



**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
“NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN”  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA  
Ingeniería Electromecánica con Orientación Electrónica**

Modelado y Simulado de un Vehículo Eléctrico a Escala 1:8 (Aguara'i)

**ARIEL DAVID BOGADO ARCE  
JUAN JOSÉ GINI BÉCKER**

---

**Hernandarias, 2019**

**UNIVERSIDAD CATÓLICA  
“NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN”**

**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**

**Ingeniería Electromecánica con Orientación Electrónica**

Modelado y Simulado de un Vehículo Eléctrico a Escala 1:8 (Aguara'i)

**ARIEL DAVID BOGADO ARCE**

**JUAN JOSÉ GINI BÉCKER**

Tutor: Lic. Gregorio Ariel Guerrero Moral

Hernandarias

2019

**ARIEL DAVID BOGADO ARCE**

**JUAN JOSÉ GINI BÉCKER**

Modelado y Simulado de un Vehículo  
Eléctrico a Escala 1:8 (Aguara’i)

Proyecto final de carrera presentado  
como requisito parcial para optar por el título  
de Ingeniero en la carrera de Ingeniería  
Electromecánica con Orientación Electrónica.  
Facultad de Ciencias y Tecnología,  
Universidad Católica “Nuestra Señora de la  
Asunción.”

Hernandarias

2019

Bogado Arce, Ariel David; Gini Bécker, Juan José. (2019); Modelado y Simulado de un Vehículo Eléctrico a Escala 1:8 (Aguara'i). Hernandarias, Universidad Católica. 163 p.

**Tutor:** Lic. Gregorio Ariel Guerrero Moral

**Defensa de Proyecto Final de carrera.**

**Palabras claves:** Identificación de sistemas, control PI

## **Dedicatorias**

A mis padres Félix Alberto y María Elva, y a mi hermana Arami Victoria por apoyarme en todo momento.

**Ariel David Bogado Arce**

A mis padres Juan Arturo y María Mercedes, y a mi hermana Johana, por su apoyo incondicional durante toda mi formación.

**Juan José Gini Bécker**

## **Agradecimientos**

Al profesor tutor, Lic. Ariel Guerrero, por su paciencia, sabiduría y predisposición para ayudarnos en todos estos meses de trabajo.

A la Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción” Sede Alto Paraná, por el apoyo en todos estos años de estudio.

A nuestro compañero y amigo Erid Pacheco, por su predisposición para ayudarnos durante toda la carrera universitaria.

A todos los miembros del equipo A2G, a la Fundación Parque Tecnológico Itaipu - Paraguay (FPTI-PY) y a la National Instruments, por el apoyo recibido y por toda la ayuda brindada para la participación en la competencia Robocar Race 2018.

*“Un niño, un profesor, un libro  
y una pluma pueden cambiar al mundo.  
La educación es la única solución”*

**Malala Yousafzai**

## **Resumen**

Esta investigación comprende estudios sobre motores eléctricos, específicamente motores BLDC, conceptos, características constructivas, el principio de funcionamiento y control de estos. También trata de técnicas de modelado e identificación de sistemas. Además, contiene el análisis del funcionamiento del modelo en la plataforma MATLAB y un diseño de control simulado en la plataforma Simulink, así como la implementación de este en el vehículo eléctrico a escala utilizando a un sistema embebido seleccionado, myRIO de National Instruments.

Para el cumplimiento de los objetivos planteados se procedió a la identificación de sistemas utilizando herramientas incorporadas de la plataforma MATLAB con datos previamente obtenidos, para luego ser simulados en Simulink para el posterior diseño de control.

**Palabras clave:** Modelo matemático, identificación de sistemas, vehículo eléctrico.

## **Abstract**

This document includes studies on electric motors; specifically, BLDC motors, concepts, constructive characteristics, principle of operation and its control. It also covers modeling and system identification techniques. In addition, it contains an analysis of the operation of the model in the MATLAB platform and a control design simulation in the Simulink platform, as well as its implementation in the electric vehicle at scale using a selected embedded system.

To fulfill the proposed objectives, we proceeded to the system identification using embedded tools of the MATLAB platform with previously obtained data, to be simulated in Simulink for the subsequent control design.

**Keywords:** Mathematical model, system identification, electric vehicle.

## Índice General

Dedicatorias .....	v
Agradecimientos .....	vi
Resumen.....	viii
Abstract.....	ix
Índice General .....	x
Índice de Figuras.....	xiv
Índice de Tablas .....	xvii
Lista de Abreviaturas .....	xviii
Introducción .....	1
Planteamiento del Problema .....	4
Preguntas.....	5
Pregunta General.....	5
Preguntas específicas .....	5
Objetivos .....	5
Objetivo General .....	5
Objetivos Específicos.....	5
Justificación .....	7
Contenido del proyecto .....	8
Marco Teórico.....	10
Capítulo 1 .....	10
Vehículos Eléctricos .....	10
Resumen.....	10
Antecedentes Históricos.....	10
Vehículos Eléctricos. Concepto .....	11
Vehículos Autónomos.....	12
Vehículo Eléctrico a Escala “Aguara’i” .....	13
Arquitectura del Aguara’i .....	15
Capítulo 2.....	16
Motores Eléctricos .....	16

Resumen.....	16
Antecedentes Históricos.....	16
Principio de Funcionamiento de un Motor CD .....	18
Construcción de un Motor de CD .....	21
Clasificación de los Motores CD .....	24
Motores de Rotor Devanado .....	25
Motores de Imán Permanente .....	25
Motores comutados electrónicamente.....	25
Motores de CD sin escobilla (Motores BLDC) .....	26
Característica de torque/velocidad.....	31
Operación y control.....	33
Control de posición.....	34
Control de velocidad.....	35
Control con sensores .....	36
Control sin sensores .....	39
ESC (Controlador Electrónico de Velocidad).....	42
BEC lineales.....	43
BEC comutados .....	43
Principio de funcionamiento .....	44
Control de un motor BLDC a través de un ESC.....	47
Capítulo 3.....	48
Modelado Matemático .....	48
Resumen.....	48
Modelado tradicional de un motor BLDC .....	48
Plataformas utilizadas. MATLAB y SIMULINK.....	52
Identificación de sistemas .....	54
Métodos gráficos.....	56
Métodos basados en la respuesta a escalón.....	56
Etapas a seguir para la identificación de un modelo.....	57
Función de transferencia de caja negra.....	58
Marco Metodológico.....	60
Capítulo 4.....	60
Diseño Metodológico.....	60
Resumen.....	60

Contexto de la Investigación.....	60
Alcance de la investigación .....	61
Diseño de la investigación .....	61
Enfoque de la investigación .....	61
Unidad de estudio .....	62
Técnicas e instrumentos de recolección de datos .....	62
Capítulo 5.....	63
Modelado, simulación e implementación .....	63
Resumen.....	63
Objetivo del Modelado .....	63
Identificación del sistema de tracción.....	66
Diseño del control de tracción .....	74
Simulación del control .....	76
Simulación del control ante perturbaciones externas.....	78
Capítulo 6.....	84
Implementación, Pruebas y Resultados .....	84
Resumen.....	84
Diseño del Software de Control.....	84
Comparación con las simulaciones.....	90
Conclusiones .....	91
Trabajos Futuros .....	93
Referencias.....	95
Apéndices.....	98
Apéndice A .....	99
TDP presentado para la competencia RoboCar Race 2018 .....	99
Apéndice B.....	105
Proyecto Aguara'i .....	105
Apéndice C.....	109
Anuncios de vencedores del mejor TDP de RobocarRace 2018 .....	109
Apéndice D .....	110
TDP en proceso de evaluación para ser publicado en la revista JPAUT .....	110
Apéndice E.....	122
Proyecto presentado en el LabVIEW Student Design Competition .....	122
Apéndice F .....	132

Nota de Agradecimiento .....	132
Apéndice G .....	139
LabVIEW .....	139
Apéndice H .....	141
Disposición de los puertos en NI myRIO .....	141
Apéndice I.....	144
Invitación para la NI WEEK 2019.....	144

## Índice de Figuras

Figura 1: Perspectiva del sistema de un vehículo eléctrico .....	12
Figura 2: Vehículo Eléctrico a escala 1:8 (Aguara'i) .....	13
Figura 3: Arquitectura del Aguara'i .....	15
Figura 4: Líneas de fuerza magnética que rodean a un imán permanente .....	17
Figura 5: Líneas de Fuerza Magnética a través de un cuerpo de baja reluctancia.....	18
Figura 6: Regla de la mano izquierda de la acción motor.....	19
Figura 7: Motor básico de corriente directa .....	20
Figura 8: Sección Transversal de un Motor DC de 2 Polos.....	22
Figura 9: Escobillas y segmentos del conmutador de un motor DC .....	22
Figura 10: Motor DC operado por tensión DC variable creado directamente de una fuente AC .....	23
Figura 11: Motor DC operado por Copper .....	23
Figura 12: Señal de encendido y forma de onda de la corriente de un Chopper .....	24
Figura 13: Clasificación de los motores DC .....	24
Figura 14: Estator de un motor BLDC.....	26
Figura 15: Fuerza contraelectromotriz en un motor trapezoidal (a) y en uno sinusoidal (b) .....	27
Figura 16: Sección transversal de un motor BLDC .....	28
Figura 17: Fuerza contraelectromotriz, corriente de fase y señales de los sensores de posición ideales.....	29
Figura 18: Sección de un motor BLDC con su secuencia de energizado de fase .....	30
Figura 19: Secuencia de manejo simplificada de un motor BLDC .....	30
Figura 20: Curva característica torque/velocidad típica para motores BLDC .....	32
Figura 21: Ejemplo de secuencia de conmutación de un motor DC sin escobillas trifásico .....	34
Figura 22: Modulación por ancho de pulso (PWM) .....	36
Figura 23: Efecto Hall.....	37

Figura 24: Secuencia de conmutación de los sensores Hall. ....	38
Figura 25: Secuencia de conmutación de las bobinas de un motor BLDC.....	41
Figura 26: Ejemplo de detección de la fuerza contraelectromotriz .....	41
Figura 27: Controlador electrónico de velocidad con circuito eliminador de corriente. ..	44
Figura 28: Funcionamiento de un motor BLDC .....	45
Figura 29: Esquema general de un ESC .....	46
Figura 30: FCEM y corriente de fase ideal de un motor BLDC .....	49
Figura 31: Sistema como "caja negra" .....	55
Figura 32: Etapas para la identificación de un proceso. ....	58
Figura 33: Componentes de un vehículo eléctrico.....	63
Figura 34: Esquema de la caja negra para una entrada PWM y una salida m/s. ....	67
Figura 35: Señal PWM que controla el ESC. A la izquierda, la señal enviada al ESC en estado de reposo. A la derecha, la señal que representa la aceleración máxima hacia adelante...	67
Figura 36: Relación de transmisión entre el motor y la rueda y posición del encoder....	69
Figura 37: Posición del encoder en el vehículo. (Imagen ilustrativa).....	69
Figura 38: Señal de salida.....	70
Figura 39: Señal filtrada.....	71
Figura 40: Señal filtrada sobre la señal original .....	71
Figura 41: Porcentaje de aproximación del modelo obtenido con la señal real.....	73
Figura 42: Ventana de sintonización del control .....	75
Figura 43: Diagrama de bloques del control.....	76
Figura 44: Diseño de control en Simulink .....	76
Figura 45: Respuesta del sistema a 1, 2, 5 y 10 m/s. ....	77
Figura 46: Esquema de control con perturbación .....	79
Figura 47: Respuesta con perturbación del 30%.....	80
Figura 48: Respuesta con valor de perturbación del 30 y 50% .....	81
Figura 49: Respuesta con perturbación negativa del 30% .....	82
Figura 50: Respuesta con valor de perturbación negativa del 30 y 50% .....	83
Figura 51: Diagrama de bloques del software de control .....	85
Figura 52: Esquema de conexión encoder/myRIO .....	86
Figura 53: Esquema de conexión myRIO/ESC .....	87

Figura 54: Panel Frontal de software de control.....	88
Figura 55: Comportamiento del vehículo a velocidades de 2, 5 y 10 m/s .....	89
Figura 56: Members of the team with Robocar Race 2018 judges.....	124
Figura 57: Project Overview - The resulting performance of Aguara'i .....	124
Figura 58: "Aguara'i" Autonomous Car.....	125
Figura 59: Aguara'i Architecture .....	126
Figura 60: Overview of the Fusion System .....	127
Figura 61: Kalman Filter for orientation.....	128
Figura 62: Path Planner.....	130
Figura 63: Panel frontal de un VI .....	139
Figura 64: Diagrama de bloques de un VI.....	140

## **Índice de Tablas**

Tabla 1: Especificaciones técnicas del motor .....	14
Tabla 2: Especificaciones técnicas del ESC .....	14
Tabla 3: Secuencia de conmutación.....	31
Tabla 4: Secuencia de conmutación de los devanados de un motor BLDC .....	45
Tabla 5: Valores del comportamiento del control.....	78
Tabla 6: Tiempo de reacción del sistema ante perturbaciones .....	83
Tabla 7: Valores del comportamiento del vehículo .....	89
Tabla 8: Costo de hardware .....	106
Tabla 9: Horas de trabajo para el proyecto Aguara'i.....	108

## **Lista de Abreviaturas**

A2G	Autonomous Arandu Group
BEC	Battery Elimination Circuit
BEMF	Back Electromagnetic Field
BJT	Bipolar Junction Transistor
BLDC	Brushless DC Motor
CD	Corriente Directa
FCEM	Fuerza Contraelectromotriz
FET	Field Effect Transistor
ESC	Electronic Speed Controller
IMU	Inertial Measurement Unit
IP	Imán Permanente
Li-Po	Lithium Polymer
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
PWM	Pulse Width Modulation
RPM	Revoluciones por Minuto
UFABC	Universidad Federal de ABC
VI	Virtual Instrument

## **Introducción**

Los vehículos eléctricos se están convirtiendo en alternativas prometedoras para remediar la contaminación del aire urbano, los gases de efecto invernadero y el agotamiento de los recursos de combustibles fósiles finitos, ya que utilizan la electricidad generada centralmente como fuente de energía. Es bien sabido que la generación de energía en las plantas centralizadas es mucho más eficiente y sus emisiones pueden controlarse mucho más fácilmente que las emitidas por los motores de combustión interna que se dispersan por todo el mundo. Además, un vehículo eléctrico puede convertir la energía cinética del vehículo en energía eléctrica y almacenarla durante el frenado y el desplazamiento por inercia.

Todos los beneficios de los vehículos eléctricos están comenzando a justificar, un siglo después, la atención de la industria, el mundo académico y los responsables políticos como alternativas prometedoras para el transporte urbano. Hoy en día, la industria y la academia se esfuerzan por superar las barreras desafiantes que bloquean el uso generalizado de vehículos eléctricos. La vida útil, la densidad de energía, la densidad de potencia, el peso y el costo de los paquetes de baterías son las principales barreras por superar. Sin embargo, el modelado y la optimización de otros componentes de los vehículos eléctricos también son tan importantes, ya que tienen fuertes impactos en la eficiencia, la capacidad de conducción y la seguridad de los vehículos. En este sentido, existe una creciente demanda de conocimiento para modelar y optimizar los vehículos eléctricos.

Muchos ven los vehículos eléctricos como los automóviles del futuro, ya que son altamente eficientes, no producen contaminación local, son silenciosos y pueden ser utilizados para la regulación de la energía por el operador de la red. Sin embargo, los vehículos eléctricos todavía tienen problemas críticos que deben resolverse. Los tres desafíos principales son el rango de conducción limitado, el tiempo de carga prolongado y el alto costo. Los tres retos principales están relacionados con el paquete de baterías del automóvil. El paquete de baterías debe contener suficiente energía para tener un cierto rango de conducción y también debe tener una capacidad de potencia suficiente para las aceleraciones y desaceleraciones. Para poder estimar el consumo de energía de un vehículo eléctrico es muy importante tener un modelo adecuado del vehículo. El modelo de un vehículo eléctrico es muy complejo ya que contiene muchos componentes diferentes, por ejemplo, transmisión, máquina eléctrica, electrónica de potencia y batería. Cada componente debe modelarse correctamente para evitar conclusiones erróneas. El diseño o clasificación de cada componente es una tarea difícil, ya que los parámetros de un componente afectan el nivel de potencia de otro. Por lo tanto, existe el riesgo de que un componente se considere inadecuado, lo que podría hacer que el vehículo sea innecesariamente caro o ineficiente. (Soylu, 2011)

Los vehículos eléctricos son sistemas mecatrónicos complejos; su diseño requiere una consideración holística de la dinámica del vehículo y los neumáticos, el tren motriz, los motores eléctricos y las baterías, y los módulos de control y estimación que se integran a través de millones de líneas de código de computadora.

Considerando la importancia que tienen en la actualidad los vehículos eléctricos y su funcionamiento, en este proyecto se ha abordado el estudio del modelo de un vehículo eléctrico, pero a escala 1:8, de manera a ser utilizado en el diseño de un control de velocidad. Se tuvo como objetivo el modelado, diseño del sistema de control, la simulación y la implementación del control

en vehículo mencionado. El desarrollo de este modelo requirió un estudio de varias áreas, tales como la mecánica, la electrónica y la teoría de control. Para el diseño de un control efectivo de velocidad, es imprescindible estudiar distintas situaciones posibles a la que puede estar expuesto el vehículo, por ello, las plataformas de simulación pueden ser una solución efectiva para la investigación y desarrollo de prototipos. En este trabajo se simuló el vehículo eléctrico a escala denominado Aguara'i, esta simulación fue realizada usando las herramientas MATLAB y Simulink como plataforma para facilitar el diseño del control y configuración de hardware. Para la implementación y la validación del resultado, fue implementado al vehículo con la ayuda del software LabVIEW.

## **Planteamiento del Problema**

El desarrollo de un vehículo autónomo es objeto de amplio estudio por muchos investigadores, el tipo de propulsión considerado para la construcción del vehículo autónomo es el motor eléctrico debido a la eficiencia y al poco impacto ambiental de este. Por esta razón, hoy en día los fabricantes de vehículos se están centrando en desarrollar vehículos eléctricos. Su diseño requiere una consideración de la dinámica del vehículo, la transmisión, los motores eléctricos, las baterías y los módulos de control. Es por ello que, en el marco de la construcción de un vehículo autónomo a escala, es necesario poder controlarlo, es decir, tener un control de velocidad.

Para diseñar el control de velocidad del vehículo, fue necesario conocer el comportamiento dinámico del mismo, es decir, tener una función de transferencia que describa el funcionamiento de este.

Existen varios tipos de modelado de un sistema, en el proyecto de Desarrollo de un vehículo autónomo a escala 1:8 “Aguara’i” se utilizó el método de identificación de sistemas proveído por la herramienta MATLAB, el cual consiste en obtener una función de transferencia aproximada a partir de los datos de entrada y salida que se le proporciona.

## **Preguntas**

### **Pregunta General**

- ¿Cómo se puede controlar de forma autónoma y eficaz la velocidad de un vehículo eléctrico a escala?

### **Preguntas específicas**

- ¿Cuáles son los fenómenos que intervienen en el movimiento de un vehículo eléctrico a escala?
- ¿Cómo se representa matemáticamente el comportamiento de un vehículo eléctrico a escala?
- ¿Cómo se puede automatizar el control de velocidad de un vehículo eléctrico a escala?
- ¿Cómo validar el control diseñado?

## **Objetivos**

### **Objetivo General**

- Obtener un modelo matemático de un vehículo eléctrico a escala 1:8 para su posterior simulación e implementación en el control de tracción.

### **Objetivos Específicos**

- Estudiar los modelos dinámicos de un vehículo eléctrico a escala
- Derivar en un modelo que represente a la tracción del Aguara'i
- Diseñar un control apropiado de velocidad

- Simular e implementar el modelo propuesto

## **Justificación**

Un modelo matemático nos da mucha información detallada acerca del conocimiento de la planta en cuestión.

En el proceso de diseño convencional, una vez que se tiene una documentación inicial, se procede a la construcción de un prototipo para probar el diseño, y en caso de encontrarse una falla en el sistema, se trata de encontrar cuál fue la causa, se intenta solucionarlo y luego se reconstruye el prototipo para ser probado una vez más. Este proceso por lo general es muy costoso, lleva mucho tiempo y no es muy eficiente. Es por esta razón que se considera el diseño basado en el modelado, en el que; luego de la documentación previa, se generan modelos con representaciones matemáticas para ese sistema, que son simulados en una computadora o en un hardware específico, y solo una vez que se cumplen con todos los objetivos de diseños se arma el prototipo. Este es un proceso mucho más eficiente y menos costoso, sin contar que el modelado puede proporcionar una información más detallada del sistema a ser analizado.

## **Contenido del proyecto**

### **MARCO TEORICO**

#### **Capítulo 1: Vehículos Eléctricos**

Este capítulo contiene los conceptos básicos sobre los vehículos eléctricos, vehículos autónomos y sus antecedentes históricos, así como las características y especificaciones técnicas del vehículo eléctrico a escala “Aguara’i”, del cual se trata este proyecto.

#### **Capítulo 2: Motores Eléctricos**

Este capítulo comienza dando una introducción sobre los motores eléctricos en general, antecedentes históricos, el principio de funcionamiento, construcción de estos y de las diferentes clasificaciones existentes, para después tratar en profundidad sobre los motores BLDC, el modo de operación, sus características y el control.

#### **Capítulo 3: Modelado Matemático**

En este capítulo, se expone el modelado matemático tradicional de un motor BLDC, la identificación de sistemas, y la función de transferencia de “caja negra”, que es el utilizado en el proyecto. También se presenta una introducción a las plataformas utilizadas en el proyecto para la realización del modelado.

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **Capítulo 4: Diseño Metodológico**

En el presente capítulo, se explican los procedimientos utilizados para el análisis de la problemática del proyecto.

## Capítulo 5: Modelado, Simulación e Implementación

En el presente capítulo, se presenta el objetivo del modelado, la identificación del sistema con los datos adquiridos, y la simulación del modelo. Los mismos fueron realizados en la plataforma MATLAB y Simulink.

## Capítulo 6: Implementación, Pruebas y Resultados

Este capítulo trata sobre la implementación y las pruebas físicas realizadas al sistema de control diseñado en el capítulo anterior.

## **Marco Teórico**

### **Capítulo 1**

#### **Vehículos Eléctricos**

##### **Resumen**

*En este capítulo se expone una breve introducción a los vehículos eléctricos, los antecedentes históricos, así como de los vehículos autónomos y las características, especificaciones técnicas y la arquitectura del vehículo eléctrico a escala “Aguara’i” utilizado para el proyecto.*

##### **Antecedentes Históricos**

Pese a que muchas personas creen que el concepto de vehículo eléctrico es relativamente actual o novedoso, la realidad es que la idea tiene más de 100 años de antigüedad. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

El vehículo eléctrico es anterior al vehículo de combustión interna. A finales del siglo pasado ya aparecen junto a los vehículos de vapor. Los vehículos eléctricos fueron superiores y más aceptados que los vehículos de combustión interna hasta 1920, cuando la relación prestaciones/precio de los motores de gasolina condena al vehículo eléctrico a su desaparición. (Carreño Aguillon, Vacca Melo, & Lugo Ariza, 2011)

Algunos estudios defienden que el primer vehículo eléctrico funcional se estrenó en agosto de 1894, por Henry Morris y Pedro Salom. Este vehículo tenía la apariencia de ser un carro sin caballos y pesaba más de 2000 kg de los cuales 700 kg eran de batería. Otras fuentes refieren que

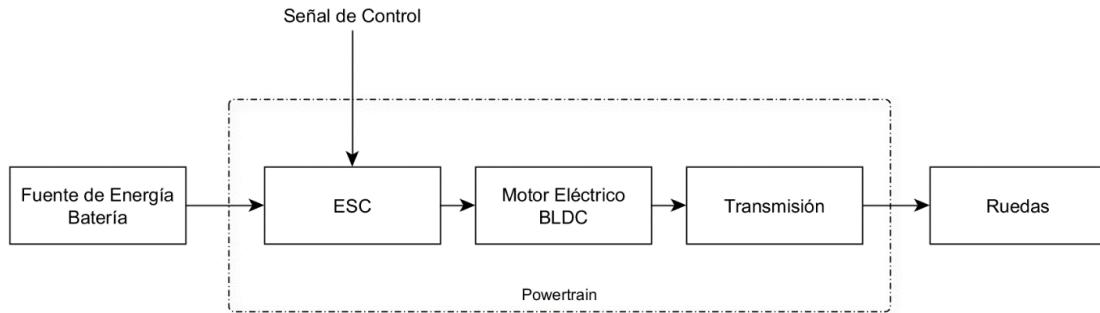
el primero vehículo eléctrico puro fue construido por un hombre de negocios llamado Robert Anderson entre 1832 y 1839. En cualquier caso, como ha sucedido con numerosos inventos de la historia, la autoría del primer vehículo de propulsión eléctrica nunca quedara completamente clara. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Se han fabricado vehículos eléctricos teniendo como fin el turismo, ya que estos no alcanzaban velocidades mayores a los 30 km/h y su autonomía era muy corta. Los vehículos eléctricos debutaron en Europa en el año 1880 y aparecieron en América en 1920, pero hacia 1970 el vehículo eléctrico comenzó a ser fabricado de nuevo y ha continuado hasta ahora, a pesar de haber tenido problemas con la autonomía y el precio, pero este resulta una buena alternativa para el uso de energías limpias y renovables. (Carreño Aguillon, Vacca Melo, & Lugo Ariza, 2011)

### **Vehículos Eléctricos. Concepto**

Un vehículo eléctrico es aquel que tiene las siguientes características: su fuente de energía es portátil y está almacenada en una o más baterías; y, el esfuerzo de tracción es suministrado solamente por uno o más motores eléctricos. La Figura 1 muestra un sistema de vehículo eléctrico. La conversión de energía eléctrica a mecánica está a cargo del Powertrain. Esta tiene tanto componentes eléctricos como mecánicos. (Husain, 2003)

Figura 1: Perspectiva del sistema de un vehículo eléctrico



Fuente: (Husain, 2003)

Los principales componentes de un sistema de vehículo eléctrico son el motor, el controlador, la batería y la transmisión. Las baterías electroquímicas han sido la fuente de energía tradicional para los vehículos eléctricos. La batería de ácido de plomo es la principal elección debido a su bajo costo y a que la tecnología está bien desarrollada, aunque nuevos tipos prometedores de baterías están siendo aplicadas en la actualidad. (Husain, 2003)

### Vehículos Autónomos

Un vehículo autónomo es un vehículo capaz de guiarse sin conducción humana (Techopedia, s.f.). Es un vehículo capaz de imitar las capacidades humanas de manejo y control. El conductor podrá elegir el destino, pero no se le requiere para activar ninguna operación mecánica del vehículo. (Guerrero Moral, Jara Ten Kathen, Pacheco Viana, Bogado Arce, & Franco Santacruz, 2018)

Los vehículos autónomos perciben el entorno mediante sensores tales como laser, radar, lidar, sistemas de posicionamiento global y visión computarizada. Los sistemas avanzados de control interpretan la información para identificar la ruta apropiada, así como los obstáculos y la señalización relevante. Los vehículos autónomos generalmente son capaces de recorrer carreteras

previamente programadas y requieren una reproducción cartográfica del terreno, con lo cual si una ruta no está recogida por el sistema se puede dar el caso que no pueda avanzar de forma coherente y normal. (Guerrero Moral, Jara Ten Kathen, Pacheco Viana, Bogado Arce, & Franco Santacruz, 2018)

### **Vehículo Eléctrico a Escala “Aguara’i”**

El vehículo eléctrico consiste en un buggy a escala 1:8 de la marca HoBao, modelo HyperVSe, fabricado por la empresa HoBao Enterprising Co. LTD. Cuenta con un chasis que está hecho con una aleación denominada Aluminio 7076, el cual le brinda alta resistencia. La tracción del vehículo está dada por un motor BLDC (Motor de corriente directa sin escobillas, por sus siglas en inglés) que impulsa a las 4 ruedas, que a su vez es controlado por un ESC (Control de Velocidad Electrónico, por sus siglas en inglés). La dirección está dada por un servo motor digital encargado de posicionar las ruedas en un ángulo determinado. Todo el sistema es alimentado por una batería de polímero de iones de litio, más conocida por sus siglas Li-Po.

Figura 2: Vehículo Eléctrico a escala 1:8 (Aguara'i)



Fuente: Team A2G.

Tabla 1: Especificaciones técnicas del motor

<b>Especificaciones del Motor</b>	
Potencia Máxima	2800 W
Tensión Máxima	< 21 V
Amperaje Máximo	135 A
$I_o$	2,3 A
No. De Polos	4
Resistencia	0,0079 $\Omega$
KV (RPM/Volts)	2.000
RPM Máxima	50.000
Longitud	76 mm
Diámetro	40 mm
Peso	~ 405 g

Tabla 2: Especificaciones técnicas del ESC

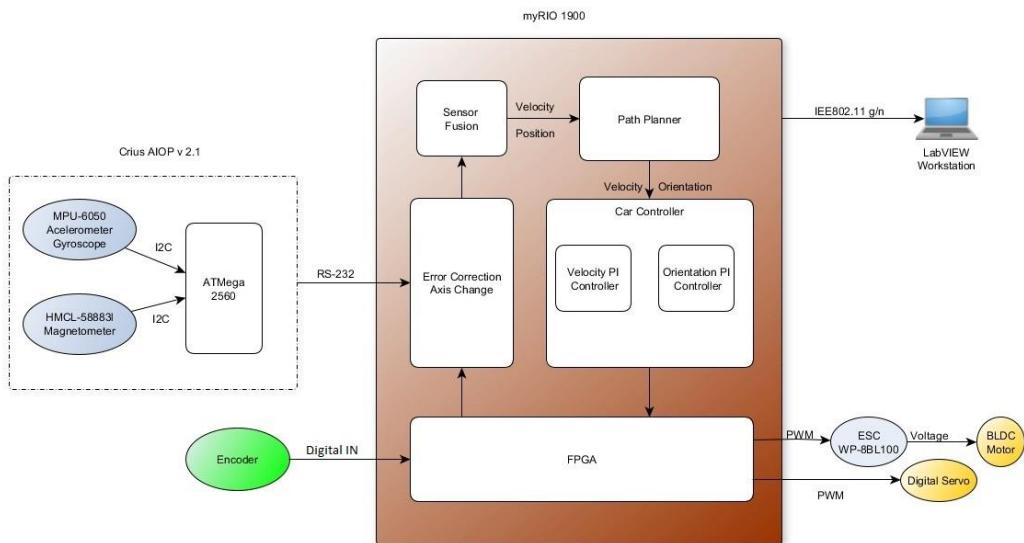
<b>Especificaciones del ESC</b>	
Cte. Cont./de Ráfaga	100 A/600 A
Resistencia	0,00035 $\Omega$
Dimensiones	41×51×36 mm

## Arquitectura del Aguara'i

Originalmente, el vehículo fue diseñado para ser conducido por control remoto, pero fue modificado para funcionar de forma autónoma. Para que funcione de esta manera, el vehículo fue dotado de sensores inerciales (IMU) tales como, acelerómetro, magnetómetro y giroscopio para poder orientarse y un encoder para medir su velocidad, estos conectados al controlador myRIO.

Estas señales del entorno físico pasan a través de un filtro de Kalman para luego ser leídas por el algoritmo de navegación y éste poder decidir el rumbo del vehículo.

Figura 3: Arquitectura del Aguara'i



Fuente: Team A2G

## Capítulo 2

### Motores Eléctricos

#### Resumen

*El presente capítulo comienza dando una introducción sobre los motores eléctricos en general, antecedentes históricos, el principio de funcionamiento, construcción de estos y de las diferentes clasificaciones existentes, para después tratar en profundidad sobre los motores BLDC, el modo de operación, sus características y el control.*

#### Antecedentes Históricos

Un motor de CD es básicamente un transductor de par que convierte energía eléctrica en energía mecánica. Para entender el principio de operación de un motor CD es necesario recordar algunos aspectos sobre magnetismo y electromagnetismo. Michael Faraday (1791-1867) originó el concepto de líneas de fuerzas magnética, también denominadas líneas de inducción magnética, como un medio para analizar y explicar los fenómenos magnéticos. (Martínez, 2009)

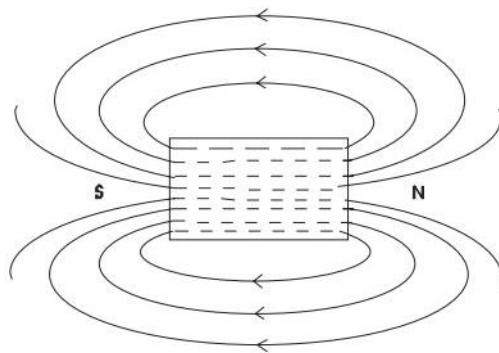
Las líneas de fuerza magnética son líneas imaginarias cuya dirección es la misma que la de un campo magnético real en un punto específico. Las líneas de fuerza magnética para un imán se presentan en la Figura 4. Las líneas dibujadas representan incontables líneas de fuerza que ilustran el camino típico de un campo magnético alrededor de un imán. (Martínez, 2009)

Las características fundamentales de las líneas de fuerza magnética son las siguientes:

- Forman lazos cerrados: Las líneas existen dentro del cuerpo de un imán y continúan externamente hasta cerrar un lazo.

- Son direccionales: Emergen de un área denominada polo norte y entran en otra área diferente denominada polo sur; estas líneas continúan internamente en el imán. Así, la dirección de las líneas de fuerza magnética internamente en un imán es de sur a norte, y externamente de norte a sur.
- No se interceptan: Dos líneas no pueden ocupar el mismo espacio o pasar a través de un punto común. Se repelen mutuamente. Así como dos cargas eléctricas iguales ejercen fuerzas mutuamente repulsivas, dos líneas de inducción cercanas experimentan fuerzas que tienden a separarlas.

Figura 4: Líneas de fuerza magnética que rodean a un imán permanente

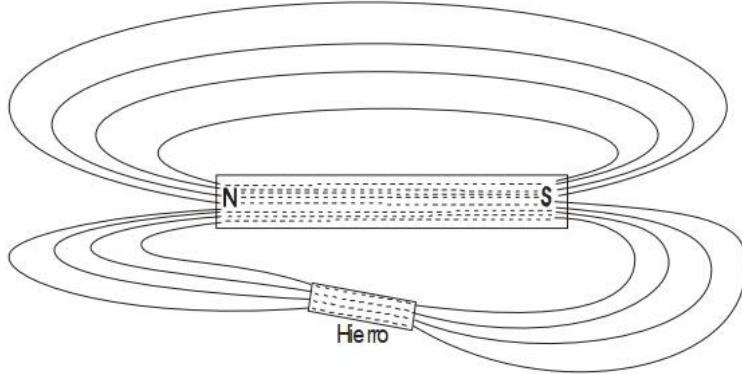


Fuente: (Martínez, 2009)

- Buscan caminos de baja reluctancia: El espacio libre y la mayoría de los materiales son medios difíciles de ser ocupados por líneas de fuerza magnéticas. Sin embargo, los materiales ferromagnéticos facilitan el paso de las líneas de fuerza magnética a través de ellos. Los materiales ferromagnéticos poseen baja reluctancia; así, a pesar de la tendencia a contraerse, muchas líneas de fuerza desvían su trayectoria corta de alta reluctancia para seguir una trayectoria más larga de baja reluctancia a través de un cuerpo ferromagnético.

Figura 5 (Martínez, 2009)

Figura 5: Líneas de Fuerza Magnética a través de un cuerpo de baja reluctancia.



Fuente: (Martínez, 2009)

Una vez que las líneas de fuerza magnética penetran el cuerpo ferromagnético, las fuerzas tensoras de las líneas de fuerza entran en acción para atraer el cuerpo hacia el imán, si las fuerzas tensoras son mayores que las fuerzas que la oponen, el cuerpo se mueve. El resultado es la conocida fuerza de atracción que tiene un imán sobre materiales ferromagnéticos. (Martínez, 2009)

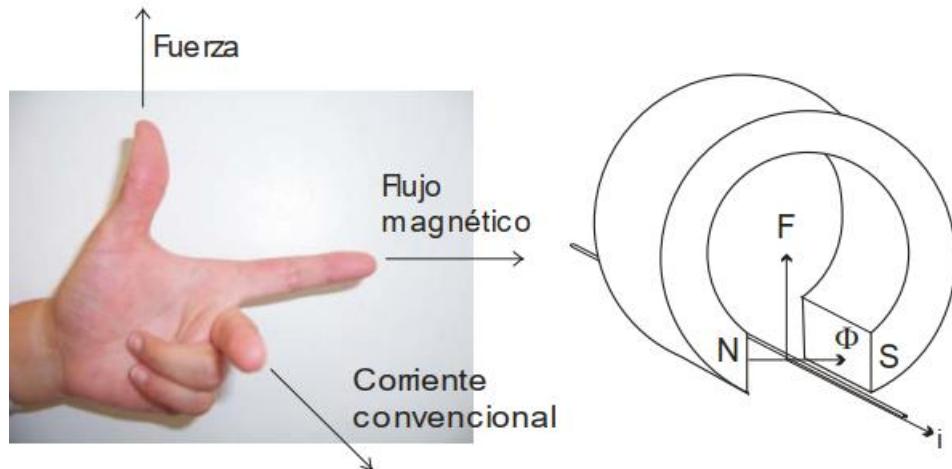
Hans Christian Oesterd (1777-1851) demostró una conexión directa entre la corriente directa y los efectos magnéticos, introduciendo así el estudio común de la electricidad y el magnetismo. Este desarrollo en gran parte del trabajo de Michael Faraday y del físico James Clerk Maxwell, Oesterd estableció la presencia y dirección de las líneas de fuerza magnética alrededor de un conductor por el cual fluye corriente directa. (Martínez, 2009)

### **Principio de Funcionamiento de un Motor CD**

La acción de la fuerza ejercida en un conductor que porta corriente eléctrica dentro de un campo magnético externo puede deducirse mediante la regla de la mano izquierda de la acción motor, como se muestra en la Figura 6, esta regla establece lo siguiente: si se extienden los dedos pulgar, índice y medio de la mano izquierda, formando ángulos rectos entre sí y el dedo índice apunta en la dirección del flujo magnético  $\Phi$  de los polos de norte a sur y el dedo medio apunta en

la dirección del flujo de corriente convencional  $i$  en el conductor, entonces el dedo pulgar apuntará en la dirección de la fuerza que se ejerce sobre el conductor. (Martínez, 2009)

Figura 6: Regla de la mano izquierda de la acción motor.



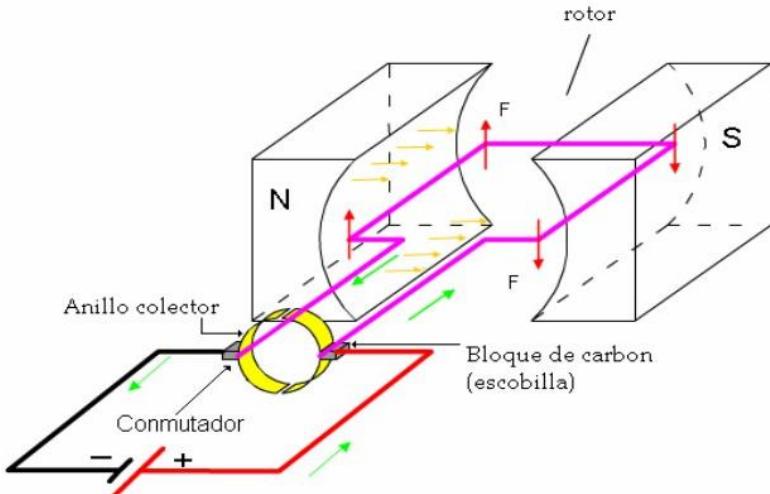
Fuente: (Martínez, 2009)

Si se toma un conductor y se dobla en forma de espira, con un eje imaginario sobre el cual la espira es libre de rotar, se coloca dentro de un campo magnético externo, y se hace pasar una corriente eléctrica a través de la espira en dirección del flujo convencional; el par de fuerzas magnéticas paralelas, de igual magnitud y de dirección opuesta, crearán un momento de torsión haciendo girar la espira en dirección de las manecillas del reloj. Estas fuerzas y el momento de torsión son el principio de funcionamiento de un motor de corriente directa. (Martínez, 2009)

En la Figura 7 se muestra el motor básico de corriente directa, el conmutador está formado por un anillo conductor dividido en dos segmentos (delgas), cada segmento está conectado a cada extremo de la espira conductora y aislados eléctricamente uno del otro. A medida que la espira gira cada escobilla toca alternativamente ambos segmentos del conmutador. En consecuencia, las conexiones eléctricas se invierten a la mitad de cada revolución en el instante en que la espira es perpendicular al campo magnético. De esta manera, el momento de torsión que actúa sobre la

espira lo hace siempre en la misma dirección y esta gira continuamente en el mismo sentido. Generalmente la armadura es el elemento del motor de cd que se encuentra girando y los imanes son estacionarios; la parte del motor que gira se denomina rotor y la parte estacionaria se denomina estator. Existe otro fenómeno que se observa al mover un conductor dentro de un campo magnético. Faraday demostró que el desplazamiento mecánico de un conductor dentro de un campo magnético produce una corriente eléctrica. Faraday lo denominó voltaje inducido ya que se genera sin que exista contacto entre el imán y el conductor, el voltaje inducido también es conocido como fuerza electromotriz inducida. La ley de Faraday se anuncia como sigue: "el voltaje inducido en un conductor es proporcional a la rapidez de cambio de las líneas de fuerza magnética que atraviesan el conductor". (Martínez, 2009)

Figura 7: Motor básico de corriente directa



Fuente: (Martínez, 2009)

Por este motivo, es que un motor de CD no solamente puede operar como motor, sino también puede operar como generador de CD, a los que se los conoce como modo motor y modo generador, respectivamente. (Martínez, 2009)

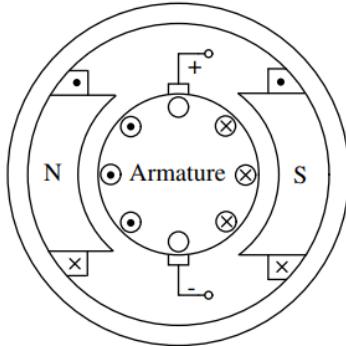
Cuando la armadura de un motor gira a consecuencia del par que se produce por la acción motor, actúa como generador al mismo tiempo. Como existe un campo magnético producido por los imanes a fin de que se produzca la acción motora, ese mismo campo genera un voltaje en los conductores de la armadura. De la ley de Faraday, la relación entre la regla de Fleming de la mano derecha de la acción generador y la regla de la mano izquierda de la acción motor, se aprecia que el voltaje inducido se opone a la corriente eléctrica producida por el voltaje aplicado que causa la acción motora. A este voltaje inducido que se opone al voltaje aplicado se le conoce como fuerza contraelectromotriz. (Martínez, 2009)

Cuando una fuente eléctrica es conectada al motor, ésta gira su eje, por lo que un motor convierte la energía eléctrica en energía mecánica. (Martínez, 2009)

### **Construcción de un Motor de CD**

El motor DC tiene su armadura en el rotor como se muestra en la Figura 8. El estator tiene polos magnéticos salientes que están hechos de imanes permanentes o de bobinas de campo especial. La corriente se alimenta a los devanados del rotor a través de escobillas que están en contacto con las tiras de cobre ubicadas en el extremo del rotor. Estas tiras de cobre, generalmente llamadas segmentos de commutador, están conectadas a los devanados del rotor. (Baldursson, 2005)

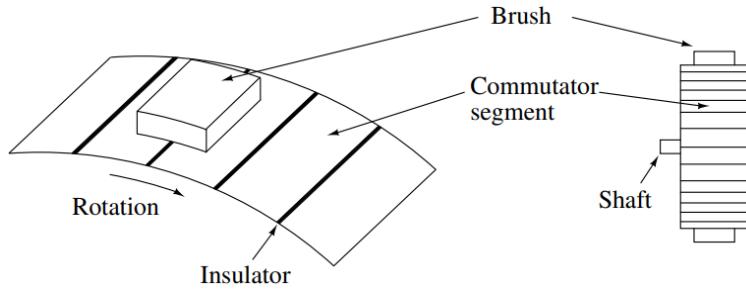
Figura 8: Sección Transversal de un Motor DC de 2 Polos.



Fuente: (Baldursson, 2005)

A medida que el rotor gira, las escobillas se mueven de un segmento a otro, lo que conmuta la corriente de tal manera que la corriente en los conductores en cada polo fluya en la misma dirección desde el punto de vista del estator. Esto se representa en la Figura 9. Los vectores de fuerza resultantes que actúan sobre los devanados del rotor son todos tangenciales a la periferia del rotor y todos contribuyen al par. (Baldursson, 2005)

Figura 9: Escobillas y segmentos del conmutador de un motor DC

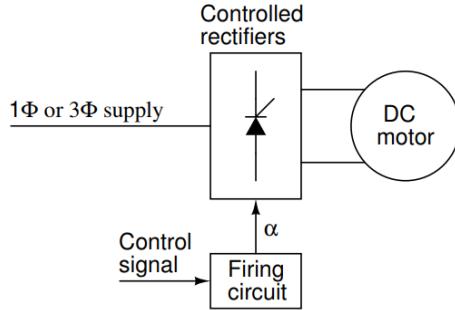


Fuente: (Baldursson, 2005)

Como su nombre lo indica, el motor DC es alimentado por una fuente de tensión DC. La velocidad se puede controlar variando la tensión aplicada. Esto se puede lograr teniendo una fuente de tensión variable o usando una resistencia variable conectada en serie con la armadura. El último método es simple pero no muy eficiente debido a la potencia disipada en la resistencia variable. Si el motor no es de imán permanente, la velocidad también puede variarse cambiando la corriente

de campo. Se logra una mayor eficiencia mediante el uso de convertidores de estado sólido, tales como rectificadores y choppers controlados. Los rectificadores controlados se utilizan para crear una tensión DC variable. La Figura 10 muestra tales arreglos. La tensión se varía cambiando el ángulo de disparo de los tiristores. (Baldursson, 2005)

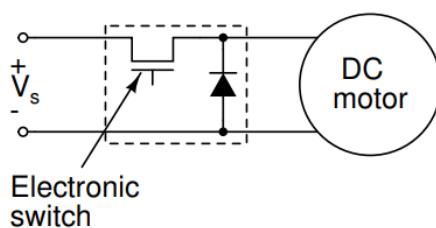
Figura 10: Motor DC operado por tensión DC variable creada directamente de una fuente AC.



Fuente: (Baldursson, 2005)

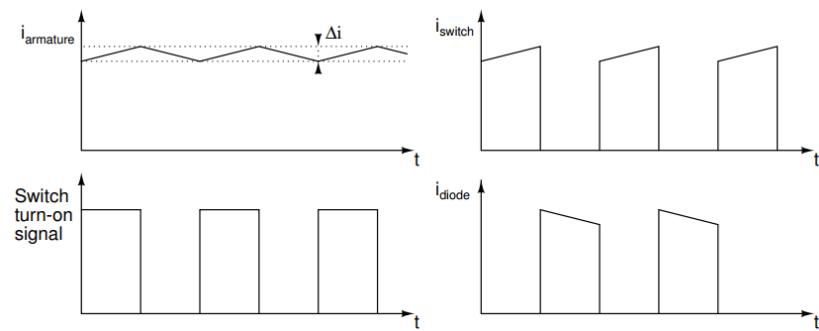
El Chopper que se muestra en la Figura 11 consiste en un interruptor electrónico que se usa para encender y apagar el motor a frecuencias altas. Cuando se apaga el interruptor, el diodo proporciona una ruta para la corriente de inducción inductiva. La Figura 12 muestra la señal de encendido y las formas de onda de la corriente. El aumento y la caída de la corriente disminuyen el valor medio de la corriente, pero también introduce una corriente de rizado no deseada que se transfiere al par eléctrico. (Baldursson, 2005)

Figura 11: Motor DC operado por Copper



Fuente: (Baldursson, 2005)

Figura 12: Señal de encendido y forma de onda de la corriente de un Chopper

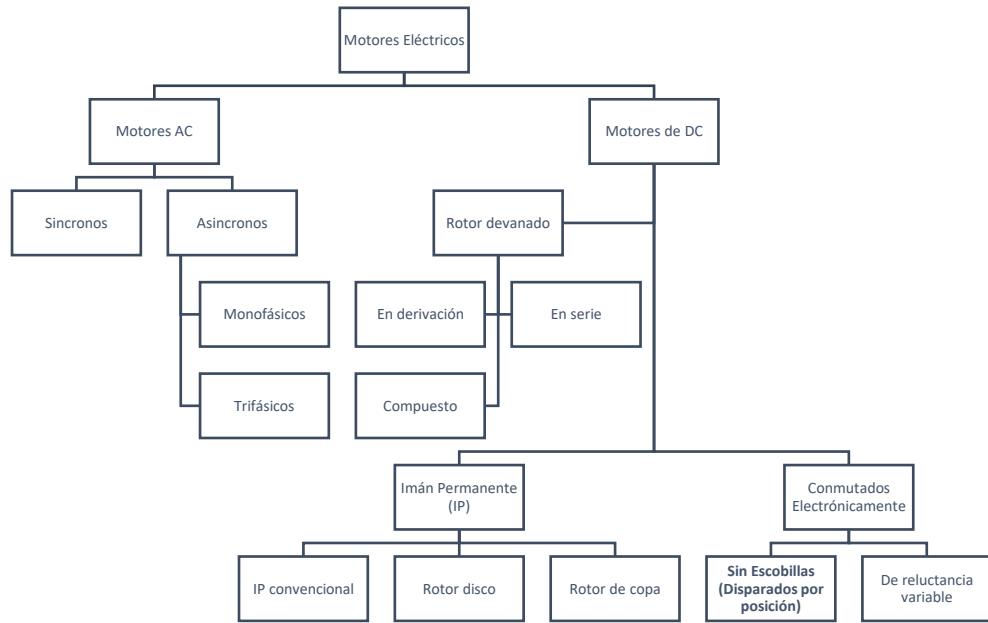


Fuente: (Baldursson, 2005)

### Clasificación de los Motores CD

Los motores de CD se dividen en: motor de rotor devanado, motor de imán permanente y motor commutado electrónicamente. Figura 13

Figura 13: Clasificación de los motores DC



Fuente: (Martínez, 2009)

## **Motores de Rotor Devanado**

Los motores de rotor devanado se dividen en tres clases: el motor devanado en serie, el motor devanado en derivación y el motor compuesto. Interna y externamente, son prácticamente iguales. La diferencia entre ellos es la forma del alambrado de los circuitos de devanado de campo y devanado de armadura. El motor de devanado en serie tiene el devanado de campo alambrado en serie con la armadura. El motor de devanado en derivación tiene los circuitos de armadura y de campo alambrados en paralelo. El motor compuesto combina las características de los motores de devanado en serie y devanado en derivación. (Martínez, 2009)

## **Motores de Imán Permanente**

Los motores de imán permanente (IP) se dividen en motores de IP convencional y motores de IP sin núcleo. Un motor de IP convencional es conceptualmente igual que un motor de rotor devanado configurado en derivación. El ensamble de rotor es idéntico, la única diferencia es que el campo magnético es establecido por imanes permanentes en lugar de electroimanes. Por su parte, los motores de IP sin núcleo se clasifican en motores de estructura de copa o también conocidos como rotor de copa, y motores de estructura de disco o rotor de disco. (Martínez, 2009)

## **Motores commutados electrónicamente**

Los motores paso a paso y motores de CD sin escobillas son motores de commutación electrónica. Conceptualmente son parecidos entre ellos.

Motores Paso a Paso: Los motores paso a paso son fundamentalmente diferentes de los demás motores de CD: no tienen escobillas ni commutador mecánico. En su lugar, la acción de commutación necesaria para la función del motor de CD es lograda por transistores externos. Es

más, el rotor no tiene devanado de armadura. Simplemente es una colección de imanes permanentes salientes. (Martínez, 2009)

Los motores paso a paso se dividen en motores de rotor de disco, cuya estructura fue diseñada para reducir la inercia de un motor de CD sin núcleo; y motores de reluctancia variable, que reciben ese nombre porque el rotor siempre se mueve a la posición la que es mínima la reluctancia magnética de la trayectoria general de flujo. (Martínez, 2009)

### **Motores de CD sin escobilla (Motores BLDC)**

Un motor BLDC es un motor síncrono de imán permanente que utiliza detectores de posición y un inversor para controlar las corrientes de armadura. El motor BLDC a veces se conoce como un motor DC de adentro hacia afuera porque su armadura está en el estator y los imanes están en el rotor y sus características operativas se parecen a las de un motor DC. En lugar de utilizar un commutador mecánico como el motor de CC convencional, el motor BLDC emplea una conmutación electrónica que lo convierte en un motor prácticamente libre de mantenimiento. (Baldursson, 2005)

Figura 14: Estotor de un motor BLDC

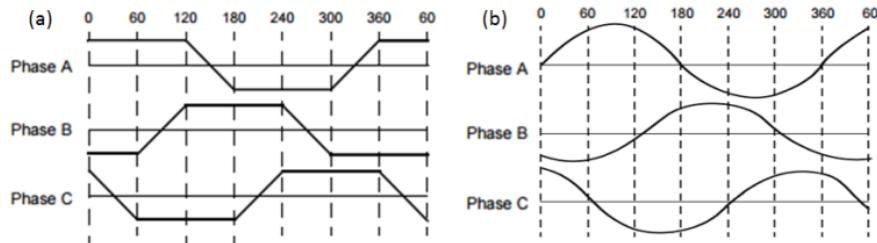


Fuente: (Baldursson, 2005)

Hay dos tipos principales de motores BLDC: tipo trapezoidal y tipo sinusoidal. En el motor trapezoidal, la fuerza contraelectromotriz inducida en los devanados del estator tiene una forma trapezoidal y sus fases deben suministrarse con corrientes casi cuadradas para una operación de torque sin ondulaciones. El motor sinusoidal, por otro lado, tiene una fuerza contraelectromotriz con forma sinusoidal y requiere corrientes de fase sinusoidal para un funcionamiento de torque sin interrupciones. La forma de la fuerza contraelectromotriz está determinada por la forma de los imanes del rotor y la distribución del devanado del estator. (Balduresson, 2005)

El motor sinusoidal necesita un sensor de posición de alta resolución debido a que la posición del rotor debe ser conocida en todo momento para un funcionamiento óptimo. También requiere software y hardware más complejo. El motor trapezoidal es una alternativa más atractiva para la mayoría de las aplicaciones debido a su simplicidad, menor precio y mayor eficiencia. (Balduresson, 2005)

Figura 15: Fuerza contraelectromotriz en un motor trapezoidal (a) y en uno sinusoidal (b)

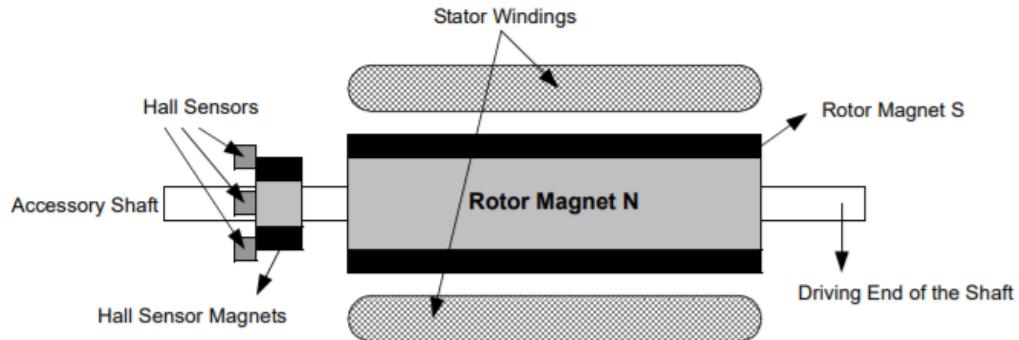


Fuente: (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Los motores BLDC existen en muchas configuraciones diferentes, pero el motor trifásico es el tipo más común debido a su eficiencia y bajo rizado de torque. Este tipo de motor también ofrece un buen equilibrio entre el control preciso y la cantidad de dispositivos electrónicos de potencia necesarios para controlar las corrientes del estator. La Figura 16 muestra una sección transversal de un motor BLDC. La detección de posición generalmente se implementa utilizando

tres sensores de efecto Hall que detectan la presencia de pequeños imanes que están conectados al eje del motor. (Baldursson, 2005)

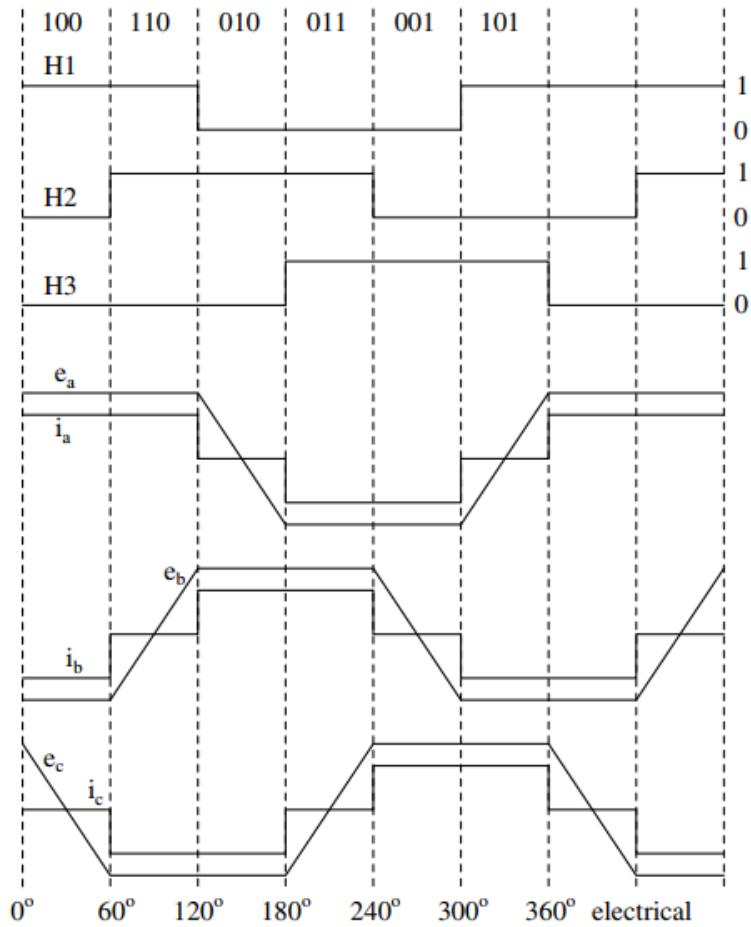
Figura 16: Sección transversal de un motor BLDC



Fuente: (Baldursson, 2005)

El motor trifásico BLDC se opera en modo de dos fases, es decir, las dos fases que producen el par más alto se activan mientras la tercera fase está apagada. Cuál de las dos fases que serán energizadas depende de la posición del rotor. Las señales provenientes de los sensores de posición producen un número de tres dígitos que cambia cada  $60^\circ$  (grados eléctricos) como se muestra en la Figura 17 (H1, H2, H3). En la Figura 17 también se muestra la corriente y la fuerza contraelectromotriz ideales (Baldursson, 2005).

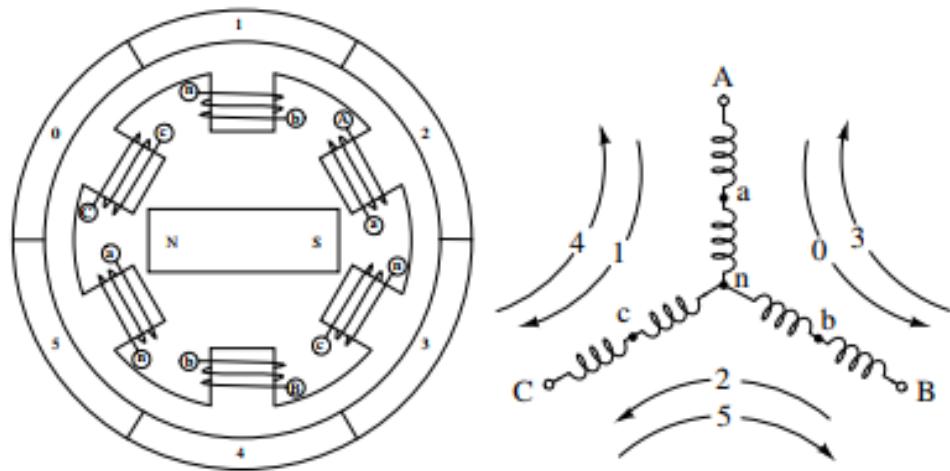
Figura 17: Fuerza contraelectromotriz, corriente de fase y señales de los sensores de posición ideales.



Fuente: (Baldursson, 2005)

La Figura 18 muestra la sección transversal de un motor trifásico conectado en estrella junto con su secuencia de energizado de fase. Cada intervalo comienza cuando los campos del rotor y el estator están  $120^\circ$  aparte y termina cuando están  $60^\circ$  aparte. El par máximo es alcanzado cuando las líneas del campo están de forma perpendicular. (Baldursson, 2005)

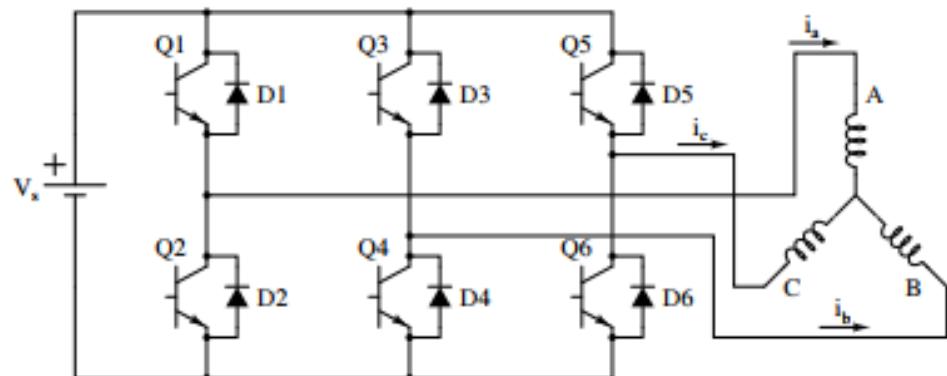
Figura 18: Sección de un motor BLDC con su secuencia de energizado de fase



Fuente: (Baldursson, 2005)

La commutación de la corriente está hecha por un inversor de 6 etapas como se muestra de forma simplificada en la Figura 19. Los interruptores son mostrados como transistores de unión bipolar (BJT) pero los transistores MOSFET son más comúnmente usados como interruptores. La Tabla 3 muestra la secuencia de commutación, la dirección de la corriente y las señales de los sensores de posición. (Baldursson, 2005)

Figura 19: Secuencia de manejo simplificada de un motor BLDC



Fuente: (Baldursson, 2005)

Tabla 3: Secuencia de conmutación

Intervalo de Conmutación	Número de Secuencia	Sensores de Posición			Interruptores Cerrados		Corrientes de Fase		
		H1	H2	H3			A	B	C
0° - 60°	0	1	0	0	Q1	Q4	+	-	OFF
60° - 120°	1	1	1	0	Q1	Q6	+	OFF	-
120° - 180°	2	0	1	0	Q3	Q6	OFF	+	-
180° - 240°	3	0	1	1	Q3	Q2	-	+	OFF
240° - 300°	4	0	0	1	Q5	Q2	-	OFF	+
300° - 360°	5	1	0	1	Q5	Q4	OFF	-	+

Fuente: (Baldursson, 2005)

### Característica de torque/velocidad

Cuando se analiza cualquier tipo de motor, sin considerar su fuente de energía, principio de funcionamiento, potencia, características constructivas u otro tipo de parámetros, se debe siempre analizar la relación que tienen el torque y la velocidad en respuesta del motor. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

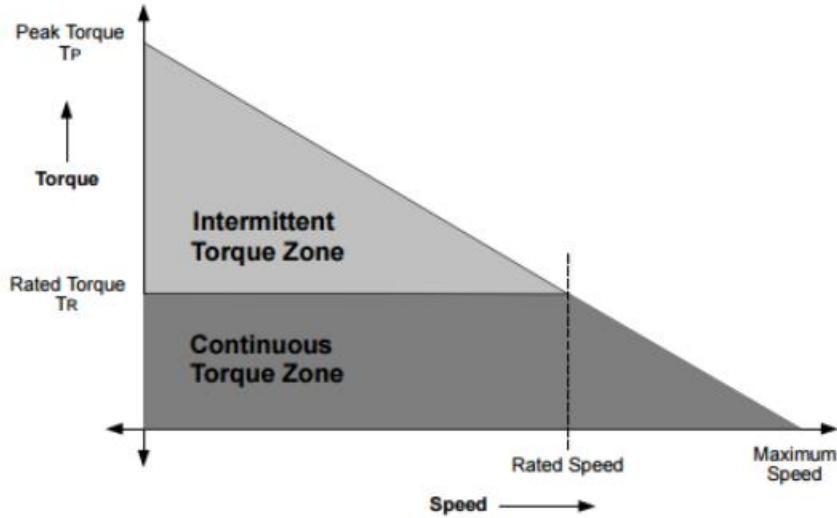
Podemos relacionar la potencia, el torque y la velocidad mediante la ecuación:

$$P = M \times \omega$$

Ecuación 1

Donde  $P$  es la potencia que desarrolla el motor,  $M$  es el par motor o torque y  $\omega$  es la velocidad angular de giro del motor. A potencia constante, el torque y la velocidad de giro son inversamente proporcionales. En la figura se puede observar una curva torque/velocidad típica para motores BLDC. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Figura 20: Curva característica torque/velocidad típica para motores BLDC.



Fuente: (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

En la Figura 20 hay dos parámetros que son importantes para definir un motor BLDC: el par máximo ( $T_P$ ) y el par nominal ( $T_R$ ). (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Durante operaciones continuas, se observa que el torque permanece constante en un rango de velocidad acotado superiormente por la velocidad nominal. A partir de este valor, el torque comienza a caer, de forma que, aunque el motor puede llegar a una máxima velocidad que puede superar en más del 50% la velocidad nominal, el torque para esta velocidad máxima será nulo. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Por otra parte, existen aplicaciones en las que se exigen frecuentes arranques y paradas del motor, así como frecuentes cambios de sentido de giro, que pueden demandar un torque superior al nominal. Este requisito puede aparecer especialmente en periodos breves, como cuando el motor arranca desde parado durante el proceso de aceleración. Durante este periodo, el torque extra que demanda el motor se utiliza para vencer la inercia de la carga y del propio rotor, hasta alcanzar una velocidad estacionaria. El motor puede entregar un torque más alto que el nominal, hasta el torque

máximo, en función de la velocidad a la que se encuentre girando, siguiendo la gráfica de la Figura 20. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

### **Operación y control**

A diferencia de un motor eléctrico de escobillas tradicional, en el que la conmutación entre devanados se produce mecánicamente provocada por el propio giro del rotor, en el caso de los motores DC sin escobilla la conmutación está controlada electrónicamente. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

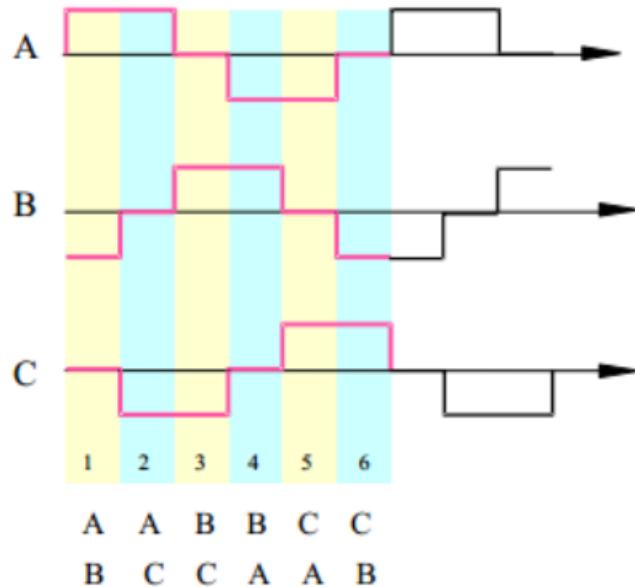
Cada secuencia de conmutación del motor presenta una bobina energizada con tensión positiva (la corriente entra en el devanado), otra bobina con tensión negativa (la corriente sale del devanado) y otra en estado abierto. El torque del motor se produce debido a la interacción entre el campo magnético generado por las bobinas del estator y el de los imanes permanentes que forman el rotor. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Idealmente, el pico de torque sucede cuando ambos están distanciados  $90^\circ$ , y decrece a medida que estos se acercan. Con el objetivo de mantener el rotor funcionando, es necesario que el campo magnético que se produce en las bobinas del estator cambie de posición, de forma que el rotor se mueva buscando atrapar el campo magnético generado por el estator. Para un determinado sentido de giro, existe una secuencia en la que se debe energizar las bobinas, que en un motor DC sin escobillas trifásico se denomina conmutación de seis etapas. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

## Control de posición

Para controlar el funcionamiento de un motor BLDC, tal y como se ha indicado, la clave reside en controlar en todo momento la posición en la que se encuentra el rotor. En el caso de un motor BLDC trifásico, se debe seguir el proceso de conmutación de seis etapas. En un ciclo eléctrico completo, cada fase estará  $120^\circ$  eléctricos polarizada con tensión positiva,  $120^\circ$  con tensión negativa y  $120^\circ$  en estado flotante o abierto. Un ejemplo de secuencia de conmutación podría ser la que se muestra en la Figura 21. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Figura 21: Ejemplo de secuencia de conmutación de un motor DC sin escobillas trifásico



Fuente: (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Así, al activar las bobinas siguiendo la secuencia AB-AC-BC-BA-CA-CB, se logrará que el motor gire. Tal y como se observa en el gráfico y en la secuencia, a cada instante únicamente hay dos bobinas conduciendo corriente, mientras que la tercera queda en estado flotante. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Con motivo de la interacción que ejercen los imanes del rotor con los devanados del estator, se genera una tensión en las bobinas, la fuerza contraelectromotriz o BEMF, ya mencionada anteriormente, que es el efecto medible de la resistencia al movimiento que los imanes del rotor ejercen sobre los devanados del estator, y que depende principalmente de la posición angular del rotor (fase) y de la velocidad de giro de éste (amplitud). (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Idealmente, con el objetivo de conseguir el máximo torque, se deberá comutar exactamente cada 60° eléctricos, de forma que la corriente de las bobinas se encuentre en fase con la fuerza contraelectromotriz. De esta forma, la posición del rotor determina el momento en el que es necesario realizar la comutación. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

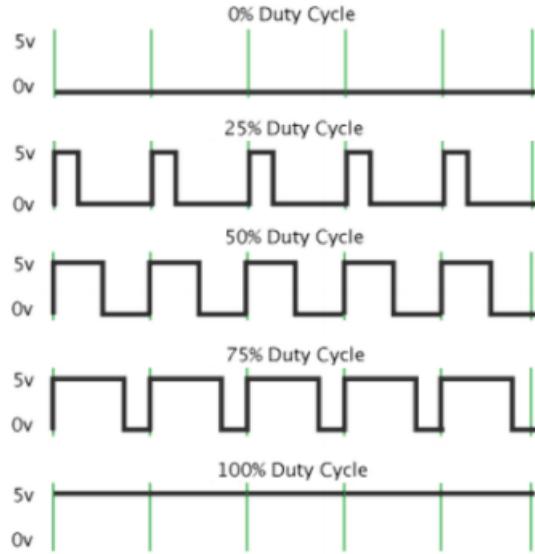
### **Control de velocidad**

Una vez se dispongan de los mecanismos necesarios para controlar que la comutación entre bobinas del estator se produzca en el momento exacto, la problemática se traslada ahora a conseguir controlar la velocidad de giro del rotor. Por suerte, el campo magnético que se genera en los bobinados del estator es proporcional a la tensión con la que estos se alimentan, y a su vez la velocidad del rotor será proporcional al campo magnético que se genere en el estator. Así pues, la idea es regular la tensión que se le suministra a los devanados del motor para modificar la velocidad de giro del rotor. Dicha tensión está suministrada por una batería, que alimenta un inversor trifásico controlado electrónicamente para realizar la comutación entre fases. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Dado que la batería suministra una tensión aproximadamente constante, se utiliza en el control del inversor la modulación por ancho de pulso, conocida también como PWM por sus

siglas en inglés (Pulse-Width Modulation). Esta técnica consiste en modificar el ciclo de trabajo de una señal periódica digital de alta frecuencia, es decir, modificar el porcentaje del ciclo que se encuentra con valor alto. En la Figura 22 se puede observar la representación gráfica de un PWM aplicado en una señal de 5V. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Figura 22: Modulación por ancho de pulso (PWM)



Fuente: (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Al aplicar esta señal en la entrada al inversor trifásico, se consigue modificar el valor eficaz de la tensión que recibe el estator, modificando así la velocidad de giro del motor. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

### **Control con sensores**

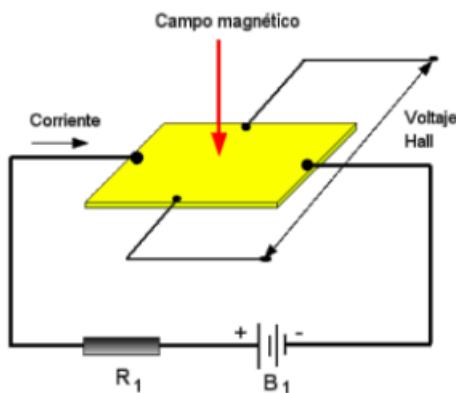
A raíz del análisis de la teoría de control de los motores DC sin escobillas para la posición y la velocidad, el problema se reduce en conocer en todo momento la posición angular relativa del rotor respecto de las bobinas del estator, para así poder utilizar esta información para conmutar adecuadamente el inversor trifásico. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

## Sensores Hall

El efecto Hall consiste en la fuerza que un campo magnético ejerce sobre una corriente eléctrica que circula por un conductor que lo atraviesa, así como se muestra en la Figura 23. Esta fuerza generada es transversal al movimiento de los portadores de carga, lo que se traduce en una tendencia a desplazarlos hacia uno u otro lado de un conductor. Este efecto se evidencia en una fina lámina conductora, en la que un desplazamiento de cargas hacia uno de los dos lados puede generar una tensión medible entre los dos terminales del conductor. La presencia de esta tensión medible transversal se denomina efecto Hall en honor a su descubridor, Edwin Herbert Hall.

(Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Figura 23: Efecto Hall



Fuente: (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

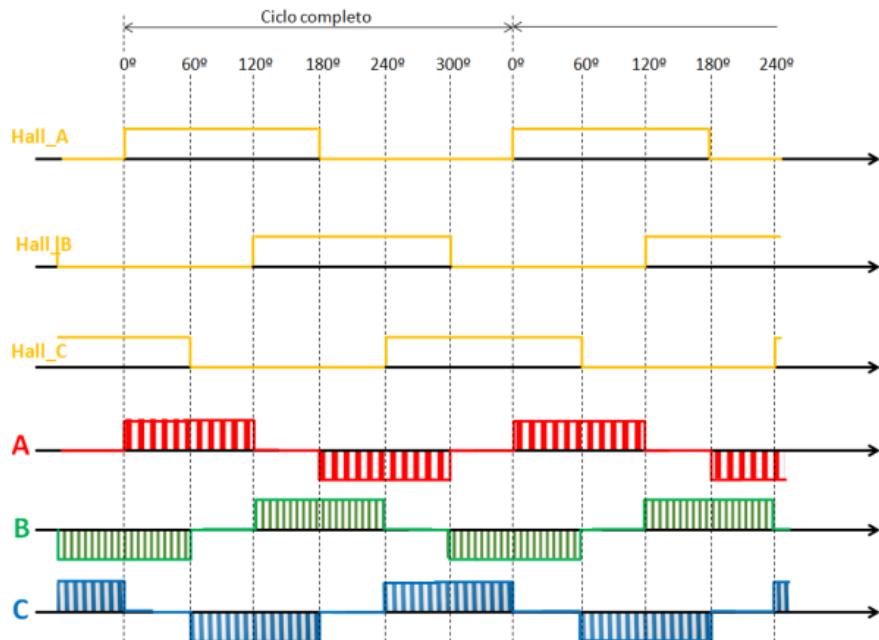
Habitualmente, en los motores DC sin escobillas que cuentan con ellos, los sensores Hall se sitúan en el estator. En el momento que un polo magnético del rotor pasa sobre el sensor de efecto Hall, éste genera una señal que puede ser alta o baja, lo que indica si el polo que ha pasado es norte o sur. Utilizando las señales producidas por los tres sensores Hall, se puede determinar la secuencia de conmutación exacta. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

## Teoría de operación

Dentro de un ciclo eléctrico, que corresponde con una revolución completa del rotor, un sensor Hall estará devolviendo una señal positiva durante medio ciclo, para pasar a comutar y devolver la señal negativa durante otro medio ciclo. En función del desfase que existe entre los sensores Hall y de la configuración del rotor, existen numerosas combinaciones para la correspondencia entre la lectura de los sensores Hall y el estado de excitación de las bobinas. No obstante, no son tan importantes los valores como conocer exactamente los estados de los sensores que se corresponden con cada una de las combinaciones de los sensores Hall. En la Figura 24 se muestran los estados de los sensores Hall y de excitación de las bobinas para un motor BLDC.

(Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Figura 24: Secuencia de conmutación de los sensores Hall.



Fuente: (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Como se puede observar en la Figura 24, los sensores tienen un desfase entre sí de  $60^\circ$  y el cambio de negativo a positivo de un sensor coincide en el tiempo con el instante en que la bobina con la misma letra que el sensor pasa de abierta a alimentada con tensión positiva.

### **Limitaciones de los sensores Hall**

A pesar de que el uso de los sensores Hall es muy habitual en aplicaciones de control de motores BLDC, estos también presentan algunos inconvenientes y limitaciones que los hacen inviables o ineficaces en determinadas aplicaciones, por lo que se buscan otras alternativas para conocer la posición del rotor del motor BLDC. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

El uso de sensores Hall incrementa no solo el tamaño, sino también el coste del motor, por lo que es necesario tener en cuenta esto en la hora del diseño de éste las modificaciones mecánicas que son necesarias para su integración. Estos sensores también son muy sensibles a la temperatura y esto supone una limitación a rangos de trabajo del motor, siendo habitual que el límite de temperatura se sitúe alrededor de  $75^\circ\text{C}$ . Por último, existen algunas características del motor o la geometría del montaje impiden la utilización de ningún tipo de sensores, por lo que durante los últimos años se ha producido un aumento del interés en los métodos de control de motores BLDC sin sensores, denominados habitualmente sensorless. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

### **Control sin sensores**

Una de las formas de controlar un motor sensorless, está basada en la detección de la fuerza electromotriz que el giro del rotor genera sobre los devanados. Se podrá conocer la posición del rotor respecto del estator dada una función de la forma de ondas de la fuerza. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

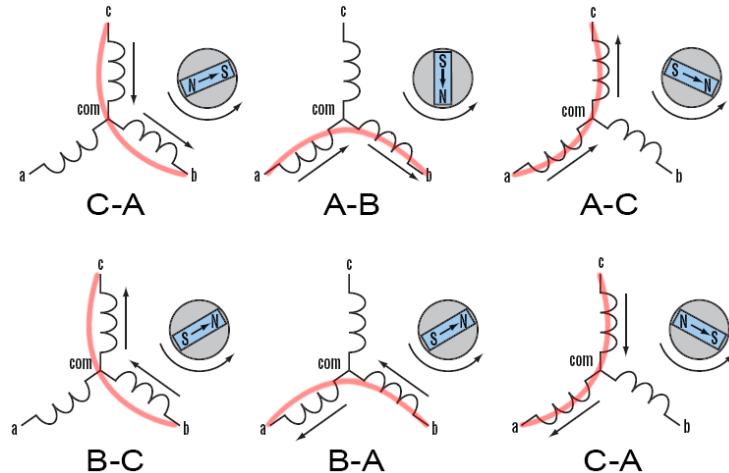
También existen otras técnicas que se basan en la estimación de la posición del rotor empleando parámetros del motor y las tensiones y corrientes consumidas. Esta técnica tiene como desventaja principal que requiere de procesadores digitales de señal para realizar los complicados cálculos en tiempo real requeridos, por lo que hace que aumente el coste del sistema. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

La técnica utilizada por el motor del Aguara'i, es la detección de la fuerza contraelectromotriz, o back EMF sensing.

### **Detección de la fuerza contraelectromotriz**

Un motor BLDC internamente tiene un número múltiplo de 3 de bobinas. Las bobinas están distribuidas de una forma equidistante alrededor del perímetro del motor. De esta manera entre cada bobina el eje girará 360 grados dividido el número de bobinas. En la Figura 25 las bobinas están representadas por solo una para cada entrada. Alrededor de la parte móvil están distribuidos de la misma manera que las bobinas la misma cantidad de imanes muy fuertes. Como al pasar corriente por las bobinas se crea un campo magnético con sentido que depende del sentido de la corriente. Alternando los sentidos de la corriente a través de las bobinas se alternan las polaridades de los campos eléctricos creados y de esta manera tendremos polos opuestos entre las bobinas y los imanes en ciertos momentos deseados. La Figura 25 muestra que empezando a conmutar la puerta superior de la entrada C y la puerta inferior de la entrada B se hace correr corriente desde C a B creando un campo magnético a través de estas dos bobinas. Dicho campo al estar opuesto al campo de los imanes moverá el eje un intervalo adelante. Justo en el momento en que las bobinas pasan por el medio del imán siguiente se debe conmutar al siguiente estado que es introducir corriente de A, a B y así para adelante creando un bucle infinito que se repite cada 6 estados. (Anghel, s.f.)

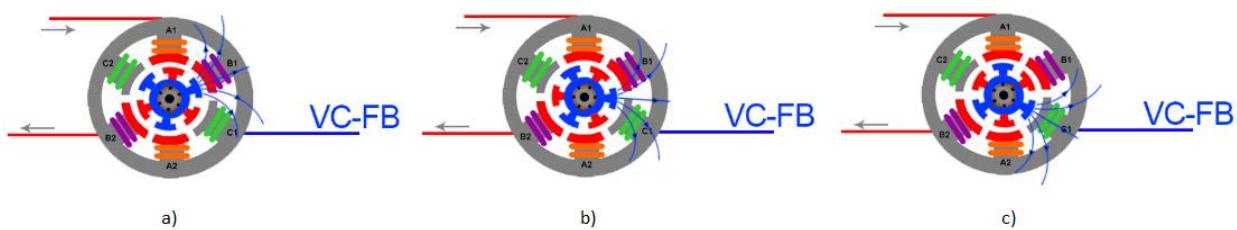
Figura 25: Secuencia de conmutación de las bobinas de un motor BLDC



Fuente: (Anghel, s.f.)

Sabiendo que un imán crea un campo magnético a su alrededor, cuando se pone una bobina delante suyo, el movimiento cambiara el flujo del campo a través de la bobina. En cuanto más flujo atraviesa la bobina, más intensidad pasará por el bobinado y más tensión puede caer en los terminales. En la Figura 26 se puede ver un ejemplo de detección de la fuerza contraelectromotriz. (Anghel, s.f.)

Figura 26: Ejemplo de detección de la fuerza contraelectromotriz



Fuente: (Anghel, s.f.)

En la Figura 26.a se ha activado el terminal superior de la salida A y la inferior de la salida B, de esta forma circula una corriente de la bobina A, a la B. Esta corriente crea un campo magnético en las bobinas A y B. Dicho campo al ser opuesto al campo creado por los imanes, empuja el eje a girar en el sentido de las agujas del reloj. Si consideramos a los imanes azules del

rotor de la figura como polarización norte y a los imanes de color rojo como polarización sur, podemos ver que las líneas del campo magnético azul salen hacia el exterior. En (a), las líneas del campo magnético aun no atraviesan la bobina C. (Anghel, s.f.)

En (b) se observa que las líneas del campo magnético ya empiezan a atravesar la bobina C. Por lo tanto, una corriente circulará por el bobinado y se empieza a ver afectado el potencial detectado en VC-FB tal como se ha explicado anteriormente. A medida que el campo creado por el imán es cada vez más perpendicular a la bobina C, el flujo será cada vez mayor. (Anghel, s.f.)

En (c) se puede observar que las líneas del campo magnético del imán del rotor están perpendicular a la bobina C. Eso quiere decir que el flujo es máximo y por lo tanto la intensidad que atraviesa el bobinado también será máxima. Es justamente ese instante en que la polarización de las bobinas debe cambiar. Ya que tenemos una salida en tensión en función de la posición del rotor dicho cambio sincronizado de estado será posible. (Anghel, s.f.)

### **ESC (Controlador Electrónico de Velocidad)**

El propósito de un controlador electrónico de velocidad (ESC) es variar la velocidad de un motor eléctrico junto con el sentido de giro. Independiente del tipo de motor eléctrico al que esté conectado el variador, el ESC interpreta información de control. Antiguamente, debido a las limitaciones de la tecnología, los variadores eran mecánicos y actuaban a través de servomotores. En la actualidad, los ESC varían la relación de cambio de una red de transistores de efecto de campo (FET). Este grupo de transistores hace posible un control más suave y preciso de la velocidad de giro de los motores. Gracias a esto también se consigue una mejora en la eficiencia con respecto a los mencionados variadores mecánicos. (FVPMax, s.f.)

La mayoría de los ESC modernos incorporan un circuito eliminador de batería (BEC) para suministrar un voltaje estabilizado para que funcione el receptor y los servomotores, esto elimina la necesidad de tener que llevar una batería extra en el modelo. Estos pueden ser lineales o conmutados. (FVPMax, s.f.)

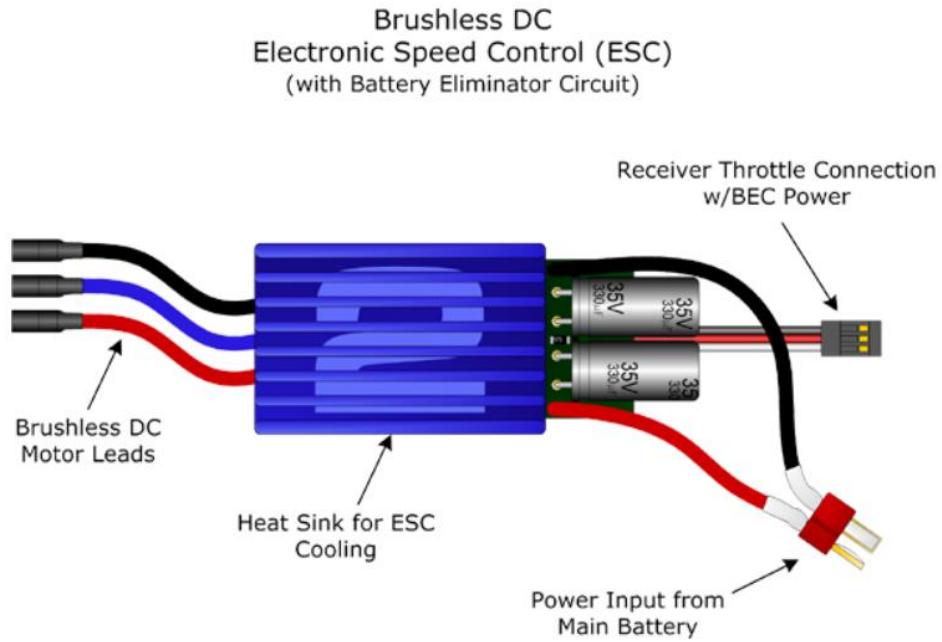
### **BEC lineales**

Los variadores lineales utilizan resistores para bajar el voltaje que proporciona la batería. Esto hace posible que el receptor funcione a 5 voltios sin que se queme por el alto voltaje de la batería. A medida que la batería tiene más celdas, o voltios, y el receptor consume más, se genera calor al pasar la corriente por el resistor. Si la corriente es muy alta, el resistor se calentará dañando el BEC. (FVPMax, s.f.)

### **BEC conmutados**

Este tipo de variadores cambia el voltaje con una alta frecuencia para bajarlo de manera más efectiva. De esta manera, se consigue reducir el voltaje sin generar calor o malgasto de energía. Alguno de estos variadores ofrece la posibilidad de regular la corriente que le llega al receptor. (FVPMax, s.f.)

Figura 27: Controlador electrónico de velocidad con circuito eliminador de corriente.

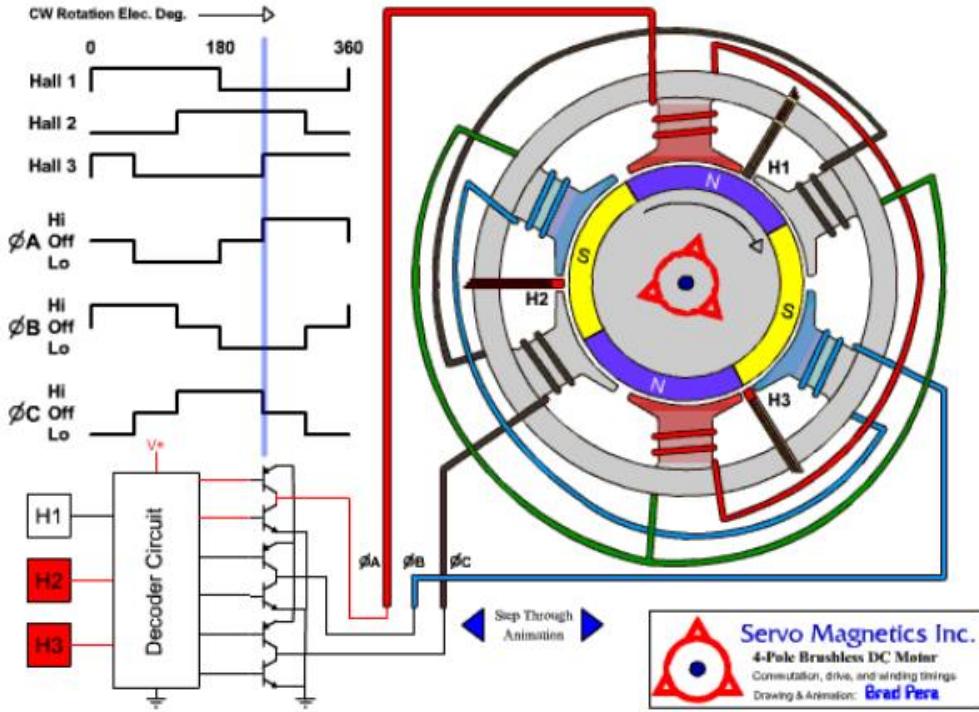


Fuente: (FVPMax, s.f.)

### Principio de funcionamiento

Los microprocesadores por lo general trabajan a una tensión de 3.3 o 5 voltios y utilizan corrientes del orden de los mA. En cambio, el alimento principal de los motores BLDC es la corriente, que, dependiendo de los motores utilizados pueden llegar a consumir alrededor de 100A, como es el caso del motor del vehículo del presente proyecto. Dicha corriente es demasiada para un microprocesador. Por lo que se debe establecer una separación con los reguladores de tensión entre la tensión que usará el motor y la tensión de la parte del procesado. Como un motor BLDC tiene tres fases, se debe alimentar 3 entradas al motor en una secuencia muy precisa. Para generar la secuencia de activación o desactivación de las entradas al motor se usa un control electrónico de velocidad o ESC por sus siglas en inglés (Electronic Speed Controller). (Anghel, s.f.)

Figura 28: Funcionamiento de un motor BLDC



Fuente: (Anghel, s.f.)

Como se puede observar en la Figura 28, se tienen que conmutar los devanados H1, H2, y H3 en una cierta secuencia. La Tabla 4 indica la secuencia en la que deben ser conmutados los devanados. En la primera fila los devanados están conectados a Vdd del puente trifásico, y los de la segunda fila están conectados a tierra.

Tabla 4: Secuencia de conmutación de los devanados de un motor BLDC

#### Secuencia de conmutación de los devanados de un motor BLDC

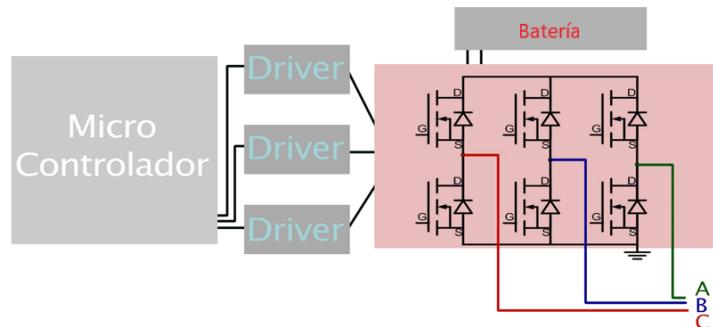
Vdd	H3	H1	H1	H2	H2	H3
GND	H2	H2	H3	H3	H1	H1

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar en el esquema general de un ESC de la Figura 29, este se divide en tres partes, en primer lugar, se encuentra el microcontrolador que se encarga de la parte del

procesado de datos y de enviar una señal a los drivers, cuya función es la de aplicar la tensión necesaria en las puertas de los transistores e ir abriendo y cerrando el paso de la corriente a través de los transistores. Finalmente se encuentra el puente trifásico, se debe alimentar el motor BLDC siguiendo una cierta secuencia de sentidos que debe tomar la corriente a través de las bobinas del motor, abriendo y cerrando de una manera muy precisa los seis transistores se logra obtener la secuencia deseada para realizar el giro del motor. (Anghel, s.f.)

Figura 29: Esquema general de un ESC



Fuente: (Anghel, s.f.)

Para tener la velocidad del motor sincronizada con la secuencia que realiza el puente trifásico, se necesita saber en todo momento la posición del motor y comparar dicha posición con la deseada por el microcontrolador. Para eso, se debe medir el campo magnético creado por el giro del motor. Los imanes crean cierta fuerza sobre las bobinas del motor. Al medir la tensión que cae en los terminales del motor se puede saber en qué posición se encuentra el motor y sincronizar su giro. (Anghel, s.f.)

## **Control de un motor BLDC a través de un ESC**

Los ESC en general son controlados por Modulación por Ancho de Puntos (PWM) para controlar los motores eléctricos. El control remoto manda una señal PWM al ESC con variaciones del orden de los milisegundos. (FVPMax, s.f.)

Los variadores para motores BLDC crean una corriente alterna trifásica a partir de corriente continua proveniente de la batería. Es por eso por lo que los ESC para motores BLDC cuentan con tres cables para ser conectados al motor. Uno de los polos del motor genera un pequeño voltaje proporcional a la velocidad de giro del motor conocido como fuerza electromotriz. Este voltaje le sirve al ESC para determinar cómo de rápido y en qué dirección gira el motor en cualquier momento. Con esta información el ESC es capaz de averiguar cómo mandar la corriente a las bobinas del motor para que este gire. (FVPMax, s.f.)

## **Capítulo 3**

### **Modelado Matemático**

#### **Resumen**

*En este capítulo, se expone el modelado matemático tradicional de un motor BLDC, la identificación de sistemas, y la función de transferencia de “caja negra”, que es el utilizado en el proyecto. También se presenta una introducción a las plataformas utilizadas en el proyecto para la realización del modelado.*

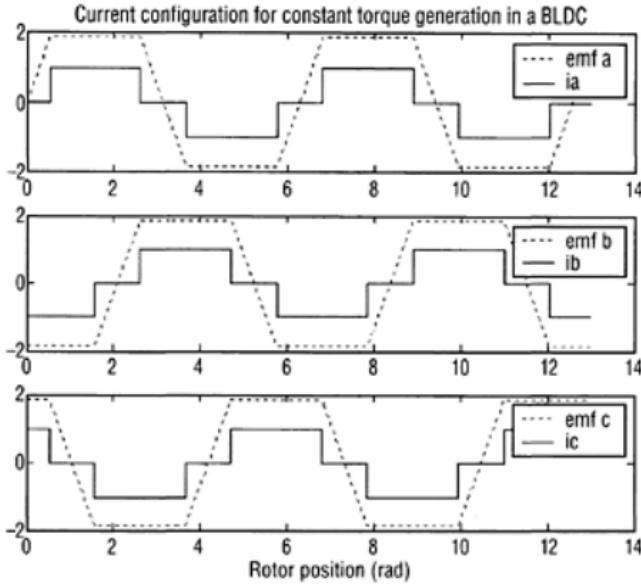
#### **Modelado tradicional de un motor BLDC**

Los devanados concentrados del motor BLDC en lugar de los devanados sinusoidales distribuidos en el estator son la razón por la que la forma de onda de la Fuerza Contraelectromotriz (FCEM) es trapezoidal. (Husain, 2003)

Solo seis posiciones del rotor por revolución eléctrica son necesarias en un motor BLDC trifásico para sincronizar las corrientes de fase con la FCEM para conseguir una producción de torque efectiva. (Husain, 2003)

La forma de onda de la FCEM trifásica y la corriente de fase ideal de un motor BLDC se muestran en la Figura 30. Las formas de onda de la FCEM están fijas con respecto a la posición del rotor. Corrientes de fase cuadradas son suministrados de manera que estas estén sincronizadas con la FCEM pico de cada fase. El controlador logra esto usando información de retroalimentación de la posición del rotor. Desde el punto de vista de control, el motor básicamente opera como un motor DC, con esta configuración del controlador. (Husain, 2003)

Figura 30: FCEM y corriente de fase ideal de un motor BLDC



Fuente: (Husain, 2003)

Los imanes permanentes del rotor pueden ser considerados como fuentes de corriente constante, dando lugar a la FCEM en los devanados del estator. Los tres devanados del estator para las tres fases se asumen como idénticas, con un desplazamiento entre ellos de  $120^\circ$  eléctricos. Por lo tanto, las resistencias de los devanados del estator y la autoinductancia de cada una de las tres fases también se asumen que son idénticas. (Husain, 2003)

El motor BLDC trifásico conectado en estrella puede ser descrito por las siguientes cuatro ecuaciones:

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b$$

$$v_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d}{dt}(i_b - i_c) + e_b - e_c$$

$$v_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{d}{dt}(i_c - i_a) + e_c - e_a$$

$$T_e = k_f \omega_m + J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L$$

En donde  $v$ ,  $i$ , y  $e$  denotan las tensiones, corrientes y Fuerza Contraelectromotriz (FCEM) por fase, fase a fase, respectivamente, en las fases  $a$ ,  $b$  y  $c$ . La resistencia  $R$  y la inductancia  $L$  son sus valores por fase y  $T_e$  y  $T_L$  representan el torque eléctrico y el torque de la carga.  $J$  es la inercia del rotor,  $k_f$  es una constante de fricción y  $\omega_m$  es la velocidad angular del rotor. La FCEM y el torque eléctrico pueden ser expresados como:

$$e_a = \frac{k_e}{2} \omega_m F(\theta_e)$$

$$e_b = \frac{k_e}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$e_c = \frac{k_e}{2} \omega_m F\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right)$$

$$T_e = \frac{k_t}{2} F \left[ (\theta_e) i_a + \left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) i_b + \left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) i_c \right]$$

Donde  $k_e$  y  $k_t$  son constantes de la FCEM y del torque, respectivamente. El ángulo eléctrico  $\theta_e$  es igual al ángulo del rotor por el número de polos pares ( $\theta_e = \frac{p}{2} \theta_m$ ). La función  $F( )$  es el que da la forma de onda trapezoidal de la FCEM. Un periodo de la función puede ser escrito como:

$$F(\theta_e) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \theta_e < \frac{2\pi}{3} \\ 1 - \frac{6}{\pi} \left( \theta_e - \frac{2\pi}{3} \right) & \frac{2\pi}{3} \leq \theta_e < \pi \\ -1 & \pi \leq \theta_e < \frac{5\pi}{3} \\ -1 + \frac{6}{\pi} \left( \theta_e - \frac{5\pi}{3} \right) & \frac{5\pi}{3} \leq \theta_e \leq 2\pi \end{cases}$$

Para una implementación más conveniente en los softwares de simulación, las ecuaciones deben estar representadas en la forma de espacio de estado. Como cada ecuación de tensión es una combinación lineal de las otras dos ecuaciones de tensión, solo dos ecuaciones son necesarias. Descartando una ecuación y eliminando una variable usando la siguiente relación:

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

Las ecuaciones de tensión se vuelven:

$$\begin{aligned}v_{ab} &= R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \\v_{bc} + R(i_a + 2i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a + 2i_b) &+ e_b - e_c\end{aligned}$$

Y el modelo matemático completo luego es:

$$\begin{aligned}
& \begin{pmatrix} i'_a \\ i'_b \\ \omega'_m \\ \theta'_m \end{pmatrix} = \\
& \left( \begin{array}{cccc} -\frac{R}{L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{k_f}{J} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{array} \right) \times \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{pmatrix} + \left( \begin{array}{ccc} \frac{2}{3L} & \frac{1}{3L} & 0 \\ -\frac{1}{3L} & \frac{1}{3L} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{J} \\ 0 & 0 & 0 \end{array} \right) \times \begin{pmatrix} v_{ab} - e_{ab} \\ v_{bc} - e_{bc} \\ T_e - T_L \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ \omega_m \\ \theta_m \end{pmatrix} = \\
& \left( \begin{array}{ccccc} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{array} \right) \times \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ \omega_m \\ \theta_m \end{pmatrix}
\end{aligned}$$

Ecuación 2

### Plataformas utilizadas. MATLAB y SIMULINK

Según la descripción que ofrece MathWorks, la empresa propietaria, MATLAB es un “lenguaje de alto nivel y un entorno interactivo para el cálculo numérico, la visualización y la programación. Mediante MATLAB, es posible analizar datos, desarrollar algoritmos o crear aplicaciones. El lenguaje, las herramientas y las funciones matemáticas incorporadas permiten explorar diversos enfoques y llegar a una solución antes que, con hojas de cálculo o lenguajes de programación tradicionales, como pueden ser C, C++ o Java.”

Una de las mayores virtudes de MATLAB es su modularidad, lo que le ha permitido mantener un crecimiento constante, gracias tanto a la colaboración de usuarios independientes como de los desarrolladores, cuyo objetivo es expandir el rango de aplicaciones del programa, creando toda una infinidad de módulos para hacer frente a una gran variedad de problemas de distintos ámbitos. Estos módulos se agrupan en bibliotecas denominadas toolboxes, que extienden el entorno de trabajo original de MATLAB, que era el del cálculo matricial, a una infinidad de campos de la ingeniería y la ciencia. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Así, en la actualidad existen toolboxes para campos tan diversos como el procesamiento de señales, el diseño de sistemas de control, la simulación de sistemas dinámicos, las redes neuronales, etc. Hoy en día nos encontramos en un punto en el que existen más de 50 toolboxes, preinstaladas en la versión de 2015 de MATLAB, además de otra serie de bibliotecas de usuario disponibles en la red para descargar gratuitamente. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

No obstante, si hablamos de toolboxes, sin duda la que más repercusión ha tenido en la evolución de las aplicaciones de MATLAB es Simulink. Simulink es el nombre que MathWorks dio a su programa para simulación (modelización y análisis) de sistemas dinámicos no lineales, presentado en 1990. Su aparición estuvo vinculada a la primera versión de MATLAB para Windows, en mayo de 1994, en la que la versión 1.3 de MATLAB incorporaba la opción de instalar de forma separada la toolbox Simulink. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

La principal diferencia de Simulink respecto a otros toolboxes de MATLAB es que Simulink ofrece un entorno gráfico de ventanas, en los que el usuario puede definir los sistemas mediante un diagrama de bloques, de manera mucho más intuitiva que otros programas de simulación. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

Utilizando Simulink, el usuario puede crear sus modelos en forma de diagramas de bloques de alto nivel partiendo de librerías de componentes básicos, utilizar componentes de toolboxes para aplicaciones específicas, y programar sus propios bloques para, estableciendo las conexiones oportunas y parametrizando el modelo adecuadamente, reducir en gran medida el tiempo de desarrollo si el modelo se creara mediante lenguajes de programación convencionales. Una vez creado el modelo, Simulink también permite ejecutar su análisis, pudiendo elegir diferentes métodos de integración. (Cuervo Fernandez & Herrero de Lucas, 2016)

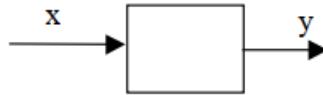
### **Identificación de sistemas**

En muchas ocasiones, es muy útil poseer el modelo de un sistema para su análisis, y en particular, para el control, porque la inmensa mayoría de los métodos de diseño se basan en su conocimiento. A la determinación de dicho modelo, a partir de tener algún conocimiento previo sobre el proceso y de experiencias prácticas, se le conoce como identificación. (Arafet Padilla, Chang Mumañ, Torres Alberto, & Dominguez Abreu, 2008)

Teóricamente, para llegar a obtener un modelo podrían adoptarse dos enfoques diferentes:

- Por la vía analítica: determinar las ecuaciones y parámetros que intervienen siguiendo exclusivamente las leyes generales de la Física.
- Por la vía experimental: en la cual se considera el sistema como una “caja negra”, con determinadas entradas y salidas, como se ilustra en la Figura 31. En esta situación se realizaría un conjunto de experimentos que proporcionarían pares de medidas de las entradas y salidas durante la evolución del sistema hacia el estado estacionario, a partir de los cuales se trataría de determinar el modelo del sistema. (Arafet Padilla, Chang Mumañ, Torres Alberto, & Dominguez Abreu, 2008)

Figura 31: Sistema como "caja negra"



Fuente: (Arafet Padilla, Chang Mumañ, Torres Alberto, & Dominguez Abreu, 2008)

Con respecto al primer enfoque hay que tener en cuenta que normalmente es extremadamente difícil considerar todas las leyes físicas que intervienen y que, aun suponiendo que esto fuera posible, el modelo resultante pudiera ser muy complejo, y, por consiguiente, difícilmente manejable por las técnicas de diseño de sistemas de control. Por otra parte, en la práctica, las tolerancias de los elementos, desgastes, fuentes de ruido no consideradas, etc., hacen que el comportamiento real nunca sea el comportamiento previsto. (Arafet Padilla, Chang Mumañ, Torres Alberto, & Dominguez Abreu, 2008)

Por lo que respecta al segundo enfoque, es evidente que la resolución del problema de identificación sin adoptar hipótesis sobre las características del sistema puede ser muy difícil.

En la práctica se combinan ambos enfoques, actuando en dos etapas:

- Etapa de análisis, en la cual se tienen en cuenta las leyes físicas y las condiciones particulares de trabajo para establecer hipótesis sobre la estructura y propiedades del modelo que se pretende identificar.
- Etapa experimental, en la cual se adoptan las hipótesis establecidas anteriormente y se tienen en cuenta las mediciones para determinar el modelo.

Una clasificación posible según el procesamiento de las mediciones es la de métodos gráficos y analíticos.

En los métodos gráficos se obtienen los parámetros del sistema de manera gráfica, mientras que en los analíticos se obtienen producto de cálculos numéricos. Es bueno destacar que, con el

desarrollo de la computación, muchos de estos métodos gráficos han pasado a ser analíticos, pero gráficos en su esencia. (Arafet Padilla, Chang Mumañ, Torres Alberto, & Dominguez Abreu, 2008)

### **Métodos gráficos.**

Estos métodos se caracterizan por determinar los parámetros del modelo de una forma gráfica, y por mucho tiempo se utilizaron de esta forma a pesar de las imprecisiones a que conllevan.

No obstante, con ayuda de la computadora, muchos métodos gráficos se han programado mediante algoritmos analíticos. (Arafet Padilla, Chang Mumañ, Torres Alberto, & Dominguez Abreu, 2008)

### **Métodos basados en la respuesta a escalón**

El escalón es la señal de prueba más utilizada, en la práctica sólo puede lograrse de forma aproximada ya que es imposible lograr un cambio brusco de una variable en un tiempo infinitesimal, no obstante, se considera válido si la constante de tiempo de la señal real es menor que la décima parte de la menor constante de tiempo que se quiere determinar en la identificación.

El uso de esta señal tiene la ventaja de la sencillez en su generación y que el tiempo de experimentación es corto. Como desventaja se puede mencionar la introducción de una alteración relativamente grande en el comportamiento del sistema, lo cual no siempre es permisible.

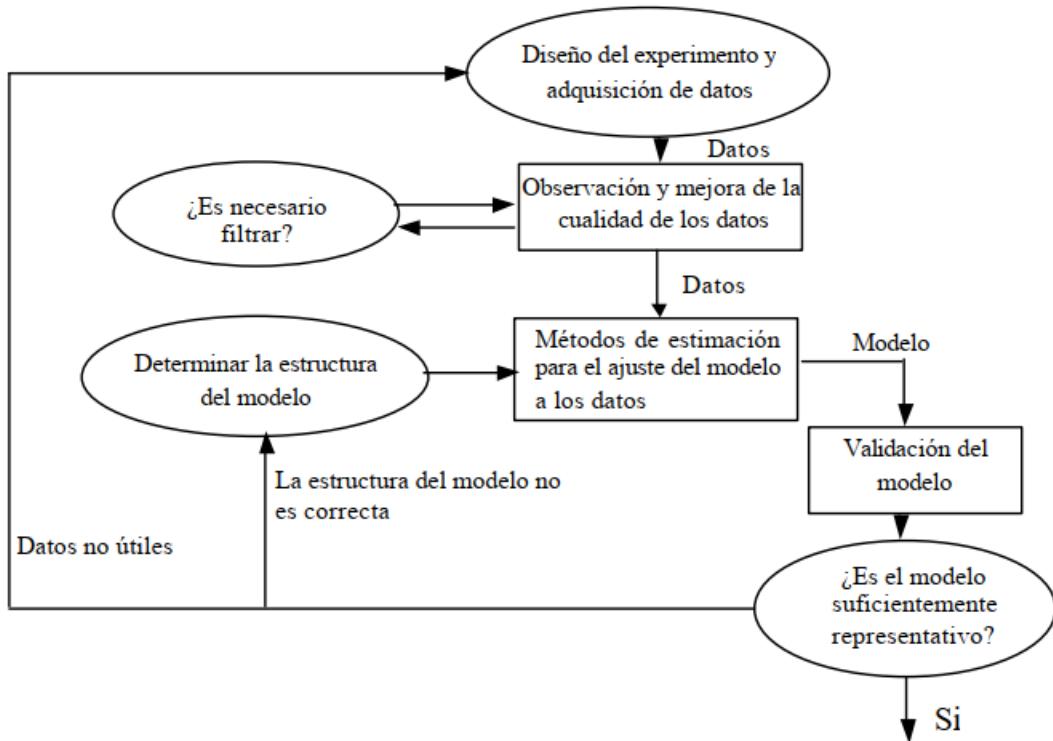
El procedimiento para obtener los parámetros del modelo estará en dependencia del modelo propuesto para la identificación, a partir de la respuesta del sistema a esta señal de estímulo.

## **Etapas a seguir para la identificación de un modelo**

En general, las etapas a seguir para la identificar un modelo paramétrico son:

- Diseño del experimento de identificación. En esta primera etapa es necesario decidir, entre otros aspectos: el tipo de señales de excitación, el mejor periodo para la adquisición de datos, la cantidad de datos necesarios;
- Observación y mejora de la calidad de los datos capturados. Antes de utilizar los métodos de estimación de parámetros es necesario: observar y reparar los datos erróneos, filtrar las altas frecuencias, eliminar offsets y tendencias, etc.
- Determinación de la estructura del modelo. En esta etapa es necesario definir los tipos de modelos a utilizar: continuos o discretos, tipos de ruido, lineales o no lineales, regresiones, redes neuronales. Y es necesario adoptar un procedimiento para determinar el orden del modelo.
- Estimación de los parámetros. Etapa la mayoría de las veces muy relacionada con la anterior, en ella se presenta el problema de decidir el método o métodos de estimación de parámetros que se van a utilizar para calcular el valor de estos. En general se puede escoger entre dos técnicas distintas: en el dominio temporal y en el dominio frecuencial.
- Validación del modelo. Es la etapa en la que debe preguntarse si el modelo identificado es suficientemente representativo del proceso estudiado. En él se debe definir un criterio para evaluar la calidad. Generalmente se dispone de varios modelos candidatos y debe escogerse uno de ellos basándose en algún criterio. (Osorio Camargo & Florez Roa, 2009)

Figura 32: Etapas para la identificación de un proceso.



Fuente: (Osorio Camargo & Florez Roa, 2009)

### Función de transferencia de caja negra.

Cuando se requiere modelar un sistema físico es necesario realizar una validación de modelos matemáticos de los diferentes procesos que en él intervienen. La diferencia del comportamiento del sistema de referencia y su representación matemática tiende a ser la mínima en algún sentido. Buscar un modelo matemático es encontrar una relación matemática entre la salida y la entrada del sistema. En particular la dinámica interna se relaciona matemáticamente con la salida y la entrada a través de la función de transferencia. Los sistemas considerados como cajas negras solo permiten conocer a la función de transferencia sin la posibilidad de acceder a sus dinámicas internas de manera directa. Para ello se realiza el proceso de filtrado compuesto por la estimación e identificación, que de manera indirecta describen la dinámica de los estados a través

de un estimador usando a la variable instrumental y la señal observable retardada, que afecta a la matriz de transición y así al identificador mediante la señal retardada del sistema de referencia. La descripción del comportamiento de un sistema tipo caja negra se hace fuera de línea, comúnmente a través de ecuaciones diferenciales; sin que ello permita conocer que ocurre dentro del sistema y menos como se da una determinada evolución. La identificación de la dinámica interna del sistema tipo caja negra se basa en la función de transición, que en su forma más simple corresponde a la primitiva de la ecuación diferencial del modelo de referencia. Pero en ningún caso se conoce la ganancia de coeficientes de la primitiva y en consecuencia la ganancia interna del sistema de referencia. (Medel Juárez, Zagaceta Alvarez, & Palma Orozco, 2014)

La forma de describir la evolución externa del sistema de referencias se logra por los métodos de interpolación. Una vez que se obtiene la convergencia en algún sentido predefinido, se cuenta con un modelo que describe la respuesta del sistema; pero sin que ello signifique el haber descrito a su dinámica ni ganancias internas. (Medel Juárez, Zagaceta Alvarez, & Palma Orozco, 2014)

En la teoría de control, las ecuaciones en el espacio de estados describen la salida del sistema en función de los parámetros y estados internos; lo cual no es posible lograrlo en sistemas tipo caja negra, ya que los parámetros y estados internos son desconocidos. (Medel Juárez, Zagaceta Alvarez, & Palma Orozco, 2014)

## **Marco Metodológico**

### **Capítulo 4**

#### **Diseño Metodológico**

##### **Resumen**

*En el presente capítulo, se explican los procedimientos utilizados para el análisis de la problemática del proyecto.*

##### **Contexto de la Investigación**

El trabajo de investigación es realizado en el contexto de la invitación a la competencia internacional de vehículos autónomos a escala RobocarRace (2018), que fue llevada a cabo en la ciudad de São Paulo, Brasil, que fue organizada por la Facultad de Tecnología de Santo André, de la Universidad Federal ABC (UFABC) y Robótica Paula Souza, en la cual se ha participado en representación de la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, sede Regional Alto Paraná, Facultad de Ciencias y Tecnología, se ha adoptado como nombre del equipo “A2G” (Autonomous Arandu Group) y el vehículo presentado fue el “Aguara’i”.

Para este propósito, se modificó un auto eléctrico a escala 1:8, dotándolo de sensores IMU (Inertial Measurement Unit), tales como acelerómetro, giroscopio, magnetómetro y un encoder para medir la velocidad; así como un dispositivo embebido myRIO de la National Instruments para realizar la tarea de adquisición de datos, procesamiento de los algoritmos de fusión, control y navegación.

## **Alcance de la investigación**

Este proyecto presenta el modelado matemático, la simulación y la implementación de un control de velocidad de un vehículo eléctrico a escala “Aguara’í” utilizando como el software MATLAB como herramienta de diseño y LabVIEW como herramienta de implementación.

## **Diseño de la investigación**

El diseño es experimental. Una acepción particular de experimento se refiere a un estudio en el que se manipulan intencionalmente una o más variables independientes, para analizar las consecuencias que la manipulación tiene sobre una o más variables dependientes, dentro de una situación de control para el investigador. (Hernandez Sampieri, Fernandez Collado, & Baptista Lucio, 2010)

Los experimentos manipulan tratamientos, estímulos, influencias o intervenciones (denominadas variables independientes) para observar sus efectos sobre otras variables (variables dependientes) en una situación de control. Los diseños experimentales se utilizan cuando el investigador pretende establecer el posible efecto de una causa que se manipula. (Hernandez Sampieri, Fernandez Collado, & Baptista Lucio, 2010)

## **Enfoque de la investigación**

El proyecto tiene un enfoque cuantitativo. El enfoque cuantitativo es secuencial y probatorio. El enfoque cuantitativo usa la recolección de datos para probar hipótesis, con base en la medición numérica y el análisis estadístico, para establecer patrones de comportamiento y probar teorías. (Hernandez Sampieri, Fernandez Collado, & Baptista Lucio, 2010)

## **Unidad de estudio**

La unidad de estudio fue el comportamiento del motor ante los estímulos del controlador de velocidad, esto se consiguió estimulando el controlador de velocidad, midiendo la velocidad del motor y estudiando los datos obtenidos.

## **Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Se excito el controlador de velocidad de manera a tener una velocidad de giro constante en el motor, para ello se utilizó el dispositivo myRIO y un sensor denominado encoder.

El myRIO excitó el controlador de velocidad y adquirió los datos del encoder, una vez recogidos estos datos, se analizaron con la herramienta de Identificación de Sistemas de Matlab, se simularon y se sintonizaron los valores para la posterior implementación y validación del control de tracción con el software LabVIEW

## Capítulo 5

### Modelado, simulación e implementación

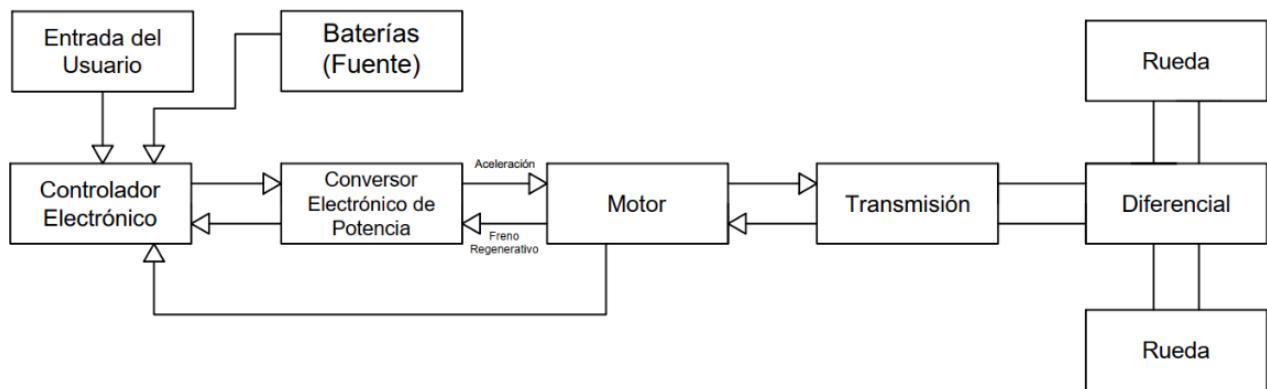
#### Resumen

*En el presente capítulo, se presenta el objetivo del modelado, la identificación del sistema con los datos adquiridos, y la simulación del modelo. Los mismos fueron realizados en la plataforma MATLAB y Simulink.*

#### Objetivo del Modelado

El objetivo principal de este trabajo es poder diseñar un control de velocidad para un vehículo a escala 1:8. Para que este control sea efectivo, se debe obtener un modelo matemático o función de transferencia que represente el comportamiento del sistema. Para poder obtener este modelo, es necesario conocer los componentes principales de un vehículo eléctrico, estos son: el motor, el controlador, la fuente de alimentación y la transmisión. En la Figura 33 se muestra el esquema completo de un vehículo eléctrico.

Figura 33: Componentes de un vehículo eléctrico



Fuente: (Husain, 2003)

Para obtener un buen controlador de velocidad es necesario conocer cuáles son las fuerzas que intervienen en el movimiento, la fuerza de tracción generada por el motor, encargada de impulsar al vehículo y las fuerzas correspondientes la dinámica que se oponen al movimiento. En la parte de impulso del vehículo, se tiene el torque y en la parte dinámica se tienen dos fuerzas, la resistencia de rodadura y el arrastre aerodinámico.

Si se hace una sumatoria de las fuerzas intervenientes, se tiene:

$$\sum Fuerzas = Fuerza\ de\ tracción - Resistencia\ de\ rodadura - Arrastre\ aerodinamico = m \cdot a$$

Ecuación 3

La fuerza de tracción es representada por la Ecuación 4

$$F_t = \frac{T}{L} \times Gr$$

Ecuación 4

Donde:

- $T$  es el torque entregado por el motor (N/m)
- $L$  es el radio de la rueda (m)
- $Gr$  es la relación de transmisión entre el motor y la rueda

La Resistencia de rodadura es representada por la Ecuación 5

$$F_r = C_r \times m \times g$$

Ecuación 5

Donde:

- $C_r$  es el coeficiente de resistencia de rodadura
- $m$  la masa del vehículo (kg)

- $g$  es la gravedad ( $\text{m/s}^2$ )

El arrastre aerodinámico es representado por la Ecuación 6

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho v^2 S C_D$$

Ecuación 6

Donde:

- $\rho$  es la densidad del aire ( $\text{kg/m}^3$ )
- $v$  la velocidad del vehículo ( $\text{m/s}$ )
- $S$  es la superficie frontal del vehículo ( $\text{m}^2$ )
- $C_D$  es el coeficiente de arrastre del vehículo

Debido al tamaño y masa pequeños del vehículo, se hizo un análisis preliminar de la fuerza de oposición al movimiento que podría tener, para ello, se tomó la parte de oposición de las fuerzas y se reemplazó con valores numéricos.

Para la fuerza de arrastre, se tienen como dato la masa del vehículo que es igual a 5.5 kg, el coeficiente de resistencia de rodadura que es igual a 0.2 para ruedas de asfalto y la gravedad que es  $9.81 \text{ m/s}^2$ . Para el arrastre aerodinámico se sabe que la densidad del aire es igual  $1.2254 \text{ kg/m}^3$ , se calculó la superficie frontal del vehículo  $S = 0.04445 \text{ m}^2$ , se consideró un valor de 0.5 para el coeficiente de arrastre, comparando con el valor promedio de vehículos con una forma parecida y por último se consideró un desplazamiento a  $12 \text{ m/s}$  de velocidad. Reemplazando estos valores numéricos en la Ecuación 5 y Ecuación 6, y sumando ambas fuerzas, se tiene:

$$\text{Fuerza dinámica} = 0.02 \times 5.5 \times 9.81 + \frac{1}{2} \times 1.2254 \times 0.04445 \times 0.5 \times 12^2 = 3.03 \text{ N}$$

Ecuación 7

Para un desplazamiento de 12 m/s se tiene una fuerza aproximada de oposición al movimiento de tan solo 3.03 newtons, lo que equivale a aumentarle la masa en 0.309 kg, tan solo 5.6% de su masa total. Por ese motivo y considerando que se pretende controlar el vehículo a velocidades menores, se despreció el efecto dinámico, por lo tanto, el modelo a analizarse se centra en el comportamiento del controlador de velocidad ESC, el motor BLDC y la transmisión.

Se pretende llegar a un modelo matemático que represente el comportamiento del sistema de tracción para poder ser aplicado en un control de velocidad. Este control de velocidad debe ser capaz de controlar el vehículo de 0 a 12 metros por segundo y reaccionar lo suficientemente rápido para poder mantenerlo en pista en caso de variaciones de velocidad, ya sea por la superficie donde circula, o alguna petición del controlador.

El software diseñado para la implementación tiene que ser capaz de acoplarse a otro software como subsistema de este, siendo más específicos, se trata del control de velocidad que será controlado por un algoritmo de navegación.

### **Identificación del sistema de tracción**

El método elegido para la obtención del modelo matemático a través de la función de transferencia es el método de la “caja negra”; que consiste en el estudio de un elemento desde su comportamiento a la salida dada una señal de entrada, sin abarcar el funcionamiento interno.

Internamente, la caja negra está compuesta por el ESC, el motor BLDC y el sistema de transmisión. Como se puede ver en la Figura 34, a la entrada del sistema se cuenta con el valor del ciclo de trabajo de la señal PWM que controla el ESC. La salida es la velocidad del vehículo en m/s.

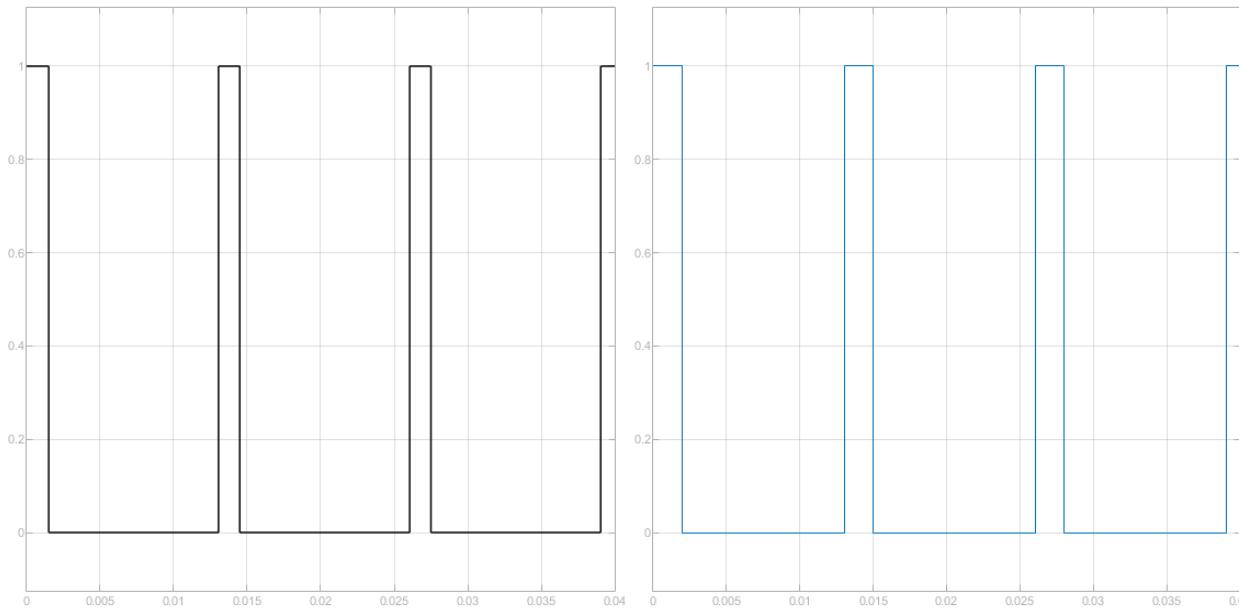
Figura 34: Esquema de la caja negra para una entrada PWM y una salida m/s.



Fuente: Elaboración propia.

La señal PWM de control del ESC tiene un periodo de 13 ms. En estado de reposo, el ESC recibe una señal con un ciclo de trabajo de 11.53% (1.5 ms de ancho de pulso). La variación del ancho de pulso de 1 ms a 1.5 ms (7.69% a 11.53%) controla la aceleración en reversa la variación del ancho de pulso de 1.5 ms a 2 ms (11.53% a 15.38%) controla la aceleración hacia adelante. En la Figura 35 se puede observar la señal PWM en estado neutro (1.5 ms) y en estado de máxima aceleración hacia adelante (2 ms).

Figura 35: Señal PWM que controla el ESC. A la izquierda, la señal enviada al ESC en estado de reposo. A la derecha, la señal que representa la aceleración máxima hacia adelante.



Fuente: Elaboración propia.

Para realizar la identificación del sistema, primeramente, se procedió a la recolección de datos de entrada y salida. Para adquirir estos datos, se dispuso una señal PWM de valor fijo en la entrada que esté dentro del rango de control del ESC (11.53% a 15.38%) y se midió la velocidad de la rueda con un encoder.

Se fijó la señal PWM de entrada a un valor de ciclo de trabajo 0.130769 que corresponde al 40% de la aceleración máxima, para luego tomar los datos del encoder a través del myRIO. El encoder utilizado fue uno óptico, en donde cada interrupción de la luz genera un pulso. Por cuestiones de fijación dentro del vehículo, fue utilizado un disco con 4 dientes, colocados en un eje intermedio entre el motor y las ruedas. Teniendo en cuenta que 4 pulsos equivalen una vuelta del eje, y teniendo la relación de transmisión entre ese eje y las ruedas y el diámetro de las ruedas, en la Ecuación 8 se encontró la relación matemática para obtener la salida en metros por segundo. La disposición del encoder se puede ver en la Figura 36 y Figura 37

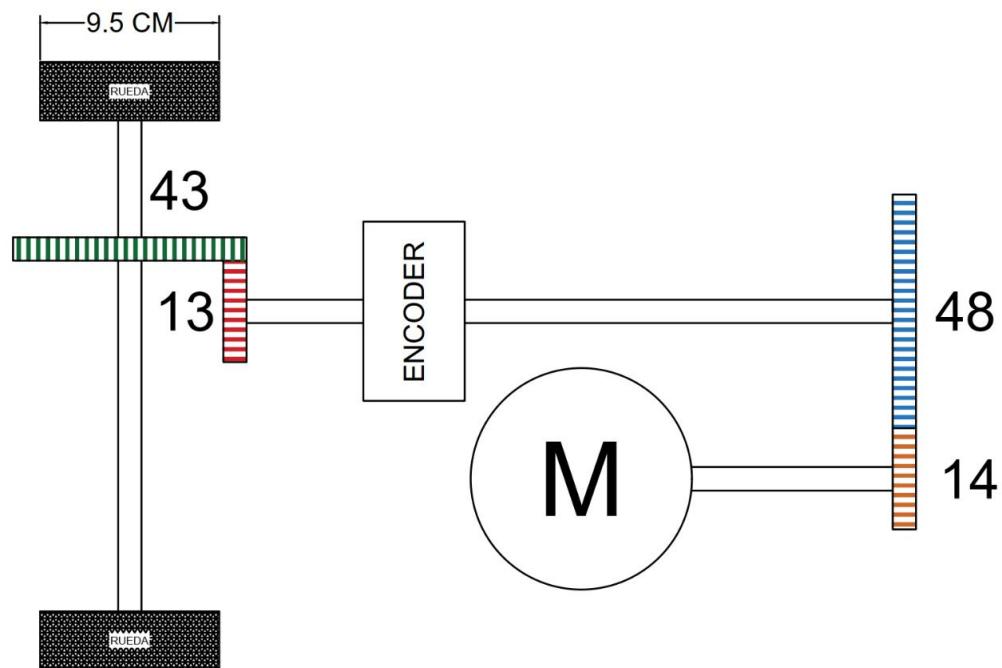
$$\text{Velocidad} \left( \frac{\text{m}}{\text{seg}} \right) = i_{\text{eje/rueda}} \times \frac{1}{4} \times PE \times Cia_{\text{Rueda}}$$

Ecuación 8

En donde,

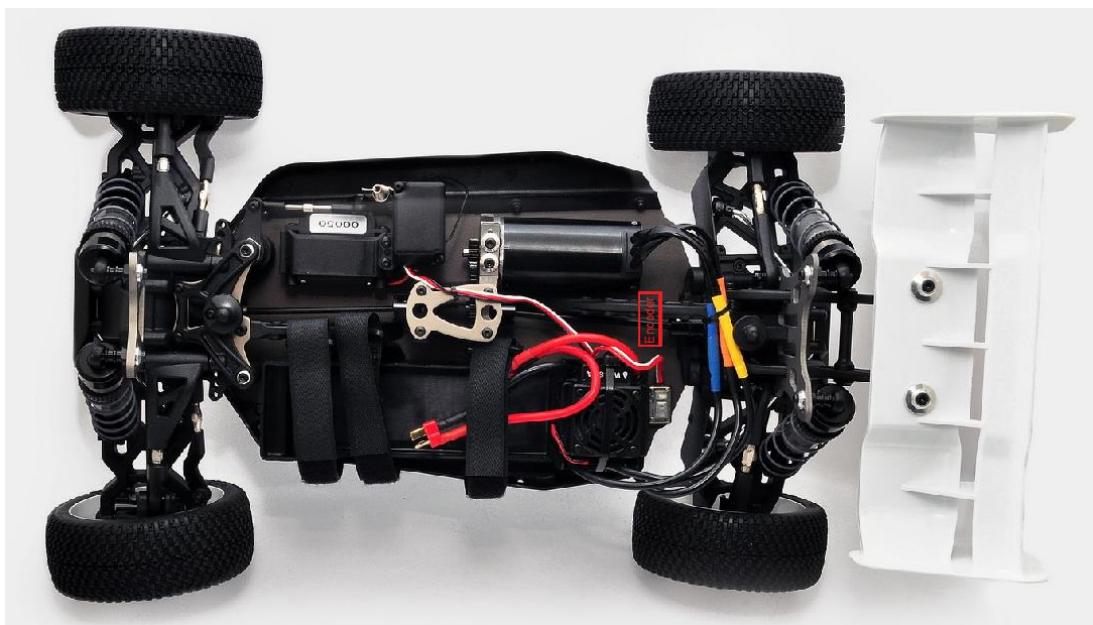
- $i_{\text{eje/rueda}}$  es la relación de transmisión entre el eje donde está ubicado el encoder y la rueda.
- $PE$  son los pulsos del encoder en pulsos/segundo.
- $Cia_{\text{Rueda}}$  es la circunferencia de la rueda en metros

Figura 36: Relación de transmisión entre el motor y la rueda y posición del encoder.



Fuente: Elaboración Propia

Figura 37: Posición del encoder en el vehículo. (Imagen ilustrativa)



Fuente: Elaboración propia.

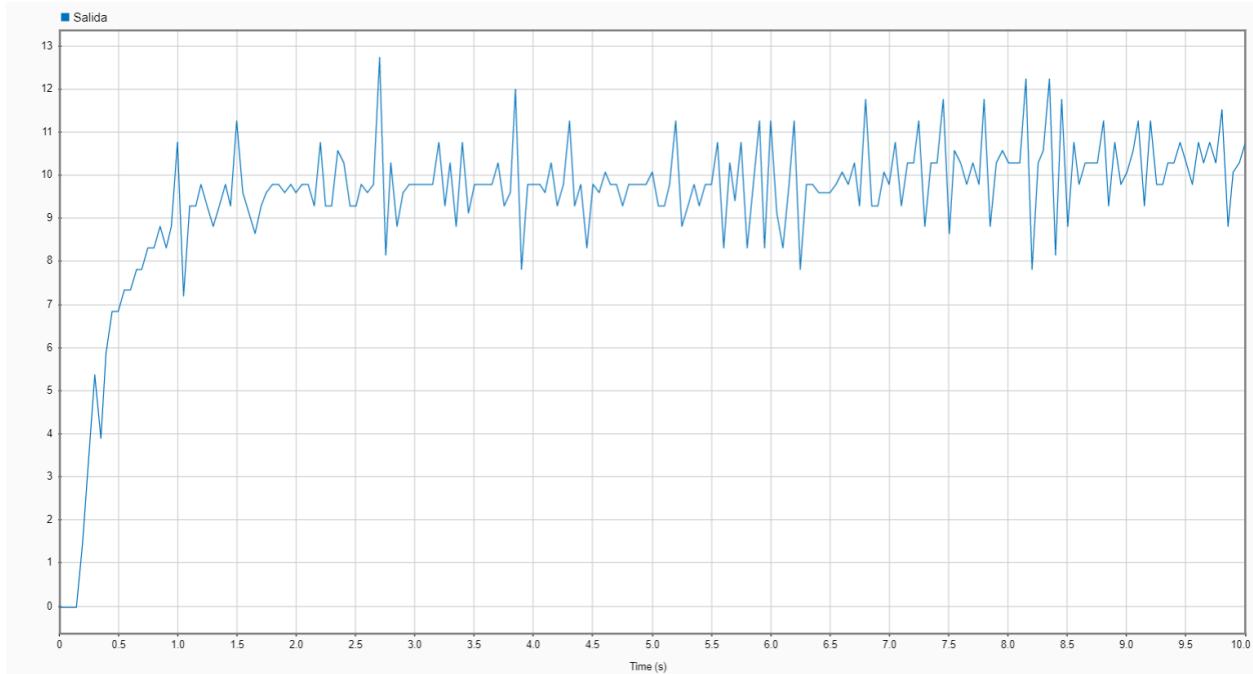
Reemplazando los valores de relación de transmisión, y la circunferencia de la rueda, se tiene:

$$\text{Velocidad} \left( \frac{m}{seg} \right) = \frac{13}{43} \times \frac{PE}{4} \times 2\pi \times 0.095$$

Ecuación 9

Se adquirieron los datos a una velocidad de muestreo de 50 ms. Una vez obtenidos los datos, se trazó la curva de la salida con respecto al tiempo, como se puede ver en la Figura 38. Como se puede observar, la señal obtenida contenía ruido introducido por la baja resolución del encoder, por lo tanto, se decidió aplicarle un filtro con el objetivo de suavizar la curva.

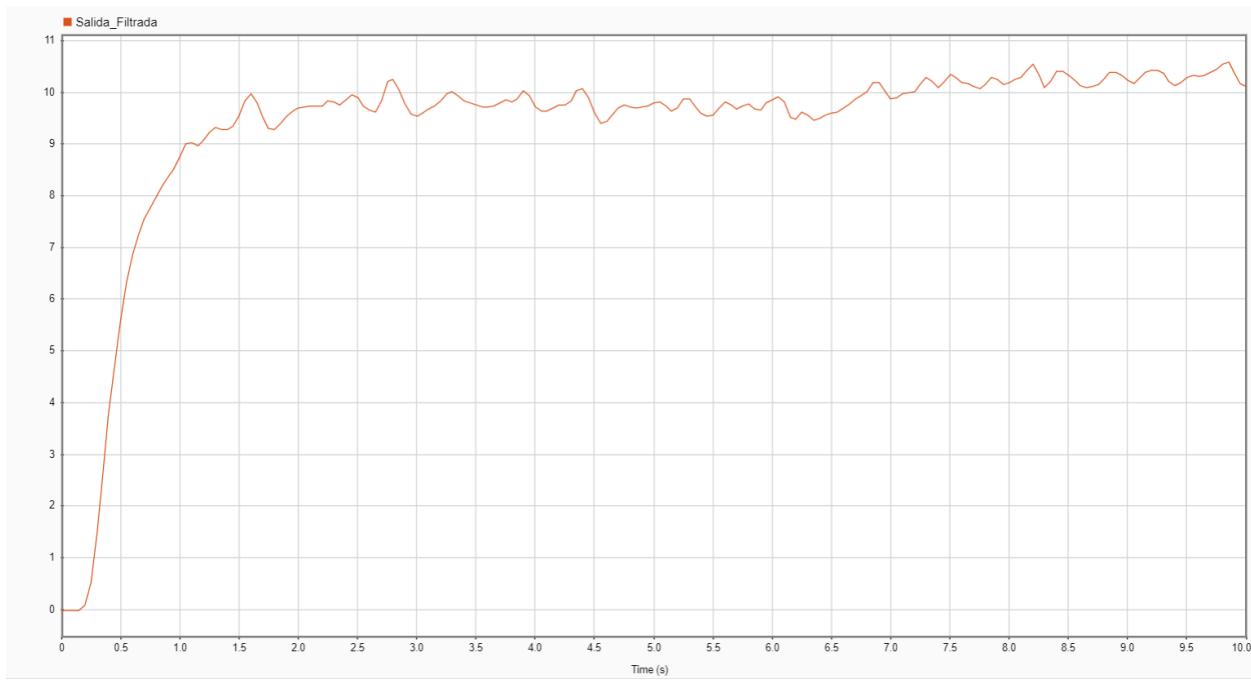
Figura 38: Señal de salida.



Fuente: Elaboración propia.

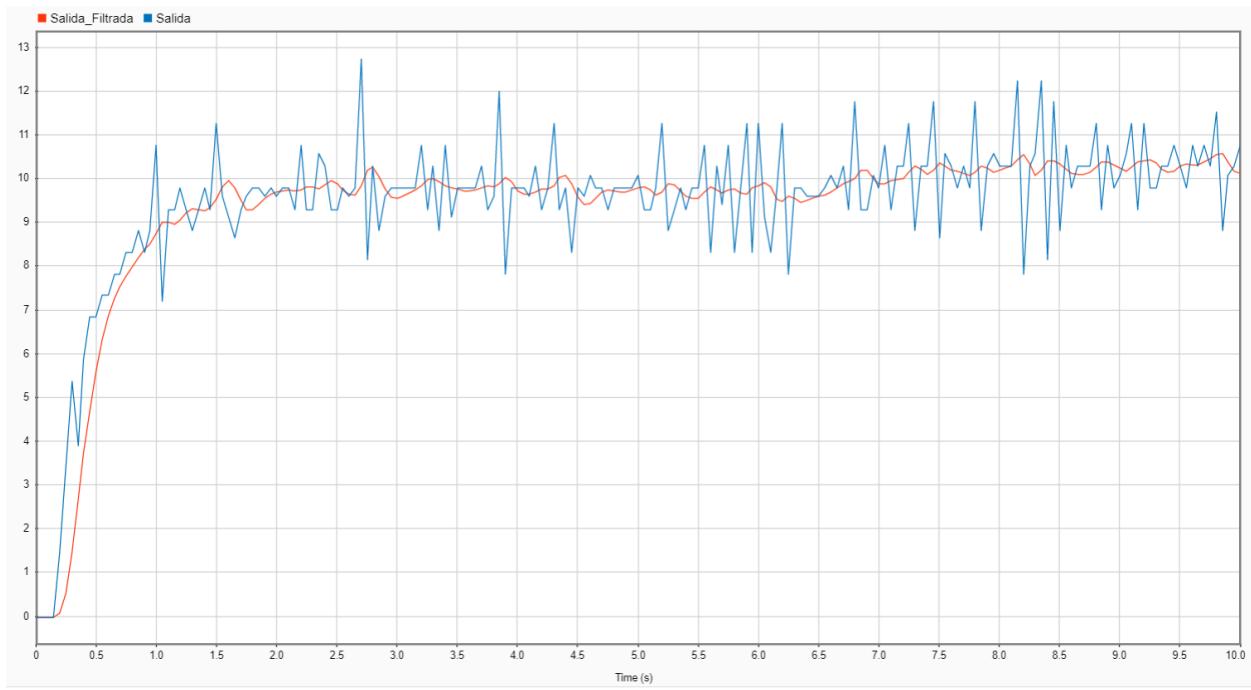
Se aplicó un filtro pasa bajos usando la herramienta incorporada de MATLAB Signal Analyzer. La señal obtenida luego de que se le haya aplicado el filtro se puede ver en la Figura 39.

Figura 39: Señal filtrada.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 40: Señal filtrada sobre la señal original



Fuente: Elaboración propia.

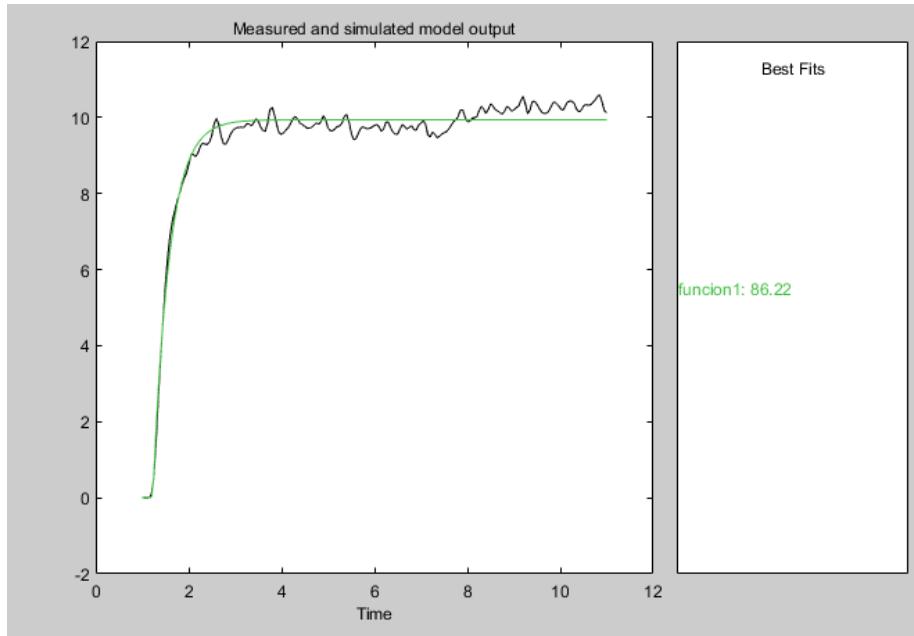
Con la señal filtrada se procedió a la identificación del sistema usando una herramienta incorporada de MATLAB llamada *System Identification Toolbox*.

La herramienta de identificación de sistemas de MATLAB; *System Identification Toolbox*, provee a MATLAB una aplicación para construir modelos matemáticos de sistemas dinámicos a partir de datos medidos de entrada y salida. Te da la posibilidad de usar datos de entrada-salida tanto en el dominio del tiempo como en el dominio de la frecuencia para identificar funciones de transferencia tanto de tiempo continuo como de tiempo discreto y procesar los modelos. (MathWorks, n.d.)

Luego de importar los datos de entrada y salida y configurar la herramienta a que aproxime la señal obtenida a una función de transferencia de segundo orden, con dos polos y un cero, como es esperado del comportamiento de un motor eléctrico. También fue añadido un delay que fue percibido en la señal obtenida de la adquisición de datos.

Como se pude ver en la Figura 41, el modelo obtenido con la identificación alcanzó un acercamiento del 86.22% a la señal comparada, lo que supone una muy buena aproximación, teniendo la cuenta el ruido presente en la señal a causa del sensor utilizado en la adquisición.

Figura 41: Porcentaje de aproximación del modelo obtenido con la señal real



Fuente: Elaboración propia

En la Figura 41 se puede observar que la señal real, a pesar del ruido, al igual que la señal obtenida desde el modelo obtenido, tiende a estabilizarse a los 10 m/s.

La función de transferencia obtenida obedece la Ecuación 10

$$G(s) = K_p \times \frac{1 + T_z s}{(1 + T_{p1})(1 + T_{p2})} \times e^{(-T_D s)}$$

Ecuación 10

Donde:

- $K_p$  es la constante proporcional
- $T_z$  es el valor del Cero
- $T_{p1}$  es el valor del polo 1
- $T_{p2}$  es el valor del polo 2
- $T_D$  es el valor del delay

Reemplazando la Ecuación 10 con los valores obtenidos, queda:

$$G(s) = 24.849 \times \frac{1 - 0.023566s}{(1 + 0.349)(1 + 0.00734)} \times e^{-0.023566s}$$

Ecuación 11

Dejando la Ecuación 11 de la forma estándar se tiene

$$G(s) = \frac{-0.5856s + 24.85}{0.002562s^2 + 0.35363s + 1} \times e^{-0.2s}$$

Ecuación 12

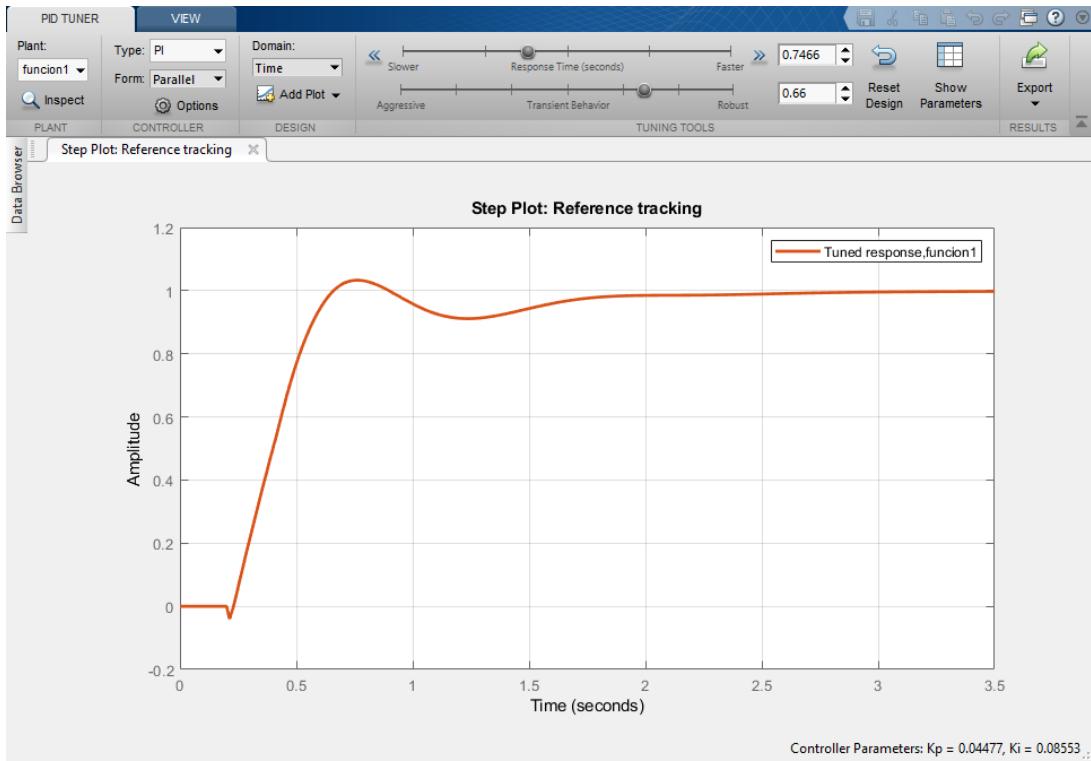
### Diseño del control de tracción

A partir de la validación de la función de transferencia obtenida con la identificación de sistemas, se procedió a diseñar un control de velocidad apropiado para la tracción del vehículo.

Se optó por el control tradicional PID por la rapidez de implementación, debido a que la señal obtenida del encoder presenta bastante ruido, se optó por descartar la acción derivativa, ya que este es bastante vulnerable ante la presencia de errores. Para hallar los parámetros de control,  $K_p$  y  $K_i$ , se utilizó la herramienta de Matlab llamada PID Tuner.

Variando el tiempo de respuesta y el comportamiento transitorio, se buscó tener un tiempo de establecimiento pequeño, de tal manera que el vehículo tenga una respuesta rápida ante cambios de velocidad, el comportamiento obtenido se puede observar en la Figura 42.

Figura 42: Ventana de sintonización del control



Fuente: Elaboración propia.

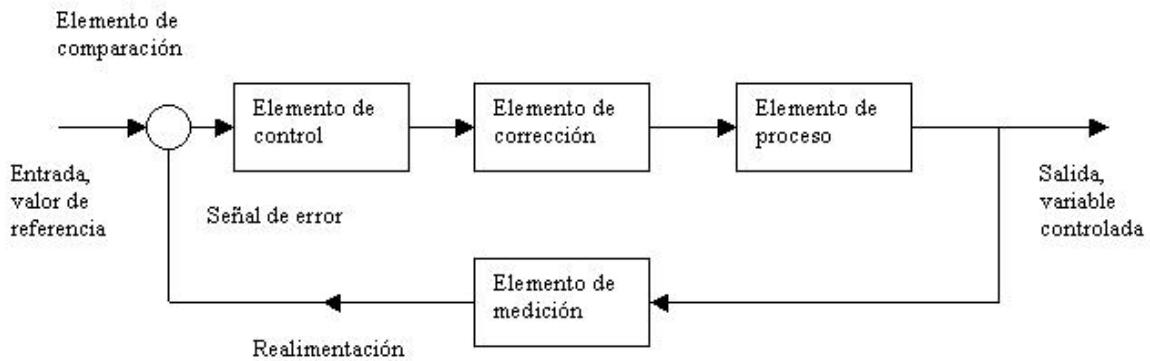
Para los valores de  $K_p = 0.04477$  y  $K_i = 0.08553$  ( $T_i = 0.5236$ ) se obtuvo:

- Tiempo de crecimiento: 0.308 segundos
- Tiempo de establecimiento: 1.8 segundos
- Sobreimpulso: 3.3%
- Pico: 1.03

Una vez obtenida la sintonización, se realizó el diseño del control en la plataforma Simulink, siguiendo el diagrama que se muestra en la Figura 43. Donde la entrada de referencia es la velocidad deseada del vehículo, el elemento de control es un control proporcional integral (PI), el elemento de corrección es el valor del ciclo de trabajo de la señal PWM enviada al ESC del motor BLDC, el elemento de proceso es el conjunto del funcionamiento del ESC, del motor BLDC

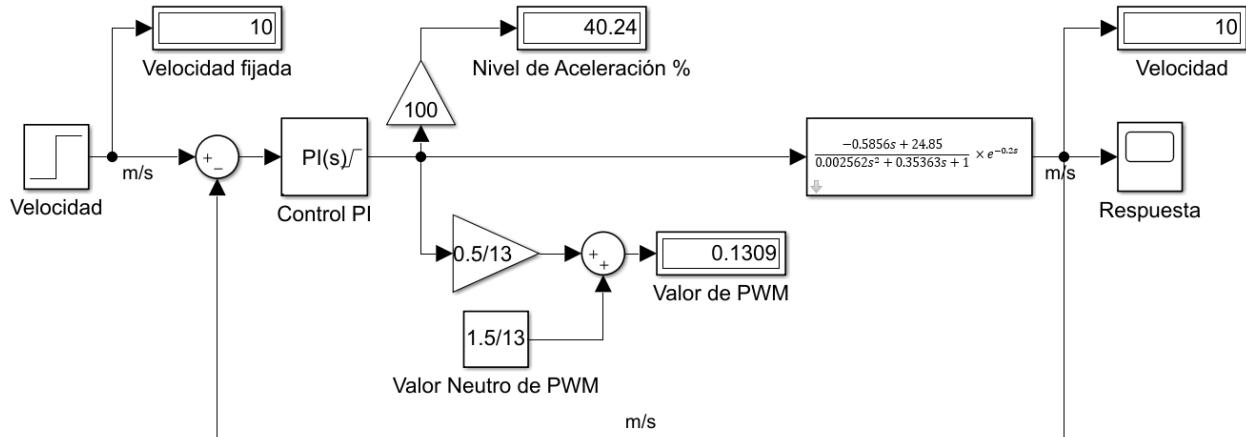
y del sistema de transmisión y el elemento de medición es la medida de velocidad proveída por el encoder. El diseño en Simulink se puede ver en la Figura 44.

Figura 43: Diagrama de bloques del control



Fuente: (Servan Montoya & Salvador Reyes, s.f.)

Figura 44: Diseño de control en Simulink



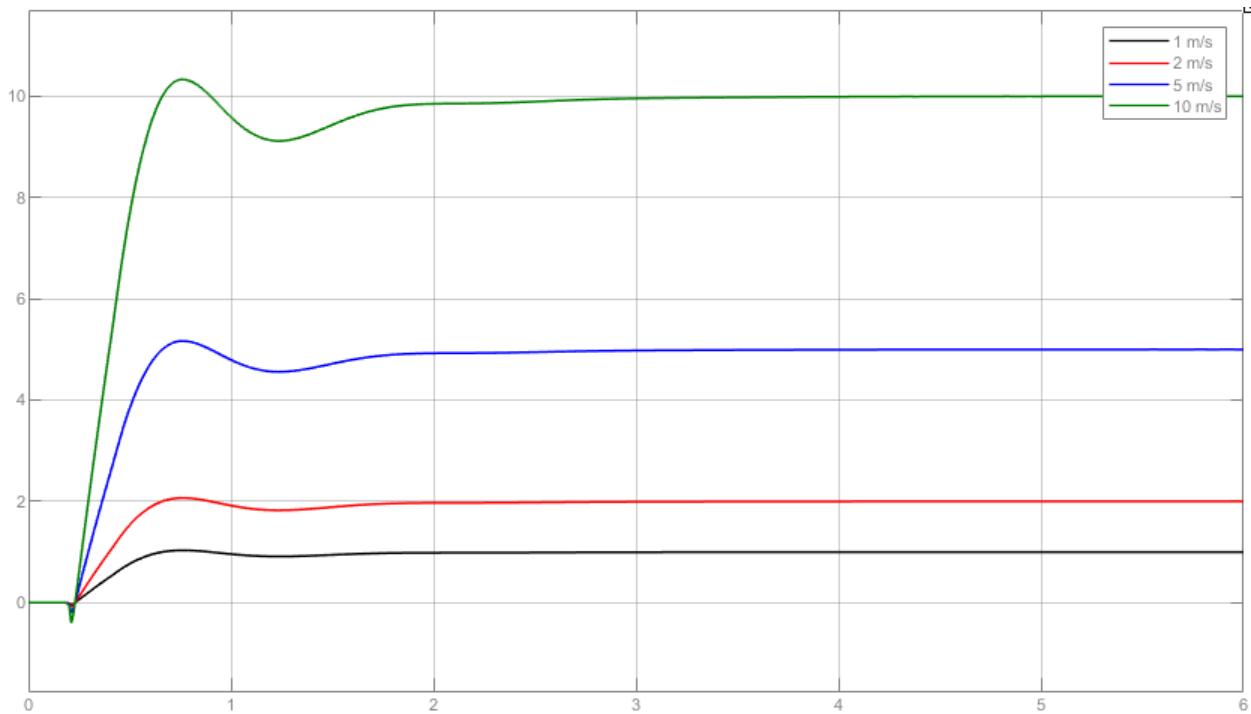
Fuente: Elaboración propia

### Simulación del control

Después del diseño de control realizado dentro de la plataforma Simulink, se realizaron pruebas del comportamiento del sistema en condiciones normales a distintas

velocidades. El objetivo de este control es poder mantener de forma apropiada al vehículo dentro de un rango de velocidad deseado, este está comprendido entre 1 y 12 metros por segundo. Si bien, el vehículo es capaz de llegar a más velocidad, se dispuso este rango debido a la velocidad de muestreo del controlador y del encoder. Se hicieron pruebas para los valores de 1, 2, 5 y 10 metros por segundo, el comportamiento obtenido con cada velocidad se puede observar en la Figura 45, el análisis de los valores de estas curvas se muestran en la Tabla 5. Considerando el uso de este control, el de ser utilizado para impulsar el vehículo autónomo a escala Aguara'i dentro de una pista a velocidades de hasta 12 m/s, valores obtenidos en el análisis cumplen con lo requerido para esta utilidad.

Figura 45: Respuesta del sistema a 1, 2, 5 y 10 m/s.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5: Valores del comportamiento del control

<b>Velocidad</b>	<b>1 m/s</b>	<b>2 m/s</b>	<b>5 m/s</b>	<b>10 m/s</b>
Tiempo de crecimiento $t_r$	0.3168 s	0.3218 s	0.3070 s	0.2878 s
Tiempo de establecimiento $t_s$	2.0027 s	2.0208 s	2.014 s	2.0327 s
Sobreimpulso $P_o$	3.3172 m/s	3.285 %	3.296 %	3.312 %
Pico P	1.0331 m/s	2.0657 m/s	5.1648 m/s	10.3312 m/s

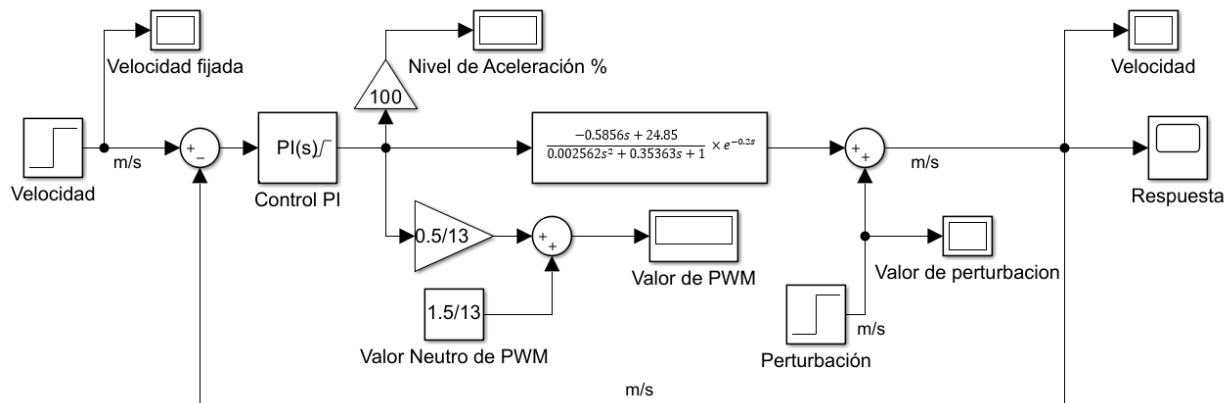
Fuente: Elaboración propia.

### **Simulación del control ante perturbaciones externas**

Previendo variaciones de velocidad debido a las condiciones de la pista en donde se desplaza el vehículo, ya sea por una pendiente o una elevación, se simularon condiciones de aceleración y desaceleración no deseadas. Para ello, en la simulación se introdujeron perturbaciones de distintos valores y se analizaron las respuestas.

Se analizó una aceleración no deseada, para ello se simuló el desplazamiento del vehículo cuesta abajo en una pendiente. Para este análisis, como se ve en la Figura 46, se añadió como perturbación un impulso unitario que disminuya la velocidad con relación a la fijada con el objetivo de observar la reacción del control ante esta variación de velocidad, específicamente el tiempo que le lleva al control tomar acción ante la velocidad y estabilizarla a la velocidad fijada con un error del 10%. A este tiempo le llamaremos tiempo de reacción.

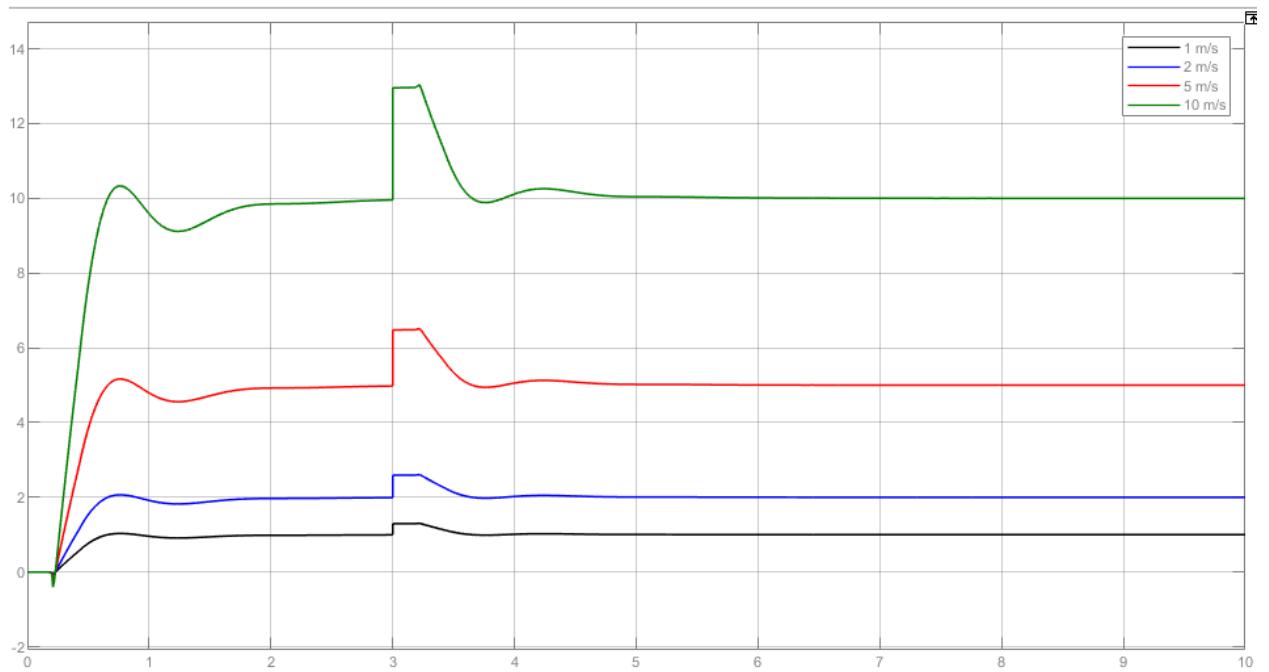
Figura 46: Esquema de control con perturbación



Fuente: Elaboración propia.

Se estableció un valor de perturbación del 30% de la velocidad fijada para 1, 2, 5 y 10 metros por segundo, como se puede observar en la Figura 47, el tiempo de reacción para ese valor de perturbación es de 0.456 segundos independientemente de la velocidad fijada.

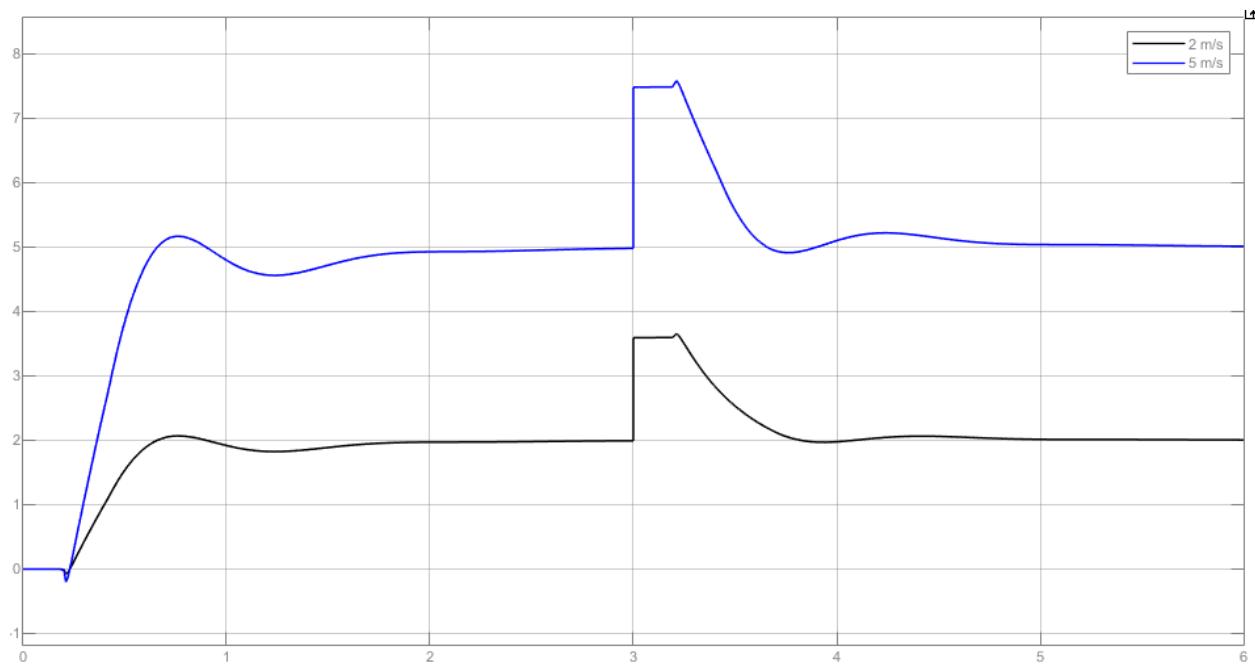
Figura 47: Respuesta con perturbación del 30%



Fuente: Elaboración propia.

Para conocer el comportamiento del sistema ante valores de perturbación más altos, se establecieron distintos valores de perturbación, 50% para una velocidad fijada de 5 metros por segundo y 80% para una velocidad de 2 metros por segundo. Como se observa en la Figura 48, se obtuvo un tiempo de respuesta de 0.513 segundos para una perturbación del 50% y 0.653 segundos para una perturbación del 80%.

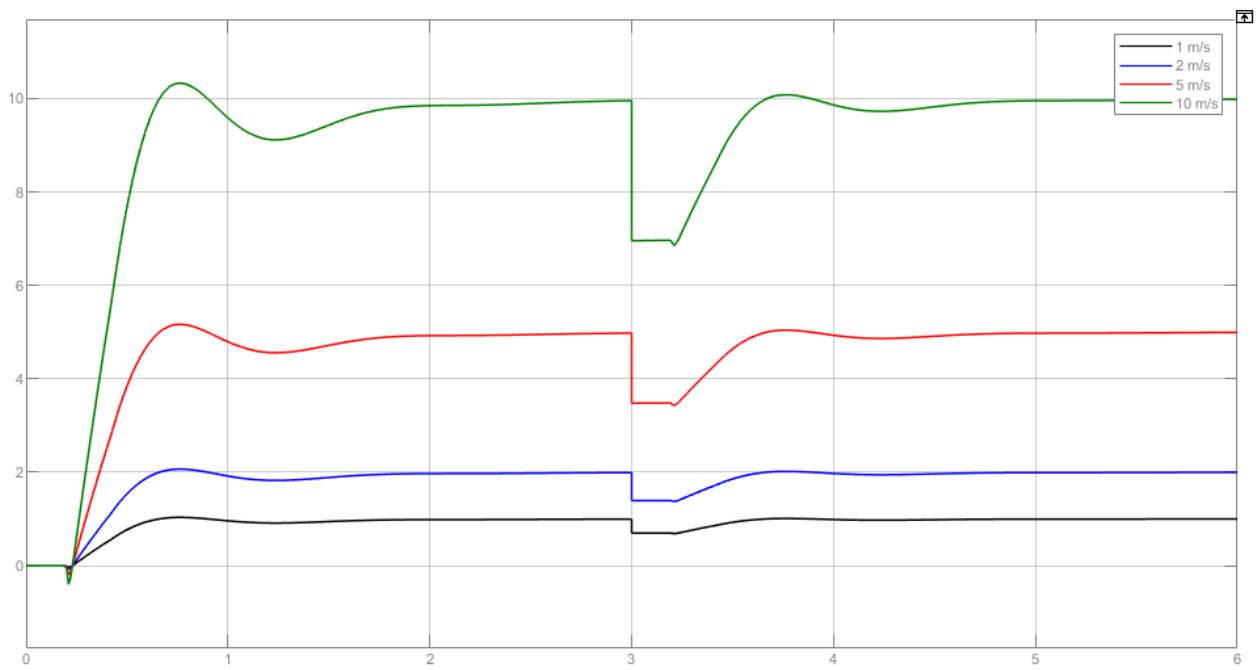
Figura 48: Respuesta con valor de perturbación del 30 y 50%



Fuente: Elaboración propia.

También se analizó el comportamiento del sistema ante una situación de desaceleración no deseada. Para ello se fijaron valores de perturbación negativos. Se estableció un valor de perturbación negativo del 30% de la velocidad fijada para 1, 2, 5 y 10 metros por segundo, como se puede observar en la Figura 49, el tiempo de reacción para ese valor de perturbación es de 0.462 segundos, al igual de lo que ocurre con una aceleración indeseada, cuando hay una desaceleración indeseada, el tiempo de reacción ante una perturbación fija es independientemente de la velocidad fijada.

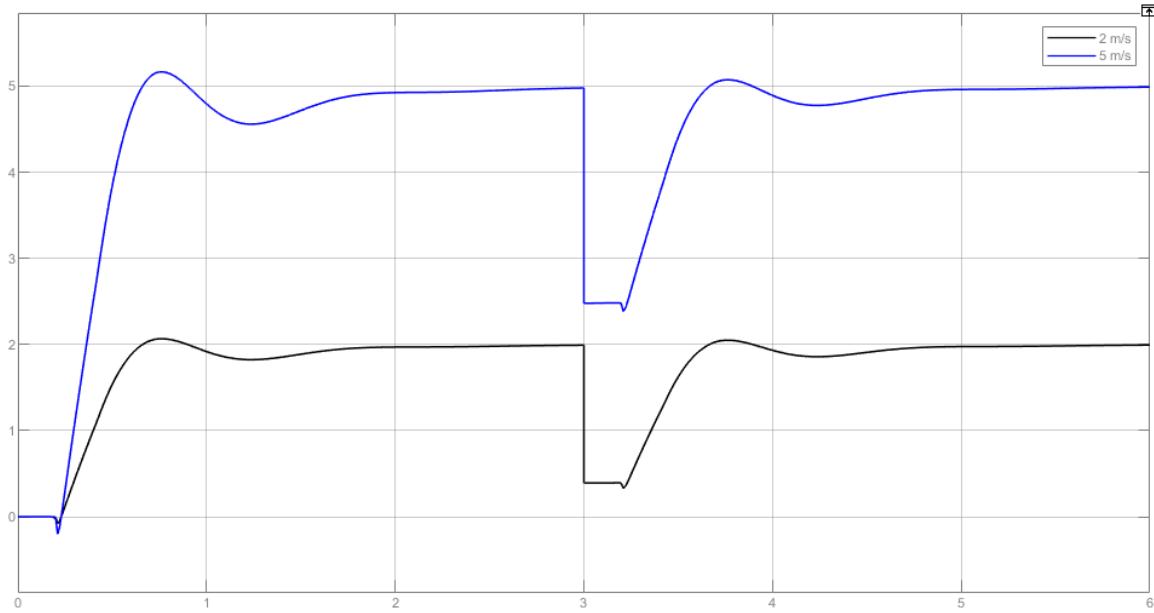
Figura 49: Respuesta con perturbación negativa del 30%



Fuente: Elaboración propia.

Como se puede observar en la Figura 50, para la perturbación negativa del 50%, el sistema tiene un tiempo de reacción de 0.557 segundos y de 0.588 segundos para una perturbación negativa del 80%.

Figura 50: Respuesta con valor de perturbación negativa del 30 y 50%



Fuente: Elaboración propia.

Tras estos análisis de perturbación de la velocidad, ya sea con una aceleración o desaceleración no deseada, se concluye que el sistema de control es capaz de hacer frente a estas situaciones y mantener la velocidad fijada. En la siguiente Tabla 6 se pueden observar que el tiempo de reacción del sistema oscila entre 0.456 y 0.653 segundos, considerando el propósito del control, estos valores cumplen con el objetivo.

Tabla 6: Tiempo de reacción del sistema ante perturbaciones

<b>Valor de la perturbación con relación a la velocidad fijada</b>	<b>Tiempo de Reacción Aceleración</b>	<b>Tiempo de Reacción Desaceleración</b>
30%	0.456 s	0.462 s
50%	0.513 s	0.557 s
80%	0.653 s	0.582 s

Fuente: Elaboración propia.

## **Capítulo 6**

### **Implementación, Pruebas y Resultados**

#### **Resumen**

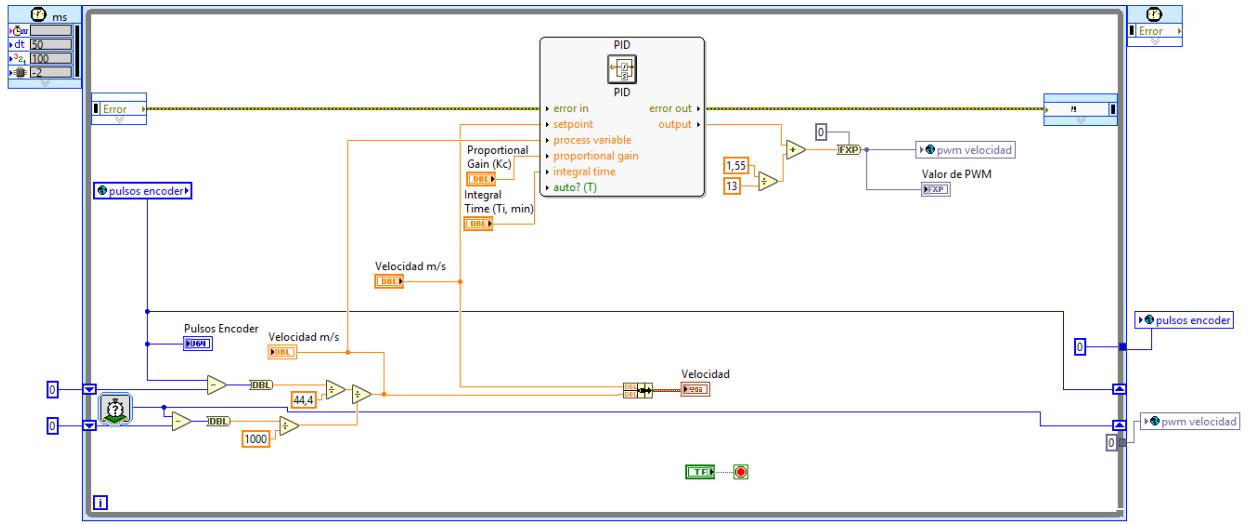
*Este capítulo trata sobre la implementación y las pruebas físicas realizadas al sistema de control diseñado en el capítulo anterior.*

#### **Diseño del Software de Control**

Para la implementación del control diseñado, se utilizó como controlador el dispositivo embebido myRIO, por este motivo y para simplificar la programación, el software de control fue desarrollado en la plataforma LabVIEW.

Este software, aparte de controlar, debe ser capaz de interactuar con otros softwares para poder ser utilizado en una navegación autónoma, para ello se utilizaron variables globales en un proyecto de LabVIEW. El diagrama de bloques se puede ver en la Figura 51.

Figura 51: Diagrama de bloques del software de control



Fuente: Elaboración propia.

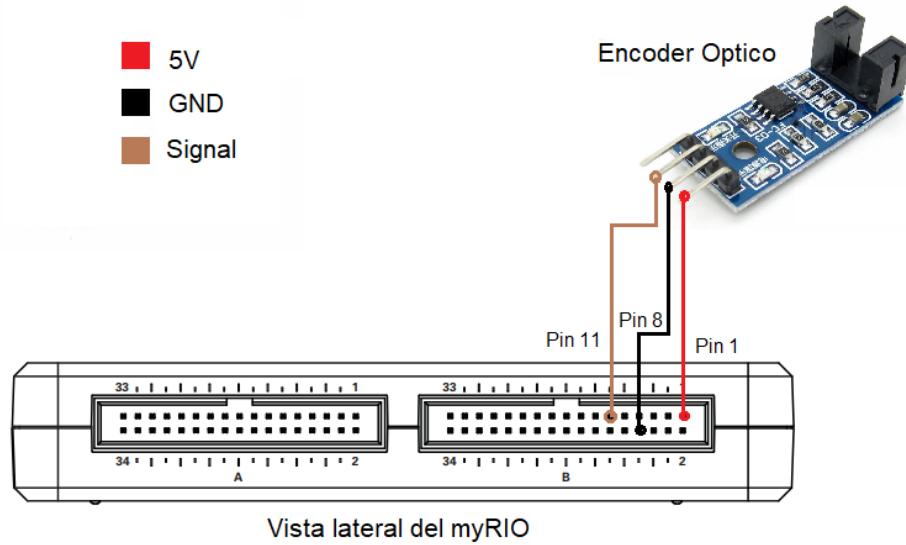
La programación está hecha dentro de una estructura de repetición con un periodo de actualización de 50 milisegundos. El dato de entrada es la cantidad de pulsos del encoder, para que esta información sea interpretada como la velocidad del vehículo, se hizo un algoritmo capaz de calcular la cantidad de pulsos por segundo y a partir de ello la velocidad en m/s. Para calcular la cantidad de pulsos del encoder para un recorrido de 1 metro, se despeja la variable PE (Pulsos del Encoder) de la Ecuación 9 y se le da el valor de 1 metro por segundo a la velocidad. Ver Ecuación 13

$$PE = \frac{43 \times 4 \times 1}{13 \times \pi \times 0.095} \approx 44.4 \text{ pulsos por segundo}$$

Ecuación 13

Una vez obtenido este valor, para conocer la velocidad del vehículo en metros por segundo, se dividió la cantidad de pulsos obtenidos por segundo entre la cantidad de pulsos calculada para 1 metro (44.4 pulsos). La conexión del encoder con el controlador se puede ver en la Figura 52.

Figura 52: Esquema de conexión encoder/myRIO



Fuente: Elaboración propia.

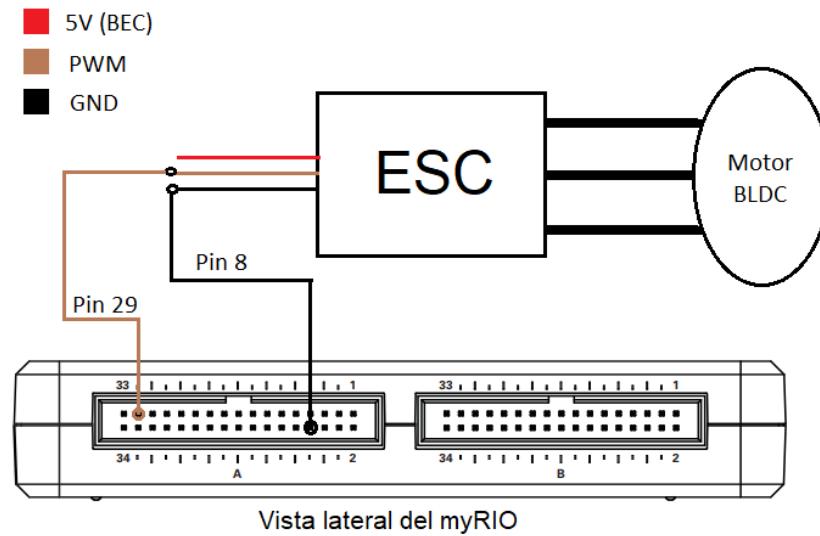
La configuración del bloque de control PID se realizó de la siguiente manera:

- Se fijó el rango de valores de salida, para el límite inferior, se estableció el valor 0 que no representa ningún cambio al sistema, y para el límite superior se estableció el valor 0.03846153846, que corresponde al máximo valor de PWM requerido para poder controlar el ESC.
- En el setpoint se introdujo el valor de la velocidad del vehículo en metros por segundo.
- Se establecieron los valores de los parámetros de control, la constante proporcional  $k_c = 0.04477$  y la constante de tiempo integral en minutos,  $T_i$ , min = 0.008726666
- Se colocó un control para fijar el punto de trabajo (setpoint).

Por último, al valor obtenido a la salida del bloque de control PID se le sumo el valor 1.5/13 correspondiente al valor de PWM del punto neutro del ESC.

La señal PWM es emitida al ESC a través el puerto DIO09/PWM como se muestra en la Figura 53.

Figura 53: Esquema de conexión myRIO/ESC

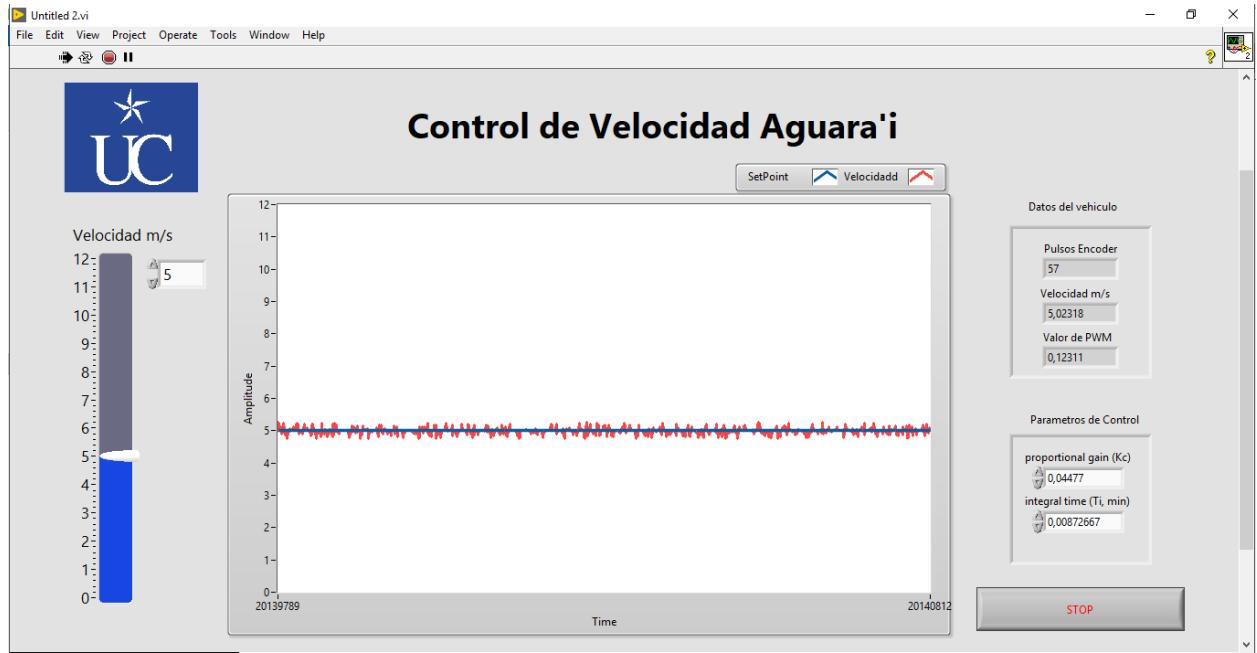


Fuente: Elaboración propia.

En el panel frontal, mostrado en la Figura 54, se dispuso un cuadro con los datos relevantes del vehículo, la cantidad de pulsos del encoder, la velocidad y el valor de la señal PWM y los parámetros de control para un eventual ajuste manual.

Se dispuso de un control del setpoint junto a un gráfico donde se pueden ver este setpoint y la velocidad actual del vehículo.

Figura 54: Panel Frontal de software de control

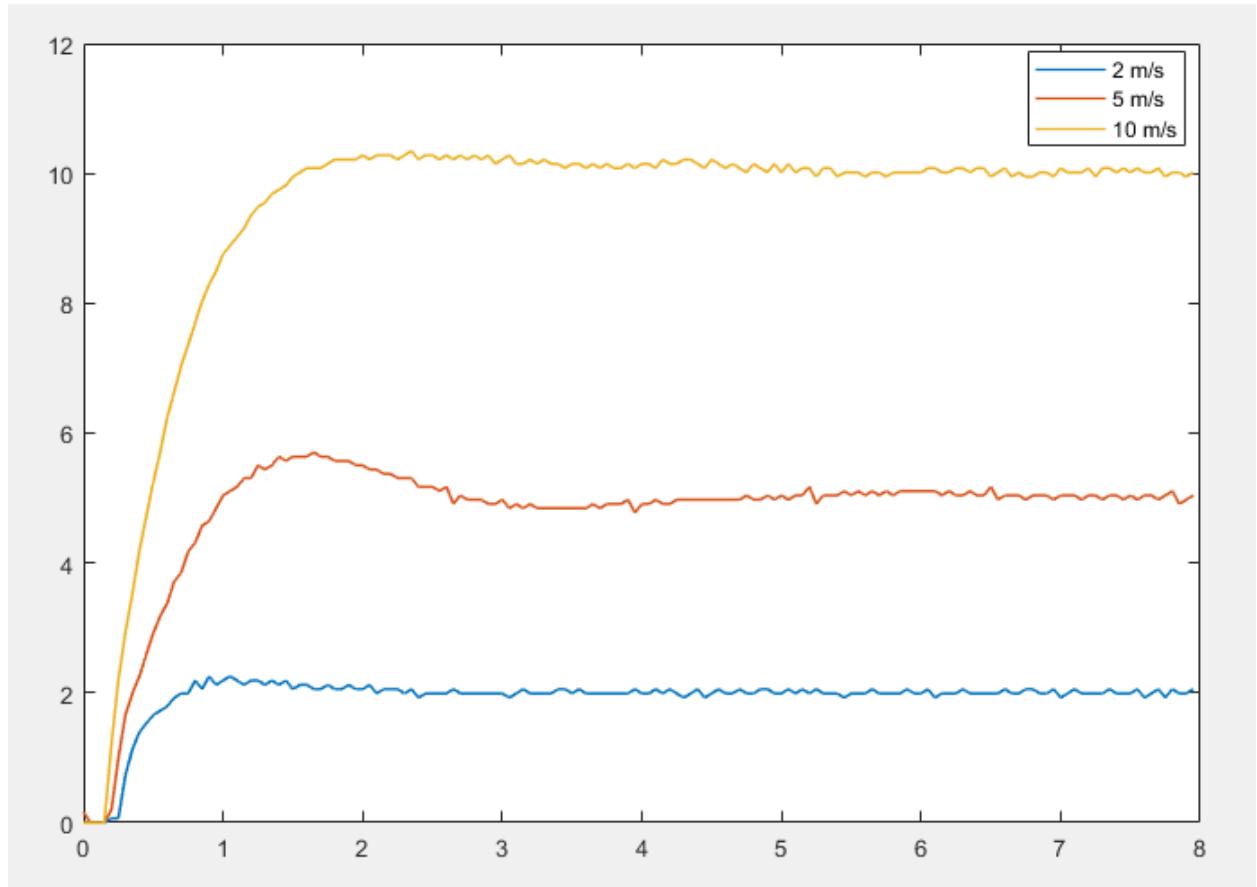


Fuente: Elaboración propia.

Una vez terminada la programación del software, se fijó el controlador en el vehículo y se hicieron las conexiones correspondientes con el ESC y el encoder. Se realizó una prueba a 5 m/s, y el sistema respondió como se esperaba, el vehículo empezó a moverse hasta alcanzar la velocidad fija, los datos obtenidos en la prueba se pueden observar en la Figura 54. Analizando el comportamiento de una forma preliminar, el control de velocidad funciona con éxito. Luego de observar el comportamiento preliminar, se recolectaron los datos de la velocidad para un análisis más profundo.

En la Figura 55 se observan los comportamientos del sistema a 2, 5 y 10 m/s, más abajo, en la Tabla 7 se detallan los parámetros del comportamiento. Como se puede apreciar en la tabla, hay una reacción diferente ante cada velocidad fijada. Esto es debido principalmente al ruido introducido por encoder, y segundo por la baja resolución de este, teniendo tan solo 4 pulsos por vuelta.

Figura 55: Comportamiento del vehículo a velocidades de 2, 5 y 10 m/s



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 7: Valores del comportamiento del vehículo

<b>Velocidad</b>	<b>2 m/s</b>	<b>5 m/s</b>	<b>10 m/s</b>
Tiempo de crecimiento $t_r$	0.3850 s	0.6484 s	0.905 s
Tiempo de establecimiento $t_s$	2.20172 s	4.050 s	3.1200 s
Sobreimpulso $P_o$	3.285 %	13.157 %	3.13 %
Pico P	2.0657 m/s	5.703 m/s	10.34 m/s

Fuente: Elaboración propia.

## **Comparación con las simulaciones**

El comportamiento obtenido en las simulaciones y en la implementación física tienen una cierta diferencia, esto se debe a distintos factores, en primer lugar, el control se diseñó en base a un modelo con un nivel de acercamiento del 86.22% al modelo real, en segundo lugar, el modelo se obtuvo haciendo pruebas sin carga inercial, para obtener el modelo, se hicieron girar las ruedas sin que tengan contacto con alguna superficie, es decir, sin fricción, en el momento de hacer la prueba, ya existía una carga inercial, las ruedas ya estaban apoyadas por una superficie y lograban desplazar el vehículo, y en tercer lugar, el ruido introducido por el encoder es variable para cada velocidad, por lo que representa un dato con errores al sistema de control y esto provoca una constante sobre corrección de la velocidad. A pesar de estas diferencias con la simulación, las pruebas realizadas cumplieron con lo esperado. Se probó el vehículo en distintos tipos de superficie logrando mantener una velocidad constante.

## **Conclusiones**

Para diseñar un buen sistema de control, resulta indispensable obtener un modelo matemático capaz de representar de forma correcta el funcionamiento de la planta a ser controlada.

El presente trabajo consistió en obtener un modelo matemático que represente el funcionamiento de un vehículo eléctrico a escala para luego aplicar ese modelo en el diseño de un control de velocidad.

Primeramente, se consideró obtener el modelo por el método tradicional, es decir obteniendo un modelo basado en la tracción y la dinámica del vehículo. En el método tradicional, se obtiene el modelo matemático del motor BLDC, encargado de darle tracción al vehículo y se relaciona con las ecuaciones que describen las fuerzas que se oponen al movimiento del vehículo, como el arrastre aerodinámico y la resistencia de rodadura, de modo a obtener un modelo con todas las fuerzas que inciden en el movimiento del vehículo.

También se consideró obtener un modelo a través del método “caja negra”, en donde se analiza el comportamiento de un sistema a través de las señales de entrada y salida sin adentrarse en su funcionamiento interno.

Debido al tiempo de implementación y dificultad de hallar de forma precisa los parámetros del motor BLDC, se optó por obtener un modelo a través del método de “caja negra”, donde se consideró como parte de una “caja negra” el comportamiento del ESC, el motor BLDC y la transmisión del vehículo. Siguiendo este método, se excita la entrada del sistema con una señal PWM conocida y se adquirió la velocidad de las ruedas en metros por segundo a la salida, una vez adquiridos los datos, se utilizó la herramienta *System Identification* de MATLAB para obtener una

función de transferencia que se aproxime a la curva obtenida en la adquisición. Como el comportamiento de un motor BLDC corresponde con una ecuación de segundo orden, se configuró la herramienta para que aproxime a una función de transferencia de este tipo.

Por otra parte, se hizo un análisis preliminar del efecto del comportamiento dinámico, en donde se concluyó que, debido al tamaño y masa pequeños del vehículo, el efecto del arrastre aerodinámico y la resistencia de rodadura son despreciables para el diseño del control de velocidad.

Con la función de transferencia obtenida, se diseñó, se sintonizó y se simuló un control PI en la plataforma MATLAB y Simulink, las simulaciones arrojaron resultados esperados, inclusive ante la presencia de perturbaciones externas, como una aceleración o desaceleración no deseada provocada por la inclinación de la superficie en donde se desplaza el vehículo.

Para la implementación del control se utilizó el controlador myRIO, y el software fue diseñado en la plataforma LabVIEW.

Una vez implementado el control, se hicieron comparaciones con las simulaciones, si bien, el comportamiento real difiere un poco del comportamiento obtenido en las simulaciones, el control cumple con la función requerida de desplazar el vehículo a la velocidad solicitada y tiene la rapidez suficiente para mantener o variar la velocidad según la petición del usuario o algún factor externo.

## **Trabajos Futuros**

- Modelado matemático del vehículo eléctrico a escala Aguara'i con todos los subsistemas (ESC, motor BLDC, batería, transmisión, dirección)
- Diseño de control de predictivo de velocidad y dirección para un vehículo eléctrico a escala 1:8
- Diseño de un control electrónico de velocidad (ESC) para un motor BLDC



## Referencias

- Anghel, A. G. (s.f.). *ESC - Control electrónico de velocidad.* Obtenido de [http://www.electrooobs.com/circuitos\\_tut4.php](http://www.electrooobs.com/circuitos_tut4.php)
- Arafet Padilla, P., Chang Mumañ, F., Torres Alberto, M., & Dominguez Abreu, H. (2008). *Métodos de Identificación Dinámica.*
- Baldursson, S. (2005). *BLDC Motor Modelling and Controll - A Matlab/Simulink Implementation.* Göteborg.
- Carreño Aguillon, E. d., Vacca Melo, E. A., & Lugo Ariza, I. (2011). Diseño y fabricación de un vehículo autónomo impulsado por energía solar. *Tecnura*, 91-106.
- Cuervo Fernandez, D., & Herrero de Lucas, L. C. (2016). *Programacion de Arduino mediante MATLAB/Simulink. Aplicacion al control de velocidad de motores BLDC.* Valladolid.
- FVPMax. (s.f.). *Variador Electrónico (ESC).* Obtenido de <http://fpvmax.com/2016/12/21/variador-electronico-esc-funciona/>
- Guerrero Moral, G. A., Jara Ten Kathen, M. C., Bogado Arce, A. D., Pacheco Viana, E. E., & Franco Santacruz, J. M. (2018). *Development of an autonomous vehicle at a 1:8 scale - NI*

*Community.* Obtenido de <https://forums.ni.com/t5/LabVIEW-Student-Design/nb-sp-Development-of-an-autonomous-vehicle-at-a-nb-sp-1-8-scale/ta-p/3898677?profile.language=es>

Guerrero Moral, G. A., Jara Ten Kathen, M. C., Pacheco Viana, E. E., Bogado Arce, A. D., & Franco Santacruz, J. M. (2018). Desarrollo de un vehículo autónomo a escala 1:8.

Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, P. (2010). *Metodología de la investigación* (Quinta ed.). Mexico: McGraw-Hill.

Husain, I. (2003). *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*.

Iyengar, D., & Peters, D. L. (2015). Development of a Miniaturized Autonomous Vehicle: Modification of a 1:8 Scale RC Car for Autonomous Operation. *ASME 2015 Dynamic Systems and Control Conference*. Columbus, OH.

Martínez, H. V. (2009). *Análisis, Modelado y Simulación en Computadora del Motor de Corriente Directa Tipo Serie*. Oaxaca.

MathWorks. (s.f.). *System Identification Toolbox* - *MATLAB*. Obtenido de <https://www.mathworks.com/products/sysid.html>

Medel Juárez, J. d., Zagaceta Alvarez, M. T., & Palma Orozco, R. (2014). Identificación con estimación para sistemas tipo caja negra. *Revista de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia*, 35-46.

Osorio Camargo, D. M., & Florez Roa, J. C. (2009). *Obtención del modelo no paramétrico de un sistema por el método de identificación de respuesta en frecuencia*. Bucaramanga.

Servan Montoya, L. J., & Salvador Reyes, C. (s.f.). *Sistema de control II: Sistema de segundo orden: Lazo Cerrado*. Obtenido de <http://syscontrol2.blogspot.com/2007/10/sistemas-de-segundo-orden-lazo-cerrado.html>

Soylu, S. (2011). Electric Vehicles - Modelling and Simulations.

*Techopedia*. (s.f.). Obtenido de <https://www.techopedia.com/definition/30056/autonomous-car>

## **Apéndices**

## **Apéndice A**

**TDP presentado para la competencia RoboCar Race 2018**

# Desarrollo de un vehículo autónomo a escala 1:8

Gregorio Ariel Guerrero Moral  
Centro de Tecnologías de la  
Información y Comunicación  
Parque Tecnológico de Itaipú -  
Paraguay  
Hernandarias, Paraguay  
ariel.guerrero@pti.org.py

Ariel David Bogado Arce  
Centro de Investigación en Ciencias,  
Tecnología e Innovación Avanzada  
Universidad Católica "Nuestra Señora  
de la Asunción"  
Hernandarias, Paraguay  
ariel.bogado@uc.edu.py

Micaela Carolina Jara Ten Kathen  
Centro de Investigación en Ciencias,  
Tecnología e Innovación Avanzada  
Universidad Católica "Nuestra Señora  
de la Asunción"  
Hernandarias, Paraguay  
micaela.jara@uc.edu.py

Jesús María Franco Santacruz  
Centro de Investigación en Ciencias,  
Tecnología e Innovación Avanzada  
Universidad Católica "Nuestra Señora  
de la Asunción"  
Hernandarias, Paraguay  
jesus.franco@uc.edu.py

Erid Eulogio Pacheco Viana  
Centro de Investigación en Ciencias,  
Tecnología e Innovación Avanzada  
Universidad Católica "Nuestra Señora  
de la Asunción"  
Hernandarias, Paraguay  
erid.pacheco@uc.edu.py

**Resumen**— El desarrollo de un vehículo autónomo es objeto de amplio estudio por muchos investigadores [1]. Uno de los enfoques de estudio consiste en el empleo de modelos físicos a escala cuya construcción es el objeto de este artículo. Para este propósito un auto eléctrico a escala 1:8 remotamente controlado es modificado. Se utiliza un myRIO para las tareas de adquisición de datos (odómetro, acelerómetro, magnetómetro, giroscopio, gps), y las de actuación. Otra tarea que realiza es fusionar los datos de los sensores de manera tal a que la información de posición y orientación pueda ser utilizada para la toma de decisión de navegación. Estos datos pueden ser remitidos a una notebook ejecutando una aplicación en LabVIEW. Esta estación de trabajo provee una interfaz hombre máquina al operador para visualizar los parámetros de navegación.

**Palabras clave**— *vehículo autónomo, IMU, GPS, algoritmo de navegación, kalman*

## I. INTRODUCCIÓN

Los vehículos autónomos han atraído una gran cantidad de interés en investigación en los últimos años, así como importantes esfuerzos de desarrollo de la industria. En 2007, DARPA ha ejecutado Urban Grand Challenge [2], con las entradas de varias universidades documentadas en muchas publicaciones diferentes, por ejemplo, [3, 4].

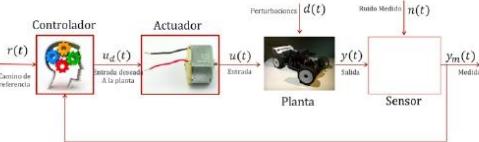
Muchas empresas del sector automotriz poseen su propia división dedicadas a la investigación de vehículos autónomos y recientemente otras empresas que no son del sector tales como NVIDIA, APPLE, GOOGLE, YANDEX, BIADU han comenzado a desarrollar su propio vehículo autónomo. Proyectos que han sido ampliamente reportado en las noticias [5, 6]. Si bien se han realizado importantes esfuerzos en este campo, aún quedan muchos problemas por resolver, entre ellos, los problemas de detección, los diferentes tipos y niveles de control y la interacción de los vehículos autónomos con su entorno.

Un vehículo autónomo, es un vehículo capaz de imitar las capacidades humanas de manejo y control. El conductor

podrá elegir el destino, pero no se le requiere para activar ninguna operación mecánica del vehículo.

Los vehículos autónomos perciben el entorno mediante sensores tales como láser, radar, lidar, sistema de posicionamiento global y visión computarizada. Los sistemas avanzados de control interpretan la información para identificar la ruta apropiada, así como los obstáculos y la señalización relevante. Los vehículos autónomos generalmente son capaces de recorrer carreteras previamente programadas y requieren una reproducción cartográfica del terreno, con lo cual si una ruta no está recogida por el sistema se puede dar el caso que no pueda avanzar de forma coherente y normal.

## II. ARQUITECTURA HARDWARE DEL SISTEMA



**Figura 1 - Modelo matemático de un vehículo autónomo**

En la literatura consultada [7] se ha verificado la necesidad de comprender cómo el modelo de la planta, así como sus restricciones, así como la compresión de los marcos referenciales que utilizados por un observador para medir la posición y otras medidas físicas de un sistema físico. Se ha realizado la identificación de la planta utilizando una operación *off-line* (acoplamiento indirecto), en el cual se almacenan los datos adquiridos y posteriormente se transfieren al ordenador para ser evaluados y procesados.

El sistema a ser implementado consta de:

- a. Vehículo Autónomo a escala 1:8: Chasis modificado de un auto eléctrico miniaturizado en el cual se adapta un myRIO 1900 así como los sensores y actuadores requeridos para navegación

- inercial (IMU+GPS). En esta plataforma se ejecutarán los algoritmos que permitan determinar la información de posición y orientación con base a los sensores. Así mismo permitirá la adquisición de datos de los sensores, ejecutar el algoritmo de navegación seleccionado y determinar las señales de control a los actuadores.
- b. Estación Base: Para configuración de los parámetros de navegación (waypoints) y visualización de estado de los sensores.

La plataforma hardware consta de los siguientes elementos:

#### A. Crisus Crisus A1OP v2.1

Esta placa electrónica tipo MARG (Magnetic, Angular rate and Gravity) tiene incorporado varios sensores como un giroscopio/acerclómetro MPU6050 de 6 ejes, un altímetro de alta precisión MS5611-01BA01, y un magnetómetro HMC5883L de 3 ejes. El microcontrolador integrado es un ATMEGA 2560 de 8 bits, 16 MHz y se comunica con los dispositivos externos mediante los pines y puertos seriales.

#### B. Sensor: MPU6050 : Acelerómetro y giroscopio

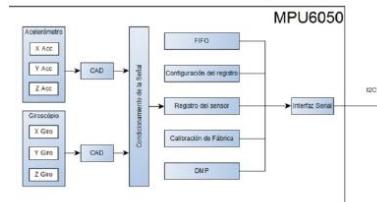


Figura 2 - Arquitectura del MPU 6050 [8]

En la Figura 2 se presenta la arquitectura del MPU6050 [9], el sensor posee conversores analógicos digitales para cada uno de los ejes y así obtener los valores en simultáneo con un rango de hasta  $\pm 2000^\circ$  por segundo en el caso del giroscopio y de  $\pm 16g$  para el acelerómetro. A continuación, los datos se filtran de acuerdo a la configuración preestablecida y la calibración de fábrica, para pasar luego al registro del sensor, los datos pueden ser accedidos por el DMP o por el usuario. El DMP actualiza los datos del FIFO leídos a una frecuencia determinada con el fin de evitar el desbordamiento. La interfaz serial de comunicación del MPU6050 es el protocolo de comunicación I2C.

#### C. Sensor: HMC5883L: Magnetómetro integrado

El magnetómetro integrado en el controlador es el HMC5883L de Honeywell, el sensor triaxial tiene un campo de operación de -8 a +8 gauss lo que de esta manera se obtiene la dirección real del norte geográfico considerando la inclinación de 15 grados que hay en la zona. La interfaz serial del HMC5883L cumple el protocolo de comunicación I2C a 400 kHz.

#### D. Sensor de velocidad: Encoder FC03

Voltaje de Operación: 3.3V - 5V DC

Salidas: Analógica y Digital TTL

Sensor: MOCH22A

Modelo Placa: FC-03/FZ0888

Tipo de emisor: Fotodiodo IR

Tipo de detector: Fototransistor  
Longitud de onda del emisor: 950 nm (infrarrojo)  
Peso: 8 g  
Dimensiones: 32\*14\*7 mm  
Ranura de 5 mm  
Comparador Opamp: LMS393  
Led indicador de alimentación  
Led indicador de pulso  
Salida TTL ON: sensor bloqueado  
Salida TTL OFF: sensor desbloqueado

Conocer la posición o velocidad de un motor es muy importante en robótica, para lo cual existen diversas alternativas, siendo una de las más comunes el uso de encoders de tipo óptico. Los encoders incrementales ópticos realizan la medición de movimiento con el uso de un haz de luz infrarrojo que se ve interrumpido por las ranuras de un disco acoplado al eje. La cantidad de ranuras por vuelta determinará la precisión del encoder, en este caso de 4 pulsos por vuelta.

#### E. Actuador: Servo digital para dirección HB-5514 14kg



Figura 3 - Servo digital para dirección

Es un dispositivo actuador que tiene la capacidad de ubicarse en cualquier posición dentro de su rango de operación, y de mantenerse estable en dicha posición.

#### F. Actuador: Motor BLDC 2200KV (rmp/V)

Son motores síncronos alimentados por CC través de un inversor o fuente de alimentación de commutación que produce una corriente eléctrica de CA para controlar cada fase del motor a través de un controlador de circuito cerrado. El controlador proporciona pulsos de corriente a los devanados del motor que controlan la velocidad y el par del motor.

#### G. Actuador: Control de velocidad ESC 100A

Un control de velocidad electrónico o ESC es un circuito electrónico que controla y regula la velocidad de un motor eléctrico. También puede proporcionar la inversión de giro del motor y el frenado dinámico. Los controles electrónicos de velocidad en miniatura se utilizan en modelos controlados por radio y con alimentación eléctrica. Los vehículos eléctricos de tamaño completo también tienen sistemas para controlar la velocidad de sus motores de accionamiento.

H. Planta: Chasis Haboo Hyper VS 1/8



Figura 4 - Chasis

Dimensión: 460 mm. x 306 mm. x 140 mm.  
Distancia entre ejes: 322 mm.  
Peso: 4720 g  
Batería para myRIO: LI-PO 2S 3000 mAh 7.4 v  
Batería para motor: LI-PO 4S 5400 mAh 14.8 v  
Chasis de aluminio anodizado.  
Torreta de aluminio delantera 4mm y trasera 3mm  
Soporte de suspensión reforzado  
Soporte de baterías con velcro  
Amortiguadores Big Bore de 17mm

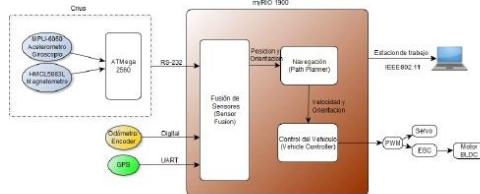


Figura 5 - Arquitectura del Hardware

### III. ARQUITECTURA SOFTWARE

En esta sección se enfocará más en el tratamiento de los datos de los sensores para obtener los datos de posición y orientación, y la utilización de los mismos para el cálculo de la trayectoria de recorrido.

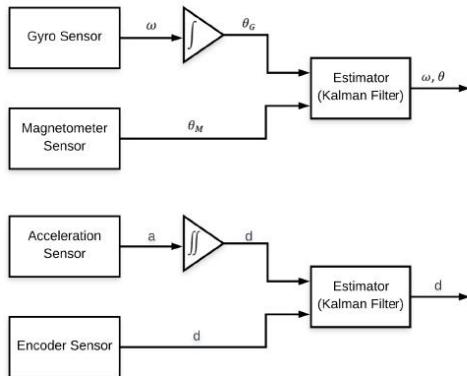


Figura 6 - Visión general del Sistema de fusión

#### A. Sensor Fusión

Se utilizaron señales de los sensores para mejorar y corregir la medición de la posición propia del vehículo

autónomo de 4 ruedas para obtener una estimación de posición más confiable. A partir de esto, calculamos la estimación de la posición y redujimos los errores sistemáticos y no sistemáticos durante las pruebas y tuvimos éxito en estimar la desviación del sesgo del giro. La herramienta básica aquí es un filtro de Kalman.

En la Figura 6,  $\omega$  es el dato de la velocidad angular proveniente del giroscopio,  $a$  es la aceleración del acelerómetro y  $\theta$  es el ángulo referente al norte magnético obtenido del magnetómetro.

De los estimadores, se obtienen la distancia recorrida y la orientación, para luego obtener las coordenadas (x,y). Se previo la corrección de la posición absoluta a partir de un GPS (Global Position Systems), pero no fue implementado.

#### B. Path Planner

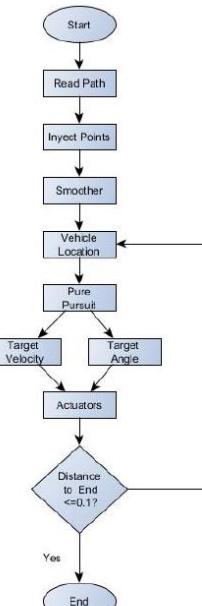


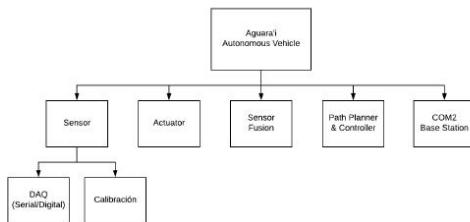
Figura 7 - Planificador de ruta

Este módulo se encarga de llevar al vehículo autónomo desde una posición inicial a una final siguiendo una trayectoria. El algoritmo utilizado es el denominado de persecución pura (pure pursuit algorithm [14]). A efectos prácticos se ha recurrido a la implementación del “Team 1712” [15] y modificado según el requerimiento.

Con este algoritmo se consigue determinar la velocidad objetivo del vehículo autónomo dependiendo de la curvatura del segmento de la trayectoria en el cual se encuentra el vehículo autónomo, como también, establecer la dirección a la cual debe dirigirse conociendo su posición actual y un punto objetivo llamado “Look Ahead Point”.

Para obtener mayor precisión en el cálculo de la velocidad y la curvatura, se inyectaron puntos a la trayectoria original obteniendo de esta manera puntos más

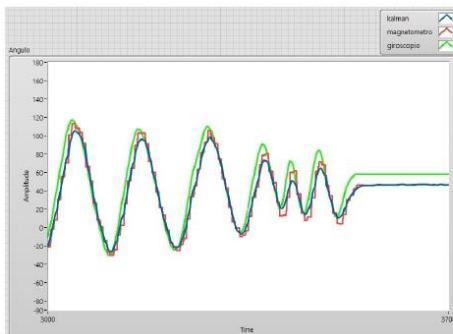
cercaos, para luego pasarlos por una etapa de suavizado y lograr la continuidad en el trayecto.



**Figura 8 - Arquitectura del Sistema**

#### IV. PRUEBAS REALIZADAS

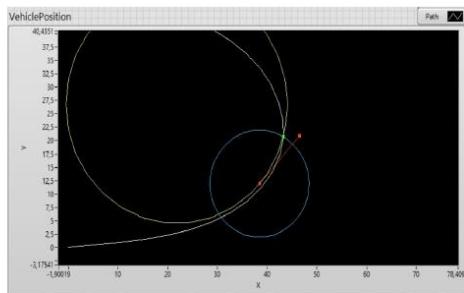
##### A. FUSIÓN DE SENsoRES



**Figura 9 - Filtro de Kalman para la orientación**

En la Figura 9, se muestra el resultado de la fusión del giroscopio y el magnetómetro. En ella, se puede observar que el magnetómetro no posee buena respuesta a frecuencias altas, en cambio, a baja frecuencia, la respuesta es buena. Por otro lado, el comportamiento de la curva del giroscopio es suave, pero el error acumulativo aumenta y no hay manera de corregirlo sin realizar la fusión de los sensores.

##### B. PATH PLANNER



**Figura 10 - Simulación del algoritmo persecución pura**

Durante las pruebas se evidenció que el algoritmo de persecución pura arroja buenos resultados en la determinación de seguimiento de la trayectoria

establecida. Debido a su robustez, esta permite que se tengan algunos errores en la adquisición de los datos de los sensores o en la sintonización del control de velocidad y dirección, sin embargo como tiene en cuenta una realimentación de un estado anterior, permite actualizar los actuadores con valores coherentes por lo cual se van atenuando los pequeños errores de orientación y posición.

#### CONCLUSIONES

Se ha modificado el chasis de un vehículo eléctrico a escala 1:8 e implementado un algoritmo de navegación basado en la estrategia denominada de persecución pura. La plataforma utilizada para estos trabajos a sido el myRIO 1900 con el entorno de desarrollo de LabVIEW. El trabajo se ha implementado en dos meses y medio, utilizando ejemplos de aplicaciones de National Instruments en conjunto con librerías del “Team 1712”, lo cual nos ha permitido realizar las primeras pruebas operativas del prototipo, con un error aceptable.

El proyecto recalca el valor pedagógico de la enseñanza basada en retos, permitiendo a los alumnos adquirir la experiencia de trabajo en equipo, en un entorno multidisciplinario así como la experiencia de reutilización de código de terceros. También ha permitido que los alumnos comparen los conceptos desarrollados en distintas materias de la universidad al calibrar los distintos sensores, a mejorar la lectura minimizando los errores mediante la implementación del filtro de kalman.

La plataforma de trabajo seleccionada también permitió que alumnos de diferentes años puedan acceder al mismo conocimiento, desde el punto de vista de implementación de un algoritmo, al permitirles obtener la certificación CLAD, con lo cual no solo han aprendido el lenguaje de programación, también se han enfocado en la metodología de trabajo en un proyecto específico.

#### RECONOCIMIENTOS

Se agradece al apoyo de las siguientes instituciones: Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”, Centro de Investigación en Ciencias, Tecnología e Innovación Avanzada, Fundación Parque Tecnológico Itaipú – Paraguay.

#### REFERENCIAS

- [1] Iyengar, D., & Peters, D. L. (2015, October). Development of a miniaturized autonomous vehicle: Modification of a 1:18 scale rc car for autonomous operation. In ASME 2015 Dynamic Systems and Control Conference (pp. V003T50A008-V003T50A008). American Society of Mechanical Engineers.
- [2] McBride, J. (2007). Darpa urban challenge.
- [3] Urmson, C., Bagnell, J. A., Baker, C. R., Hebert, M., Kelly, A., Rajkumar, R., & Team, D. U. C. (2007). Tartan racing: A multi-modal approach to the DARPA.
- [4] Montemerlo, M., Becker, J., Bhat, S., Dahlkamp, H., Dolgov, D., Etinger, S., & Thrun, S. (2008). Junior: The Stanford entry in the Urban Challenge. Journal of field Robotics, 25(9), 569-597
- [5] The Economist. (2013). Look, no hands. Extraído de <http://www.economist.com/news/special-report/21576224-one-day-every-car-may-come-invisible chauffeur-look-no-hands>

- [6] Dockterman, E. (2015). Google's self-driving car may come with airbags on the outside. Time Magazine. Extraido de <http://time.com/3758446/googles-self-driving-car-may-come-with-airbags-on-the-outside/>
- [7] The DuckieTown project. (2017). Extraido de <https://www.duckietown.org/>
- [8] Benítez, W., & Bogado, Y. (2015). Desarrollo de un prototipo de VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado) para inspección visual de líneas eléctricas aéreas (Tesis de Grado). Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción" Campus Alto Paraná. Paraguay.
- [9] MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4. Sunnyvale, California, Estados Unidos. Extraido de [https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050\\_Datasheet\\_V3%204.pdf](https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050_Datasheet_V3%204.pdf)
- [10] EureCar, KAIST Self-Driving car. Extraido de <https://forums.ni.com/t5/Projects-Products/EureCar-KAIST-Self-Driving-car/ta-p/3517884>
- [11] Kok, M., Hol, J. D., & Schön, T. B. (2017). Using inertial sensors for position and orientation estimation. *arXiv preprint arXiv:1704.00053*.
- [12] Ozyagcilar, T. (2012). Implementing a tilt-compensated eCompass using accelerometer and magnetometer sensors. *Freescale semiconductor, AN*, 4248.
- [13] Zunaidi, I., Kato, N., Nomura, Y., & Matsui, H. (2006). Positioning system for 4-wheel mobile robot: encoder, gyro and accelerometer data fusion with error model method. *CMU. Journal*, 5(1).
- [14] Conitzer, R. C. (1992). Implementation of the Pure Pursuit Path Tracking Algorithm.
- [15] Implementation of adaptative pure persuit controller. Extraido de <https://www.chiefdelphi.com/media/papers/3488>.

## **Apéndice B**

### **Proyecto Aguara'i**

#### **Resultados del proyecto**

En efecto, en la competencia internacional de vehículos autónomos a escala RobocarRace (2018) llevada a cabo en la ciudad de Sao Paulo – Brasil, organizada por la Facultad de Tecnología de Santo André, Universidad Federal ABC y Robótica Paula Souza (RobocarRace, 2018) en la cual ha participado en representación de la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, sede Regional Alto Paraná, Facultad de Ciencias y Tecnología, la participación del equipo ha sido exitosa, pues se logró:

- Segundo puesto en la calidad del TDP (Technical Description Paper), el artículo de descripción técnica será publicado en la prestigiosa revista JPAUT (Journal of Production and Automation) de Brasil. Véase Apéndice D
- Cuarto lugar en la competencia (categoría libre)

Además, se ha participado en la competencia LabVIEW Student Design Competition, y como resultado, la National Instruments ha invitado al equipo principal de A2G al evento NIWeek 2019, que se desarrollará entre los días 20 al 23 de mayo de 2019, véase el Apéndice I. Dicho evento tendrá una duración de cuatro días, en este tiempo serán desarrollados sesiones técnicas, conferencias, podrán ser observados proyectos desarrollados por ingenieros de la empresa o asociados a la misma, entre otros. El paper presentado para la competencia se adjunta en el apéndice A.

## Análisis de costos

En esta sección se expondrá el costo total del proyecto Aguara'i, así como las horas de trabajo que ha sido empleado para su elaboración completa. El costo de los equipos utilizados se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 8: Costo de hardware

Partes	Especificaciones	Cantidad	Precio en Gs.
Auto eléctrico*	Hobao Hyper VSE 1/8 Buggy	1	3.850.000
Controlador de vuelo**	Crius AIOP V2.1	1	292.000
Cargador*	iMAX B6	1	418.000
Batería LiPo*	SMC 4S 5400 mAh	1	440.000
Batería LiPo***	VEX 2S 3000 mAh	1	200.000
Encoder*	FC-03	1	40.000
Controlador****	myRIO 1900	1	5.000.000
Otros*****	Impresión 3D, tornillos, cables, etc.	-	1.000.000
Total			11.260.000

Fuente: Team A2G (2018)

Es importante aclarar que el costo fue financiado de la siguiente manera:

\* Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción, Sede Regional Alto Paraná.

\*\* Ing. Walter Benítez – Ing. Yessica Bogado

\*\*\* Lic. Ariel Guerrero.

\*\*\*\* National Instruments

\*\*\*\*\* Universidad Católica, junto con alumnas de la carrera de Arquitectura de dicha institución.

El tiempo de desarrollo del proyecto Aguara'i se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 9: Horas de trabajo para el proyecto Aguara'i.

<b>Actividad</b>	<b>Detalles</b>	<b>Horas</b>
Planificación	Investigación, especificaciones de hardware y software, planificación del desarrollo del proyecto.	50
Identificación del sistema	Modelado del auto eléctrico a escala, para el diseño del algoritmo de control.	40
Sistema de control	Diseño e implementación de los algoritmos de control (PID) para la velocidad y el control de dirección del vehículo autónomo a escala.	50
Fusión de datos	Diseño e implementación de los algoritmos de fusión de sensores para estimar la posición y orientación del vehículo autónomo a escala.	50
Desarrollo de hardware	Modificaciones necesarias para dotar al vehículo eléctrico de los dispositivos necesarios para una conducción autónoma.	40
Algoritmo de navegación	Diseño e implementación del algoritmo de navegación (Pure Pursuit).	60
Comprobación del sistema	Se llevan a cabo las pruebas de la fusión de los algoritmos desarrollados de manera independiente en las etapas previas.	50
Cierre	Elaboración de la documentación correspondiente (TDP), organización del viaje y otras actividades relacionadas a la participación en la competencia.	20
Total		360

---

Fuente: Team A2G (2018).

## Apéndice C

### Anuncios de vencedores del mejor TDP de RobocarRace 2018



Ariel Bogado <arielbogado95@gmail.com>

---

#### Anuncio dos vencedores de melhor TDP do RoboCar Race 2018

1 mensaje

**RoboCar Race** <robocar.race@gmail.com>  
Cco: arielbogado95@gmail.com

6 de diciembre de 2018, 22:09

Boa noite a Todos.

Desculpem-nos pela longa demora no retorno a vocês após o evento. Estamos entrando em contato para anunciar os vencedores do melhor TDP.

1a - Equipe Semear - USP São Carlos

2a - Equipe A2G - Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción

3a - Equipe Car-not-found - UFABC

Os vencedores terão o TDP publicado na revista JPAUT - <https://jpaut.com.br> na 3a Edição do 1a trimestre de 2019.

Solicitamos que os vencedores entrem em contatos conosco para receber maiores informações sobre o formato, correções e extensão do paper.

Agradecemos a participação de todos e contamos com a vossa presença no próximo evento de 2019. Manteremos vocês informados sobre as novidades.

Abraços

--

Prof. Dr. Edson Kitani (FATEC Santo André)

Prof. Dr. Luiz Celiberto Jr. (UFABC)

---

Coordenadores

## **Apéndice D**

**TDP en proceso de evaluación para ser publicado en la revista JPAUT**

# Development of an autonomous vehicle at a 1:8 scale

Ariel Guerrero<sup>1</sup>, Micaela Jara<sup>2</sup>, Erid Pacheco<sup>2</sup>, Ariel Bogado<sup>2</sup>, Jesús Franco<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Parque Tecnológico de Itaipu – Paraguay, <sup>2</sup>Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”

## ABSTRACT

The development of an autonomous vehicle is the subject of extensive study by many researchers [1]. One of the approaches of study consists of the use of physical models at scale whose construction is the object of this article. For this purpose, a RC (Remotely Controlled) electric car with a 1: 8 scale is modified. A myRIO is used for data acquisition (odometer, accelerometer, magnetometer, gyroscope) and operation tasks. Another task is to merge the data of the sensors in such a way that the position and orientation information can be used for the navigation decision making. This data can be sent to a workstation, running an application in LabVIEW. This workstation provides a human-machine interface for the operator to display the navigation parameters.

**Keywords:** Autonomous Vehicle, IMU, Navigation Algorithm, Kalman.

## INTRODUCTION

Autonomous vehicles have attracted a great deal of interest in research in recent years, as well as important industry development efforts. In 2007, DARPA has executed the Urban Grand Challenge [2], with entries from several universities documented in many different publications, for example, [3, 4].

Many companies in the automotive sector have their own division dedicated to the investigation of autonomous vehicles and recently other companies that are not of the sector such as NVIDIA, APPLE, GOOGLE, YANDEX, BIADU have started to develop their own autonomous vehicle. Projects that have been widely reported in the news [5, 6]. Although important efforts have been made in this field, there are still many problems to be solved, among them, the problems of detection, the different types and levels of control and the interaction of autonomous vehicles with their environment.

An autonomous vehicle is a vehicle capable of imitating the human capacities of management and control. The driver may choose the destination but is not required to activate any mechanical operation of the vehicle. Autonomous vehicles perceive the environment through sensors such as laser, radar, lidar, global positioning system and computer vision. Advanced control systems interpret information to identify the appropriate route, as well as obstacles and relevant signage. Autonomous vehicles are generally capable to travel previously programmed roads and require a cartographic reproduction of the terrain, so if a route is not picked up by the system it is possible that it cannot advance coherently and normally.

## METHODOLOGY

The methodology used in this project was the traditional design. In Figure 1, the flow diagram of the tasks performed is presented. The main problem was how to develop, in a short period of time, an autonomous scaled electric car. Based on this approach, possible solutions were analyzed, carrying out the necessary studies and evaluations. Once the objectives to be met were set, the hardware was prepared, in this case the adaptation of the components in the scaled electric car, and the design of the software. The software and hardware implementations were carried out. Subsequently, the necessary tests were carried out in order to verify problems, and if necessary, implement modifications and improvements to the system, whether they were in the software or hardware.

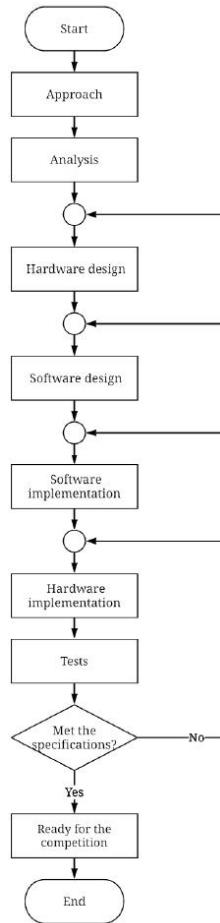


Figure 1 - Project methodology flowchart

## DEVELOPMENT

### I. SYSTEM HARDWARE ARCHITECTURE

Following the consulted literature [7] we needed to have a mathematical model that describes the behavior of the plant. As it would take more time to reach an accurate model taking into account the short time available to complete the project and the fact that we needed to have the control of both the traction and the direction of the plant, we proceeded to obtain the mathematical model through a transfer function using the "black box" method, which consists in the study of an element from its output behavior for a given entry without covering its internal functioning. The diagram can be seen in figure 1. Knowing the input and output, the transfer function of the "black box" was identified using the Matlab System Identification tool.

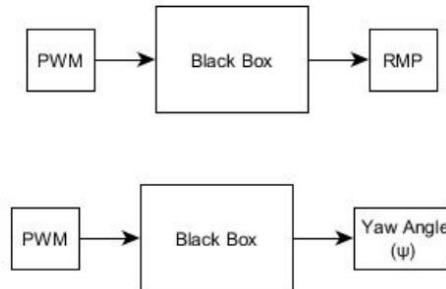


Figure 2 -Powertrain and direction schematic

In the "black box" of the powertrain, there is a brushless motor (BLDC) powered by an electronic speed controller (ESC), which receives a PWM signal to control the speed of the motor. On the other hand, in the "black box" of the steering, there is a servo motor, which receives another PWM signal to control the Yaw Angle of the front wheels, and consequently control the direction of the car.

The result obtained through this method had an approximation of 70% for the powertrain and 87% for the direction, which was enough to be able to control the plant.

The system to be implemented consists of:

- Autonomous Vehicle at 1: 8 scale: Modified chassis of a miniaturized electric car in which a myRIO 1900 is adapted as well as the sensors and actuators required for inertial navigation (IMU + GPS). In this platform the algorithms that allow determining the position and orientation information based on the sensors will be executed. It will also allow the acquisition of data from the sensors, execute the selected navigation algorithm and determine the control signals to the actuators.
- Base Station: For configuration of the navigation parameters (waypoints) and visualization of the status of the sensors.

The hardware platform consists of the following elements:

#### A. Crius AIOP v2.1

This electronic board type MARG (Magnetic, Angular rate and Gravity) has several built-in sensors such as a gyroscope /accelerometer MPU6050 6-axis, a high-precision altimeter MS5611-01BA01, and a magnetometer HMC5883L 3-axis. The integrated microcontroller is an ATMEGA 2560 8-bit, 16 MHz and communicates with external devices through pins and serial ports.

1) Sensor: MPU6050 : Accelerometer and gyroscope

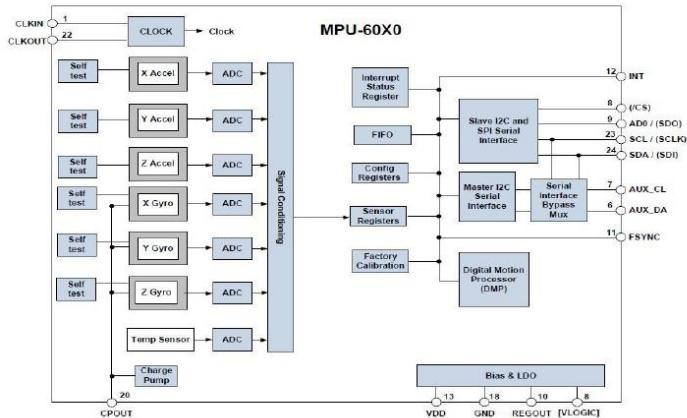


Figure 3 - Architecture of the MPU 6050 [8]

Figure 3 shows the architecture of the MPU6050 [9], the sensor has digital analog converters for each of the axes and thus obtains the values simultaneously with a range of up to  $\pm 2000$  per second in the case of the gyroscope and  $\pm 16g$  for the accelerometer. Then, the data is filtered according to the preset configuration and the factory calibration, then it goes to the sensor register, the data can be accessed by the DMP or by the user. The DMP updates the FIFO data read at a certain frequency in order to avoid overflow. The communication serial interface of the MPU6050 is the I2C communication protocol.

2) Sensor: HMCL5883L: Integrated magnetometer

The magnetometer integrated in the controller is the Honeywell HMC5883L, the triaxial sensor has an operation field of -8 to +8 gauss, which in this way gives the real direction of the geographic north considering the 15 degree inclination that exists in the zone. The serial interface of the HMC5883L complies with the I2C communication protocol at 400 kHz.

B. Odometer and Speed Sensor Encoder FC03

Operating voltage: 3.3V - 5V DC

Outputs: Analogica y Digital TTL

Sensor: MOCH22A

Board model: FC-03/FZ0888

Type of emitter: Photodiode IR

Detector type: Phototransistor

Wavelength of the emitter: 950 nm (infrared)

Weight: 8 g

Dimensions: 32\*14\*7 mm

Slot: 5 mm

Opamp comparator: LMS393

Power indicator LED

Pulse indicator LED

Output TTL ON: blocked sensor

Output TTL OFF: unlocked sensor

Knowing the position or speed of an engine is very important in robotics, for which there are several alternatives, one of the most common being the use of optical type encoders. The incremental optical encoders perform the measurement of movement with the use of an infrared beam that is interrupted by the slots of a disk coupled to the shaft. The number of slots per revolution will determine the encoder's accuracy, in this case 4 pulses per revolution.

C. Actuator: Digital Servo HB-5514 14kg



Figure 4 - Digital servo for direction

It is an actuator device that has the ability to be located in any position within its operating range, and to remain stable in that position.

D. Actuator: Motor BLDC 2200KV (rmp/V)

They are synchronous motors fed by DC through an inverter or switching power supply that produces an AC electric current to control each phase of the motor through a closed circuit controller. The controller provides pulses of current to the motor windings that control the speed and torque of the motor.

E. Actuator: Electronic Speed Controller ESC WP-8BL100, 100A

An electronic speed controller or ESC is an electronic circuit that controls and regulates the speed of an electric motor. It can also provide reversing of the motor and dynamic braking. ESCs are often used on motors essentially providing an electronically-generated three-phase electric power low voltage source of energy for the motor.

F. Mechanical Plant: Chassis Haboo Hyper VS 1/8



Figure 5 - Chassis

Dimension: 460 mm. x 306 mm. x 140 mm.

Distance between axis: 322 mm.

Weight: 4720 g

Battery for myRIO: LI-PO 2S 3000 mAh 7.4 v

Motor battery: LI-PO 4S 5400 mAh 14.8 v

Anodized aluminum chassis.

Front aluminum turret 4mm and rear 3mm

Reinforced suspension support

Battery holder with velcro

Big Bore 17mm shock absorbers

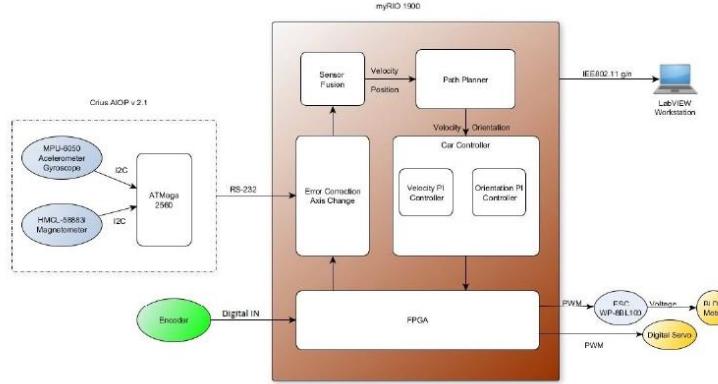


Figure 6 - Hardware Architecture

## II. SOFTWARE ARCHITECTURE

In this section, we will focus more on the processing of sensor data to obtain the position and orientation of the vehicle, and the use of them for the calculation of the path of travel. Before the fusion of sensors, the collected data go through a calibration process, where offset and gain errors are eliminated, this process can be found in [8], then the data goes through a process of changing the reference, passing from a fixed frame of reference to the autonomous vehicle, to which the inertial sensors belong, to a frame of reference fixed to the ground, known as the navigation reference frame.

### A. Sensor Fusion

Sensor signals were used to improve and correct the position measurement of the 4-wheel autonomous vehicle to obtain a more reliable position estimate. From this, we calculated the estimation of the position and reduced the systematic and non-systematic errors during the tests and we succeeded in estimating the deviation of the turn bias. The basic tool here is a Kalman filter.

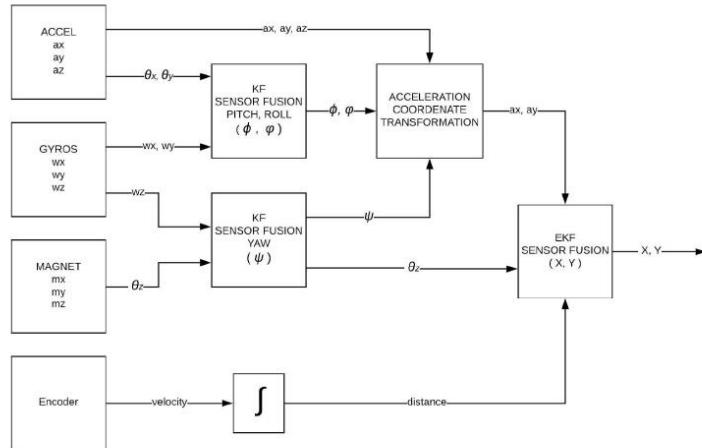


Figure 7 - Overview of the fusion system

As shown in figure 7; initially, a linear Kalman filter (KF) is used to merge the data of the accelerometer and the gyroscope, with this we obtain the pitch ( $\varphi$ ) and roll ( $\varphi$ ) angles, the yaw angle ( $\psi$ ) is obtained from the fusion of the gyroscope with the magnetometer, also through a linear Kalman filter (KF) [14].

In Figure 8, the result of the fusion of the gyroscope and the magnetometer is shown. In the figure, it can be seen that the magnetometer does not have good response at high frequencies, however, at low frequencies, the response is good. On the other hand, the behavior of the gyroscope curve is smooth, but the cumulative error increases and there is no way to correct it without performing the fusion of the sensors.

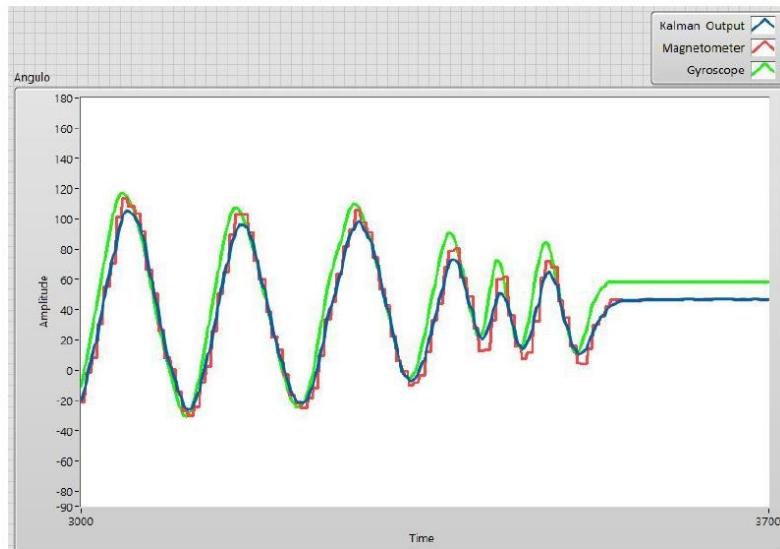


Figure 8 - Kalman filter for orientation

Finally, the encoder is added to the system, in order to have a better estimate of the distance traveled, an extended Kalman filter (EKF) is used, taking into account the non-linearity of the estimation by means of the odometry model [15].

This model is subject to cumulative errors that increase with time, because there is no external reference. These errors can be minimized by integrating a GPS (Global Position Systems) into the system, but this is beyond the scope of this work [16].

#### *B. Path Planner*

This module is responsible for taking the autonomous vehicle from an initial position to a final, following a trajectory. The algorithm used is the so-called pure pursuit algorithm [17]. For practical purposes, the implementation of "Team 1712" [18] has been used and modified according to the requirement.

With this algorithm it is possible to determine the target speed of the autonomous vehicle depending on the curvature of the segment of the trajectory in which the autonomous vehicle is located, as well as to establish the direction to which it should go knowing its current position and a target point called "Look Ahead Point" (Figure 10).

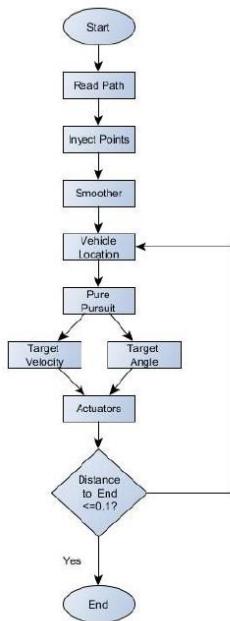


Figure 9 - Route planner

The "Look Ahead Point" is a fundamental parameter in the application of this algorithm, since by varying its value it is possible to vary: the response of the car to deviations from the wanted trajectory, and the stability in which the car follows its trajectory preventing oscillations. Its value can be static or dynamic, that is, static if its value is predetermined by the programmer before the car starts its trajectory, or dynamic when its value depending on characteristics such as the speed of the car and the curvature of the trajectory make its value to get the best response. In this project the static was applied due to its simplicity and rapid implementation.

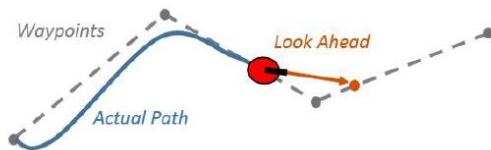


Figure 10 - Look Ahead Distance [19]

With regard to its value, the choice of a small number will cause the vehicle to quickly seek to approach the desired trajectory, however, as a consequence, the car begins to oscillate in search of the trajectory as shown in Figure 11.

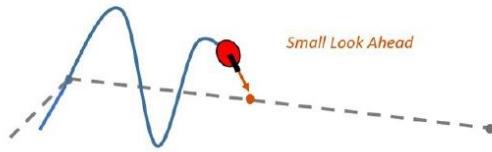


Figure 11 - Small Look Ahead [19]

On the other hand, a choice of a large value will cause the car to stop oscillating, however the response to sudden variations in the trajectory becomes very slow, as does the curvature in which the car follows its trajectory (Figure 12).

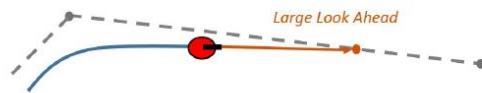


Figure 12 - Large Look Ahead [19]

To obtain greater precision in the calculation of the speed and curvature, points were injected into the original trajectory obtaining in this way closer points, then, to pass them through a smoothing stage and achieve continuity in the path.

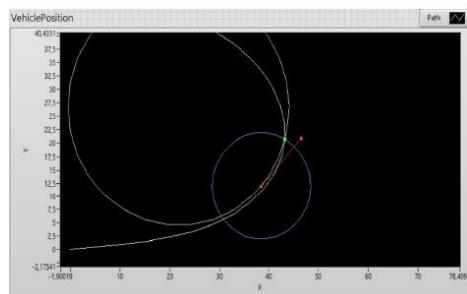


Figure 13 - Simulation of Pure Pursuit Algorithm

## FINDINGS

During the tests it was evidenced that the pure pursuit algorithm gives good results in the determination of follow-up of the established trajectory. Due to its robustness, this allows some errors in the acquisition of sensor data or in the tuning of the speed and direction control, however, as it takes into account feedback from a previous state, it allows to update the actuators with consistent values so that small errors of orientation and position are attenuated.

The choice of the best value for the Look Ahead Point was made through experimentation finding that for the speed 2 m/s, a value of Look Ahead Point equal to 1.8m, prevents oscillations and a good response is obtained for more curves closed.

## CONCLUSIONS

Autonomous navigation was validated in the tests, demonstrating its effectiveness in tracking a defined trajectory. A set of tests was performed varying the initial position and the orientation to verify that, despite the different initial conditions, in the same way, the car manages to follow a predefined trajectory, as expected by the results of the simulations. Tests in a controlled environment have obtained satisfactory results for the desired purposes, taking into account that the scaled vehicle was used in a race of autonomous scaled cars. For this purpose, the cumulative errors inherent in the system were reduced so that the influence on the result was negligible. In addition, the inertial navigation algorithm turned out to be very effective compared to other types of navigation used for this purpose, achieving a higher response speed due to its low computational requirement.

However, in uncontrolled environments, it has not been very effective, due to the inability of the linear Kalman filter to eliminate electromagnetic distortions that affect the readings of the magnetometer, these readings with distortion considerably affect the calculation of the yaw angle, and consequently, they produce errors in the calculation of the x and y coordinates.

Bearing in mind that the duration of the race does not generate significant cumulative errors, the use of a magnetometer could be eliminated, and thus make the system less sensitive to disturbances in the magnetic field (with the cost that this entails in the absence of an absolute orientation, which is what the magnetometer offered).

## ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the support of the following institutions: Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción", Centro de Investigación en Ciencias, Tecnología e Innovación Avanzada (CICTIA), Fundación Parque Tecnológico Itaipú – Paraguay and National Instruments Brazil.

## REFERENCES

- [1] IYENGAR, D., & PETERS, D. L. (2015, October). Development of a miniaturized autonomous vehicle: Modification of a 1: 18 scale rc car for autonomous operation. In ASME 2015 Dynamic Systems and Control Conference (pp. V003T50A008-V003T50A008). American Society of Mechanical Engineers.
- [2] MCBRIDE, J. (2007). Darpa urban challenge.
- [3] URMSON, C., BAGNELL, J. A., BAKER, C. R., HEBERT, M., KELLY, A., RAJKUMAR, R., & TEAM, D. U. C. (2007). Tartan racing: A multi-modal approach to the DARPA
- [4] MONTEMERLO, M., BECKER, J., BHAT, S., DAHLKAMP, H., DOLGOV, D., ETTINGER, S., & THIRUN, S. (2008). Junior: The Stanford entry in the Urban Challenge. Journal of field Robotics, 25(9), 569-597
- [5] THE ECONOMIST. (2013). Look, no hands. Recovered from The economist: <http://www.economist.com/news/special-report/21576224-one-day-every-car-may-come-invisible-chauffeur-look-no-hands>
- [6] DOCKTERMAN, E. (2015). Google's self-driving car may come with airbags on the outside. Time Magazine. Recovered from Time: <http://time.com/3758446/googles-self-driving-car-may-come-with-airbags-on-the-outside/>
- [7] THE DUCKIETOWN FOUNDATION. (2017). The Duckietown Project. Recovered from Duckietown: <https://www.duckietown.org/>

- [8] BENÍTEZ, W., & BOGADO, Y. (2015). Desarrollo de un prototipo de VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado) para inspección visual de líneas eléctricas aéreas (Tesis de Grado). Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción" Campus Alto Paraná. Paraguay.
- [9] INVENSENSE. (2013). MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification Revision 3.4. Sunnyvale, California, United States of America. Recovered from Invensense: [https://store.invensense.com/datasheets/invenSense/MPU-6050\\_DataSheet\\_V3%204.pdf](https://store.invensense.com/datasheets/invenSense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf)
- [10] LEE, U., OH, J., SHIN, S., SHIM, I., CHOI, J., JUNG, Y., PARK, K., KIM, M., & JUNG, J. (2014). EureCar, KAIST Self-Driving car. Recovered from National Instruments: <https://forums.ni.com/t5/Projects-Products/EureCar-KAIST-Self-Driving-car/ta-p/3517884>
- [11] KOK, M., HOL, J. D., & SCHÖN, T. B. (2017). Using inertial sensors for position and orientation estimation. *arXiv preprint arXiv:1704.06053*.
- [12] OZYAGCILAR, T. (2012). Implementing a tilt-compensated eCompass using accelerometer and magnetometer sensors. *Freescale semiconductor, AN, 4248*.
- [13] ZUNAIDI, I., KATO, N., NOMURA, Y., & MATSUI, H. (2006). Positioning system for 4-wheel mobile robot: encoder, gyro and accelerometer data fusion with error model method. *CMU. Journal*, 5(1).
- [14] VIGOUROUX CAVOLINA, D. P. (2010). Implementación de unidad de mediciones iniciales (IMU) para robótica utilizando filtro de Kalman. Sartenejas, Venezuela.
- [15] FISCHER, T., NITSCHE, M. A., & PEDRE, S. (2014). Fusión de encoders de cuadratura, sensores iniciales y magnéticos para la localización de robots móviles. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales - UBA, Buenos Aires.
- [16] MOHINDER S., G., & ANGUS P., A. (2008). *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB* (Third ed.). Hoboken, New Jersey: JOHN WILEY & SONS, INC.
- [17] Coulter, R. C. (1992). Implementation of the pure pursuit path tracking algorithm (No. CMU-RI-TR-92-01). Carnegie-Mellon UNIV Pittsburgh PA Robotics INST.
- [18] FRC TEAM 1712 (2018). Implementation of adaptive pure pursuit controller. Recovered from chiefdelphi: <https://www.chiefdelphi.com/media/papers/3488>.
- [19] MATHWORKS (w/d). Pure Pursuit Controller. Recovered from MathWorks: <https://www.mathworks.com/help/robotics/ug/pure-pursuit-controller.html>

## CONTACT INFORMATION

**Gregorio Ariel Guerrero Moral (corresponding author)**  
[ariel.guerrero@pti.org.py](mailto:ariel.guerrero@pti.org.py)

**Micaela Carolina Jara Ten Kathon**  
[micaela.jara@uc.edu.py](mailto:micaela.jara@uc.edu.py)

**Erid Eulogio Pacheco Viana**  
[erid.pacheco@uc.edu.py](mailto:erid.pacheco@uc.edu.py)

**Ariel David Bogado Arce**  
[ariel.bogado@uc.edu.py](mailto:ariel.bogado@uc.edu.py)

**Jesús María Franco Santacruz**  
[jesus.franco@uc.edu.py](mailto:jesus.franco@uc.edu.py)

## **Apéndice E**

### **Proyecto presentado en el LabVIEW Student Design Competition**

#### **Contact information:**

**Country:** Paraguay

**Year Submitted:** 2019

**University:** Universidad Católica “Nuestra Señora de la Asunción”

#### **List of Team Members (with year of graduation):**

- Micaela Carolina Jara Ten Kathon (2019)
- Ariel David Bogado Arce (2019)
- Erid Eulogio Pacheco Viana (2019)
- Jesus Maria Franco Santacruz (2020)

**Faculty Advisers:** Prof. Gregorio Ariel Guerrero Moral

**Main Contact Email Address:** ariel.guerrero@uc.edu.py

#### **Project Information:**

**Title:** Development of an autonomous vehicle at a 1:8 scale

#### **Description:**

The challenge of the Robocar Race 2018 competition held in Sao Paulo – Brazil is to design an autonomous scale vehicle that can compete in 2023 against a radio-controlled car piloted by a man. Our team of students of the Universidad Católica Nuestra Señora de

la Asunción accepted the challenge and presented a solution based on inertial navigation using the NI myRIO and LabVIEW, being the first students from Paraguay to accept the challenge of building an autonomous car.

**Products:** NI myRIO 1900 and LabVIEW 2017.

**The Challenge:**

Brazilian branch of National Instruments challenged LabVIEW Student Ambassadors (LSAs) to design and build an autonomous scale vehicle to compete at the Robocar Race, in return, they would give them a NI myRIO controller. Our ambassador for PTI-UCA accepted the challenge and assembled the first team from Paraguay to develop an autonomous scaled vehicle. Our goal was to win the competition that consisted in running the track in the shortest time. We entered the race with our car called Aguara'i (little fox in Guarani), a Radio-Controlled RC car that we modified to be autonomous. Although we finished in 4th place, our work inspired a lot of engineering students from our country to take part of this exciting and promising field.

Figura 56: Members of the team with Robocar Race 2018 judges



Fuente: (Guerrero Moral, Jara Ten Kathen, Bogado Arce, Pacheco Viana, & Franco Santacruz, 2018)

### The Solution:

Figura 57: Project Overview - The resulting performance of Aguara'i



Fuente: (Guerrero Moral, Jara Ten Kathen, Bogado Arce, Pacheco Viana, & Franco Santacruz, 2018)

## System Configuration

**Autonomous Vehicle at 1:8 scale:** Modified chassis of a miniaturized electric RC car in which a myRIO 1900 is adapted as well as the sensors and actuators required for inertial navigation (IMU). In this platform the algorithms that allow determining the position and orientation information based on the sensors will be executed. It will also allow the acquisition of data from the sensors, execute the selected navigation algorithm and determine the control signals to the actuators.

**Base Station:** For configuration of the navigation parameters (waypoints) and visualization of the status of the sensors. Human-machine interface with LabVIEW.

Figura 58: "Aguara'i" Autonomous Car



Fuente: (Guerrero Moral, Jara Ten Kathen, Bogado Arce, Pacheco Viana, & Franco Santacruz, 2018)

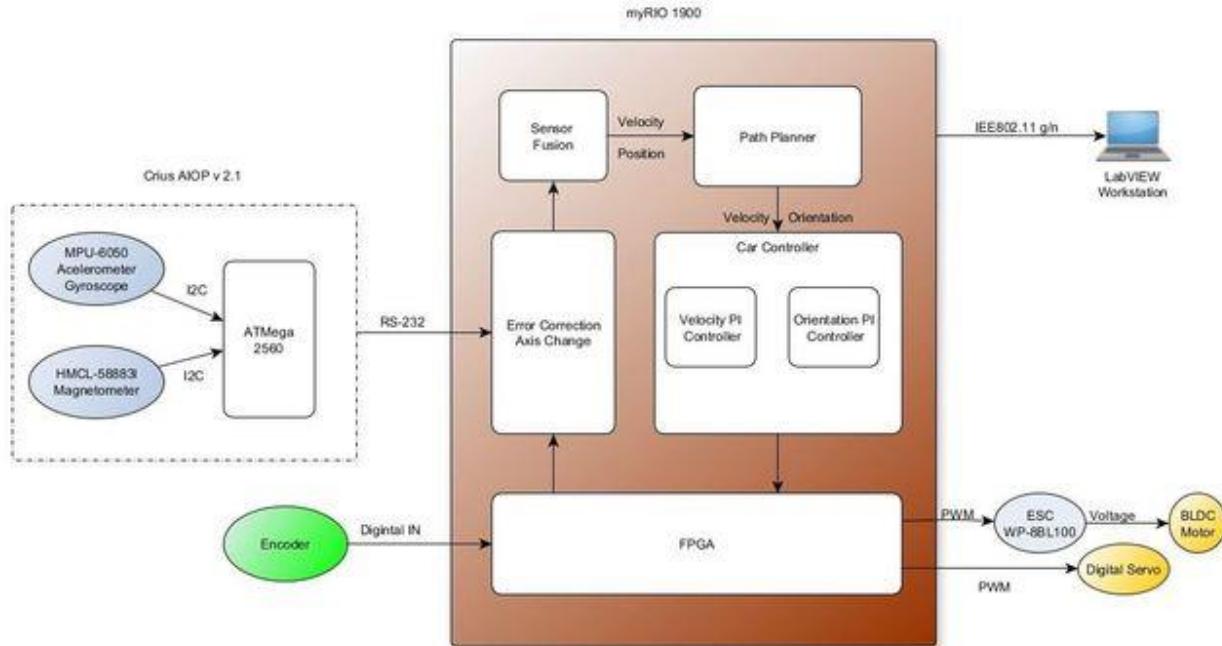
## Using LabVIEW and myRIO

The first step is to acquire the signals of the sensors. The encoder was connected to one of the FPGA's (Field-Programmable Gate Array) inputs, and the IMU sensors were connected through a serial connection from an Arduino microcontroller (ATMega2560) to the myRIO CPU.

In order to control the speed and direction of the car, we made use of the parallelism of the loops in the FPGA, these PWMs (Pulse Width Modulation) values to control the direction and the speed came from constantly updated values in the myRIO. To communicate this data from the RT-target to FPGA-target we use global variables, since we needed that several processes running in parallel in LabVIEW, can communicate their data and in this way obtain the processing and control of the state variables of the car in real time.

Next, the configuration of the system can be seen in figure below.

Figura 59: Aguara'i Architecture

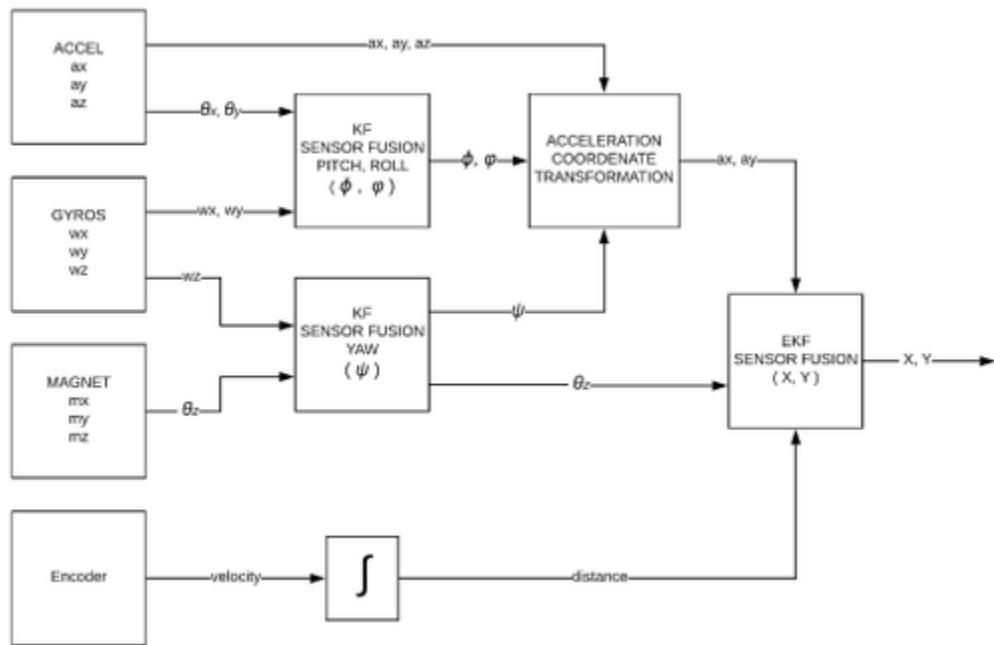


Fuente: (Guerrero Moral, Jara Ten Kathen, Bogado Arce, Pacheco Viana, & Franco Santacruz, 2018)

## Sensor Fusion

Sensor signals were used to improve and correct the position measurement of the 4-wheel autonomous vehicle to obtain a more reliable position estimate. From this, we calculated the estimation of the position and reduced the systematic and non-systematic errors during the tests, and we succeeded in estimating the deviation of the turn bias. The basic tool here is a Kalman filter.

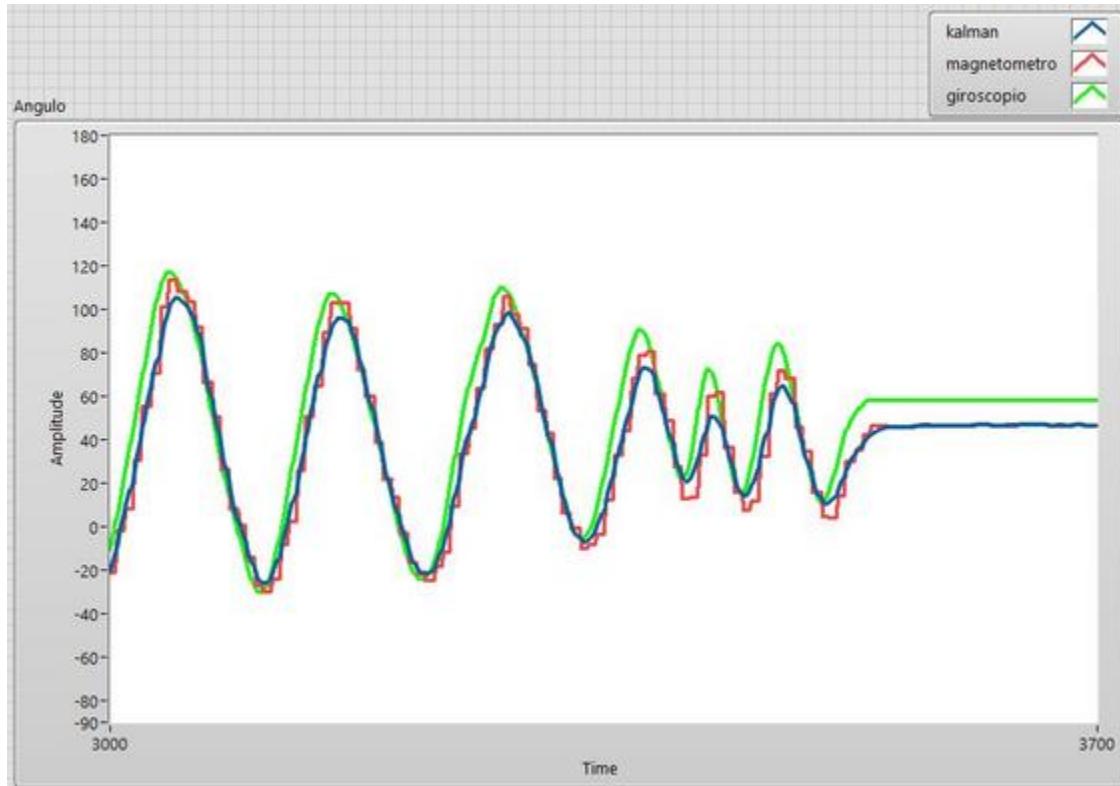
Figura 60: Overview of the Fusion System



Fuente: (Guerrero Moral, Jara Ten Kathen, Bogado Arce, Pacheco Viana, & Franco Santacruz, 2018)

As shown in the figure above; Initially, a linear Kalman filter (KF) is used to merge the data of the accelerometer and the gyroscope, with this we obtain the pitch ( $\phi$ ) and roll ( $\psi$ ) angles, the yaw angle ( $\psi$ ) is obtained from the fusion of the gyroscope with the magnetometer, also through a linear Kalman filter (KF).

Figura 61: Kalman Filter for orientation



Fuente: (Guerrero Moral, Jara Ten Katheren, Bogado Arce, Pacheco Viana, & Franco Santacruz, 2018)

In the figure above, the result of the fusion of the gyroscope and the magnetometer is shown. In it, the magnetometer does not have good response at high frequencies, however, at low frequency, the response is good. On the other hand, the behavior of the gyroscope curve is smooth, but the cumulative error increases and there is no way to correct it without performing the fusion of the sensors.

Finally, the encoder is added to the system, in order to have a better estimate of the distance traveled, an extended Kalman filter (EKF) is used, considering the non-linearity of the estimation by means of the odometry model.

This model is subject to cumulative errors that increase with time, because there is no external reference. These errors can be minimized by integrating a GPS (Global Position Systems) into the system, but this is beyond the scope of this work.

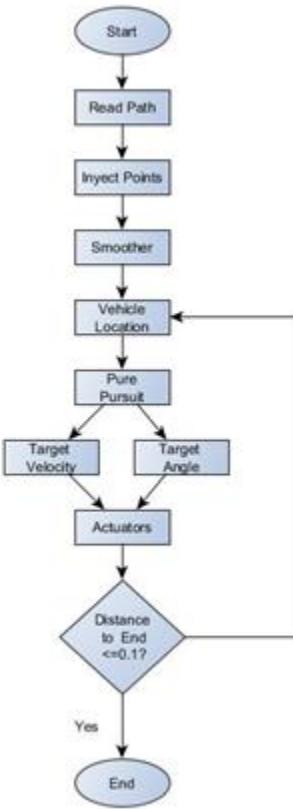
### **Path Planner**

This module is responsible for taking the autonomous vehicle from an initial position to a final, following a trajectory. The algorithm used is the so-called pure pursuit algorithm. For practical purposes, the implementation of "Team 1712" has been used and modified according to the requirement.

With this algorithm it is possible to determine the target speed of the autonomous vehicle depending on the curvature of the segment of the trajectory in which the autonomous vehicle is located, as well as to establish the direction to which it should go knowing its current position and a target point called "Look Ahead Point".

To obtain greater precision in the calculation of the speed and curvature, points were injected into the original trajectory obtaining in this way closer points, to then passing through a smoothing stage and achieve continuity in the path.

Figura 62: Path Planner



Fuente: (Guerrero Moral, Jara Ten Katheren, Bogado Arce, Pacheco Viana, & Franco Santacruz, 2018)

### The Conclusion:

If it wasn't for the NI platform, which made us achieve a very high level of development without entering into hardware programming and allowed us to make use of modularity even using third-party code, we wouldn't have been able to develop the car in time for the competition.

This project was not carried out only by five people, this project involved the entire university community, students of electromechanical engineering, architecture and teachers of the university. In the Aguara'i, the effort of each one of them, colleagues who worked with the members of the team during the morning, afternoon and night is put. This experience not only brought intellectual growth but also growth in teamwork. We learned that there are always people

willing to help for the simple fact of being necessary. With the project it was possible to inspire the students of the inferior courses of the career and even to high school students, in the exciting area of the autonomous cars.

The Technical Description Paper (TDP), presented in Robocar Race 2018 competition, was selected, along with two others TDP, to be published in a journal of São Paulo, Journal of Production and Automation, besides, the paper achieved the first place in the Research Day organized by the Center for Research in Sciences, Technology and Advanced Innovation (CICTIA) belonging to the institution. This project allowed to start a new line of research.

**Time to Build:**

This project was carried out in two months. The period in which it was made is September 2018 - October 2018

## **Apéndice F**

### **Nota de Agradecimiento**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA "NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN"  
CAMPUS UNIVERSITARIO ALTO PARANÁ  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
Teléfono: 595 61 572 467/9 Interno: 113 Web: [www.ucap.edu.py](http://www.ucap.edu.py)  
Paraná Country Club - Hernandarias - Paraguay

Hernandarias, 23 de noviembre de 2018

Ing. Juan Carlos Ocampos Núñez  
Decano  
Facultad de Ciencias y Tecnología  
Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción  
Campus Alto Paraná

MICHAELA JARA, ERID PACHECO, ARIEL BOGADO y JESÚS FRANCO, alumnos de la Facultad de Ciencias y Tecnología, de la carrera Ingeniería Electromecánica, nos dirigimos a usted y por su intermedio a donde corresponda para manifestar cuanto sigue:

Antes que todo, nuestro más profundo agradecimiento por haber apoyado en todos los aspectos la participación en la corrida de autos autónomos a escala denominado ROBOCAR RACE en la cual participamos como representantes de esta casa de estudios y que fue llevado a cabo en la ciudad de Sao Paulo – Brasil.

Nuestra participación no hubiera sido posible sin el apoyo de la Universidad por su intermedio, así como del estamento estudiantil y de la sociedad en general inclusive, quienes nos ayudaron a cubrir los gastos que generó nuestra participación en dicho evento, y que fue motivado principalmente por el respaldo de la Universidad.

Agradecemos igualmente a la Universidad Católica "Nuestra Señora de la Asunción" campus Alto Paraná y al director general de campus, el Ing. Ladislao Aranda, por su intermedio, pues como ya hemos manifestado, no hubiera sido posible nuestra participación en dicha competencia, sin su apoyo.

Le comentamos, que igualmente hemos tenido el apoyo del Centro de Estudiantes de la Facultad de Ciencias y Tecnología (CEFACYT), quienes nos apoyaron de forma económica y logística en la organización de una fiesta con el fin de recaudar fondos para el viaje. Esto demuestra el compañerismo y el compromiso con esta casa de estudios, lo que nos ha sorprendido gratamente y queremos poner a su conocimiento.

Además, agradecemos el apoyo incondicional del Lic. Ariel Guerrero, profesor de la Universidad quien nos asesoró durante todo el proyecto. Por otra parte, agradecemos de igual manera el apoyo moral de los profesores y alumnos de nuestra facultad, en especial de un grupo de alumnos del tercer año de nuestra carrera, quienes incansablemente nos han ayudado en todo lo que refiere a la parte técnica de la construcción del auto autónomo al que le llamamos AGUARA I. También tuvimos la ayuda de unas alumnas la carrera de Arquitectura y de algunos ingenieros egresados de nuestra carrera a quienes agradecemos.



**UNIVERSIDAD CATÓLICA "NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN"  
CAMPUS UNIVERSITARIO ALTO PARANÁ  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
Teléfono: 595 61 572 467/9 Interno: 113 Web: [www.ucap.edu.py](http://www.ucap.edu.py)  
Paraná Country Club - Hernandarias - Paraguay

No podemos dejar de agradecer también al Centro de Investigación en Ciencias, Tecnología e Innovación Avanzada (CICTIA) y a su director, el Dr. Pedro Gardel por el apoyo logístico constante y por la cesión del espacio físico para la realización del proyecto.

Adjuntamos a la presente nota, los detalles técnicos de la construcción del auto autónomo y con el cual participamos en la competencia mencionada, de lo cual podemos referir que ha sido un éxito, a pesar de que no pudimos traer los primeros lugares de la competencia, pudimos demostrar que nuestra Universidad tiene el mismo nivel que Universidades del extranjero y los alumnos la misma capacidad.

En la página del Facebook del evento (<https://www.facebook.com/robocarrace/>), se pueden observar fotografías y videos de la corrida, donde estuvimos en representación del Paraguay, por la Universidad Católica Nuestra Señora de la Asunción.

Le comentamos, que deseamos realizar una demostración del auto autónomo que hemos construido para todos los integrantes de esta comunidad educativa y para el efecto le solicitamos nos indique una fecha y se puedan cursar las invitaciones correspondientes para que la sociedad en general incluso pueda conocer sobre el trabajo realizado en esta Universidad.

Nos despedimos nuevamente agradeciendo y con este pensamiento: *¡Con el apoyo de todos los integrantes de esta casa de estudios y de la sociedad, pudimos!*

Obs.: En adjunto a la nota, 1) La lista de los colaboradores del proyecto, 2) Fotografías del proceso de construcción y de la competencia, 3) La descripción técnica del Aguara'i, 4) El Inventario de las piezas que forman parte del AGUARA I, y su correspondiente entrega a la facultad, 5) Detalle de los gastos

Micaela Jara  
Mat.: 45.581

Erid Pacheco  
Mat.: 45.990

Ariel Bogado  
Mat.: 45.302

Jesús Franco  
Mat.: 46.204



**UNIVERSIDAD CATÓLICA "NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN"**  
**CAMPUS UNIVERSITARIO ALTO PARANÁ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
Teléfono: 595 61 572 467/9 Interno: 113 Web: [www.ucap.edu.py](http://www.ucap.edu.py)  
Paraná Country Club - Hernandarias - Paraguay

### **Adjunto 1: Lista de colaboradores del proyecto**

Jorge Ariel Bareiro	Alumno, 3er año Ingeniería Electromecánica
Oscar Martínez	Alumno, 3er año Ingeniería Electromecánica
Sebastián Reckziegel	Alumno, 3er año Ingeniería Electromecánica
Alfredo Galeano	Alumno, 3er año Ingeniería Electromecánica
Alejandro Grigolo	Alumno, 3er año Ingeniería Electromecánica
Belén Álvarez	Alumna, 3er año Ingeniería Electromecánica
Ana Rodríguez	Alumna, 2do año Ingeniería Electromecánica
Mauricio Sanabria	Alumno, 3er año Ingeniería Electromecánica
Juanita Tatton	Alumna, 5to año Ingeniería Electromecánica
José Barrios	Alumno, 5to año Ingeniería Electromecánica
Juan José Gini	Alumno, 5to año Ingeniería Electromecánica
Paloma Frutos	Alumna, 4to año Arquitectura
Ana Ledesma	Alumna, 4to año Arquitectura
Arq. Villanueva	Profesor
Ing. Tania Melgarejo	Jefa de Laboratorio
Ing. Walter Benítez	Egresado, Ingeniería Electromecánica
Ing. Yessica Bogado	Egresada, Ingeniería Electromecánica
Ing. Gabriela Cáceres	Egresada, Ingeniería Electromecánica
Ing. Diosnel Dávalos	Director Ejecutivo PTI



**UNIVERSIDAD CATÓLICA "NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN"  
CAMPUS UNIVERSITARIO ALTO PARANÁ  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
Teléfono: 595 61 572 467/9 Interno: 113 Web: [www.ucap.edu.py](http://www.ucap.edu.py)  
Paraná Country Club - Hernandarias - Paraguay





**UNIVERSIDAD CATÓLICA "NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN"  
CAMPUS UNIVERSITARIO ALTO PARANÁ  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
Teléfono: 595 61 572 467/9 Interno: 113 Web: [www.ucap.edu.py](http://www.ucap.edu.py)  
Paraná Country Club - Hernandarias - Paraguay





**UNIVERSIDAD CATÓLICA "NUESTRA SEÑORA DE LA ASUNCIÓN"  
CAMPUS UNIVERSITARIO ALTO PARANÁ  
FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA**  
Teléfono: 595 61 572 467/9 Interno: 113 Web: [www.ucap.edu.py](http://www.ucap.edu.py)  
Paraná Country Club - Hernandarias - Paraguay



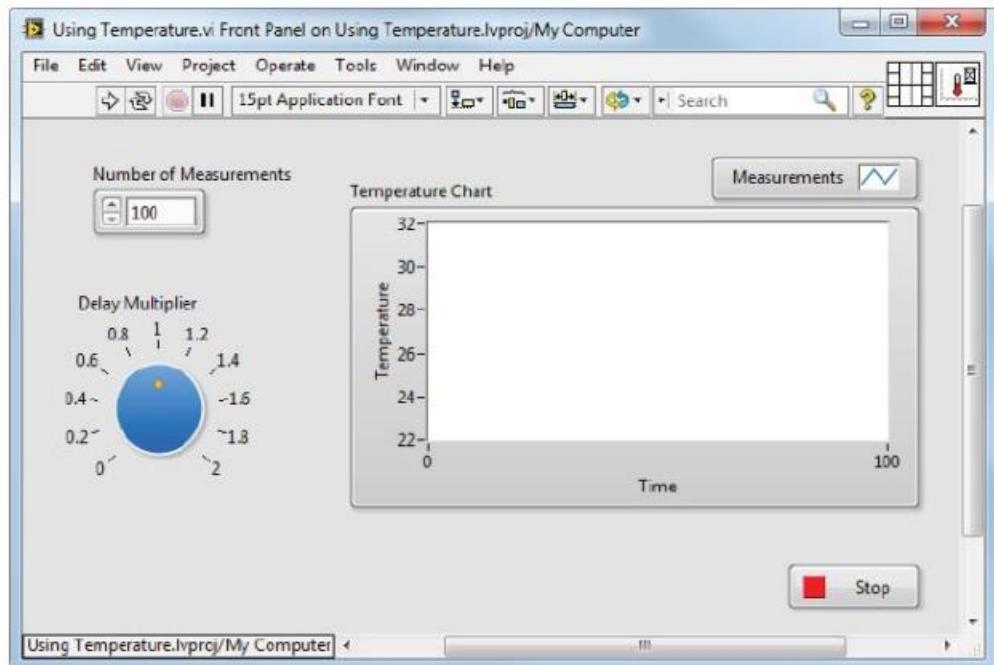
## Apéndice G

### LabVIEW

LabVIEW es un entorno de programación gráfico. Ofrece integración con miles de dispositivos y facilita cientos de librerías integradas para análisis avanzados y visualización de datos para crear instrumentos virtuales.

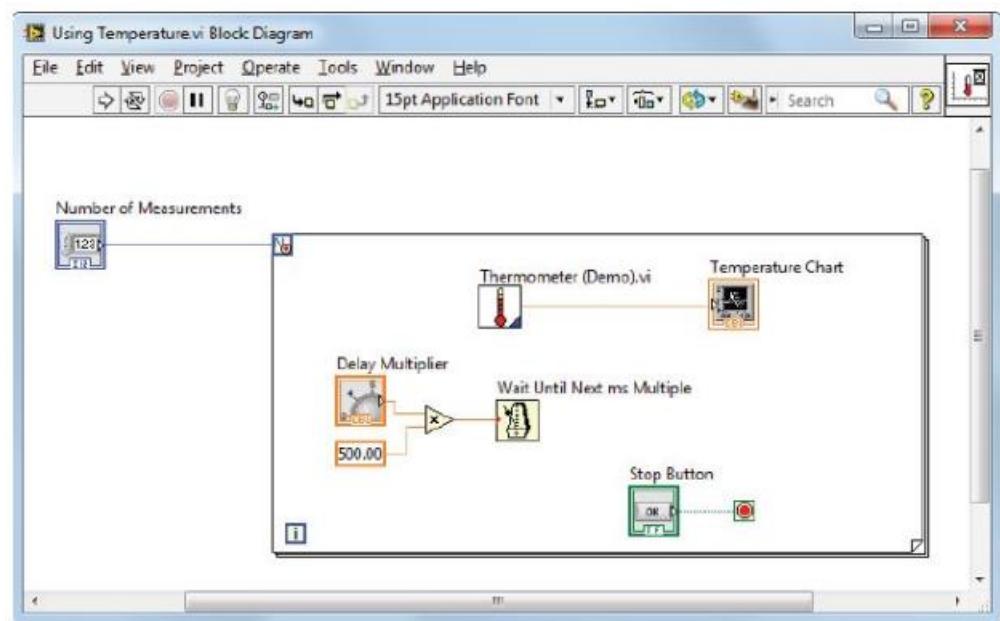
Ya que LabVIEW imita la apariencia y operación de instrumentos físicos, como osciloscopios y multímetros, los programas en LabVIEW son llamados instrumentos virtuales o VIs. Los Vis tienen panel frontal y diagrama de bloques. El panel frontal es la interfaz de usuario. El diagrama de bloques es el programa detrás de la interfaz de usuario. El código en el diagrama de bloques es código gráfico, también conocido como código G o código de diagrama de bloques.

Figura 63: Panel frontal de un VI



Fuente: National Instruments (2014a)

Figura 64: Diagrama de bloques de un VI



Fuente: National Instruments (2014a)

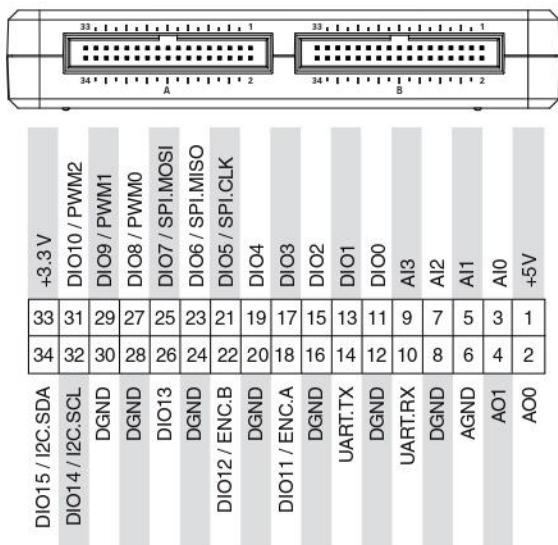
## **Apéndice H**

### **Disposición de los puertos en NI myRIO**

## Connector Pinouts

NI myRIO-1900 Expansion Port (MXP) connectors A and B carry identical sets of signals. The signals are distinguished in software by the connector name, as in ConnectorA/DIO1 and ConnectorB/DIO1. Refer to the software documentation for information about configuring and using signals. The following figure and table show the signals on MXP connectors A and B. Note that some pins carry secondary functions as well as primary functions.

**Figure 3.** Primary/Secondary Signals on MXP Connectors A and B



**Table 1.** Descriptions of Signals on MXP Connectors A and B

Signal Name	Reference	Direction	Description
+5V	DGND	Output	+5 V power output.
AI <0..3>	AGND	Input	0-5 V, referenced, single-ended analog input channels. Refer to the <i>Analog Input Channels</i> section for more information.
AO <0..1>	AGND	Output	0-5 V referenced, single-ended analog output. Refer to the <i>Analog Output Channels</i> section for more information.
AGND	N/A	N/A	Reference for analog input and output.
+3.3V	DGND	Output	+3.3 V power output.
DIO <0..15>	DGND	Input or Output	General-purpose digital lines with 3.3 V output, 3.3 V/5 V-compatible input. Refer to the <i>DIO Lines</i> section for more information.
UART.RX	DGND	Input	UART receive input. UART lines are electrically identical to DIO lines.
UART.TX	DGND	Output	UART transmit output. UART lines are electrically identical to DIO lines.
DGND	N/A	N/A	Reference for digital signals, +5 V, and +3.3 V.

## **Apéndice I**

### **Invitación para la NI WEEK 2019**



Dear Ariel Bogado,

It is with great satisfaction we would like to invite you for attending **NIWeek 2019**, our annual user conference in Austin, Texas from May 20-23. Given your engagement and accomplishments using our technology along with the fact you are enrolled in an academic institution makes you a valuable participant and contributor for the conference, it will be a pleasure to have your presence participating and contributing to the event through discussions with peers from other universities and industry from all parts of the world.

A Full Conference Pass for NI Week 2019 costs US\$ 1,095.00 if purchased before May 19<sup>th</sup>, due to your commitment, outstanding accomplishments and positive impact at the Robocar Race in 2018, National Instruments is glad to offer you a free Full Conference Pass for NI Week this year.

**Overall, the NIWeek conference provides:**

- More than 200 hours of technical, case study, and panel sessions
- 40+ hands-on product sessions
- 50+ training, certifications, and badging opportunities
- Over 100 exhibitors featuring the latest test and measurement advancements
- Keynote presentations from industry thought leaders

**I thought you might find these sessions in the Academic track valuable:**

- Using Record Players and LabVIEW to Teach PID Control
- Industry-University Partnerships
- Increasing Undergraduate Exposure to Interdisciplinary Design

See the attached flyer for an overview of all sessions and presenters.

**At the NIWeek Expo, I think you should visit our Academic pavilion to see these demos:**

- Oklahoma State University's Endeavor Labs
- New Solutions for Teaching Circuits and Measurements
- 16x1 Massive MIMO

If needed I would be happy to set up a quick 10 min follow-up call with a NI team member or even an in-person meeting at an appropriated time if you have any questions on the event.

Looking forward to your participation in this year NI Week edition.

Best Regards,

A handwritten signature in black ink, appearing to read "André Oliveira".

André Oliveira  
Regional Sales Manager  
Brazil and Cono Sur