

DISEÑO Y MONTAJE DEL SISTEMA DE TRACCIÓN ELÉCTRICA DE UN
VAGÓN

DAVID ENRIQUE CUESTA GOMEZ
NESTOR DE JESUS CALLEJAS MANDON

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA
2019

DISEÑO Y MONTAJE DEL SISTEMA DE TRACCIÓN ELÉCTRICA DE UN
VAGÓN

DAVID ENRIQUE CUESTA GOMEZ
NESTOR DE JESUS CALLEJAS MANDON

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO
ELECTRONICO

DIRECTOR
JAIME GUILLERMO BARRERO PÉREZ
MAGISTER EN POTENCIA ELECTRICA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2019

AGRADECIMIENTOS

Este proyecto se ha llevado a cabo gracias al apoyo de nuestras familias, amigos y docentes por estar al pendiente de nosotros y brindar su ayuda, asesoría cuando fue necesario.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. OBJETIVOS.....	17
1.1 OBJETIVO GENERAL	17
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. CALCULO DE LAS ESPECIFICACIONES DEL MOTOR	18
2.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN.....	18
2.1.1 Cálculos de selección del motor..	18
3. COMPONENTES DEL SISTEMA DE ARRASTRE	22
3.1 Conjunto Motor-controlador..	22
3.1.1 Club Car series Engine and Controller.....	22
3.1.2 L16E-AC Batteries..	31
3.2 COMPONENTES DEL SISTEMA DE CENSADO Y VISUALIZACION DE VARIABLES	34
3.2.1 ESP32.....	34
3.2.2 Nextion display.....	37
3.2.3 Medidor de RPM..	38
3.2.4 Medidor de la corriente del motor.	38
3.2.5 Medidor de la tensión del banco de baterías..	39
4. CONEXIONES HARDWARE.	40
4.1 CONEXIONES ENTRE DISPOSITIVOS.....	40
4.1.1 Esquema de conexión de la pantalla Nextion y la ESP32.....	40
4.1.2 Esquema de conexión del <i>shunt</i> y la ESP32..	41
4.1.3 Esquema de conexión del censado de voltaje.....	42
4.1.4 Esquema de conexiones sensor de efecto Hall.....	43

4.1.5 Control de cambio de giro del motor.....	44
5. SOFTWARE Y TRANSMISIÓN DE DATOS VÍA WI-FI USANDO THINGER.IO.	46
5.1 ARDUINO IDE.	46
5.2 NEXTION EDITOR.. . . .	46
5.3 TRANSMISIÓN DE DATOS VÍA WI-FI A LA INTERFAZ DE THINGER.IO. . .	48
6. RESULTADOS.....	51
6.1 RESULTADOS DE PRUEBAS.....	51
6.1.1 Resultados censado del voltaje.	51
6.1.2 Resultados cesando de corriente.	58
6.1.3 Resultados censado de RPM.....	62
6.1.4 Sistema de tracción.	65
6.1.5 Tablero del sistema de control.	66
7. CONCLUSIONES	69
8. RECOMENDACIONES.....	70
BIBLIOGRAFÍA.....	71

LISTA DE TABLAS

Pág

Tabla 1. Porcentajes de carga de un Banco de baterías de 24 [V].....	33
Tabla 2. Comparaciones del sensor de voltaje entre multímetro y de la ESP32 sin calibrar.	52
Tabla 3. Comparación valores del ADC ESP32 y multímetro (Fluke 117c).	53
Tabla 4. Valores del sensor aumentando a la cantidad de muestras.	55
Tabla 5. Valores de tensión pruebas de campo.....	56
Tabla 6. Datos tomados en laboratorio censado de corriente	59
Tabla 7. Valores de corriente pruebas de campo sin carga.....	62
Tabla 8. Prueba 1 sensor de efecto hall y tacómetro con porcentaje de error..	63
Tabla 9. Toma de valores del sistema de monitoreo.	68

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. DCL (diagrama de cuerpo libre) del vagón	19
Figura 2. Esquema del motor serie.....	23
Figura 3. Apariencia del Motor de carrito de golf eléctrico D & D 170-004-00001.	25
Figura 4. Caja reductora LHYJ-4A125-Y1-21 usada en el sistema	26
Figura 5. Controlador ALLTRAX y sus puertos.....	27
Figura 6. Conexión del sistema de arrastre.	28
Figura 7. Fusible AN400	29
Figura 8. Contactor SW180	30
Figura 9. Solenoide de reversa ZJSF-41-12V/24V	30
Figura 10. Esquema del ZJSF-41-12V/24V	31
Figura 11. Apariencia de la batería l16E-AC.	32
Figura 12. Tabla de porcentajes de carga de la batería.	32
Figura 13. Desempeño de la L16E-AC	33
Figura 14. ESP32 apariencia y DOIT.....	34
Figura 15. Módulo Lm2596.....	37
Figura 16. Nextion display apariencia y puertos	37
Figura 17. Modulo Sensor Lineal Efecto Hall 49E	38
Figura 18. Apariencia y puertos del módulo INA219.....	39
Figura 19. Esquema de conexión ESP32-Nextion Display.	40
Figura 20. Shunt 300 Amp 75mv.	41
Figura 21. Conexión entre shunt y la ESP32.....	42
Figura 22. Conexiones del censado de voltaje con protecciones contra sobre picos.	43
Figura 23. Conexiones entre el sensor de efecto Hall y la ESP32.....	44
Figura 24. Esquema de conexión de enclavamiento digital.....	45
Figura 25. Interfaz de monitoreo de variables.	46

Figura 26. Visualización de datos en la plataforma Thinger.io.	50
Figura 27. Linealidad del ADC	54
Figura 28. Tendencia polinómica.....	55
Figura 29. Tendencia lineal SHUNT	61
Figura 30. Capacitor 4.7uF del kit de Alltrax.....	68

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

	Pág.
Fotografía 1. Esquema de conexiones- pruebas censado de voltaje.	52
Fotografía 2. Evidencia de pruebas del medidor de corriente con el motor	62
Fotografía 3. Esquema de conexiones- pruebas sensor Efecto Hall	64
Fotografía 4. Sistema de monitoreo de variables.	65
Fotografía 5. Sistema de tracción.	66
Fotografía 6. Tablero del sistema de control de giro.....	66
Fotografía 7. Señal de salida del controlador ALLTRAX	67

TABLA DE VARIABLES

Para una mayor comprensión de la solución de los ejercicios, en la siguiente tabla se muestran las variables, su significado y unidades:

Variable	Significado	Unidades
F	Fuerza	N
M_M	Momento motor	Nm
M_C	Momento carga	Nm
R	Radio	m
J	Momento inercia	$Kg \cdot m^2$
P	Potencia	W
m	Peso	Kg
J_{eq}'	Momento equivalente	$Kg \cdot m^2$
Ω	Velocidad angular	r/s
Ω_{LL}	Velocidad angular rueda	r/s
Ω_M	Velocidad angular motor	r/s
HP	Potencia en caballos de fuerza	HP
f	Frecuencia	Hz
RPM	Revoluciones por minuto	RPM
P_g	Potencia generada	W
KT	Constante motor serie	$V \cdot s/A$
Φ	Flujo	$N \cdot m^2/C$
E_{an}	Tensión inducida nominal	V
I_n	Corriente nominal	A
Ω_N	Velocidad angular nominal	RPM
RT	Resistencia de armadura	Ω

LISTA DE ANEXOS

(Los anexos están adjuntos en el CD y se pueden visualizar en base de datos de la biblioteca UIS).

- ANEXO A. Configuración de Arduino IDE para ESP 32.
- ANEXO B. Creación de una interfaz en Nextion Editor.
- ANEXO C. Configuración de librerías Espressif para Arduino IDE.
- ANEXO D. Configuración para envío de datos a la Nextion Display.
- ANEXO E. Manual de conexión del controlador ALLTRAX.
- ANEXO F. Datasheet del *INA219*.
- ANEXO G. Librerías de Espressif e ITEAD.
- ANEXO H. Especificaciones del controlador ALLTRAX.
- ANEXO I. Club car application & cross reference guide.
- ANEXO J. Nextion editor.
- ANEXO K. Código del sistema de monitoreo de variables.
- ANEXO L. Manual software Alltrax Toolkit.
- ANEXO M. Software Alltrax Toolkit.
- ANEXO N. Datasheet L16EAC batteries.
- ANEXO O. Trasmisión de datos usando una red local usando la ESP32 por medio de la plataforma THINGER.IO.
- ANEXO P. Tipos de motores.
- ANEXO Q. Tabas complementarias pruebas de censado.
- ANEXO R. Evidencias fotográficas complementarias sistema de tracción y censado de variables.

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y MONTAJE DEL SISTEMA DE TRACCIÓN ELÉCTRICA DE UN VAGÓN *

AUTORES: DAVID ENRIQUE CUESTA GOMEZ**
NESTOR DE JESUS CALLEJAS MANDON**

PALABRAS CLAVE: TRACCIÓN, SISTEMAS, SHUNT, VAGON, TREN.

DESCRIPCIÓN:

Este proyecto nace como una iniciativa entre las escuelas de ingeniería mecánica y de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones de la universidad industrial de Santander, en la que se implementó un sistema de tracción eléctrica a un vagón con el fin de liberar a las personas que se dedican a movilizar materiales por medio de vagones, lo que trae consigo una mejora en las actividades desarrolladas en estas industrias, este vagón además tiene un sistema de monitoreo de la autonomía del banco de baterías permitiendo al usuario conocer el momento en el que estas necesiten ser cargadas o reemplazadas, aparte de la tensión eléctrica de las baterías, también se realizaron mediciones de la corriente y de la velocidad con la que mueve el vagón. El monitoreo de variables está conformado por componentes de censado como divisores de tensión resistivos, el INA219 (amplificador de instrumentación) y el sensor de efecto hall. Todas estas variables son procesadas por la tarjeta ESP32 y son visualizadas en una pantalla Nextion, la cual se comunica por un protocolo serial permitiendo mostrar los datos recogidos por el censado de variables, esta información también se envía por medio de Wi-Fi a un computador usando la plataforma THINGER.IO .

* Trabajo de grado .

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela ingeniería electrónica y telecomunicaciones. Director: Jaime Guillermo Barrero Pérez, Magister en Ingeniería Electrónica

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND ASSEMBLY OF A WAGON ELECTRICAL TRACTION SYSTEM *

AUTHORS: DAVID ENRIQUE CUESTA GOMEZ**
NESTOR DE JESUS CALLEJAS MANDON**

KEYWORDS: TRACTION, SYSTEMS, SHUNT, WAGON, TRAIN.

DESCRIPTION:

This project was born as an initiative between the schools of mechanical engineering and electrical engineering, electronics and telecommunications of the industrial university of Santander, in which an electric traction system was implemented to a wagon in order to free people who They are dedicated to mobilize materials by means of wagons, which brings with it an improvement in the activities developed in these industries, this wagon also has a system for monitoring the autonomy of the battery bank allowing the user to know the time when they need to be charged or replaced, apart from the electrical voltage of the batteries, measurements were also made of the current and the speed with which the wagon moves. Variable monitoring consists of census components such as resistive voltage dividers, the INA219 (instrumentation amplifier) and the hall effect sensor. All these variables are processed by the ESP32 card and are displayed on a Nextion screen, which is communicated by a serial protocol allowing the data collected by the variable census to be displayed. This information is also sent via Wi-Fi to a computer. using the THINGER.IO platform

* BachelorThesis

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of electronic engineering and telecommunications.
Director: Jaime Guillermo Barrero Pérez, Magister in Electronic Engineering

INTRODUCCIÓN

Este proyecto nació como una iniciativa entre las escuelas de ingeniería mecánica e ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones de la universidad industrial de Santander, y tuvo como objetivo “motorizar” un vagón que se usa para el transporte de carga en una mina para aumentar la productividad y mejorar la calidad de vida de los trabadores que eran dedicados a propulsar dicho vagón con su propia fuerza. Con base en las especificaciones de carga, velocidad, trayectoria que debía recorrer el vagón, junto con la escuela de mecánica, se seleccionaron el motor eléctrico, su controlador y el banco de baterías. El vagón cuenta con un sistema de monitoreo de variables entre las que se encuentra el estado de carga del banco de baterías, la velocidad del motor (en RPM), esta se realizó por medio de un sensor de efecto hall. Cuenta además con sistema que censa la corriente que consume el motor compuesto por un INA219 (Amplificador de instrumentación) y un sensor de corriente tipo “shunt”. Las variables son procesadas por medio de una tarjeta ESP32 y por medio de la pantalla Nextion se muestran los datos censados al operario que maneja el vagón, esta información también se envía por medio de Wi-Fi a un computador. A continuación, se muestra el desarrollo de las actividades y la investigación llevada a cabo para completar este proyecto.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar el diseño y la selección de los componentes de un sistema de tracción eléctrica de un vagón, junto con un sistema de monitoreo de variables.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ❖ Determinar la potencia que debería tener un motor para subir un vagón durante 1km con una carga de 1 tonelada a una pendiente máxima de 10° y desarrollar una velocidad de 5km/h.
- ❖ Seleccionar el motor reductor, controlador, banco de baterías y demás accesorios para mover el vagón de manera segura.
- ❖ Diseñar e implementar un sistema monitoreo de variables como tensión y corriente de baterías. Los datos arrojados por el monitor se enviarán por medio de un servidor usando una red local.
- ❖ Entregar el sistema completamente cableado y probado para que pueda ser posteriormente instalado en un vagón.

2. CALCULO DE LAS ESPECIFICACIONES DEL MOTOR

2.1 CRITERIOS DE SELECCIÓN.

Por requerimientos de la empresa, se requiere diseñar un sistema de tracción eléctrica para subir un vagón con un peso de una tonelada por una pendiente con 10° grados a una velocidad máxima de 5km/h, el trayecto tiene una longitud de 1km. Una vez este llegue al punto deseado el vagón será cargado, este proceso dura 20 minutos, una vez cargados los vagones, se realiza el mismo recorrido de regreso (bajando), esta vez con una carga cercana a las 3 toneladas; se estima que el tiempo total entre la salida del vagón y el regreso de este al punto de partida, dure alrededor de 1 hora. Dada esta premisa, la empresa requiere de un sistema que realice el recorrido planteado durante las 8 horas laborales, además de contar con un sistema de monitoreo de variables que permita observar los valores del porcentaje de carga y la tensión del banco de baterías, las RPM del sistema y la corriente que este consume.

2.1.1 Cálculos de selección del motor. Teniendo en cuenta la situación planteada se realizaron los siguientes cálculos con el fin de hallar la potencia, el torque y las RPM que debe desarrollar el motor.

Dada la naturaleza de este proyecto el cual se realizó con la escuela de ingeniería mecánica, se pidió asesoría en la selección de un motor que se acoplaría a una caja reductora (la LHYJ-4A125-Y1-21) con una relación 21:1 y un acople de cadena con una relación de 1,3:1 a unas ruedas de 28 cm de diámetro. El sistema de tracción debe alcanzar la velocidad requerida, 5 Km/h.

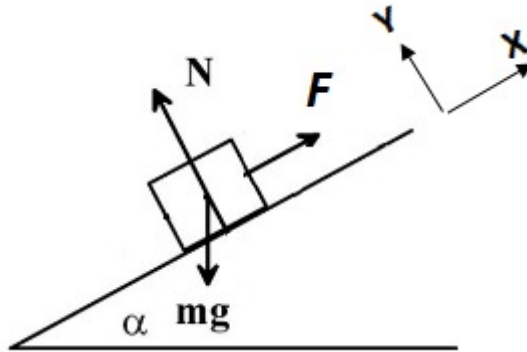
Cálculo de la potencia y velocidad del motor:

Esta se determina bajo las condiciones máximas de carga a la que puede ser sometido el motor, es decir, el encendido durante la máxima carga a la máxima inclinación de 10° . El sistema debe llegar a la velocidad máxima de 5 km/h.

Cálculo de la potencia del motor sin considerar pérdidas y sin considerar la aceleración del tren:

Esta se determina bajo las condiciones más desfavorables a la que puede ser sometido el motor. Como la caja no es reversible, esta se presenta cuando el motor debe subir la carga (una tonelada), a la máxima inclinación de 10° . A este peso se le adiciono 300 Kg, un supuesto para el peso del motoreductor y el banco de baterías. El sistema debe llegar a la velocidad máxima de 5 km/h, (según el decreto 1886 del 21 de septiembre de 2015 en la reglamentación de seguridad de vehículos en labores mineras subterráneas).

Figura 1. DCL (diagrama de cuerpo libre) del vagón



$$\sum F = \frac{d}{dt}(m * v) = m * a \quad (1)$$

$$\sum M = \frac{d}{dt}\left(\frac{mR^2V}{R}\right) = J \frac{d\Omega}{dt} = JA \quad (2)$$

$$R_{LL} = 0.14[m] \quad (3)$$

$$v = 5 \left[\frac{km}{h} \right] = 1.38 \left[\frac{m}{s} \right] \quad (4)$$

$$Red = 21 * 1.3 = 27.3 \quad (5)$$

$$m = 1300[Kg] \quad (6)$$

$$Jeq' = m \frac{R_{ll}^2}{Red^2} = 1300 * \left(\frac{0.14}{27.3} \right)^2 = 0,034[Kg * m^2] \quad (7)$$

$$M_M - M_{C1} = Jeq' \frac{d\Omega}{dt} \quad (8)$$

$$M_{C1} = \frac{m * g * \text{sen}(10) * R_{ll}}{Red} = \frac{1300 * 9.8 * \text{sen}(10) * 0.14}{27.3} = 11.34[Mm] \quad (9)$$

$$\Omega_{ll} = \frac{v}{R_{LL}} = \frac{1.38}{0.14} = 9.92 \left[\frac{r}{s} \right] \quad (10)$$

$$\Omega_M = \Omega_{ll} * Red = 9.92 * 27.3 = 270.83 \left[\frac{r}{s} \right] \quad (11)$$

$$\Omega_M = 2\pi * f \quad (12)$$

$$f = 43.10[Hz] \quad (13)$$

$$RPM = 2586[RPM] \quad (14)$$

$$P1 = F * V = M_{C1} * \Omega_M = 11.34 * 270.8 = 3073.58[W] \quad (15)$$

$$HP1 = 4.12 [HP] \quad (16)$$

Después de seleccionar el motor para una pendiente de 10°, se nos informó que por adecuación del terreno este valor cambio su valor a 3° y que el peso total del motor-reductor con las baterías y demás accesorios cambio a 500 Kg. Con esta nueva información se procedió a verificar que el motor seleccionado sigue cumpliendo con las especificaciones de la empresa, por lo cual se recalcularon los valores.

$$M_{C2} = \frac{m * g * \text{sen}(3) * R_{ll}}{Red} = \frac{1500 * 9.8 * \text{sen}(3) * 0.14}{27.3} = 3.94[Mm] \quad (17)$$

$$P2 = F * V = M_{c2} * \Omega_M = 3.94 * 270.8 = 925.94[W] \quad (18)$$

$$HP2 = 1.24 [HP] \quad (19)$$

Una vez realizados los cálculos,

Para la selección del motor, se tuvo en cuenta que tipos de motores son actualmente los más usados para sistemas de tracción eléctrica, estos son el motor de c.c serie y el motor de inducción [ver anexo P]. Por las características de la caja reductora (no reversible) y por su alto torque, se seleccionó el motor serie, la velocidad de descenso del sistema será controlada mecánicamente por un freno. El motor de combustión fue descartado por aspectos de legislación (seguridad de los trabajadores).

3. COMPONENTES DEL SISTEMA DE ARRASTRE

En esta sección se presentan los componentes mecánicos y eléctricos del sistema de arrastre del tren.

3.1 CONJUNTO MOTOR-CONTROLADOR.

Se encontró conveniente la compra de un *kit* controlador y motor del mismo fabricante pues al buscar estos por separado costaban más.

3.1.1 Club Car series Engine and Controller. D&D Motor Systems Inc y la empresa ALLTRAX venden un *kit* que contiene un motor de corriente continua serie y un controlador electrónico de velocidad.

Motor D&D 170-004-0001: Es un motor desarrollado por la empresa D&D Motor Systems, es un motor eléctrico serie el cual opera entre 24 a 36 volts, fue escogido para la labor de arrastre del vagón debido a que cuenta con las siguientes características:

- ❖ Motor serie 36 VDC
- ❖ 2750 RPM ($\Omega_n \approx 288$ rad/S)
- ❖ 5 HP ≈ 3730 W
- ❖ 8,0 HP pico a 2780 RPM ;(1,6 potencia nominal)
- ❖ 58 lbs

Con el motor elegido se realizaron en el laboratorio pruebas de rotor bloqueado para determinar la resistencia total de los dos devanados R_T y se encontró que esta es de aproximadamente 40m Ω .

Con el motor elegido se realizaron los siguientes cálculos para comprobar si puede cumplir con los requerimientos de desempeño en las situaciones planteadas en el capítulo anterior:

$$V = 36[V] \quad (20)$$

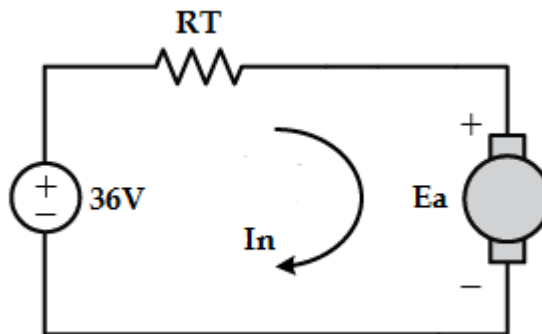
$$Pg \approx Pout = 5[HP] = 3730[W] = M_m * \Omega_n = Ean * I_n \quad (21)$$

$$M_m = \frac{3730}{288} = 12,95 [Nm] \quad (22)$$

$$M_m = k * \phi * I_n = k * k_i * I_n * I_n = K_T * I_n^2 \quad (23)$$

De la figura 2, se pueden calcular la tensión inducida Ean en condiciones nominales:

Figura 2. Esquema del motor serie



$$Vin = I_n * RT + Ean \quad (24)$$

$$Ea = k * \phi * \Omega_n \quad (25)$$

Y como el flujo es proporcional a la corriente.

$$\phi = k_i * I_n \quad (26)$$

$$E_{an} = k_i * k * I_n * \Omega_n = K_T * I_n * \Omega_n \quad (27)$$

$$Potencia en el eje \approx P_g = 5[HP] = 3730[W] = M_m * \Omega_n = E_{an} * I_n \quad (28)$$

De la ecuación 24.

$$E_{an} = V_{in} - I_n * R_T = 36 - 0,04 * I_n \quad (29)$$

De la ecuación 28 se resuelve.

$$3780 \approx (36 - 0,04 * I_n) * I_n$$

$$I_n \approx 121,36[A]$$

$$E_{an} = 31,14[V]$$

Y de la ecuación 28 donde:

$$K_T = \frac{E_{an}}{(I_n * \Omega_n)} = \frac{31,14}{(121,36 * 288)} \approx 890e^{-6} [V * \frac{s}{A}]$$

Se puede calcular el M_m de la ecuación 28.

$$M_m = K_T * I_n^2 = 890e^{-6} * 121,36^2 = 13.10[Nm] \quad (30)$$

Para subir 1,5 toneladas por una pendiente de 3°, sin considerar momentos de aceleración y pérdidas, se tiene un $M_m = 3,94\text{Nm}$ que requieren a una corriente de 66,5[A].

Con base en los cálculos realizados, se va a relacionar el valor de la pendiente, con el tiempo que le tomaría al motor en alcanzar la velocidad de 5 Km/H. Basado en la ecuación 8, se tiene que:

$$M_M = 13,10 \text{ [Nm]}$$

$$M_{C1} = 11,34 \text{ [Nm]}; \text{ para una pendiente de } 10^\circ$$

$$M_{C2} = 3,94 \text{ [Nm]}; \text{ para una pendiente de } 3^\circ$$

Por lo tanto.

$$\text{Para } 10^\circ; dt = \frac{0,034 \cdot 270,83}{13,10 - 11,34} = 5,23 \text{ [s]}$$

$$\text{Para } 3^\circ; dt = \frac{0,034 \cdot 270,83}{13,10 - 3,94} = 1 \text{ [s]}$$

A continuación, se muestra la apariencia del motor utilizado para este proyecto:

Figura 3. Apariencia del Motor D & D 170-004-00001



Fuente: Imagen Motor D&D de la empresa D&D motors [En Línea]. (Recuperado 15 en noviembre 2017). Archivo se encuentra Disponible en <http://ddmotorsystems.com/GolfCartMotorPage.php>

Este motor se acopla a una caja reductora para generar mayor torque, la caja reductora usada fue la siguiente:

Caja reductora LHYJ-4A125-Y1-21. La caja reductora es un sistema de engranajes que permite una disminución en la velocidad y un aumento del torque de salida que será aplicado en las ruedas del tren, ver figura 4.

- ❖ Potencia: 8 HP
- ❖ $r = \Omega_m / \Omega_s = 21$
- ❖ peso de 70 Kg.

Figura 4. Caja reductora LHYJ-4A125-Y1-21 usada en el sistema

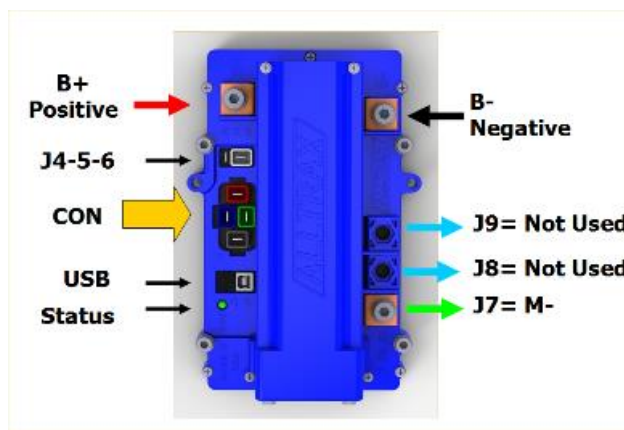


Controlador ALLTRAX: Pertenece a la familia de controladores desarrollados por la empresa ALLTRAX con el que se realizan las conexiones necesarias con otros dispositivos para controlar el arranque y la reversa del motor, el controlador posee las siguientes características:

- ❖ $F_s = 18 \text{ KHz}$

- ❖ In = 380 A
- ❖ Trabaja con tensiones de 24 a 48 VDC
- ❖ USB 2.0 compatible para programar la configuración del usuario.
- ❖ Caja FN-1 compatible para velocidad de usuario y control de aceleración.
- ❖ Permite el control de la velocidad, el arranque y el cambio de sentido de rotación del motor.

Figura 5. Controlador ALLTRAX y sus puertos.

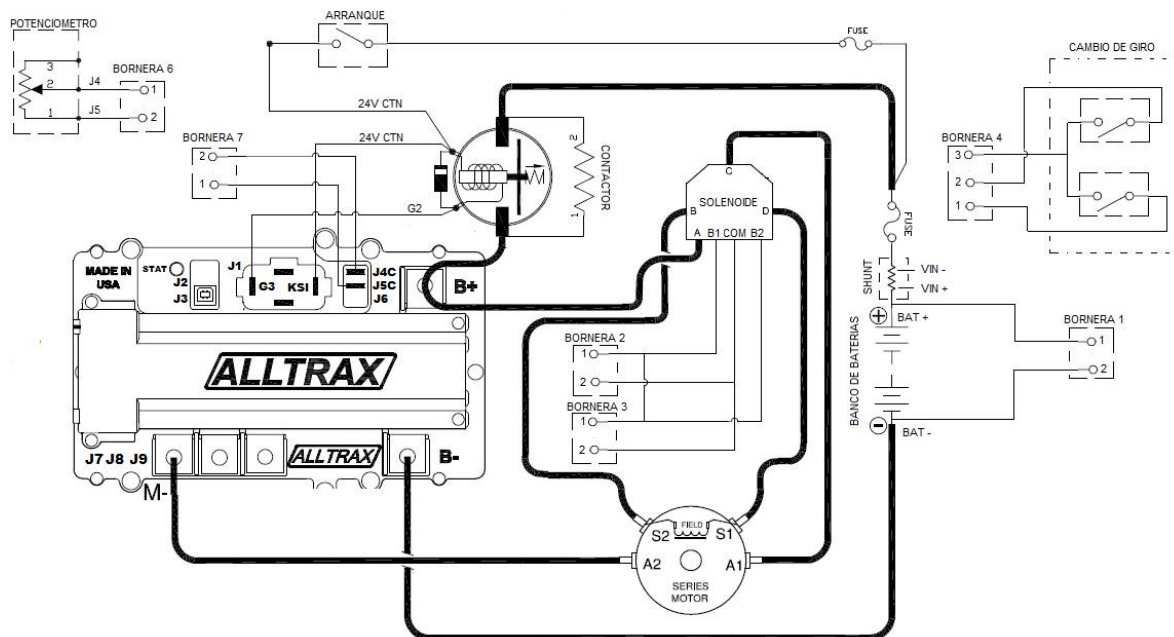


Fuente: ALLTRAX CONTROLLER [En línea]. (Recuperado en 15 de octubre 2017) disponible en configuración <https://alltraxinc.com/sr-series/>

Alltrax toolkit: Es el software usado por la compañía ALLTRAX para la programación de sus diferentes controladores, cuenta con una interfaz gráfica con tres opciones: *Control panel*, *Throttle response* y *Monitor*, en las cuales se pueden programar diversas opciones para el funcionamiento del controlador y la respuesta de este a señales externas. Ver anexo L.

La conexión seleccionada para el conjunto motor- controlador es la siguiente:

Figura 6. Conexión del sistema de arrastre.



Fuente: Modificado por los autores manual de conexión del ALLTRAX (en anexos).

- ❖ **Arranque:** Interruptor de encendido del sistema.
- ❖ **Contactor:** Contactor que al accionar el key-switch (encendido), permite que la tensión llegue y energice la bobina interna que este posee.
- ❖ **Potenciómetro:** Potenciómetro que sirve para variar la velocidad del motor.
- ❖ **Cambio de sentido:** Interruptor de tres posiciones para cambiar el sentido de giro del motor o dejarlo “en neutro”.
- ❖ **Solenoides :** Es un solenoide que posee dos bobinas internas, cuando se mueve **reverse/foward** es accionada en alguno de los sentidos adelante o atrás (**foward or reverse**) provoca que se energice algunas de las dos bobinas las cuales dada la conexión del sistema le hacen que el motor gire en un sentido u otro.

Fusible de 400 A: En la figura 5 se observa el uso de un fusible para la protección del sistema, el recomendado por el fabricante es el AN400. Ver figura 6.

Figura 7. Fusible AN400



Potenciómetro $\frac{3}{4}$ vuelta: Este se va a emplear con controlador de la velocidad con la que se mueve el tren el fabricante recomienda que sea de **5K Ω** .

Contactador Albright SW180: Utilizado para conectar el motor al banco de baterías.

- ❖ Voltaje: 12/24 VDC
- ❖ Nominal: 500 A

El SW180 ha sido diseñado para manejar cargas de corriente continua, incluidos los motores que se utilizan en vehículos eléctricos. Se recomienda colocar un diodo de libre paso en paralelo con la bobina del contactor para evitar sobretensiones, ver figura 8. (El fabricante recomienda el diodo 1N5408).

Figura 8. Contactor SW180



Fuente: Contactor SW180 [En línea]. (Recuperado en 17 de octubre 2017) disponible en <http://www.albrightinternational.com/products/sw180/>

Solenoide de reversa. Permite el cambio del sentido de rotación de un motor serie, para realizarlo cuenta con dos bobinas ver figura 9.

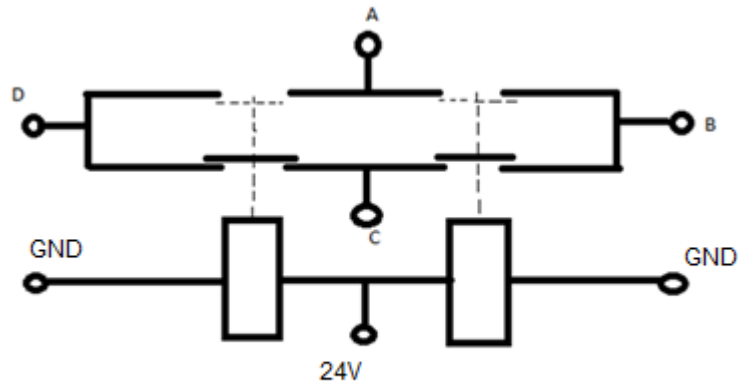
Figura 9. Solenoide de reversa ZJSF-41-12V/24V



Fuente: solenoide de reversa ZJSF-41-12V/24 V [En línea]. (Recuperado en 17 de octubre 2017) disponible en <https://es.aliexpress.com/item/Heavy-Duty-12V-24V-DC-Winch-Reversing-Solenoid-Relay-500A-Automotive-Switch/32819354117.html>

- ❖ Voltaje: 12/24 VDC
- ❖ Nominal: 500A
- ❖ M8 terminales de Entrada y Salida
- ❖ Construcción sólida sellado

Figura 10. Esquema del solenoide ZJSF-41-12V/24V



3.1.2 Baterías L16E-AC . Para garantizar que el motor pueda subir la carga de 1,5 Ton con un consumo de corriente ideal de alrededor de 66,5 [A] durante 12 minutos (que es el tiempo que le tomaría al tren recorrer 1 Km a una velocidad de 5 Km/h) y que sea capaz de repetir esta operación 8 veces en el día (12min* 8 = 96minutos = 1 hora 1/4), se requieren baterías de 107,2 A-H. Revisando características de baterías, las L16E-AC pueden suministrar 107,2 A-H durante 300...400 minutos, ver figura 13. Se requieren 4 baterías de este tipo para generar un voltaje de 24 voltios. Los principales datos técnicos de esta batería se muestran a continuación. [Ver anexo N].

- ❖ 6 VDC.
- ❖ Polipropileno, ciclo profundo.
- ❖ 57 Kg.

- ❖ 357 A-H durante 5 H, es decir en 5 horas entrega una corriente de 71,4 A.
- ❖ 100 A = 200 minutos.
- ❖ 200 A = 100 minutos.

Figura 11. Apariencia de la batería I16E-AC.



Figura 12. Tabla de porcentajes de carga de la batería.

Percentage Charge	Specific Gravity	Cell	6 Volt
100	1.277	2.122	6.37
90	1.258	2.103	6.31
80	1.238	2.083	6.25
70	1.217	2.062	6.19
60	1.195	2.040	6.12
50	1.172	2.017	6.05
40	1.148	1.993	5.98
30	1.124	1.969	5.91
20	1.098	1.943	5.83
10	1.073	1.918	5.75

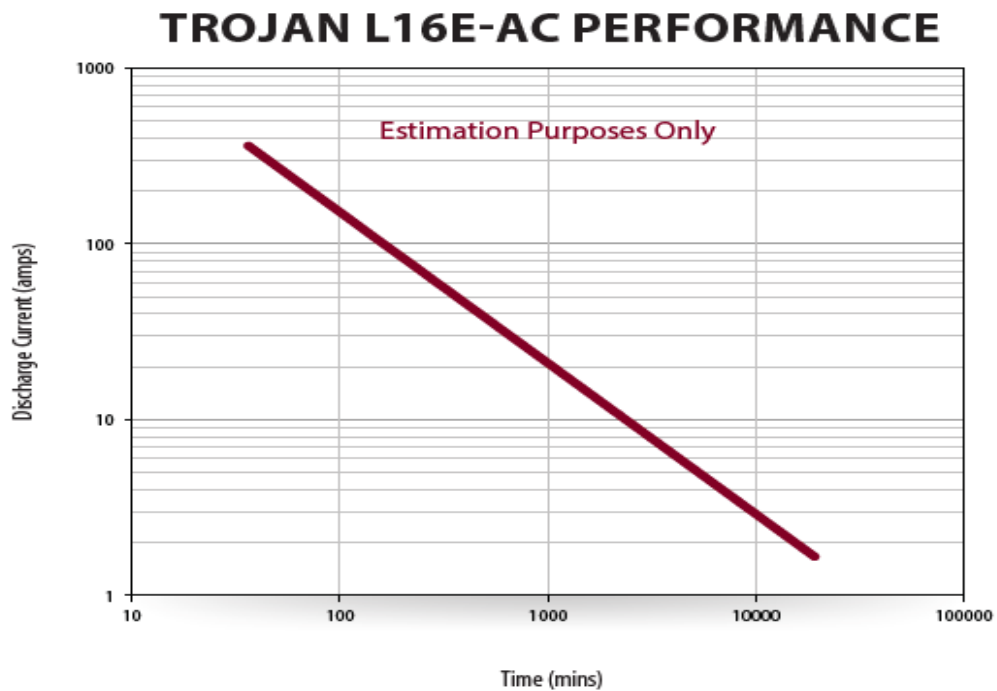
Fuente: L16EAC Trojan DataSheets (anexos) (Estado de carga medido de un voltaje de circuito abierto).

Basados en la tabla 12 de la batería se realizó el cálculo de los porcentajes de carga de un banco de baterías de 24 volts.

Tabla 1. Porcentajes de carga de un Banco de baterías de 24 [V]

Porcentaje de carga	Gravedad especifica	Cell	volts
100	5,108	8,488	25,48
90	5,032	8,412	25,24
80	4,952	8,332	25
70	4,868	8,248	24,76
60	4,78	8,16	24,48
50	4,688	8,068	24,2
40	4,592	7,972	23,92
30	4,496	7,876	23,64
20	4,392	7,772	23,32
10	4,292	7,672	23

Figura 13. Desempeño de la L16E-AC



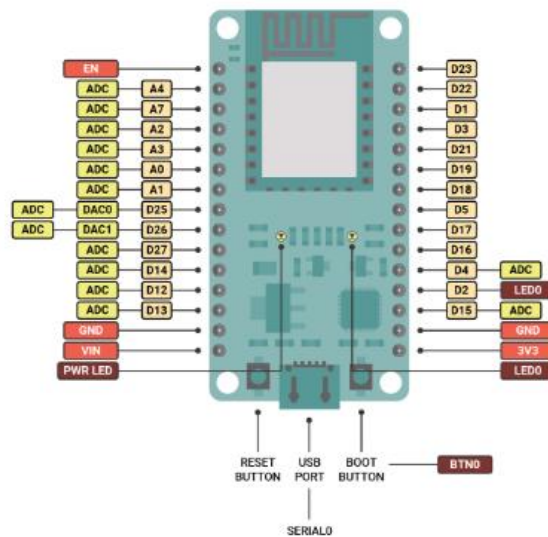
3.2 COMPONENTES DEL SISTEMA DE CENSADO Y VISUALIZACION DE VARIABLES

En esta sección se presentan los elementos electrónicos para realizar el censado de variables y la presentación de los mismos en una pantalla y en un pc usando Wi-Fi.

El corazón del sistema de monitoreo de variables se hizo con el procesador ESP32 y se eligió por alta capacidad de computo su bajo costo y bajo consumo de corriente.

3.2.1 ESP32. Es un microcontrolador de bajo costo y bajo consumo con Wi-Fi y Bluetooth integrado. La ESP32 utiliza un microprocesador Tensilica Xtensa LX6, creado y desarrollado por Espressif Systems, una compañía ubicada en China con sede en Shanghai, y es fabricado por TSMC utilizando su tecnología de 40 nm. Para este proyecto se utilizó la tarjeta de desarrollo de la empresa DOIT. Ver figura 14.

Figura 14. ESP32 apariencia y DOIT



Fuente: DOIT ESP32 DevKit v1 [En línea]. (Recuperado en noviembre 20 2017). https://docs.zerynth.com/latest/official/board.zerynth.doit_esp32/docs/index.html

La ESP32 puede ser programada por medio del software Arduino, esto facilita el desarrollo de aplicaciones debido a que se usa un lenguaje más comprensible e intuitivo y permite enlazarlo rápidamente con muchos periféricos. La ESP32 posee las siguientes características:

Procesador:

- ❖ CPU: microprocesador Xtensa 32-bit LX6, operando a 160 o 240 MHz y actuando hasta 600 DMIPS (Dhrystone Million Instructions Per Second)
- ❖ (ULP) co-procesador de ultra bajo consumo
- ❖ Memoria: 520 Kbytes SRAM

Conectividad inalámbrica:

- ❖ Wi-Fi: 802.11 b/g/n/e/i
- ❖ Bluetooth: v4.2 BR/EDR y BLE

Interfaces periféricas:

- ❖ 12-bit SAR ADC hasta 18 canales.
- ❖ 2 x 8-bit DACs
- ❖ 10 x sensores táctiles
- ❖ Sensor de temperatura
- ❖ 4 x SPI
- ❖ 2 x I²S
- ❖ 2 x I²C
- ❖ 3 x UART
- ❖ SD/SDIO/MMC host
- ❖ Slave (SDIO/SPI)
- ❖ Interfaz Ethernet MAC con DMA dedicado y IEEE 1588 soportado

CAN bus 2.0

- ❖ IR (TX/RX)
- ❖ Control motor PWM
- ❖ LED PWM hasta 16 canales
- ❖ Sensor de efecto hall
- ❖ Pre-amplificador de muy baja potencia

Seguridad:

- ❖ IEEE 802.11 todas las características de seguridad incluida, incluida WFA, WPA/WPA2 y WAPI
- ❖ Booteo seguro
- ❖ Encriptación flash
- ❖ 1024-bit OTP, up to 768-bit para usuario.
- ❖ Aceleración de hardware criptográfico: AES, SHA-2, RSA, curva elíptica criptográfica(ECC), generador de número aleatorio (RNG)
- ❖ Administración de energía interna LDO
- ❖ Dominio de potencia individual para RTC
- ❖ 5uA de corriente de sueño profundo
- ❖ Wake up from GPIO interrupt, timer, medidas de ADC.
- ❖ Vref out 3.3V.
- ❖ 300 mA con wi-fi, ble, 120 mA sin wi-fi, 5 uA sueño profundo.

La alimentación de esta tarjeta se realizó por medio de un convertidor de tensión de 24 a 5volts, 3 A.

La ESP es alimentada por un módulo Lm2596 conversor de Dc-dc Arduino.

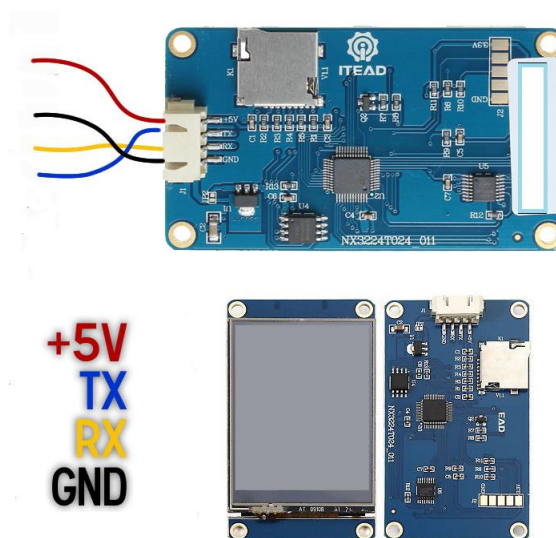
Figura 15. Módulo Lm2596



Fuente: Modulo Lm2596 [En línea]. (Recuperado en noviembre 20 2017).
<http://www.dnatechindia.com/LM2596-adjustable-power-supply-module.html>

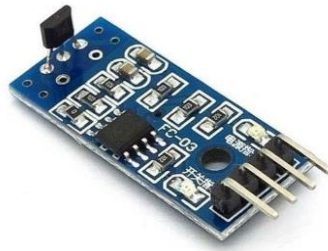
3.2.2 Nextion display. Nextion es una pantalla que facilita la interfaz hombre-máquina (HMI), la empresa Nextion ofrece tanto la pantalla como un potente editor de gráficos para programar la pantalla por medio de un puerto serie, ver figura 16

Figura 16. Nextion display apariencia y puertos



3.2.3 Medidor de RPM. Para medir las vueltas por minuto (RPM) del motor, se utilizó el módulo de Efecto Hall 49E, ver figura 17. Este módulo tiene un switch de efecto Hall que permite detectar la presencia de campo magnético, el cual se aprovechó en este proyecto para medir las vueltas que daba un imán colocado al eje del motor del tren.

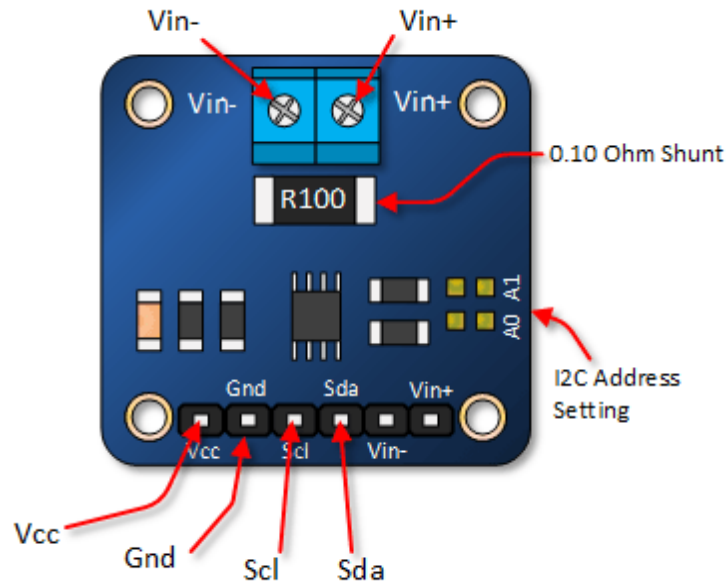
Figura 17. Modulo Sensor Lineal Efecto Hall 49E



Fuente: Moviltronics SAS [En línea]. Modulo Sensor Lineal Efecto Hall 49E (Recuperado en noviembre 15 2017). <https://moviltronics.com.co/sensores/175-sensor-efecto-hall-44e.html>

3.2.4 Medidor de la corriente del motor. Para realizar esta medida, se utilizó el módulo monitor de corriente/potencia con interfaz I²C INA 219, ver figura 18. Este módulo permite la lectura digital de corriente, tensión eléctrica, y potencia. Los registros programables permiten una configuración flexible para la resolución de la medición, así como el funcionamiento continuo en modo de operación. La información detallada de este módulo se encuentra en la hoja de datos (datasheet) Ver anexo F. En este proyecto se modificó la resistencia de censado que posee el módulo (100 mΩ a 3 A --300 mV), por una externa que soporta 300 A y presenta un resistencia $R_{SHUNT} = 250 \mu\Omega$ (75 mV, podría medir hasta 1200 A).

Figura 18. Apariencia y puertos del módulo *INA219*



Fuente: HENRY'S BENCH [En línea]. Módulo *INA219*. (Recuperado noviembre 20 2018), disponible en: <http://henrysbench.capnfatz.com/henrys-bench/arduino-current-measurements/ina219-arduino-current-sensor-voltmeter-tutorial-quick-start/>

3.2.5 Medidor de la tensión del banco de baterías. En la medición de tensión del banco de baterías que tiene un valor máximo de 36/24 v se decide utilizar un divisor de tensión por que las entradas analógicas de la ESP32 pueden medir hasta 3.3v, No se usó el *INA219* porque solo mide hasta 26 V y el banco puede llegar a 36 V, (cuando se utiliza la tensión de referencia analógica incorporada). Esta conexión cuenta con una protección que consta de un diodo zener de 3.3 V, que protege la tarjeta de sobretensiones y un capacitor, el cual tiene como objetivo atenuar el ruido eléctrico generado, entre otros, por el motor y el controlador Alltrax.

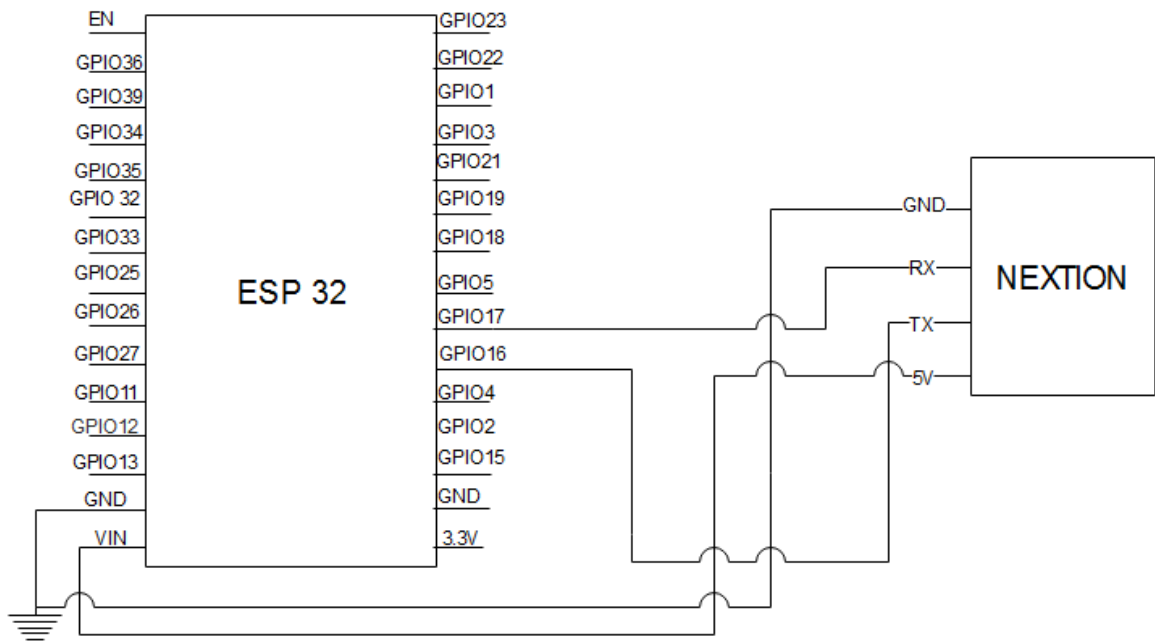
4. CONEXIONES HARDWARE.

4.1 CONEXIONES ENTRE DISPOSITIVOS.

El esquema de conexión entre los dos dispositivos que forman parte del sistema de censado y del sistema de arrastre del vagón son los siguientes.

4.1.1 Esquema de conexión de la pantalla Nextion y la ESP32. La ESP será alimentada por un módulo convertidor de 24V a 5V LM2596, este se omitirá de los siguientes esquemas de conexión con el fin de enfocarse en los otros dispositivos conectados a esta tarjeta.

Figura 19. Esquema de conexión ESP32-Nextion Display.

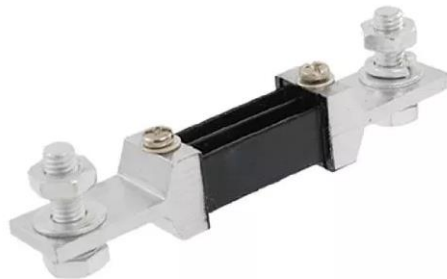


Fuente: Esquema eléctrico realizado en Edraw Max

Donde el cable amarillo es Rx de la Nextion Display y va conectado al Tx2 de la ESP32, el cable azul es el Tx de la Nextion y esta va conectado al RX2 de la ESP32.

4.1.2 Esquema de conexión del *shunt* y la ESP32. Para poder medir la corriente que consume el motor dependiendo del esfuerzo que esté realiza, se optó un sensor *shunt* el cual es una carga resistiva a través de la cual fluye una corriente eléctrica. Generalmente la resistencia de un *shunt* es conocida con precisión y es utilizada para determinar la intensidad de corriente eléctrica que fluye a través de él, mediante la medición de la diferencia de tensión entre sus terminales, una vez conocida la tensión la corriente es calculada por la ley de Ohm ($I = V/R$).

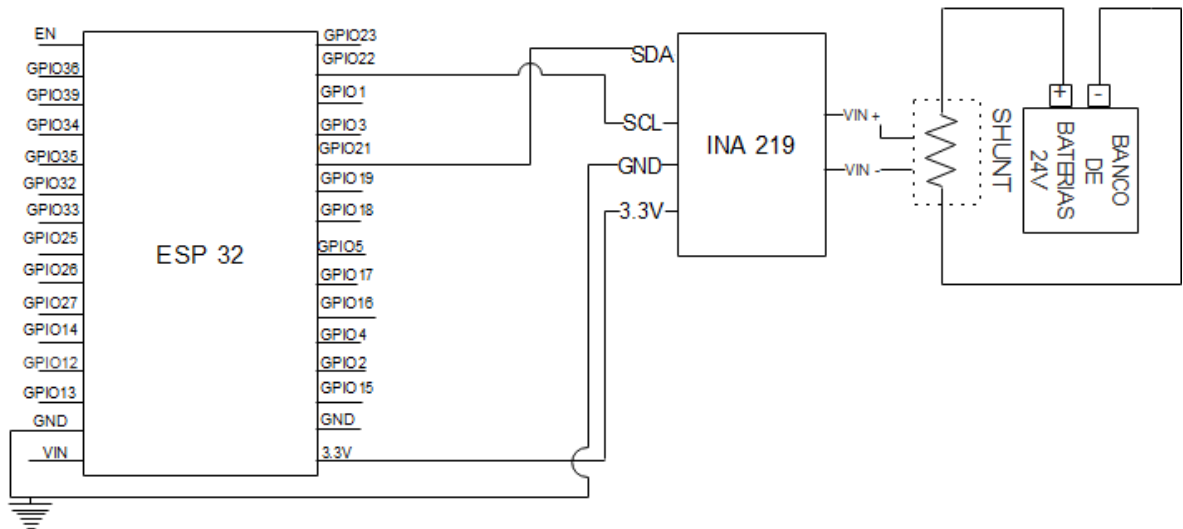
Figura 20. Shunt 300 Amp 75mv.



Es elemento fue elegido debido a que puede soportar corrientes de hasta 300 [A], lo cual es ideal para el sistema ya que este puede consumir corrientes muy altas, las cuales pueden ser cercanas a este valor .

La conexión que se debe realizar la obtener los valores de corriente de este elemento se puede observar en la figura 21.

Figura 21. Conexión entre shunt y la ESP32.

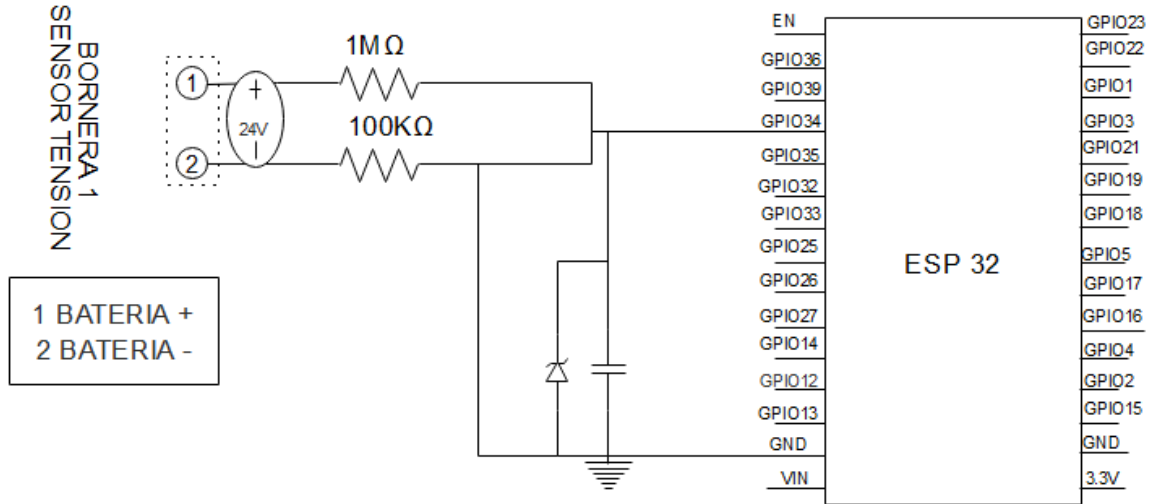


Fuente: Esquema eléctrico realizado en Edraw Max

El *shunt* se conecta a un a un módulo que contiene un *INA219* como se observa en la figura 21, este posee un *offset* a la entrada muy pequeño ($50 \mu\text{V}$) por lo que las medidas son obtenidas con alta precisión, normalmente este integrado viene incluido dentro de un módulo para Arduino el cual se comunica con el micro controlador por medio del protocolo I^2C , posee la capacidad de medir hasta 3.2A. Para adecuar el modulo a las necesidades del proyecto de removi6 la resistencia de medida que el trae por defecto y en su lugar fue puesto los terminales del *shunt*, lo que permite al m6dulo medir las tensiones del shunt las cuales proviene de corrientes que pueden llegar hasta los 300A y tensiones la cuales llegan hasta los 75m [V].

4.1.3 Esquema de conexi6n del censado de voltaje. El tipo de conexi6n que se debe realizar para el censado de tensi6n con las protecciones pertinentes las cuales son las conexiones con un diodo zener lo cuales protegen el micro controlador contra sobretensiones, ver figura 22:

Figura 22. Conexiones del censado de voltaje con protecciones contra sobre picos.

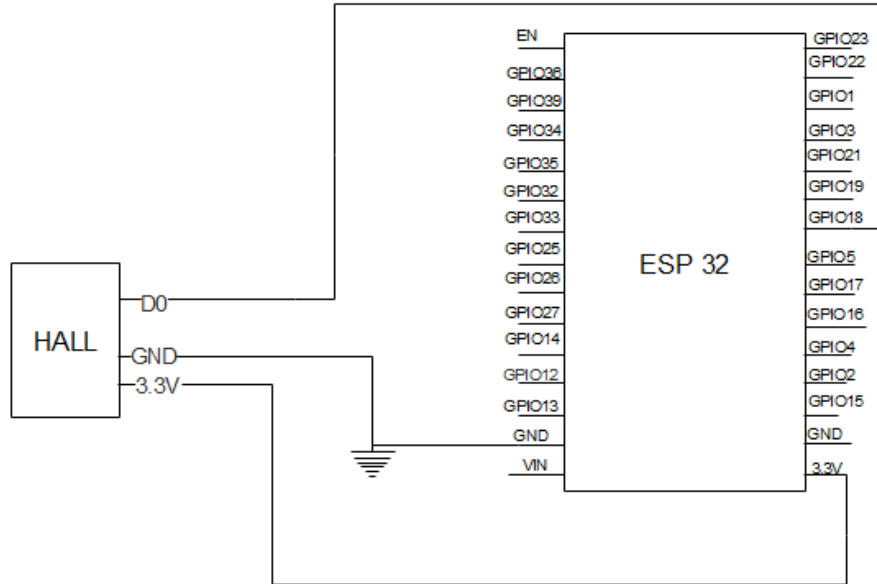


Fuente: Esquema eléctrico realizado en Edraw Max

El circuito con los valores mostrados para R1 de 100KΩ en serie con R2 de 1MΩ representa una impedancia de entrada de $1M\Omega + 100k\Omega = 1.1M$. El divisor presenta una atenuación de 11 veces lo que le permite medir tensiones de continua de hasta 33V.

4.1.4 Esquema de conexiones sensor de efecto Hall. Las conexiones del sensor de efecto Hall y la ESP 32 que se muestran en la figura 23, en esta se usan los pines digitales de la ESP32 para la lectura de los valores enviados por el sensor.

Figura 23. Conexiones entre el sensor de efecto Hall y la ESP32.



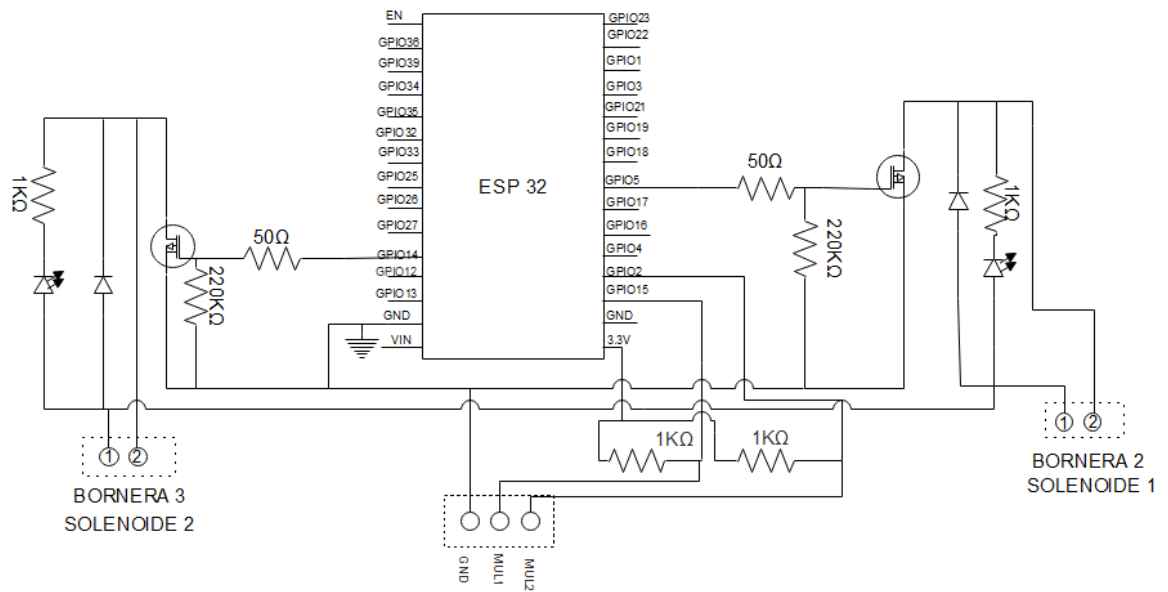
Fuente: Esquema eléctrico realizado en EDraw Max

4.1.5 Control de cambio de giro del motor. Es necesario evitar que el operario del tren active un cambio de giro del motor, cuando este se encuentre en movimiento, pues debido a la característica “auto bloqueante” de la caja seleccionada, se presentaría un frenado “instantáneo”, lo cual puede generar daños al sistema, como pueden ser, que el tren se salga de su carril o también, que el eje se motor se quiebre.

Para proteger al sistema mecánico de un cambio de giro brusco del motor, cuando este se encuentre en movimiento, se decidió evitar esta situación utilizando dos pines de la ESP32 para controlar el cambio de sentido de giro del motor por medio de dos transistores, lo cuales permiten el cambio de giro con un tiempo de espera de 1 segundo.

Para el “enclavamiento digital” se usó el transistor MOSFET IRF530 ($V_{TH_{min}}=2V$; la ESP32 genera un $V_{H_{min}} 2,475 V$).Este se usó para alimentar cargas a tensiones o corrientes superiores a las que la ESP32 puede manejar. Las conexiones se pueden observar en la figura 24.

Figura 24. Esquema de conexión de enclavamiento digital.



Fuente: Esquema eléctrico realizado en Edraw Max

5. SOFTWARE Y TRANSMISIÓN DE DATOS VÍA WI-FI USANDO THINGER.IO

En este capítulo se hace mención al software usado para la visualización de datos en la pantalla (Nextion editor) y la configuración realizada para la transmisión de datos por medio de Wi-Fi a la plataforma Thinger.io.

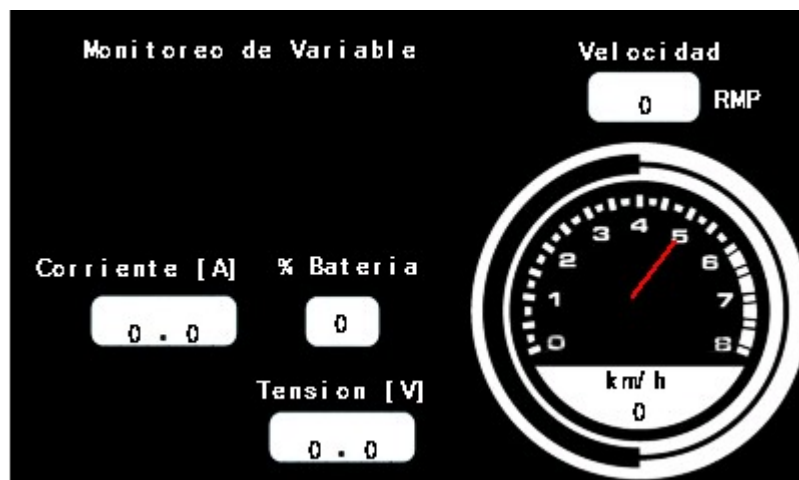
5.1 ARDUINO IDE.

Es el software creado por Arduino el cual permite programar la tarjeta ESP, está basado en el lenguaje C, y puede ser descargado desde el sitio oficial de Arduino, este software se usó para la programación del sistema de monitoreo de variables.

5.2 NEXTION EDITOR. Es un software creado por la empresa ITEAD, usado para el desarrollo de interfaces de usuario, estas pueden ser cargadas a la pantalla Nextion ya sea para solo visualización de datos o para aplicaciones de IoT (internet de las cosas).

La interfaz de usuario creada con este software se puede observar en la figura 25.

Figura 25. Interfaz de monitoreo de variables.



En esta interfaz se pueden observar las variables medidas, lo que permite al operario tener pleno conocimiento del consumo de corriente, la velocidad y la tensión y porcentaje de carga del banco de baterías instalado en el tren.

La configuración en software para la visualización de datos en la pantalla es la siguiente:

```
TO N = TO (PAG, ID,"NOBJ")
```

Donde TO es tipo de objeto, N es el nombre que se le va usar para identificarlo, PAG es la página de la interfaz en la que se encuentra el objeto, el ID es la identificador id del objeto, por ultimo NOBJ que corresponde al nombre del objeto en la interfaz, este de ir entre comillas dobles. El siguiente es un ejemplo:

```
NexNumber n1 = NexNumber(0,4, "n2");
```

Para el envío o modificación de datos en cada uno de los elementos se deben tener cuenta que tipo de son ya que cada uno tiene una forma para la asignación de datos por ejemplo:

```
t4.setText("-");
```

Donde t4 es el nombre de un text, setText es el comando que permite imprimir el símbolo o palabra que esté entre paréntesis y comillas dobles, otro ejemplo es el de un number (número), si desea mostrar un valor numérico en la Nextion Display, se deben digitar las siguientes líneas:

```
n1.setValue(valor);
```

Donde n1 es el nombre del objeto setValue es el comando que permite mostrar el valor entre paréntesis en la Nextion Display.

De esta forma con las líneas de código anteriormente mencionadas se puede sincronizar el envío de datos entre la ESP32 y la Nextion Display por medio de la Arduino IDE.

Para más información revisar anexo J.

5.3 TRANSMISIÓN DE DATOS VÍA WI-FI A LA INTERFAZ DE THINGER.IO.

Para la transmisión de datos vía Wi-Fi se configuró la ESP32 como *Station* debido a que esta solo se va a comunicar como un solo dispositivo, en este caso con un pc, y por medio de la plataforma de Thinger.io realizar la visualización de las variables medidas en el proyecto.

El código usado para la transmisión es el siguiente:

```
#include <WiFi.h>
#include <ThingerWifi.h>
#include <WiFiClientSecure.h>
#include <ThingerESP32.h>
#define USERNAME "nestor25" //nombre de usuario
#define DEVICE_ID "monitoreo" //nombre del dispositivo
#define DEVICE_CREDENTIAL "monitor" //credenciales
#define SSID "SANDY" //nombre de red
#define SSID_PASSWORD "XXXXXX" // clave de red
```

```

ThingerESP32 thing(USERNAME, DEVICE_ID, DEVICE_CREDENTIAL);

// Parámetros de conexión WiFi

void setup() {
    // Inicialización
    Serial.begin(115200);

    //-----variables para transmitir via wifi-----
    thing.add_wifi(SSID, SSID_PASSWORD);

    thing["monitoreo"] >> [](pson & out) {

        out["velocidad"] = velocidad;

        out["velkm"] = velkmh;

        out["Voltaje"] = Voltaje;

        out["corriente_shunt"] = Corriente_shunt;

    };
}

void loop() {
    thing.handle();
}

```

Una vez implementado el código se pudo observar los datos tal como se muestra en la figura 26.

Figura 26. Visualización de datos en la plataforma Thinger.io.

The screenshot shows the Thinger.io web interface. On the left is a dark sidebar with navigation links: 'Your Cloud' (Statistics, Dashboards, Devices, Data Buckets, Endpoints, Access Tokens), 'Your Account' (Profile, Settings, Account Upgrade), and 'Resources' (Shop, Documentation, Community). The main content area is titled 'monitoreo_var' and features a 'Bucket Explorer' section with a table of data. Below the table is a green 'Refresh' button and a 'Bucket Data Export' section with a 'Data Format' dropdown menu set to 'CSV (Comma Separated Values)'. The table contains 12 rows of data with the following columns: Date, Voltaje, corriente_shunt, velkm, and velocidad.

Date	Voltaje	corriente_shunt	velkm	velocidad
2018-11-28T16:28:54.274-0500	-0.00000196695	-0.00800024	1.02467	530
2018-11-28T16:27:53.738-0500	19.8183	0.0399998	1.02467	530
2018-11-28T16:26:53.784-0500	19.8183	0.776	1.02467	530
2018-11-28T16:25:53.522-0500	19.8183	0.78	1.02467	530
2018-11-28T16:24:52.653-0500	19.8183	0.8	1.02467	530
2018-11-28T16:23:52.448-0500	19.8183	0.792	1.02467	530
2018-11-28T16:22:52.176-0500	19.8183	0.776	1.02467	530
2018-11-28T16:21:51.922-0500	19.8183	0.792	1.02467	530
2018-11-28T16:20:51.732-0500	19.8183	0.772	1.02467	530
2018-11-28T16:19:51.438-0500	19.8219	0.744	1.3804	714

Se realizó el envío de datos vía wi-fi de forma exitosa. Para mayor información del proceso de transmisión de datos a Thinger io. Revisar anexo O.

6. RESULTADOS.

6.1 RESULTADOS DE PRUEBAS.

Para el cálculo de los errores se usó la fórmula de error absoluto, donde se comparan las medidas obtenidas con las arrojadas por el dispositivo de medida patrón.

$$Error\ absoluto(\%) = \left| \frac{medida\ patron - medida\ experimental}{medida\ patron} \right| * 100 \quad (31).$$

6.1.1 Resultados censado del voltaje. Se realizaron pruebas con una fuente de laboratorio, para simular el banco de baterías (24 V), con el objetivo de comparar los valores arrojados por un multímetro y por la ESP32 para determinar el error en la medida, también se adecuó el código para que muestre el porcentaje carga del banco de baterías que se instaló (24V) Ver tabla 1. En La tabla 2 se muestran los valores obtenidos del censado del voltaje obtenido entre la ESP32 por medio del ADC, y un multímetro (Fluke 117c)

En la fotografía 1, se muestra el montaje en laboratorio con el que se realizaron las pruebas de laboratorio para el censado de tensión.

Fotografía 1. Esquema de conexiones- pruebas censado de voltaje.



Tabla 2. Comparaciones del sensor de voltaje entre multímetro y de la ESP32 sin calibrar.

Multímetro(V)	ESP32(V)	Error (%)
6,004	3,57	40.53
7,02	4,45	36.44
8,04	5,42	32.28
8,99	6,2	31.034
10,06	7,16	28.82
11,01	7,96	27.70
12,15	9	25.92
13,02	9,8	24.73
14,02	10,77	23.18
15,04	11,6	22.87
16,04	12,45	22.38
17,09	13,45	21.29
18	14,33	20.38
19,01	15,22	19.93
20,04	16,1	19.60
21,02	17	19.12
22,01	17,9	18.67
23	18,87	17.95
24,03	19,72	17,93

25,03	20,6	17.69
26,01	21,51	17.30
27,03	22,44	16.98
28,01	23,38	16.52
29,06	24,27	16.48
30,05	25,16	16.27

Con los datos obtenidos se pudo observar las medidas obtenidas poseen errores de máximo de un 40%, además el error disminuye a medida que el valor de la tensión aumenta.

Se establecieron varias causas a los errores presentados, entre las cuales estaban que el ADC de la ESP32 no esté calibrado y factores externos como los valores de las resistencias ya que estos poseen un porcentaje de error.

Para corregir los errores del ADC (12 bits), se realizó en laboratorio otra prueba aplicándole tensiones entre 0 y 3.3 [V], los resultados se muestran en la tabla 3.

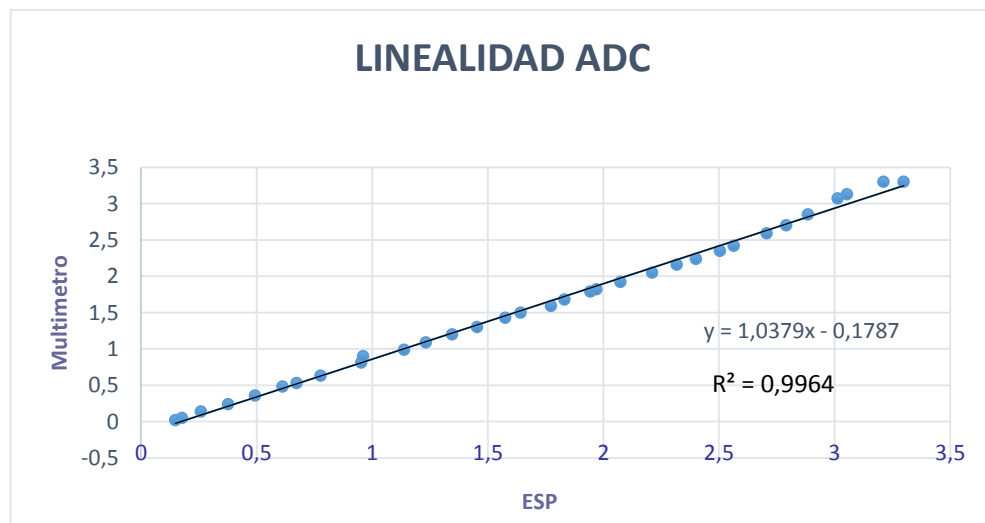
Tabla 3. Comparación valores del ADC ESP32 y multímetro (Fluke 117c).

<i>Multímetro(V)</i>	<i>ESP32(V)</i>	<i>Error (%)</i>	<i>Valor ADC</i>
0,149	0,02	86,58	25
0,178	0,05	71,91	62
0,26	0,14	46,15	174
0,378	0,24	36,51	298
0,494	0,36	27,13	447
0,612	0,48	21,57	596
0,674	0,53	21,36	658
0,778	0,63	19,02	782
0,953	0,81	15,01	1005
0,962	0,9	6,44	1117
1	0,99	1,00	1229
1	1,09	9,00	1353
1	1,2	20,00	1489
1	1,3	30,00	1613
2	1,43	28,50	1775
2	1,5	25,00	1861
2	1,59	20,50	1973

2	1,68	16,00	2085
2	1,79	10,50	2221
2	1,82	9,00	2258
2	1,92	4,00	2383
2	2,05	2,50	2544
2	2,16	8,00	2680
2	2,24	12,00	2780
3	2,35	21,67	2916
3	2,42	19,33	3003
3	2,59	13,67	3214
3	2,7	10,00	3350
3	2,85	5,00	3537
3	3,07	2,33	3810
3	3,13	4,33	3884
3	3,3	10,00	4095
3,3	3,3	0,00	4095

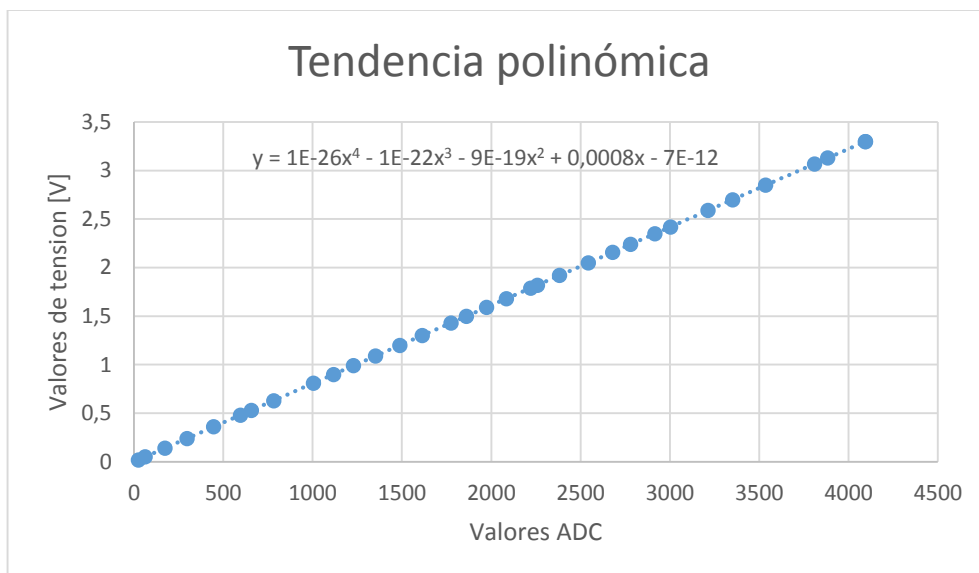
Con estos valores se realiza la gráfica para observar la linealidad del ADC.

Figura 27. Linealidad del ADC



Estos valores fueron llevados a Excel donde se generó la gráfica de la que se extrajo su función polinomial, esta se puede observar en la figura 28.

Figura 28. Tendencia polinómica



Una vez realizada la curva de ajuste se obtuvo la siguiente ecuación de ajuste:

$$y = 1 * 10^{-26}X^4 + -1 * 10^{-22}x^3 - 9 * 10^{-19}x^2 + 0.0008x - 7 * 10^{-12} \quad (31)$$

Una vez ingresada en el código de censado de tensión se procede a reproducir la prueba que simula el banco de baterías y se muestran en la tabla 4 los cambios del ajuste. Para esta prueba se realizó un promediado en las lecturas del ADC, con el fin de disminuir el ruido (digital) resultado del proceso de la conversión.

Tabla 4. Valores del sensor de tensión.

Multímetro(V)	ESP32(V)	ERROR%
6,075	6,1	0,412
7,02	7,1	1,140
8,06	8,12	0,744
8,98	9	0,223
10	10,07	0,700
11,07	11,12	0,452
12,01	12,01	0,000
13,01	12,97	0,307
13,94	13,9	0,287

15,06	15	0,398
16,03	15,9	0,811
17,08	16,91	0,995
18,05	17,85	1,108
19,03	18,77	1,366
20,03	19,85	0,899
21,06	20,88	0,855
22,03	21,74	1,316
23,02	22,72	1,303
24,09	23,78	1,287
25,04	24,74	1,198
26,03	25,75	1,076
27,07	26,85	0,813
28,01	27,75	0,928
29	28,92	0,276
30,05	29,88	0,566

Con el censado de tensión calibrado, se realizaron pruebas con el vagón, con el objetivo de comprobar el correcto funcionamiento del sensor en el campo, el resultado se observa en la siguiente tabla:

Tabla 5. Valores de tensión pruebas de campo

Tensión		
Baterías (multímetro)	ESP32	Error%
25,7	25,63	0,27237354
25,1	25,15	0,19920319
24,8	24,67	0,52419355
24,6	24,47	0,52845528
24,3	24,27	0,12345679

Con los valores obtenidos en la tabla 6 se pudo comprobar la confiabilidad en las medidas entregadas por el sensor de tensión, ya que estas presentaron un error inferior al 0.528%.

Una vez realizados los ajustes previos, el código para la lectura de valores es el siguiente:

```
#define ANALOG_PIN_6 34
float Voltaje;
float r1 = 1000000; // 1M
float r2 = 100000; // 100K

const int numLecturasV = 10;
float LecturasV[numLecturasV]; // Lecturas de la entrada analógica
int inde = 0; // El indice de la lectura actual
float total = 0; // Total
float average = 0; // variable que guarda Promedio

void setup() {

    Serial.begin(115200);
    analogSetWidth(12);
    analogSetCycles(255);
    analogSetSamples(1);
    analogSetClockDiv(255);
    analogSetAttenuation(ADC_11db); //otras configuraciones son:ADC_0db,
ADC_2_5db, ADC_6db, ADC_11db
    analogSetPinAttenuation(34, ADC_0db); // otras configuraciones son:
ADC_0db, ADC_2_5db, ADC_6db, ADC_11db
    adcAttachPin(34);
    adcStart(34);

}

void loop() {

total= total - LecturasV[inde];
LecturasV[inde] = ReadVoltage(34);
total= total + LecturasV[inde];
inde = inde + 1;

if (inde >= numLecturasV)
inde = 0;
average = total / numLecturasV;
float Voltaje = average / (r2 / (r1 + r2)); //variable de salida
Serial.println(Voltaje,2);
delay(500);
}

double ReadVoltage(byte pin){
double reading = analogRead(ANALOG_PIN_6); // El voltaje de referencia
es 3,3v, por lo que la lectura máxima es 3,3v = 4095 en el rango de 0 a
4095
    if(reading < 1 || reading > 4095) return 0;
```



```

}

void loop() {
// Restamos la última lectura:
total_I= total_I - LecturasI[inde_I];
// Leemos del sensor:
LecturasI[inde_I] = INA219.getShuntVoltage_mV(); //lee la tensión del
shunt
// Añadimos la lectura al total_I:
total_I= total_I + LecturasI[inde_I];
// Avanzamos a la proxima posición del array
inde_I = inde_I + 1;

// Si estamos en el final del array...
if (inde_I >= numLecturasI)
// ...volvemos al inicio:
inde_I = 0;

// Calculamos el promedio:
shuntcorriente = (total_I / numLecturasI)*(300/75); //conversión a
valores de corriente

Serial.print("Corriente : ");
Serial.print(shuntcorriente);
Serial.println(" A");
delay(500);
}

```

Con la configuración para la lectura de tensión se procedió a realizar las medidas. Luego se hace una operación que consiste en una regla de 3 simple, basándonos en que el *shunt* a 300A nos entrega una tensión de 75mV se calcula la corriente que fluye por el *shunt*. Los datos recogidos se pueden observar en la tabla 6.

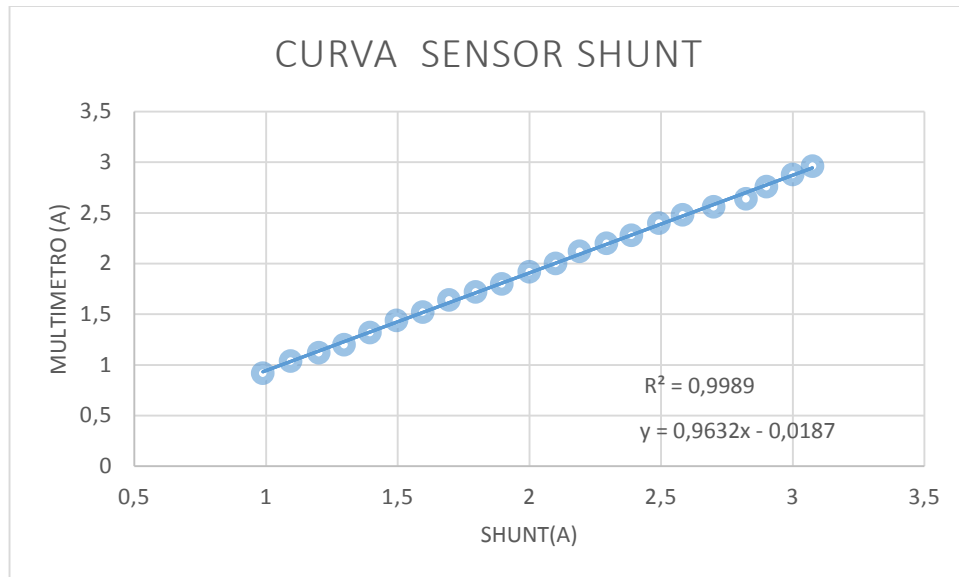
Tabla 6. Datos tomados en laboratorio censado de corriente

Multímetro(A)	corriente calculada (A)	Error (%)
0,998	0,92	7,816
1,092	1,04	4,762
1,2	1,12	6,667

1,299	1,24	4,542
1,376	1,32	4,070
1,498	1,44	3,872
1,597	1,56	2,317
1,694	1,64	3,188
1,79	1,72	3,911
1,896	1,84	2,954
1,997	1,96	1,853
2,101	2,04	2,903
2,2	2,08	5,455
2,302	2,24	2,693
2,394	2,32	3,091
2,502	2,44	2,478
2,596	2,52	2,928
2,669	2,6	2,585
2,81	2,68	4,626
2,898	2,72	6,142
2,997	2,88	3,904
3,076	3	2,471

Con los datos recogidos en la tabla anterior se procedió a obtener la curva entre los valores de corriente medidos por la ESP32 y por el multímetro Fluke 117c con el fin de verificar la linealidad de los valores arrojados por el shunt y determinar qué tan viable era calcular las corrientes por medio de “Ley de OHM”.

Figura 29. Tendencia lineal SHUNT



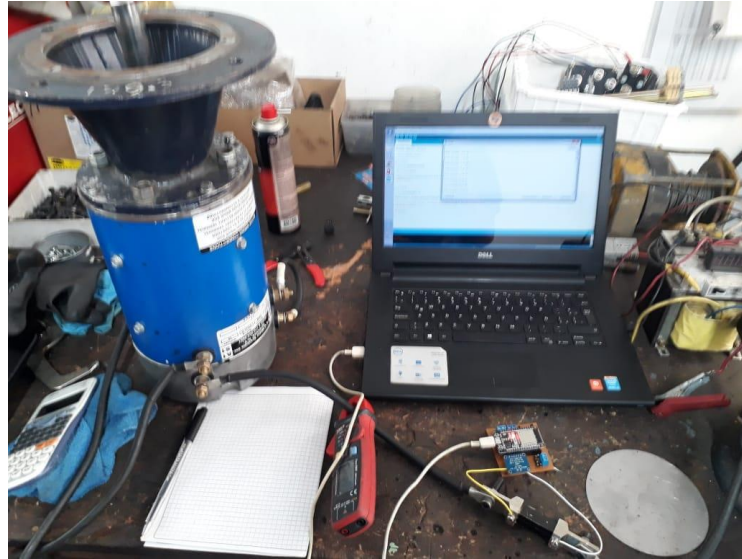
Las pruebas anteriores se repitieron y se corroboró que el censado de corriente arroja medidas confiables, ver anexo Q.

La ecuación de la recta es:

$$y = 0,9632x - 0,0187 \quad (32)$$

Una vez realizadas las pruebas de laboratorio, se realizaron las pruebas de campo, con el objetivo de generar diferentes valores de corriente que fueron medidos por la ESP 32 y contrastados por medio de una pinza amperimétrica UNI-T UT202A, ver fotografía 2.

Fotografía 2. Evidencia de pruebas del medidor de corriente con el motor



Los resultados de las pruebas fueron se observan en la tabla 7:

Tabla 7. Valores de corriente pruebas de campo sin carga

Corriente		
Pinzas(A)	ESP32 (A)	Error (%)
8,75	8,65	1,14285714
11,2	11,73	4,73214286
14,7	14,86	1,08843537
19,35	19,64	1,49870801

61.3 Resultados censado de RPM. Para estas pruebas, tanto en laboratorio como en campo se usó el tacómetro UNIT T-372 y el módulo de efecto Hall con el objetivo de comparar sus medidas. Para las pruebas se le aplico al motor serie (el cual esta acoplado a la caja reductora y a la cadena) diferentes niveles de tensión, los resultandos se observan en las siguientes tablas:

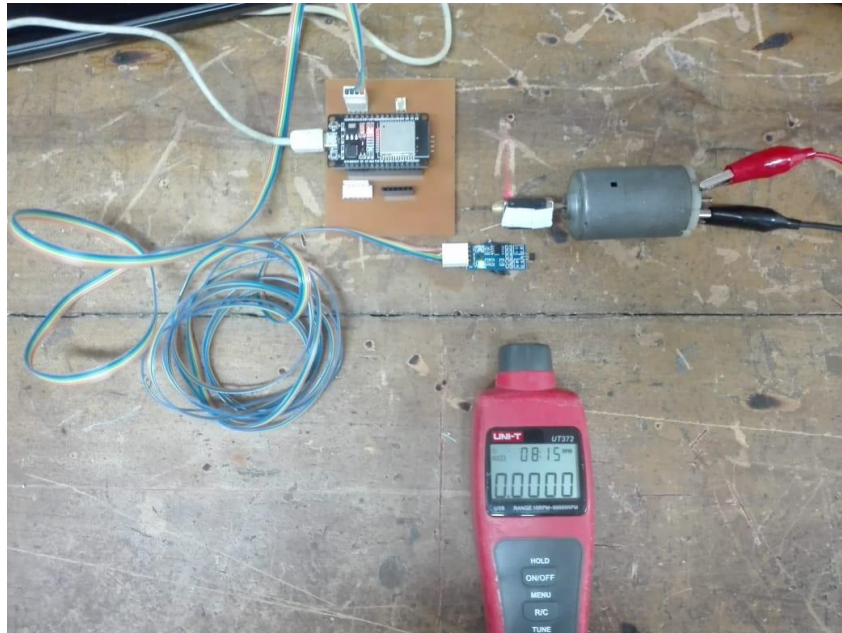
Tabla 8. Prueba 1 sensor de efecto hall y tacómetro con porcentaje de error

Multímetro(v)	Tacómetro(RPM)	sensor hall(RPM)	Error (%)
1,96	235,5	236	0,2
3,047	422	422	0
4,019	589	588	0,1
5,056	749	750	0,1
6,036	929	927	0,2
7,01	1098	1090	0,7
8,04	1266	1276	0,7
9,04	1420	1428	0,5
10,09	1611	1621	0,6
11,01	1760	1764	0,22
12,02	1910	1935	1,3
13,01	2056	2068	0,6
14,06	2230	2222	0,35
15,03	2444	2430	0,57
16,06	2604	2608	0,15
17,01	2729	2727	0,07
18,08	2887	2857	1,39

Las pruebas se repitieron para observar si el error de medida se mantenía y corroborar la confiabilidad de las medidas leídas ver anexo Q.

Realizadas las pruebas se puede observar que los resultados son satisfactorios y que la variación entre las medidas de ambos instrumentos es pequeña por lo que no se tendrá que realizar ningún ajuste.

Fotografía 3. Esquema de conexiones- pruebas sensor Efecto Hall



El código del sensor efecto Hall es el siguiente:

```
int pin = 18; //pino de interrupción
volatile unsigned int rpm; //contador de rpm
volatile unsigned long timeold; //tiempo

void setup() {
    Serial.begin(115200);

    pinMode(pin, INPUT_PULLUP); //no estaba
    attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(pin),
interruptPin, RISING); // CHANGE, FALLING, LOW, ¿HIGH?
    rpm = 0;
    timeold = millis();
}

void loop() {

    Serial.print("RPM");
    Serial.println(rpm);

void interruptPin()
    {
        rpm = 60*1000/(millis() - timeold);
        timeold = millis();
    }
```

Una vez realizadas las pruebas anteriores el sistema de monitoreo de variables es el siguiente:

Fotografía 4. Sistema de monitoreo de variables.



6.1.4 Sistema de tracción. El sistema de tracción instalado al vagón se muestra en la siguiente imagen en la cual se puede observar al motor conectado a la caja reductora, el banco de baterías y conexiones al controlador.

Fotografía 5. Sistema de tracción.



6.1.5 Tablero del sistema de control. Para la conexión del sistema de control se estudió el manual del controlador ALLTRAX para realizar una conexión de acuerdo a las necesidades del sistema. En la fotografía 6, se muestra está el tablero del sistema de arranque/parada control de giro.

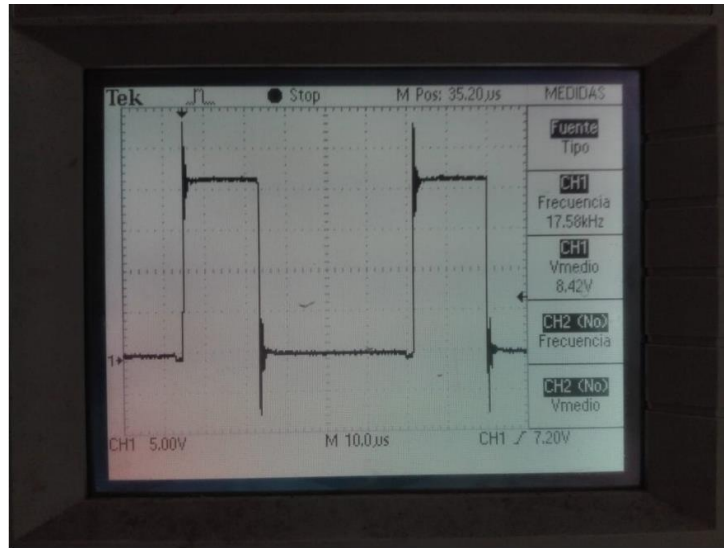
Fotografía 6. Tablero del sistema de control de giro



Se realizó una prueba al controlador para observar que tipo de señal le aplica al motor y se encontro que esta corresponde a una señal PWM de aproximadamente

24 V, la tensión del banco de baterías, con una frecuencia constante de 17,58 KHz y con ciclo de trabajo variable (el potenciómetro **Throttle** cambia el ciclo útil y por tanto la tensión promedio que se le aplica el motor), ver fotografía 7.

Fotografía 7. Señal de salida del controlador ALLTRAX

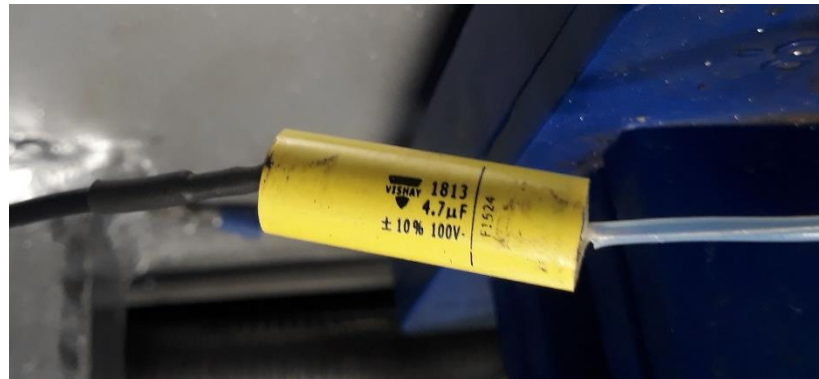


Posteriormente se realizó una prueba al sistema instalado con el objetivo de comprobar su correcto funcionamiento, es decir que el motor mueva el sistema de arrastre, que la inversión de giro y el monitoreo de variables funcione correctamente. Los resultados de la prueba arrojaron un correcto funcionamiento del sistema de tracción eléctrica.

Hubo problemas con la visualización de las revoluciones del motor al momento de realizar las pruebas de campo, este se debió a que el controlador generaba ruido el cual provocó que el sensor arrojara medidas erróneas,

Es importante resaltar que, atendiendo una recomendación del fabricante, la adición de un capacitor de 4.7µF (que viene junto con el kit del controlador, se conectó entre e B- y el chasis del tren) ver figura 30, se disminuyó ostensiblemente el ruido generado por el sistema de control y las medidas obtenidas por la ESP32 fueron más estables.

Figura 30. Capacitor 4.7uF del kit de Alltrax



En la tabla 9 se presenta un juego de lecturas, tomadas en campo, con diferentes velocidades del motor, como dato adicional se encuentra la tensión promedio que el controlador ALLTRAX le aplica al motor.

Tabla 9. Toma de valores del sistema de monitoreo.

Tensión		RPM		Corriente		Motor
ESP (V)	Multímetro (v)	ESP(RPM)	Tacómetro (RPM)	ESP (A)	Pinzas (A)	V_Motor (V)
24.11	24.3	916	914	7.75	7.85	5.9
23.98	24.1	1462	1477	12.52	11.90	8.3
23.84	24.0	2104	2110	18.82	17.20	11.5
23.70	23.8	2666	2655	23.57	21.40	14.0
23.66	23.8	3156	3076	26.53	24.0	16.2
23.45	23.6	3870	3800	33.30	30.0	19.7
23.39	23.46	4444	4339	39.0	34.90	22.6

Error máximo en medida de tensión: 0.78%.

Error máximo en medida de corriente: 10.51%.

Error máximo en media de RPM: 1.80%.

7. CONCLUSIONES

- ❖ Al realizarle el ajuste al sistema de monitoreo del porcentaje de carga del banco de baterías por medio de una función polinomial, se logró disminuir el error (inferior a 1,4%) con respecto a las medidas tomadas con un multímetro Fluke 117C.
- ❖ El sistema de censado del corriente conformado por shunt y el *INA219* tiene un rango de medida de 0 a 300 amperios y entrega un error menor al 1,42 % en pruebas de laboratorio.
- ❖ El sistema de control de tracción eléctrica cumple con requerimientos de movilidad, cambio de sentido, aumento y disminución de la velocidad del vagón.
- ❖ En las pruebas de campo se observa que los valores obtenidos de Tensión poseen un error inferior al 0.78% en comparación a los arrojados por un multímetro Fluke, así mismo las RPM muestran un error inferior al 1.80% al ser comparadas con los valores que arrojó en tacómetro UNIT T-372.
- ❖ La corriente medida en las pruebas de campo presenta un error inferior al 10.51% al ser comparadas con los valores obtenidos de las pinzas amperimétricas empleadas en las pruebas.
- ❖ Se detectó inicialmente errores en las medidas tomadas debido al ruido generado por el motor, causando que el sistema de censado de la corriente presentara diferencias significativas con los valores esperados, la solución fue la adición de un capacitor de 4.7uF(este se instaló entre el puerto B- y el chasis del tren) que viene junto con el kit del controlador ALLTRAX.

8. RECOMENDACIONES

- ❖ Si desea cargar una interfaz la Nextion Display, debe tener en cuenta se debe programar por medio de una MicroSD, el archivo debe ser guardado en una de 4ta generación o inferior, de no ser así, no será reconocida y por ende no podrá cargar el código con la interfaz al display, (esto puede cambiar según la versión del display que se adquiera).
- ❖ Consultar el manual de conexiones del controlador ALLTRAX, debido a que se debe verificar si los dispositivos que este empleando coincidan con los mostrados en el manual.
- ❖ Las medidas del ADC de la ESP32 no son lineales, como se puede observar en la figura 24, se recomienda a la persona que desea replicar este proyecto, realizar una regresión polinomial para corregir este error y de esta forma obtener medidas más precisas.
- ❖ Se recomienda usar un banco de baterías que genere entre 30[V] a 36[V] para un correcto funcionamiento del controlador, ya que con 24[V], se está operando al límite mínimo para el funcionamiento de este. Entre las opciones se recomiendan las: DC 500ML 12 V, 281 A-H, 151 KG, L16HAC Trojan 6V 310 A-H. 57Kg.
- ❖ Instalar un sistema de refrigeración para el motor, que el uso continuo puede causar que este se caliente.
- ❖ Realizar la compra de un fusible de 400[A] de repuesto.
- ❖ Realizar la compra de una tarjeta ESP32, para su programación y que sea guardada como repuesto.
- ❖ El sistema no fue diseñado para ambientes explosivos, tomar precauciones y realizar las protecciones pertinentes al sistema de ser necesario.

BIBLIOGRAFÍA

- ALLTRAX INC. An Advanced Motor Controller for Today's Demanding Markets [En línea]. (Recuperado en Agosto 20 2017). Disponible en <https://alltraxinc.com/sr-series/>
- BUDYNAS, R. Nisbett, K.; Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. (8ª. Ed). México D.F.: Ed. Mc Graw Hill, 2008. 1104 p.
- ENRIQUE GÓMEZ. Pantalla Nextion de Itead y Arduino [En línea].(Recuperado en Noviembre 22 2017).Disponible en <https://www.rinconingenieril.es/pantalla-nextion-de-itead-y-arduino/>
- ELECTRICIDAD Y AUTOMATISMOS. [En línea] (Recuperado en Noviembre 15 2017).disponibles en <http://www.nichese.com/motor-c.c.html>
- GITHUB. Steps to install Arduino ESP32 support on Windows [En línea]. (Recuperado en Noviembre 15 2017). Disponible en <https://github.com/espressif/arduino-esp32/blob/master/docs/arduino-ide/windows.md>
- HAMROCK, B., Jacobson, B., Schmid, S.; Elementos de máquinas. México D.F.: Ed. Mc Graw Hill, 2000. 926 p.
- ITEAD WIKI. Nextion HMI Solution [En línea]. (Recuperado en septiembre 14 2017). Disponible en https://www.itead.cc/wiki/Nextion_HMI_Solution
- ITT CARLOS CISNEROS, ARRANQUE DE UN MOTOR CC DE EXITACION INDEPENDIENTE.[En línea].(Recuperado en Septiembre 14 2017).Disponible en <https://es.slideshare.net/andyv16/motor-de-excitacin-independiente>
- ITEAD WIKI. Guía de inicio rápido de Nextion Editor [En línea]. (Recuperado en Septiembre 15 2017). Disponible en https://www.itead.cc/wiki/Nextion_Editor_Quick_Start_Guide#Introduction
- LUIS LLAMAS [En línea]. DETECTAR CAMPOS MAGNÉTICOS CON ARDUINO Y SENSOR HALL A3144 (Recuperado en Noviembre 15 2017). Disponible en <https://www.luisllamas.es/detectar-campos-magneticos-con-arduino-y-sensor-hall-a3144/>

Maquinas eléctricas y transformadores – Bhag S. Guru – Hüseyin R. Hiziroglu.
INA129. [En línea]. (Recuperado en Diciembre 15 2017). Disponible en
<http://www.ti.com/product/INA129>.

THINGER IO. [En línea](recuperado Octubre 16 2018). Disponible en
<https://thinger.io/>.