

Universidad Tecnológica Nacional

Proyecto Final

**Desarrollo de un sistema electrónico
dual fuel GNC-Diesel**

Autores:

- *Gonzalo José Grattier*
- *Alesandro Mare*

Director:

- *Alejandro Cabral*

*Proyecto final presentado para cumplimentar los requisitos
académicos para acceder al título de Ingeniero Electrónico*

en la

Facultad Regional Paraná

Febrero de 2022

Declaración de autoría:

Nosotros declaramos que el Proyecto Final “Desarrollo de un sistema electrónico dual fuel GNC-Diesel” y el trabajo realizado son propios.

Declaramos:

1. Este trabajo fue realizado en su totalidad, o principalmente, para acceder al título de grado de Ingeniero Electrónico, en la Universidad Tecnológica Nacional, Regional Paraná.
2. Se establece claramente que el desarrollo realizado y el informe que lo acompaña no han sido previamente utilizados para acceder a otro título de grado o pre-grado.
3. Siempre que se ha utilizado trabajo de otros autores, el mismo ha sido correctamente citado. El resto del trabajo es de autoría propia.
4. Se ha indicado y agradecido correctamente a todos aquellos que han colaborado con el presente trabajo.
5. Cuando el trabajo forma parte de un trabajo de mayores dimensiones donde han participado otras personas, se ha indicado claramente el alcance del trabajo realizado.

Firmas:

- Gonzalo José Grattier _____
- Alesandro Mare _____

Fecha: 07/02/2022

Agradecimientos:

En agradecimiento a nuestro docente director, Alejandro Cabral, por su tiempo y predisposición a lo largo de este proyecto.

A la UTN Regional Paraná, que nos permitió formarnos como profesionales.

A nuestras familias y amigos por el apoyo incondicional y acompañarnos a lo largo de toda la carrera.

Gonzalo José Grattier

Alesandro Mare

Universidad Tecnológica Nacional

Abstract

Facultad Regional Paraná

Ingeniero en Electrónica

**Desarrollo de un sistema electrónico
dual fuel GNC-Diesel**

Gonzalo José Grattier

Alesandro Mare

Abstract

An electronic CNG-Diesel dual fuel system was developed for vehicles that use diesel. The system is designed to be applied in diesel-powered cars that have a common rail system for diesel injection and an electronic throttle body opening sensor, with the aim of facilitating the installation of CNG equipment in said vehicles by specialized workshops.

This system is made up of 3 parts: the central processing unit (CPU), the user interface (UI) and the programming interface (PI).

The CPU uses an ATMEGA328P microcontroller from the Microchip company to read the signals from the throttle body position sensor (TPS), the pressure rail sensor (PRS), a K-type thermocouple and a pressure gauge specially designed for CNG.

The program was developed in the Visual Studio Code (VSC) environment, in C++ language and compiled with the Arduino core. This allows the processing of sensor signals and the activation of: a gas solenoid valve through a relay, a bipolar stepper motor through an A4988 driver and a digital-analog converter (MCP4725) through I2C port.

To show the data to the user and to the installer, was used a 128x64 pixel OLED display that communicates through an I2C port. In addition, the UI has a switch key that allows the user to turn the system on or off and the IP has a rotary encoder that allows the installer to navigate through the screen, select and configure the necessary parameters.

An economical product was obtained, configurable and with very little competition in the market, capable of facilitating the task of installing CNG equipment in vehicles with a Diesel engine.

Keywords:

CNG System, CNG-Diesel, dual fuel engine, Visual Studio Code, microcontrolled system, embebed system, emulator.

Resumen

Se desarrolló un sistema electrónico doble combustible GNC-Diesel para vehículos que utilizan gasóleo. El sistema está pensado para ser aplicado en automóviles con motor Diesel que posean sistema de riel común para la inyección de gasoil y sensor de apertura de cuerpo de mariposa electrónico, con el objetivo de facilitar la instalación de equipos GNC en dichos vehículos por parte de talleres especializados.

Este sistema está compuesto por 3 partes: la unidad central de procesamiento (UCP), la interfaz de usuario (IU) y la interfaz de programación (IP).

La UCP utiliza un microcontrolador ATMEGA328P de la empresa Microchip para la lectura de las señales del sensor de posición de cuerpo de mariposa (TPS), el sensor de presión de riel (PRS), un termopar tipo K y un manómetro especialmente diseñado para GNC.

El programa fue desarrollado en el entorno de Visual Studio Code (VSC), en lenguaje C++ y compilado con el core de Arduino. Este permite realizar el procesamiento de las señales de los sensores y realizar el accionamiento de: una electroválvula para gas a través de un relé, un motor paso a paso bipolar por medio de un driver A4988 y un conversor digital-analógico (MCP4725) por puerto I2C.

Para la visualización de datos al usuario y al instalador, se utilizó un display oled de 128x64 pixeles que se comunica mediante puerto I2C. Además, la IU posee una llave interruptora que permite al usuario encender o apagar el sistema y la IP un encoder rotativo, que permite al instalador navegar por la pantalla, seleccionar y configurar los parámetros necesarios.

Se obtuvo un producto económico, configurable y con muy poca competencia en el mercado, capaz de facilitar la tarea de instalación de equipos GNC en vehículos con motor Diesel.

Palabras clave:

Sistema GNC, GNC-Diesel, combustible dual, Visual Studio Code, sistema embebido, emulador.

Índice

1. Introducción	18
2. Antecedentes	23
3. Marco Teórico	25
4. Requerimientos	28
4.1. Requerimientos funcionales	28
4.1.1. REQ0	30
4.1.2. REQ1	31
4.1.3. REQ2	31
4.1.4. REQ3	31
4.1.5. REQ4	31
4.1.6. REQ5	32
4.1.7. REQ6	32
4.1.8. REQ7	32
4.1.9. REQ8	32
4.1.10. REQ9	32
4.1.11. REQ10	32
4.1.12. REQ11	33
4.1.13. REQ11.1	33
4.1.14. REQ11.2	33
4.1.15. REQ12	33
4.1.16. REQ13-16	33
4.1.17. REQ16-17	34
4.1.18. REQ16-18	34
4.1.19. REQ19-20.4	34
4.1.20. REQ21-21.3	34

4.1.21.	REQ22-22.2 -----	34
4.1.22.	REQ23-23.2 -----	35
5.	Arquitectura-----	36
5.1.	Subsistemas y actores externos -----	37
5.1.1.	Subsistema de sensores -----	37
5.1.2.	Subsistema de actuadores -----	37
5.1.3.	Subsistema Interfaz de Usuario -----	38
5.1.4.	Subsistema Interfaz de Programación -----	38
5.1.5.	Subsistema Unidad Central de Procesamiento -----	38
5.1.6.	Actor externo: Instalador -----	38
5.1.7.	Actor externo: Usuario -----	38
5.2.	Interfaces -----	38
5.2.1.	Interfaces Externas -----	38
5.2.2.	Interfaces entre Subsistemas -----	39
5.2.3.	Interfaces Internas -----	39
6.	Diseño -----	40
6.1.	Diseño de hardware-----	40
6.1.1.	Selección del hardware de Subsistema de sensores: -----	40
6.1.2.	Selección del hardware de Subsistema de actuadores-----	45
6.1.3.	Selección del hardware de Subsistema Interfaz de Usuario-----	49
6.1.4.	Selección del hardware de Subsistema Interfaz de Programación -----	50
6.1.5.	Selección del hardware de Subsistema Unidad Central de Procesamiento	52
6.2.	Diseño de software-----	52
6.2.1.	Selección del lenguaje de programación y el compilador -----	52
6.2.2.	Software del Subsistema de Unidad Central de Procesamiento -----	53
7.	Implementación -----	54

7.1.	Implementación del hardware-----	54
7.1.1.	Hardware del subsistema Interfaz de Usuario-----	54
7.1.2.	Hardware del subsistema Interfaz de Programación -----	54
7.1.3.	Hardware del subsistema UCP (partes de subsistema de sensores y actuadores)-----	54
7.2.	Implementación del software-----	57
7.2.1.	Software de la Unidad Central de Procesamiento -----	59
7.2.2.	Software de la Interfaz de Programación -----	61
8.	Validación y verificación -----	62
8.1.	Matriz de trazabilidad -----	62
8.2.	Arquitectura del banco de pruebas -----	62
8.2.1.	Simulador de temperatura-----	63
8.2.2.	Herramientas adicionales-----	64
8.3.	Casos de prueba para test de sistema-----	65
8.3.1.	Caso de prueba N°0: Verificación de la alimentación del sistema.-----	65
8.3.2.	Caso de prueba N°1: Verificación de sensores. -----	65
8.3.3.	Caso de prueba N°2: Lectura del TPS. -----	65
8.3.4.	Caso de prueba N°3: Lectura del PRS. -----	66
8.3.5.	Caso de prueba N°4: Lectura de temperatura. -----	66
8.3.6.	Caso de prueba N°5: Lectura nivel de GNC. -----	66
8.3.7.	Caso de prueba N°6: Verificación electroválvula. -----	66
8.3.8.	Caso de prueba N°7: Verificación motor paso a paso. -----	66
8.3.9.	Caso de prueba N°8: Verificación conversor digital analógico. -----	66
8.3.10.	Caso de prueba N°9: Verificación relé doble inversor.-----	66
8.3.11.	Caso de prueba N°10: Verificación de conexión entre módulos. -----	67
8.3.12.	Caso de prueba N°11: Interfaz de Usuario. -----	67
8.3.13.	Caso de prueba N°12: Verificar pantalla. -----	67

8.3.14.	Caso de prueba N°13: Llave interruptora.-----	67
8.3.15.	Caso de prueba N°14: Interfaz de Programación.-----	67
8.3.16.	Caso de prueba N°15: Voltaje mínimo de TPS.-----	67
8.3.17.	Caso de prueba N°16: Rango de temperatura de trabajo.-----	67
8.3.18.	Caso de prueba N°17: Voltaje mínimo PRS.-----	68
8.3.19.	Caso de prueba N°18: Estados del sistema.-----	68
8.3.20.	Caso de prueba N°19: Estado activo.-----	68
8.3.21.	Caso de prueba N°20: Estado inactivo.-----	68
8.3.22.	Caso de prueba N°21: Mostrar temperatura.-----	68
8.3.23.	Caso de prueba N°22: Mostrar nivel de GNC.-----	68
8.3.24.	Caso de prueba N°23: Mostrar estado de interruptor.-----	68
8.3.25.	Caso de prueba N°24: Mostrar estado del sistema.-----	69
8.3.26.	Caso de prueba N°25: Emulando PRS.-----	69
8.3.27.	Caso de prueba N°26: Apertura del motor paso a paso.-----	69
8.3.28.	Caso de prueba N°27: No emula PRS.-----	69
8.3.29.	Caso de prueba N°28: Cierre del motor paso a paso.-----	69
8.3.30.	Caso de prueba N°29: Cierre de electroválvula.-----	69
9.	Análisis de costos-----	70
9.1.	Costos de materiales-----	70
9.2.	Costos totales-----	71
10.	Conclusiones-----	72
11.	Trabajos futuros-----	73
	Bibliografía-----	74

Índice de figuras

Figura 1: Diagrama comparativo de emisiones de dióxido de carbono según revoluciones del motor para operación Diesel y Dual-Fuel.....	18
Figura 2: Interfaz interactiva para calcular el ahorro de nafta con GNC.	19
Figura 3: Conjunto de elementos de un sistema Dual-Fuel.....	21
Figura 4: Componentes de un motor Diesel convencional.....	25
Figura 5: Dos formas de inyección de GNC a un cilindro.	27
Figura 6: Arquitectura del sistema.	36
Figura 7: Cuerpo de mariposa con electrónica integrada.	40
Figura 8: Riel común o common rail.....	40
Figura 9: Voltaje de salida de TPS.	41
Figura 10: Voltaje de salida del PRS.....	41
Figura 11: Relé doble inversor (izquierda) y amplificador LM358 (derecha).	42
Figura 12: Amplificador operacional no inversor.	42
Figura 13: Sonda de temperatura K.....	43
Figura 14: Conexión entre MAX6675 y controlador.	44
Figura 15: Manómetro GNC.	44
Figura 16: Electroválvula de 12 [V].	45
Figura 17: Motor paso a paso con vástago.	46
Figura 18: Driver A4988 del motor paso a paso.	47
Figura 19: Conexión entre A4988 y microcontrolador.	47
Figura 20: Circuito DAC discreto.	48
Figura 21: Circuito Integrado MCP4725.....	49
Figura 22: Display 7 segmentos.	49
Figura 23: Pantalla LCD retroiluminada.	50
Figura 24: Pantalla OLED.	50
Figura 25: Teclado de membrana.	51
Figura 26: Encoder rotativo.	51
Figura 27: Diagrama esquemático del subsistema de sensores.	55
Figura 28: Diagrama esquemático del subsistema de actuadores.....	55
Figura 29: Diagrama esquemático Unidad Central de Procesamiento.....	56
Figura 30: Diseño PCB de la UCP.	56
Figura 31: Diseño 3D del PCB de la UCP.	56

Figura 32: Diagrama de flujo general del software.	57
Figura 33: Diagrama de estados de la Unidad Central de Procesamiento.....	58
Figura 34: Diagrama de estados de la Interfaz de Programación.....	58
Figura 35: Banco de pruebas del sistema.	63
Figura 36: Estación de soldado Hony 936A.....	64
Figura 37: Fuente de alimentación Step-Down LM2596 B3603.	64
Figura 38: Multímetro digital Sanwa CD771.....	65

Lista de tablas

Tabla 1: Tabla de requerimientos.	30
Tabla 2: Interfaces externas.	39
Tabla 3: Interfaces entre subsistemas.	39
Tabla 4: Características del manómetro GNC.	45
Tabla 5: Costo de materiales.	71
Tabla 6: Matriz de trazabilidad de requerimientos del sistema.	76

Lista de abreviaciones

GNC	Gas Natural Comprimido
GNL	Gas Natural Licuado
UCP	Unidad Central de Procesamiento
IU	Interfaz de Usuario
IP	Interfaz de Programación
TPS	Throttle Position Sensor
PRS	Pressure Rail Sensor
VSC	Visual Studio Code
CO ₂ eq	Dióxido de carbono equivalente
CO ₂	Dióxido de carbono
CH ₄	Metano
PCS	Poder Calorífico Superior
BEV	Vehículos Eléctricos a Batería
HEV	Vehículos Híbridos Eléctricos
E-REV	Vehículos Eléctricos de Autonomía Extendida
FCEV	Vehículos a Hidrógeno con Celdas de Combustible
CC	Celda de Combustible
Li-Ion	Litio-Ion
OMI	Organización Marítima Internacional
ECU	Engine Control Unit
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
DAC	Digital to Analogue Converter
NA	Normal Abierto
NC	Normal Cerrado
IDE	Integrated Development Environment
SMD	Surface Mounted Device
USB-TTL	Universal Serial Bus-Transistor Transistor Logic
UART	Universal Asynchronous Receiver/Transmitter
GPIO	General Purpose Input/Output
LCD	Liquid Crystal Display
OLED	Organic Light-Emitting Diode
PaP	Paso a Paso
MAN	Manómetro
TK	Termocupla tipo K
EV	Electroválvula
EM	Emulador
PID	Proporcional Integral Derivativo
PWM	Pulse Width Modulation
PCB	Printed Circuit Board
AO	Amplificador Operacional
CI	Circuito Integrado
uC	Microcontrolador

Lista de símbolos

[Kcal/l]

[Kcal/ m³]

[m³]

[l]

[\$]

[Km]

[bar]

[°C]

[V]

[mV]

Unidad Kilocalorías por Litro

Unidad Kilocalorías por Metro Cúbico

Unidad Metro Cúbico

Unidad Litro

Símbolo Peso

Unidad Kilogramo

Unidad Bar

Unidad Grados Celsius

Unidad Voltios

Unidad Milivoltios

Dedicado a:

Nuestras familias y amigos por el apoyo incondicional.

1. Introducción

En Argentina el sector transporte representa 32% del consumo final energético nacional, los combustibles fósiles abarcan aproximadamente el 100% de dicho consumo (sólo el 0,35% del consumo de este sector se realiza con electricidad) [1]. Las emisiones provenientes de los vehículos (transporte) representan el 30,5% de las emisiones totales del Sector Energía, en términos de CO₂eq [2].

Las emisiones tóxicas con GNC, sin excepción, son más bajas que cualquier otro hidrocarburo combustible, resultado directo de que el gas natural es un hidrocarburo simple con un porcentaje de metano de más de 90%, en la mayoría de los casos, mientras que los otros combustibles son una mezcla de hidrocarburos [3].

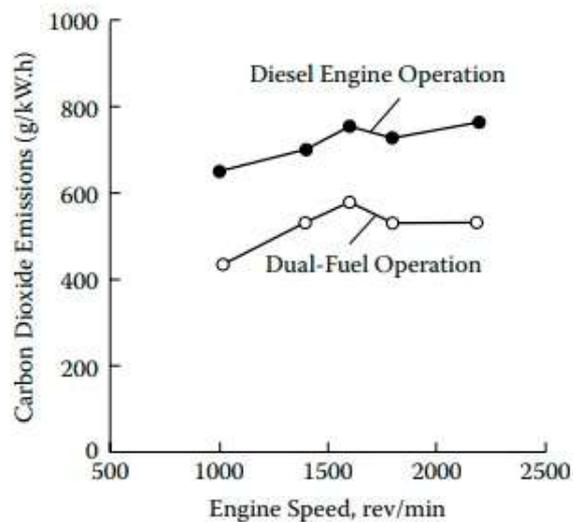


Figura 1: Diagrama comparativo de emisiones de dióxido de carbono según revoluciones del motor para operación Diesel y Dual-Fuel.

Existe una gran ventaja económica en el uso del GNC como combustible respecto al de la nafta y del gasoil debido a su menor precio [4]. La compañía Shell en la estación de servicio Servinorte S.A. en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires expende Nafta a \$67,10 el litro, Gasoil a \$62,70 el litro y GNC a \$23,49 el m³, por lo que el GNC es entre dos y tres veces más barato que dichos combustibles [5]. Además, el gas natural tiene un poder calorífico superior (PCS) de 9.300 [kcal/m³] mientras que el PCS de la gasolina es de 8.242 [kcal/l]. De modo que 1 [m³] de GNC equivale energéticamente a 1,13 [l] de nafta. Así, en términos de costo de combustibles, en la Argentina, para recorrer la misma distancia, el GNC es entre dos y tres veces más

económico que la nafta y el diesel [4]. Si bien la inversión inicial para instalar el equipo completo para GNC tiene un costo que ronda entre \$100.000 y \$150.000, la misma se amortiza en aproximadamente 30.000 [km] [4] [6]. Por otra parte, el GNC tiene una combustión limpia, lo que reduce los costos de mantenimiento del vehículo [3] [6]. Podemos señalar como desventaja la pérdida de espacio en el baúl (para instalar el o los cilindros contenedores de GNC), y el hecho que, en ciertas ocasiones, es necesario reforzar la suspensión del vehículo [4].

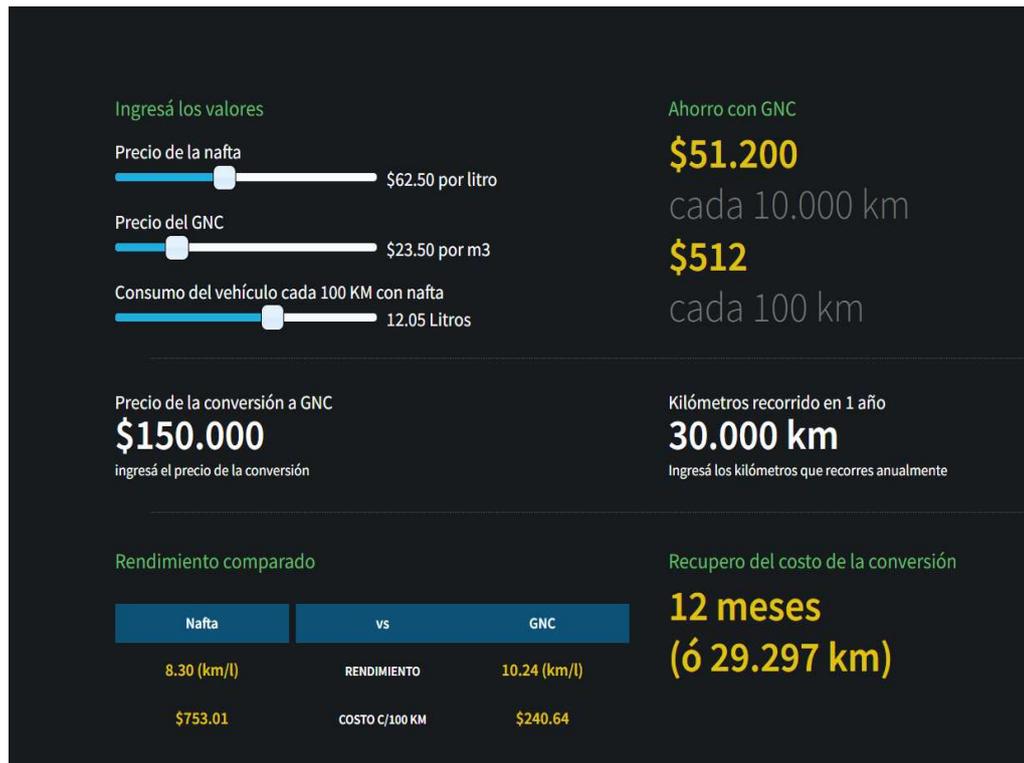


Figura 2: Interfaz interactiva para calcular el ahorro de nafta con GNC.

En los últimos años se desarrollaron distintas variedades de vehículos eléctricos e híbridos. Los vehículos eléctricos a batería (BEVs) que son propulsados por electricidad almacenada en una batería de larga duración, generalmente de Li-Ion o níquel-hierro. El costo de adquisición de los mismos es superior a los convencionales, las baterías son caras, pesadas y tienen un número de recargas limitadas (entre 300 y 1.000), los tiempos de carga son prolongados (8 horas) y la infraestructura tanto para las estaciones de carga rápida como de intercambio de batería están en una etapa muy incipiente [7].

Los vehículos híbridos eléctricos (HEV) que combinan automáticamente entre un motor de combustión interna que carga la batería interna y un motor eléctrico para

maximizar la eficiencia de combustible. El costo de adquisición de esta tecnología es más caro que los convencionales [7].

Los vehículos eléctricos de autonomía extendida o Extended (E-REV) son similares a los BEV, pero disponen de un motor de combustión interna solo para aportar carga a la batería, en ningún momento proporciona potencia en forma directa a las ruedas, por lo que funciona solo con electricidad. El costo de estos vehículos es todavía alto comparado a un automóvil convencional [7].

Los vehículos a hidrógeno con celdas de combustible (FCEVs) poseen una celda de combustible (CC) que utiliza una reacción de hidrógeno y oxígeno para producir electricidad. El reabastecimiento de combustible tarda alrededor de tres minutos y la emisión de escape es solo vapor de agua. La infraestructura de abastecimiento de combustible es casi inexistente en el mundo. El costo del vehículo es muy alto, así como también el costo del combustible [7].

El GNC es gas natural comprimido a una presión aproximada de 200-250 [bar], dependiendo del país. Este es una mezcla de gases naturales (fundamentalmente, metano CH_4) e hidrocarburos combustibles encontrado en las formaciones porosas bajo la superficie de la tierra. Se crea por la descomposición de plantas y restos de animales, bajo gran calor y presión, por períodos muy largos de tiempo [3].

En los vehículos con motores a gas, se utiliza más frecuentemente el encendido por chispa eléctrica debido a la alta temperatura de autoinflamación del gas (650-700 [°C] en comparación con 320-380 [°C] del combustible Diesel). Es por esta razón que se formulan requerimientos elevados para las bujías y todo el sistema de encendido. Los motores Diesel tienen la capacidad inherente para tolerar con relativa facilidad cambios en el tipo de combustible empleado, entre ellos el GNC, pero carecen de bujías de encendido, razón por la cual no puede reemplazarse completamente el combustible Diesel por gas [3] [4].

El sistema dual fuel está conformado por un conjunto de elementos que permiten el uso del GNC como combustible automotor en vehículos equipados con un motor de combustión interna. En general, está constituido por un depósito de combustible, una válvula de corte de combustible, un reductor de presión, un calentador (intercambiador de calor) un filtro de GNC, un mezclador aire combustible y elementos accesorios. Los sistemas de alimentación de GNC pueden ser de dedicación

exclusiva a GNC (para motores nafteros o con bujías) o sistemas de carburación dual GNC/nafta-Diesel [3].

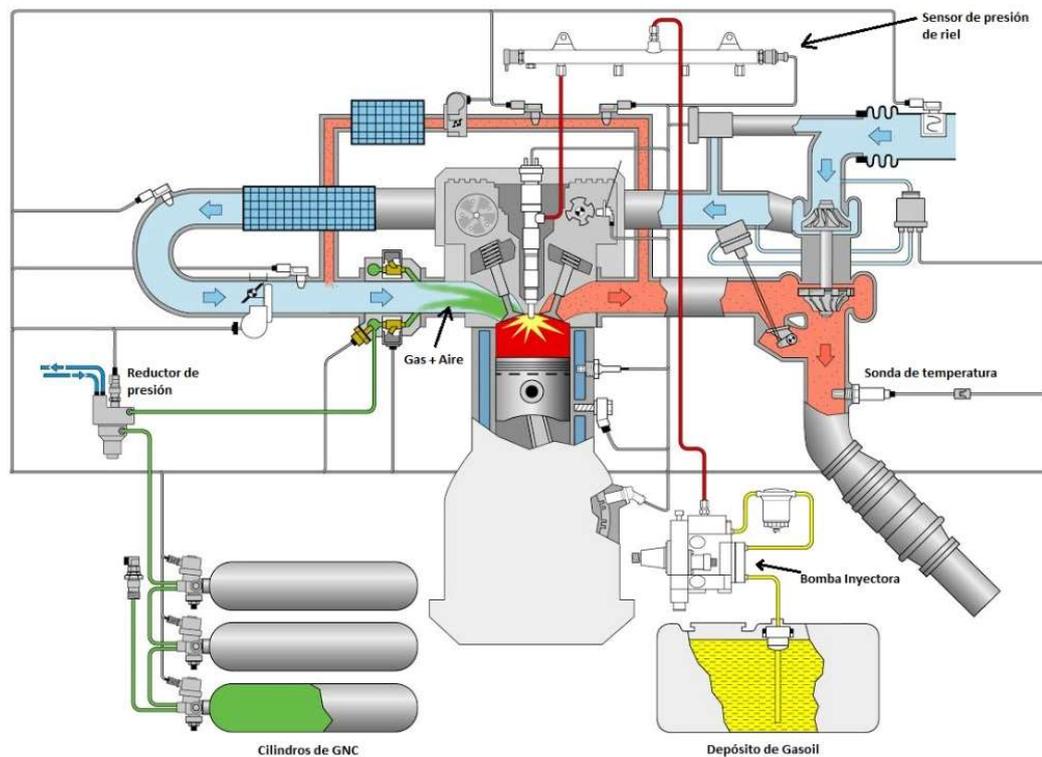


Figura 3: Conjunto de elementos de un sistema Dual-Fuel.

El GNC es almacenado en cilindros a bordo del vehículo en fase gaseosa. Es introducido al circuito por medio de la válvula de carga. Luego, el gas es conducido a través de la línea de alta presión, desde la válvula de carga hasta el cilindro de almacenamiento, el cual puede ser de diferentes diámetros y largos, según la cantidad de gas a almacenar. Estos tanques tienen en su entrada una válvula de servicio la cual permite cerrar la entrada o salida del gas. El gas natural fluye desde el cilindro de almacenamiento a través de la válvula del tanque y, recorriendo la tubería a alta presión, pasa por una electroválvula de corte, la cual se encuentra cerrada durante el funcionamiento con gasolina (sistema dual) o con el motor apagado, y alcanza luego el reductor. En este, se reduce la presión del GNC a través de etapas de reducción y se regula la alimentación del mismo al motor. El gas natural sale del reductor a presión cercana a la atmosférica, fluye a través de la línea de baja presión y llega a la unidad de mezcla, la cual se encarga de suministrar el gas junto con el aire al motor, en caso de vehículos con carburador. Si el vehículo es dual, y cuenta con inyección

multipunto, el gas natural que sale del reductor se dirige a un dosificador electrónico de gas, el cual regula la cantidad de gas que necesita el motor, a continuación, el gas llega al distribuidor de gas, el cual se encarga de distribuir el gas natural a cada cilindro. Los sistemas duales y con inyección de gasolina cuentan también con cableados eléctricos para interrumpir los inyectores. Existe la posibilidad de corregir el avance del encendido (que para el GNC es mayor), agregando un variador electrónico de avance, que se desactiva cuando el vehículo funciona con gasolina [3].

En el presente trabajo, se realizó un sistema que controla el ingreso de GNC en motores Diesel. Como fue mencionado anteriormente, estos motores realizan la explosión sin una chispa, por lo que no es posible realizar un reemplazo completo de dicho combustible por gas. Se utilizaron sensores estratégicos del vehículo para determinar en qué momento habilitar el paso de GNC. Además, se emularon, dentro de ciertos límites, las mediciones que entrega el sensor de presión de riel común, logrando que la bomba de gasoil inyecte menos combustible.

2. Antecedentes

La historia del GNC se remonta a la década de 1930 para tecnologías similares a la actual, y a la de 1920 para una generación anterior de tecnología. La mayoría los vehículos que utilizan GNC hoy en día son convertidos a partir de vehículos de gasolina, aunque hay un número creciente de vehículos fabricados por los fabricantes de vehículos. La mayoría son vehículos pequeños como automóviles, camionetas y camiones ligeros. Sin embargo, hay flotas de vehículos pesados, principalmente autobuses urbanos, que han tenido un uso extensivo en EE. UU., Australia y otros lugares [8].

Con el pasar de los años, se fue incorporando la utilización de GNC en distintos tipos de vehículos, tales como motocicletas y vehículos de tres ruedas, automóviles, camionetas y camionetas, carretillas elevadoras, autobuses, camiones, trenes, barcos e incluso aviones [8].

En 2011, la locomotora eléctrica de turbina de gas GT1-001 desarrollada por Rusia transportó con éxito 16.000 toneladas en 170 vagones de ferrocarril, un nuevo récord mundial para un solo motor principal con un motor de combustión interna [9].

La industria marítima está adoptando cada vez más el gas natural como combustible de elección. En particular, los constructores de buques y los operadores de flotas que buscan cumplir con las estrictas regulaciones de la Organización Marítima Internacional (OMI) que rigen las emisiones marinas están recurriendo a motores de combustible dual que utilizan GNL o GNC y Diesel (combustible dual) [9].

Hasta mediados de 2012 se han visto más de 20 nuevos buques propulsados por GNL lanzados, principalmente en aguas noruegas e incluyendo transbordadores de pasajeros/automóviles y buques de suministro en alta mar. Varios buques más están en orden, incluido el nuevo crucero de Viking Line, el MS Viking Grace y un ferry de alta potencia que se construye en Australia y emplea un motor de turbina de gas [9].

En 2012, Boeing informó sobre su proyecto 'SUGAR Freeze': 'Freeze' se refiere al almacenamiento de combustible criogénico. El estudio, completo con hojas de ruta tecnológicas, propone que combinado con todas las demás medidas de eficiencia,

un avión alimentado con gas podría reducir el consumo de combustible sobre los aviones actuales hasta en un 62% [9].

3. Marco Teórico

El motor Diesel a través del rápido progreso logrado en los últimos años, ha llegado a ser reconocido como la clase principal de motores de combustión para la producción económica de energía, tanto para aplicaciones estacionarias como móviles. El motor Diesel moderno de hoy en día, es de una alta eficiencia, una salida de potencia específica muy alta, y características favorables de par de salida y emisiones de escape [4] [10] [11]. El motor Diesel convencional se distingue además por su capacidad para desarrollarse en tamaños y rangos de potencia de salida muy diferentes [10].

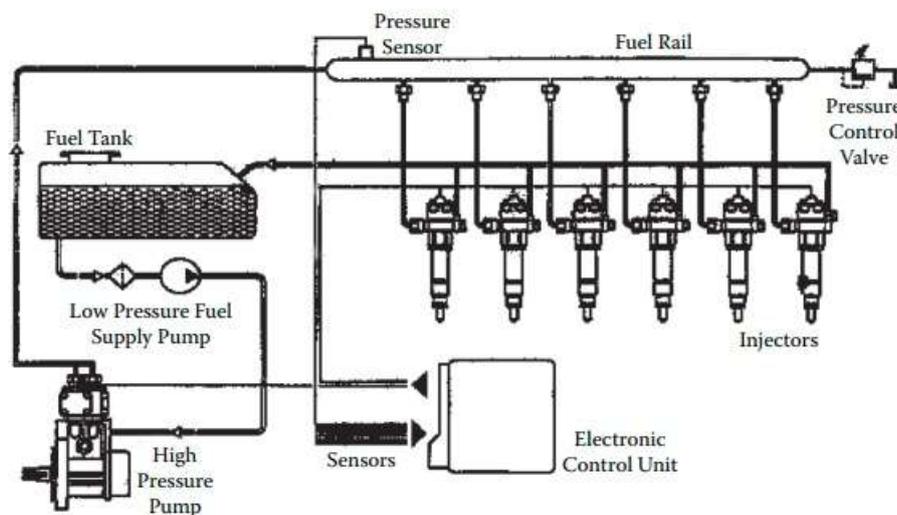


Figura 4: Componentes de un motor Diesel convencional.

Actualmente, hay muchos sistemas de combustible dual disponibles comercialmente ofrecidos por varios fabricantes en muchas partes del mundo, como por ejemplo “Landi Renzo” que opera en muchos países, inclusive Argentina, “Diesel Inyección Milladorio”, “Gascomb Mexico” [12] [13] [14].

También hay una entrada cada vez más exitosa de motores de combustible dual en el sector del transporte dirigidos principalmente a los campos público e industrial. Sin embargo, aunque estos sistemas han funcionado de manera satisfactoria y económica, todavía hay espacio para reducir costos y mejorar aún más su desempeño, ya sea en términos de eficiencia, producción de energía, maximización del reemplazo de combustible Diesel, mostrando una tolerancia más amplia a los cambios en la composición del combustible gaseoso, o asegurando mejoras adicionales en las emisiones de gases de escape. De hecho, los motores de combustible dual, cuando se

dedican de manera adecuada principalmente a la operación de gas combustible, pueden tener algunos aspectos de su desempeño iguales o superiores a los del motor Diesel común mientras explotan económicamente una variedad más amplia de recursos de combustible gaseoso [10].

La economía de la conversión de motores Diesel a operación de combustible dual se beneficia de la combinación de un combustible barato (al menos en Argentina) y un motor primario eficiente, bien desarrollado y fácilmente disponible en forma de motores Diesel. A menudo resulta ser una atractiva oportunidad de inversión al mismo tiempo que ofrece claras ventajas medioambientales y de recursos [10].

Sin embargo, el motor de combustible dual no ha visto, hasta hace relativamente poco, la amplia aplicación que debería haber tenido. La mayoría de sus campos de aplicación tendían a ser la generación de energía eléctrica, con menos aplicaciones dentro de los motores más pequeños del sector del transporte [10].

Actualmente, se emplean en motores relativamente más pequeños, como camiones de transporte relativamente corto, furgonetas, autobuses, taxis y aplicaciones de transporte escolar y para el transporte de vehículos particulares [10].

Una consideración importante para los motores convertidos es, si necesitan mantener la capacidad para entregar la salida de carga completa de Diesel cuando sea necesario, o simplemente están destinados exclusivamente para una aplicación dedicada de combustible dual, y la operación de Diesel es simplemente una medida de corto tiempo en caso de interrupción de la operación de combustible dual [10].

Por lo tanto, los kits para la conversión adecuada de motores no suelen estar hechos de diseño universal y genérico. Apuntan a tipos específicos de motores diésel y gas con un conocimiento de las condiciones operativas esperadas. Estos requisitos han tendido a imponer limitaciones al número de conversiones realizadas [10].

En general, la conversión de un motor Diesel a una operación de combustible dual debe mantener las siguientes características deseables:

- Deben evitarse modificaciones importantes en el motor mientras se conserva la facilidad para operar como un motor Diesel [10].

- La seguridad de la operación con combustibles gaseosos debe seguir siendo de suma importancia, y el control a prueba de fallas y de exceso de velocidad debe permanecer disponible en el modo de combustible dual [10].

La inserción de gas como combustible secundario puede realizarse de distintas maneras:

- Cambiando o agregando inyectores de GNC.
- Ingresando GNC mezclado con el aire que ingresa al cilindro.

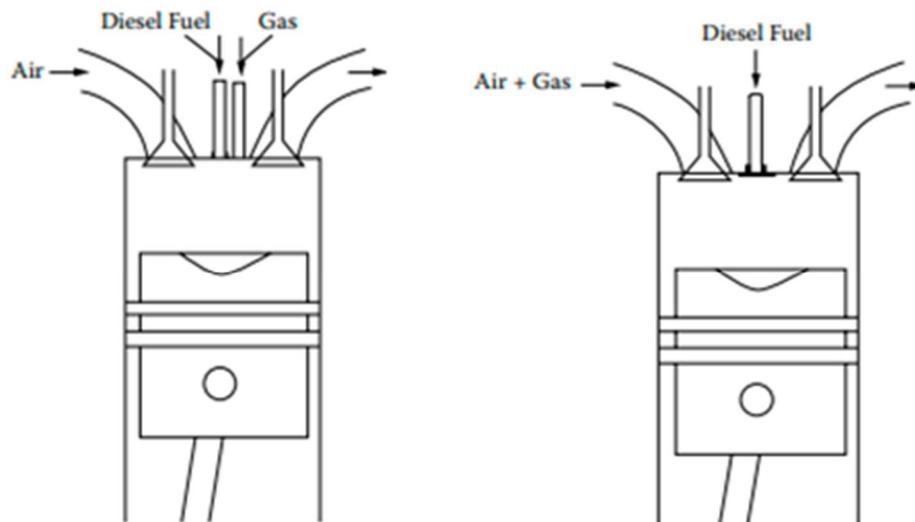


Figura 5: Dos formas de inyección de GNC a un cilindro.

El segundo método nombrado, donde el GNC es mezclado con el aire, es el empleado en el presente proyecto, donde la conversión a realizar en los motores no requiere modificar ni intercambiar partes originales del vehículo [10]. El gas es succionado, mezclándose con el aire que ingresará al cilindro. La tubería por la que circula el gas, consta de un actuador para cerrar su paso de ser necesario, tanto en el caso de una emergencia o mal funcionamiento, como en el caso en que se desea deshabilitar el uso de GNC para funcionar solo a gasoil [10].

El sistema Dual-Fuel emplea la explosión del combustible Diesel al momento de su inyección causada por el calor producido por la compresión del aire en la cámara de combustión. Esta explosión, enciende conjuntamente al gas natural y así opera con los dos combustibles a la vez [3] [10].

4. Requerimientos

El objetivo principal de este proyecto consiste en implementar un sistema dual-fuel que controle el ingreso de GNC en motores Diesel con riel común (Common rail en inglés). Para ello se utilizarán algunos sensores estratégicos del vehículo, el sensor de posición del cuerpo de mariposa (Throttle Position Sensor o TPS por sus siglas en inglés) y el sensor de presión de riel (Pressure Rail Sensor o PRS por sus siglas en inglés). Mediante la lectura de estos sensores el sistema evaluará las condiciones propicias para inyectar GNC en el vehículo.

Los objetivos particulares a perseguir son:

- Analizar las señales provenientes de los sensores del vehículo.
- Implementar la conexión de dichas señales a una unidad de procesamiento.
- Convertir y procesar dichas señales para transmitir órdenes a los actuadores.
- Proporcionar una interfaz de usuario simple que muestre los datos considerados de interés.
- Proporcionar una interfaz de programación robusta y sencilla para el instalador.
- Lograr un sistema que no interfiera con el comportamiento normal del vehículo en forma notoria.
- Contribuir al desarrollo de sistemas similares basados en dual-fuel.

El sistema requerido debe ir montado en el bajo capó del vehículo, en un lugar donde se pueda acceder a la unidad de procesamiento, para que así el instalador pueda conectarse mediante la interfaz de programación de forma rápida y sencilla, sin complicaciones. Esto permite al instalador realizar la puesta a punto del sistema de manera ágil y segura.

Para cumplir con los objetivos presentados se establecen los requerimientos funcionales y no funcionales del sistema en las siguientes secciones.

4.1. Requerimientos funcionales

Los requerimientos funcionales serán aquellos que definen qué debe hacer un sistema cuando se cumplen ciertas condiciones. Expresan cómo interacciona el sistema con su entorno y cuál va a ser su estado y funcionamiento. Dichos requerimientos se enumeran en la Tabla 1.

TABLA DE REQUERIMIENTOS			
ID	REQUERIMIENTOS	TIPO	CATEGORÍA
REQ0	El sistema debe alimentarse con 12 [V] bajo contacto del vehículo.	funcional	obligatorio
REQ1	El sistema debe controlar el ingreso de GNC de vehículos con motores gasoleros que posean sensor de apertura de cuerpo de mariposa (TPS) electrónico y sistema de riel común (Common-rail) con su respectivo sensor de presión de riel (PRS).	funcional	obligatorio
REQ2	El sistema debe tomar lectura del sensor de apertura de cuerpo de mariposa electrónico (TPS) en un rango de 0 a 5 [V], equivalente al grado de apertura del cuerpo de mariposa entre 0 y 100%.	funcional	obligatorio
REQ3	El sistema debe tomar lectura del sensor de presión de riel (PRS) en un rango de 0 a 5 [V], equivalente a la presión de inyección de gasoil entre 100 y 2500 bares.	funcional	obligatorio
REQ4	El sistema debe tomar lectura del sensor de temperatura en un rango de 4 a 30 [mV], equivalente a la temperatura de gases de escape del vehículo de 100 a 700 °C.	funcional	obligatorio
REQ5	El sistema debe tomar lectura del sensor de nivel del tanque de GNC en un rango de 0 a 5 [V], equivalente al porcentaje de llenado del tanque de 0 a 100%.	funcional	obligatorio
REQ6	El sistema debe disponer de una electroválvula de corte total de suministro de GNC que actúe por seguridad.	funcional	obligatorio
REQ7	El sistema debe disponer de un motor paso a paso acoplado a un vástago que limite el ingreso de GNC en un rango de 0 a 100% de apertura.	funcional	obligatorio
REQ8	El sistema debe emular el PRS en un rango de 0 a 5 [V].	funcional	obligatorio
REQ9	El sistema debe disponer de un relé doble inversor para conectar el paso de las señales del PRS y el TPS.	funcional	obligatorio
REQ10	El sistema debe disponer de un módulo central donde se realizará el procesamiento general del sistema, el cual se conectará a un módulo interno y a un módulo externo.	funcional	obligatorio
REQ11	El sistema debe disponer de un módulo interno fijo accesible al usuario en el habitáculo del vehículo.	funcional	obligatorio
REQ12	El módulo del REQ11 debe tener un frente con una pantalla para poder visualizar las variables descritas en REQ15.	funcional	obligatorio
REQ13	El módulo del REQ11 debe poder activar o desactivar el funcionamiento del sistema a través de una llave interruptora.	funcional	obligatorio
REQ14	El sistema debe disponer de un módulo externo portable, manipulado solo por el instalador.	funcional	obligatorio

REQ15	El sistema debe permitir mediante el módulo del REQ 14, calibrar, manipular y configurar los siguientes parámetros:	funcional	obligatorio
REQ15.1	<i>El voltaje mínimo del TPS para el ingreso de GNC al motor expresado como rango de 0 a 100 %.</i>		
REQ15.2	<i>El límite mínimo y máximo de temperatura entre 100 y 600 °C dentro del cual el sistema entrará en el estado del REQ17.</i>		
REQ15.3	<i>El voltaje mínimo del PRS dentro del cual se emulará al PRS.</i>		
REQ16	El sistema debe manejar dos estados posibles una vez encendido: Inactivo y Activo.	funcional	obligatorio
REQ17	El sistema debe entrar en estado Activo si la llave interruptora está encendida, la temperatura está dentro de los límites configurados y el nivel de GNC se encuentra por encima del mínimo.	funcional	obligatorio
REQ18	El sistema debe entrar en estado Inactivo si alguno de los parámetros del REQ17 no se cumplen.	funcional	obligatorio
REQ19	El sistema una vez encendido debe monitorear y mostrar al usuario a través del módulo interno la siguiente información en todo momento:	funcional	obligatorio
REQ19.1	<i>La temperatura expresada en grados Centígrados que mide el sensor.</i>		
REQ19.2	<i>El nivel de GNC expresado en barras de carga que mide el sensor de nivel del tanque.</i>		
REQ19.3	<i>El estado de la llave interruptora expresado como ON/OFF.</i>		
REQ19.4	<i>El estado Inactivo o Activo del sistema expresado en letras según el estado en el que se encuentre.</i>		
REQ20	El sistema en estado Activo debe realizar las siguientes acciones:	funcional	obligatorio
REQ20.1	<i>Energizar el relé del REQ9 para comenzar a emular el PRS.</i>		
REQ20.2	<i>Controlar la apertura del vástago del REQ7 según el parámetro mínimo configurado en el REQ15.1.</i>		
REQ21	El sistema en estado Inactivo debe realizar las siguientes acciones:	funcional	obligatorio
REQ21.1	<i>Desenergizar el relé del REQ9.</i>		
REQ21.2	<i>Cerrar por completo el vástago del REQ7.</i>		
REQ22	El sistema debe desenergizar la electroválvula del REQ6 cuando:	funcional	obligatorio
REQ22.1	<i>La temperatura excede el límite máximo del REQ15.2.</i>		
REQ22.2	<i>El sensor de nivel de GNC del REQ5 acusa 10 %.</i>		

Tabla 1: Tabla de requerimientos.

4.1.1.REQ0

El sistema se energizará cuando se de contacto al vehículo. Esto es así para que el sistema no se encuentre encendido en todo momento y no consuma carga de la batería si no se está usando el vehículo.

4.1.2.REQ1

El sistema debe controlar el ingreso de GNC de vehículos gasoleros que posean las siguientes características:

- sensor de posición de cuerpo de mariposa (TPS) electrónico.
- sensor de presión de riel (PRS).

El TPS, en inglés Throttle Position Sensor, es el encargado de medir la posición a la cual se encuentra la mariposa de aceleración, elemento que se abre o se cierra, en función de la posición del pedal acelerador de los coches.

El PRS es el encargado de detectar la presión de combustible en el riel común mediante un sistema piezoeléctrico que varía el voltaje enviado a la ECU, en función de la presión existente.

4.1.3.REQ2

El sistema debe tomar lectura del TPS, que se encuentra acoplado al eje de la válvula mariposa para que pueda monitorear directamente su posición. Este sensor es un potenciómetro que consiste en una resistencia variable en función de la posición del eje.

4.1.4.REQ3

El sistema debe tomar lectura del PRS, que se encuentra en uno de los extremos del riel común. Este sensor trabaja con una resistencia piezoeléctrica, la cual varía su resistencia si cambia su forma. Esta deformación origina una variación de la resistencia y genera un cambio de tensión en la señal del sensor.

4.1.5.REQ4

El sistema debe tomar lectura de la temperatura de los gases de escape para para monitorear el comportamiento del vehículo y cortar el suministro de GNC si sobrepasa la temperatura máxima admitida y calibrada por el instalador. El sistema funcionará en un rango de temperatura de 100 a 700 [°C].

4.1.6.REQ5

El sistema deberá supervisar el nivel de GNC, tomando la señal del manómetro incluido en tubo del equipo de gas. Este manómetro entrega una señal de voltaje analógica. Si el nivel de GNC es muy bajo el sistema pasa a estado inactivo.

4.1.7.REQ6

El sistema debe disponer de una electroválvula de corte de suministro de GNC que cierre totalmente el paso del mismo, y que actuará en el caso de que la temperatura esté por encima del límite máximo o por debajo del mínimo, o en caso de que el nivel del GNC sea mínimo.

4.1.8.REQ7

El sistema debe disponer de un motor paso a paso que limite el ingreso de GNC. Este motor limita el ingreso de GNC según el estado en el que se encuentre el sistema. Su accionamiento está ligado al valor del TPS.

4.1.9.REQ8

El sistema debe disponer de un conversor digital analógico para emular el PRS. Su funcionamiento está ligado al valor del TPS y de un valor configurado por el instalador.

4.1.10. REQ9

El sistema debe disponer de un relé doble inversor que interrumpa o no el paso de las señales del PRS y el TPS. En el caso del TPS, recién cuando el relé se acciona (estado activo) la señal es tomada por el módulo central. En caso contrario la señal no se interrumpe y por lo tanto no le llega información al módulo central. En el caso del PRS, cuando el relé está desenergizado, la señal es tomada por la ECU del vehículo en todo momento. En cambio, cuando el relé se energiza, la señal del PRS pasa antes por un amplificador.

4.1.11. REQ10

En este módulo se sitúan los componentes electrónicos principales del sistema, y donde se realizan las operaciones lógicas y de cálculo. A este se conecta un módulo interno y un módulo externo que deberán energizarse y comenzar a realizar sus respectivas tareas.

4.1.12. REQ11

El módulo interno, denominado Interfaz de Usuario, interactuará con el usuario del vehículo, situado en un lugar accesible a la vista y dispuesto para el encendido/apagado del sistema GNC.

4.1.13. REQ11.1

El display del módulo interno, será para visualizar los parámetros y el estado general del sistema, como la temperatura, el nivel del tanque de GNC, estado activo o inactivo, y si el sistema se encuentra encendido o apagado por el usuario.

4.1.14. REQ11.2

El interruptor del módulo interno, permite al usuario encender o apagar el sistema de gas según lo requiera. Este interruptor permite al sistema saber si el usuario propone encender (o apagar) el sistema, pero esta condición (encendido) no es suficiente para que el equipo de GNC entre en completo funcionamiento.

4.1.15. REQ12

Además del módulo interno del REQ11, el equipo posee un módulo portátil (interfaz de programación) para que el instalador pueda configurar de manera digital parámetros relevantes para el sistema.

4.1.16. REQ13-16

Mediante la interfaz de programación, que constará de un display y un encoder rotativo, se podrán configurar ciertos parámetros por medio de un menú, y enviar dichos parámetros a la UCP para que queden almacenados en EEPROM. Estos parámetros son:

- Voltaje del TPS para permitir el ingreso de GNC mediante el motor paso a paso del REQ2.
- Voltaje del TPS para comenzar a emular el valor del PRS mediante la salida DAC del REQ3.
- Límite mínimo y máximo de temperatura de operación del sistema
- Nivel mínimo de GNC.

4.1.17. REQ16-17

Decimos que el sistema entra en estado activo, cuando los parámetros mínimos de seguridad se cumplen. La temperatura debe estar dentro de los rangos configurados, la llave interruptora operada por el usuario debe estar encendida, y el nivel del tanque de GNC debe ser mayor que el nivel mínimo. Que el sistema se encuentre en estado activo, es condición necesaria pero no suficiente para que el motor se encuentre operando con los dos combustibles simultáneamente.

4.1.18. REQ16-18

El sistema se encontrará en estado inactivo, cuando algunas de las condiciones planteadas en el REQ16 no se cumplan. En este estado, si la llave interruptora está encendida, se verifica que los demás parámetros se cumplan para poner el sistema en estado activo.

4.1.19. REQ19-20.4

En todo momento, mediante el módulo de la Interfaz de Usuario se debe mostrar la temperatura expresada en °C, el nivel de carga del tanque de GNC, el estado de la llave interruptora expresado como ON/OFF, y si el sistema se encuentra en estado activo o inactivo.

4.1.20. REQ21-21.3

Cuando el sistema se encuentra en estado activo, el sistema deberá realizar acciones según ciertos requerimientos. Se accionará el relé del REQ9 dando paso a las señales de los sensores de los REQ2 y REQ3. Dependiendo del valor del TPS, se deberá abrir o cerrar el paso de GNC mediante el motor del REQ7 y se emulará el valor del PRS mediante el DAC del REQ8.

4.1.21. REQ22-22.2

Contrario al REQ anterior, si el sistema se encuentra en estado inactivo, debe desenergizar el relé del REQ9, dejando sin señal de TPS y PRS al sistema, y cerrar el motor del REQ7 para bloquear el ingreso de GNC. El sistema permanece en este estado, monitoreando permanentemente las variables que puedan cambiar su estado.

4.1.22. REQ23-23.2

El sistema deshabilita la electroválvula general en caso de emergencia por alta temperatura, o si el nivel de tanque es muy bajo.

5. Arquitectura

La propuesta de este trabajo es aprovechar la aptitud de los motores de combustión interna con ciclo Diesel para trabajar con la mezcla de dos combustibles simultáneamente, gasoil y GNC, aprovechando las ventajas de este último. Esto nos lleva a obtener un vehículo cuyas emisiones de CO₂ son menores, logrando eventualmente un ahorro de dinero en países como Argentina debido a su bajo costo, y un aumento de la potencia debido a la capacidad calorífica superior del GNC.

Se considera conveniente que el instalador del equipo pueda configurar los parámetros necesarios a fin de adaptar el equipo a distintas marcas y modelos de vehículos, logrando un sistema relativamente flexible. Así mismo, este se ha modularizado con la finalidad de facilitar la instalación y configuración.

La Figura 6 muestra la arquitectura del sistema propuesto. El propósito es presentar los subsistemas y las interfaces que lo conforman. En dicha figura, los subsistemas están representados por cajas, las interfaces por flechas que vinculan los subsistemas, y se identifican los actores externos.

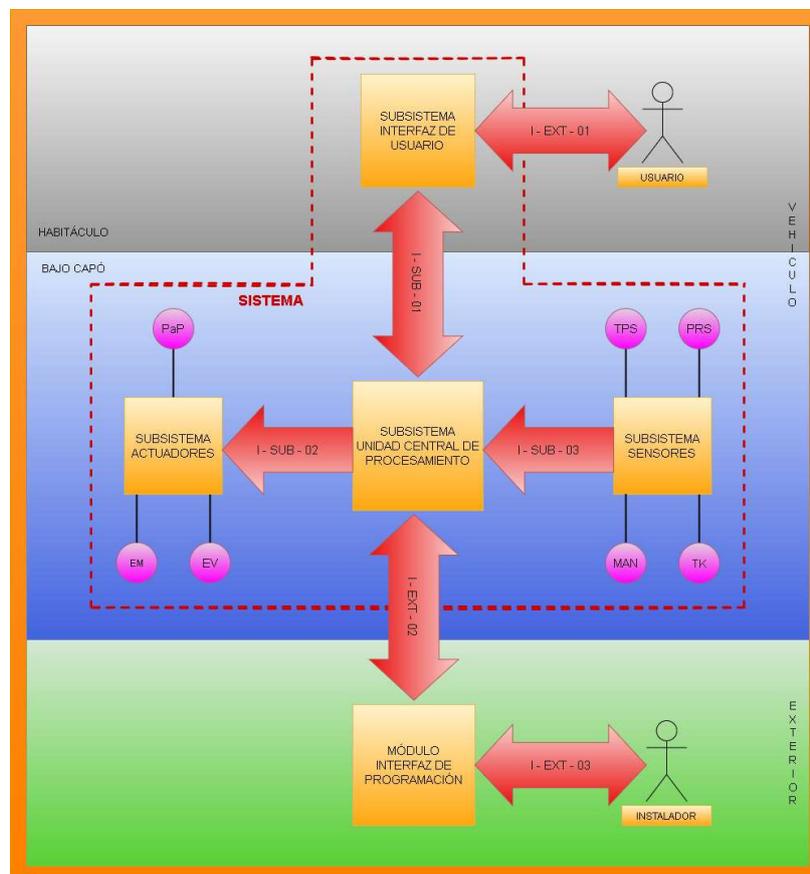


Figura 6: Arquitectura del sistema.

Se implementarán entonces 5 subsistemas:

- Subsistema de sensores, interviniendo sensores existentes en el vehículo y agregando otros, adaptando las señales a niveles compatibles con el hardware restante, y digitalizando señales para un correcto procesamiento.
- Subsistema de actuadores, accionando las salidas y su correspondiente actuador asociado.
- Subsistema interfaz de usuario, para mostrar la información del estado del sistema al usuario del vehículo.
- Subsistema interfaz de programación, para que el instalador del sistema, pueda preseleccionar parámetros a fin de adaptarlo al vehículo intervenido.
- Subsistema Unidad Central de Procesamiento, para comandar y gestionar todos los subsistemas ya nombrados.

5.1. Subsistemas y actores externos

A continuación, se describirán los sistemas a ser implementados en este trabajo.

5.1.1. Subsistema de sensores

Para controlar el ingreso de GNC al motor Diesel, el sistema se basa en las lecturas de ciertos sensores según los requerimientos REQ2-REQ5. Dos de estos sensores se encuentran instalados en el vehículo según las limitaciones del REQ1, y los dos restantes deberán ser instalados. La señal proveniente de estos cuatro sensores, es acondicionada para poder ser procesada luego por el subsistema UCP.

5.1.2. Subsistema de actuadores

El objetivo de este subsistema es adaptar las señales de salidas digitales para ser utilizadas por cada uno de los tres actuadores intervinientes. La electroválvula del REQ6, es comandada por un relé de 12 [V], que a su vez es accionado por un transistor. En el caso del actuador del REQ7 se utilizó un driver específico para comandar ese tipo de motores. Por último, el conversor DAC del REQ8 es quien generará una señal analógica a partir de una digital, emulando el valor del PRS (REQ3) cuando el sistema se encuentra activo.

5.1.3.Subsistema Interfaz de Usuario

Tiene como objetivo mostrar la información del estado actual del sistema completo por medio de un display, y la posibilidad de encenderlo/apagarlo a través de una llave. La información que se muestra al usuario, da conocimiento general del estado de los parámetros básicos, como por ejemplo la temperatura y el nivel de GNC del tanque.

5.1.4.Subsistema Interfaz de Programación

Con la interfaz de programación, el instalador puede configurar diferentes parámetros con la finalidad de obtener el mejor funcionamiento del sistema. Principalmente se configuran los valores de voltaje en que las señales provenientes de los sensores deben ser motivo de acción para el sistema. Por ejemplo, el valor mínimo y máximo de temperatura en que el sistema debe operar.

5.1.5.Subsistema Unidad Central de Procesamiento

Es quien realiza todas las acciones entre los demás subsistemas. El objetivo principal es, por medio de los valores brindados por el subsistema de sensores, realizar acciones sobre el subsistema de actuadores. A su vez, se comunicará con el subsistema Interfaz de usuario a fin de exponer la información del estado general. También interactúa con la interfaz de programación cuando esta se conecta. Nombradas las principales funciones de este subsistema, se puede afirmar que es quien se mantiene comunicado con los demás subsistemas a través de las interfaces, para lograr el funcionamiento total del sistema, unificando y conformando lo que sería el núcleo o cerebro de nuestro proyecto.

5.1.6.Actor externo: Instalador

Es el profesional que se encargará de instalar los componentes y configurará los parámetros. Actuará realizando el conexionado eléctrico y sobre la interfaz de programación.

5.1.7.Actor externo: Usuario

Es la persona dueña del vehículo en el que se instalará el sistema GNC-Diesel.

5.2. Interfaces

5.2.1.Interfaces Externas

Estas son las interfaces que existen entre el sistema y los actores externos al mismo. A continuación, se listan las interfaces externas del sistema.

ID	Descripción
I-EXT-01	Interfaz Externa 01 – Entre el actor externo USUARIO y el SUBSISTEMA DE INTERFAZ DE USUARIO.
I-EXT-02	Interfaz Externa 02 – Entre el MÓDULO INTERFAZ DE PROGRAMACIÓN y el SUBSISTEMA UNIDAD CENTRAL DE PROCESAMIENTO.
I-EXT-03	Interfaz Externa 03 – Entre el actor externo INSTALADOR y el MÓDULO INTERFAZ DE PROGRAMACIÓN.

Tabla 2: Interfaces externas.

5.2.2. Interfaces entre Subsistemas

Estas son las interfaces que existen entre módulos de distintos Subsistemas.

ID	Descripción
I-SUB-01	Interfaz entre Subsistemas 01 – Entre el SUBSISTEMA INTERFAZ DE USUARIO y el SUBSISTEMA UNIDAD CENTRAL DE PROCESAMIENTO.
I-SUB-02	Interfaz entre Subsistemas 02 – Entre el SUBSISTEMA ACTUADORES y el SUBSISTEMA UNIDAD CENTRAL DE PROCESAMIENTO.
I-SUB-03	Interfaz entre Subsistemas 03 – Entre el SUBSISTEMA SENSORES y el SUBSISTEMA UNIDAD CENTRAL DE PROCESAMIENTO.

Tabla 3: Interfaces entre subsistemas.

5.2.3. Interfaces Internas

Estas son las interfaces que existen entre los módulos pertenecientes a un mismo Subsistema.

6. Diseño

6.1. Diseño de hardware

6.1.1. Selección del hardware de Subsistema de sensores:

Este subsistema está formado por cuatro sensores: dos de ellos ya existentes en los vehículos y los otros dos son agregados al momento de la instalación del sistema.

Los primeros dos sensores nombrados anteriormente son: el sensor de posición del cuerpo de la mariposa (TPS), y el sensor de presión de riel (PRS).

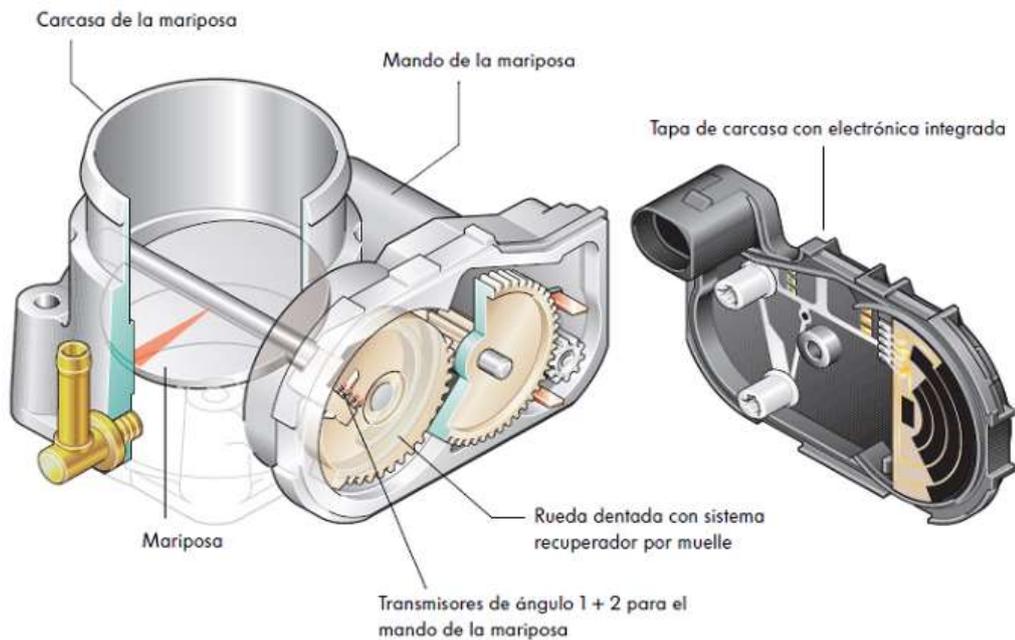


Figura 7: Cuerpo de mariposa con electrónica integrada.



Figura 8: Riel común o common rail.

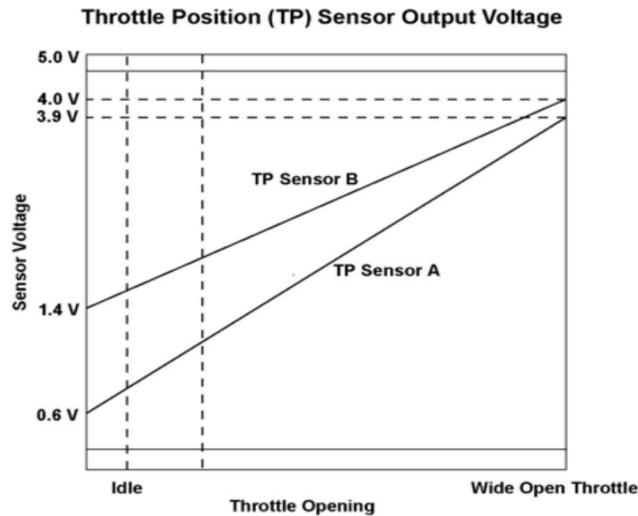


Figura 9: Voltaje de salida de TPS.

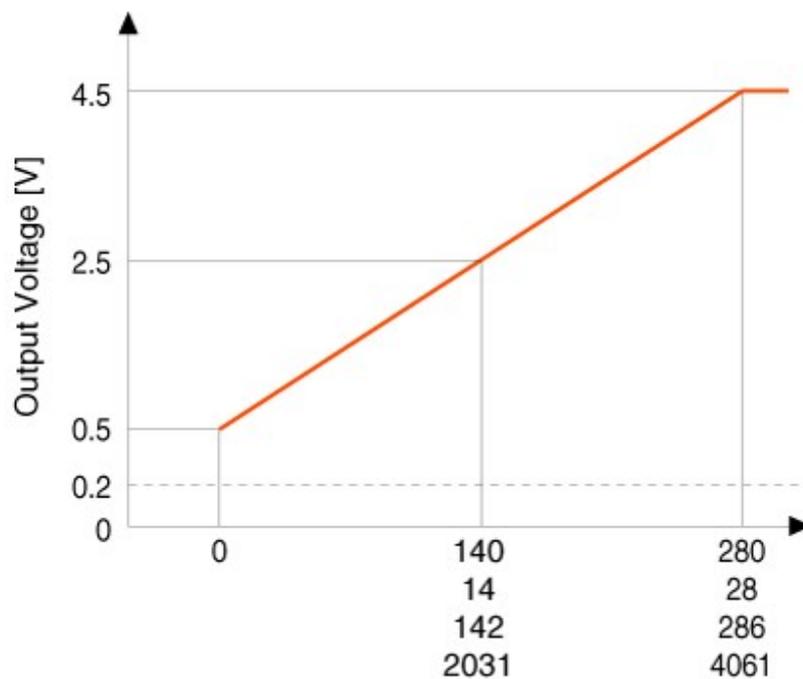


Figura 10: Voltaje de salida del PRS.

Como se puede apreciar en la Figura 9 y Figura 10, la señal parte desde un rango inicial distinto de cero, y no llega al voltaje máximo de alimentación de estos sensores.

Las señales provenientes de estos dos sensores serán derivadas por un circuito que debe conectar con la etapa de amplificación y desconectarlos del sistema del vehículo a través de un relé, quien habilita su paso hacia un amplificador operacional LM358. Este circuito integrado se eligió porque tiene alta impedancia de entrada, salidas con protección contra cortocircuitos, alimentación con fuente simple de voltaje en un rango de 3 a 32 [V] y

entradas con protección contra descarga electrostática. El relé utilizado, es doble inversor de baja potencia, y nos permite desactivar o activar el ingreso de las dos señales al sistema. En un encapsulado pequeño tenemos la posibilidad de conmutar ambas señales simultáneamente.

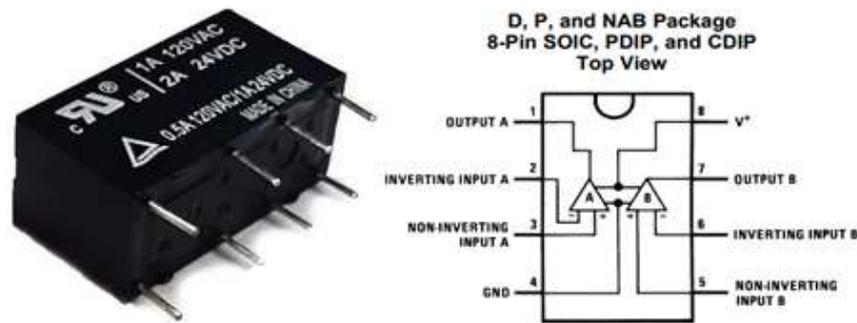


Figura 11: Relé doble inversor (izquierda) y amplificador LM358 (derecha).

El amplificador operacional puede funcionar como amplificador no inversor, o como seguidor de tensión. En ambos casos, la configuración es similar a un amplificador no inversor, pero con ganancia igual a uno en el circuito seguidor de voltaje.

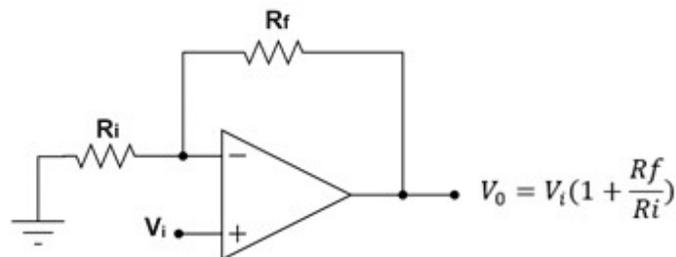


Figura 12: Amplificador operacional no inversor.

Si hacemos que R_f sea igual a cero, y que el valor de R_i sea muy grande (tendiendo a infinito) obtenemos un amplificador de ganancia unitaria, donde $V_0 = V_i$. Con esto se logra una impedancia de entrada muy alta, y una de salida muy baja.

Los otros dos sensores presentados son: un termopar para medición de temperatura y un manómetro para indicación de nivel de tanque de GNC.

El primero, es un termopar tipo K. Este tipo de sondas, resisten temperaturas muy altas (superiores a los 1000 [°C]) y se encuentran fácilmente disponible en el mercado argentino. La señal entregada por este transductor, no posee características lineales, y tiene errores por la diferencia de voltajes entre de la denominada “juntura fría” (extremo donde se toma la señal eléctrica) y la juntura caliente (unión de los dos metales, zona

donde se realiza la medición efectiva). El voltaje máximo arrojado por este tipo de sondas ronda los 30 [mV] [15].



Figura 13: Sonda de temperatura K.

Para poder utilizar dicha termocupla se diseñaron y probaron tres circuitos diferentes.

Se evaluó en primera instancia un circuito con un circuito integrado (CI) que dispone de cuatro amplificadores operacionales (AO), además de un LM35. Con tres AO se realizó un amplificador de instrumentación con entrada diferencial para la conexión de la termocupla. El cuarto AO se utiliza para el acondicionamiento de la señal del LM35. Las dos señales de salida son analógicas que deben ser leídas y procesadas por la UCP, agregando complejidad al programa y utilizando más puertos de entrada del controlador.

Como segunda opción se evaluó un circuito similar, pero con un amplificador de instrumentación integrado ahorrando cierta complejidad al circuito, pero con los mismos inconvenientes.

La tercera y última opción consistió en utilizar un circuito integrado diseñado para este tipo de sondas, el MAX6675. Este circuito integrado posee: compensación de la junta fría, linealización de la curva de temperatura, detección de desconexión de la termocupla, y digitalización de la señal, otorgando una salida de datos SPI.

Optamos por esta última opción, ya que simplifica varias funciones en un solo chip, permitiendo ahorrar espacio en la placa PCB y simplificando la lectura de la temperatura debido al formato de los datos de salida. Además, la compensación de la junta fría requiere de otro sensor de temperatura y el acondicionamiento de su señal, sumado a la operativa ligada a la alinealidad de dicha señal.

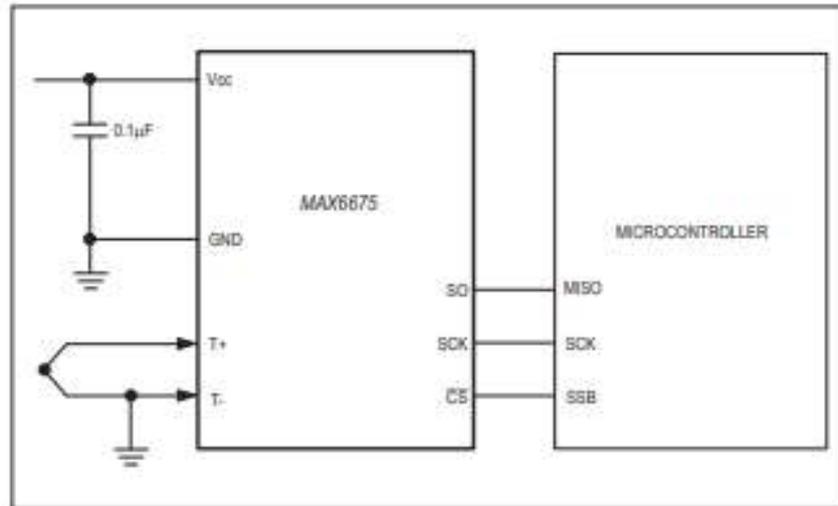


Figura 14: Conexión entre MAX6675 y controlador.

Por último, el cilindro de GNC instalado en el vehículo, lleva un manómetro [16] quien acusa el nivel de carga de gas en su interior. Los manómetros actuales fueron adaptados para leer una señal analógica de voltaje, mientras que anteriormente los manómetros eran mecánicos, pudiéndose leer únicamente el nivel mirando la aguja. Poseen un conector de tres pines, siendo estos para su alimentación entre 0 y 5 [V], y un pin de señal quien arroja voltajes escalonados según se encuentre el cilindro más o menos lleno. Este sensor no requiere de hardware adicional, ya que los voltajes operan en los mismos rangos que el microcontrolador utilizado, por lo que la señal se conecta directamente sin dispositivos intermedios.



Figura 15: Manómetro GNC.

INPUT:	5 V
OUTPUT:	4V/3V/2V/1V
MATERIAL:	Steel
ACCURACY CLASS:	2.5%,1.6%
PRESSURE RANGE:	0~400 bar, 0~6.000PSI (Dual scale)

Tabla 4: Características del manómetro GNC.

6.1.2. Selección del hardware de Subsistema de actuadores

El subsistema de actuadores, está formado por tres salidas diferentes.

6.1.2.1. Electroválvula

La primera es una electroválvula (EV) de 12 [V]. Esta válvula es denominada válvula de corte o válvula general, ya que es la que permite el suministro principal de GNC al sistema. Es el primer elemento con el que se encuentra el gas que circula por la tubería después de salir del cilindro. Es robusta ya que debe interrumpir el flujo de gas a alta presión (aproximadamente 200 [bar]).

Para accionar este tipo de actuador, se resolvió el uso de una salida por relé. De esta manera, la EV se alimenta con 12 [V], utilizando el contacto normal abierto (NA) del relé como interruptor.

Otra opción viable, era utilizar un transistor MOSFET para la activación de este actuador, se optó igualmente el uso del relé, debido a la simplicidad del circuito, y la no repetitividad que tendrá el accionamiento, ya que es activado una vez encendido el sistema controlador de GNC, y solo se desactivará cuando éste es apagado o aparezca alguna falla.



Figura 16: Electroválvula de 12 [V].

6.1.2.2. Motor paso a paso bipolar

En segundo lugar, fue incluido un motor paso a paso bipolar. La selección de este actuador, se llevó a cabo debido a dos razones principales. La primera, es que los kits actuales disponibles en el mercado argentino para la conversión de motores de combustión interna a GNC incluyen un motor similar al utilizado para este proyecto, razón por la cual es conocido por los talleres instaladores. También, si bien no fue contemplado en el presente proyecto, debido a sus características y la morfología en la que se los comercializa son capaces de rotar fracciones de revolución según esté conformado su bobinado interno, haciéndolo capaz de permitir el ingreso de GNC en mayor o menor medida según las condiciones lo requieran. El funcionamiento del mencionado actuador en este proyecto, es ON/OFF, es decir que permite o bloquea completamente el paso de gas.



Figura 17: Motor paso a paso con vástago.

En el diseño de su accionamiento, se contemplaron dos opciones:

- Doble puente H con componentes discretos y variantes.

Este circuito debe incluir ocho transistores, ya que cada puente H está compuesto por cuatro de ellos, y se deben manejar dos bobinas con sus respectivas secuencialidades. Se debe tener sumo cuidado en los tiempos muertos entre la activación/desactivación de cada rama, o podría generarse un cortocircuito.

- Driver dedicado a motores paso a paso bipolares.

Estos controladores se volvieron muy famosos al popularizarse las impresoras 3D. Constan de un circuito integrado, el A4988, que cuenta internamente con los circuitos lógicos y de potencia necesarios para comandar un motor PaP bipolar. Las versiones comerciales disponibles más conocidas, están

compuestas por un PCB con el integrado soldado y pines para su fácil conexión. Basta con enviar secuencias de pulsos al terminal correspondiente a los pasos. El sentido puede seleccionarse solamente cambiando el estado lógico de otro terminal.

La segunda opción, resultó con grandes ventajas frente a la alternativa con componentes discretos, debido a la simplicidad de la lógica de funcionamiento y el grado de integración que provee el A4988. Como mencionamos anteriormente, su masiva oferta al ser utilizados por la comunidad maker del rubro 3D, hizo que su precio sea realmente bajo.

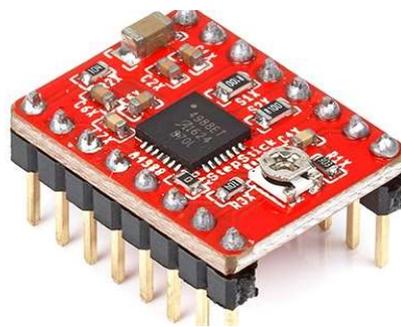


Figura 18: Driver A4988 del motor paso a paso.

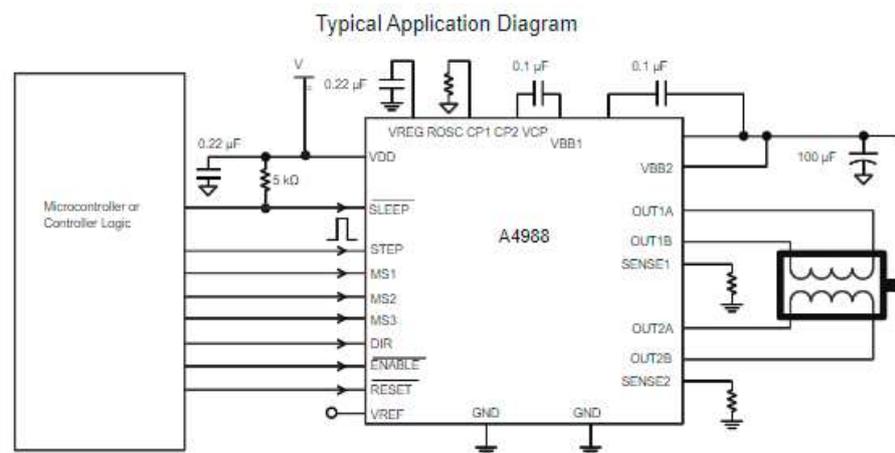


Figura 19: Conexión entre A4988 y microcontrolador.

6.1.2.3. Conversor digital-analógico

El tercer actuador de este subsistema es un conversor digital-analógico. Este conversor se encarga de transformar una señal digital proveniente del microcontrolador (componente principal del subsistema Unidad central de Procesamiento) en una señal analógica. En la selección del actuador más conveniente, fueron analizados y probados tres circuitos:

- El primero de ellos, actuaba sobre la señal analógica original proveniente del PRS, sin ser convertida y procesada por el microcontrolador. Dicha señal ingresaba a un amplificador no inversor y era amplificada por un factor variable dependiente del valor de un preset. Este circuito tenía el inconveniente de presentar el voltaje de alimentación (+12V) a su salida cuando el equipo se encontraba apagado.
- La segunda opción, fue incluir un relé entre el sensor y el microcontrolador para eliminar el problema nombrado anteriormente, habilitándolo únicamente mientras el sistema permanece encendido. Para generar la señal analógica, se utilizó modulación por ancho de pulso (PWM) y un operacional como filtro. El inconveniente de este circuito fue el permanente procesamiento del microcontrolador para actualizar el puerto PWM, y la variación de la tensión eficaz según los valores RC del filtro.

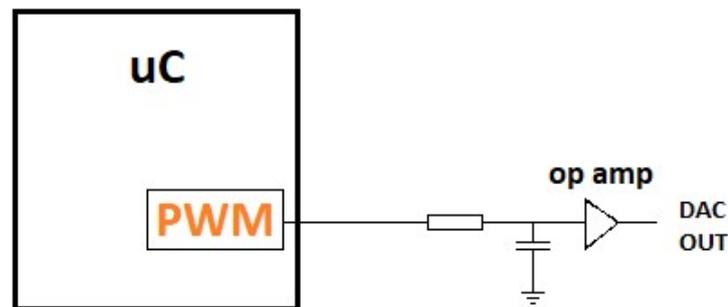


Figura 20: Circuito DAC discreto.

Finalmente, se optó por un convertor DAC integrado. El MCP4725 de Microchip, es un convertor digital-analógico de 12 bits de resolución, incluye una EEPROM integrada y posee un puerto de comunicación I2C. Este chip es de tamaño muy compacto por lo que ahorramos en tamaño de PCB, y basta con enviar los datos en formato digital para que este se encargue de la conversión. Los datos pueden ser enviados cada un periodo determinado de tiempo, ya que el MCP4725 mantiene en su salida el ultimo valor enviado ahorrándonos así capacidad de procesamiento por parte del micro, permitiendo atender otras tareas.

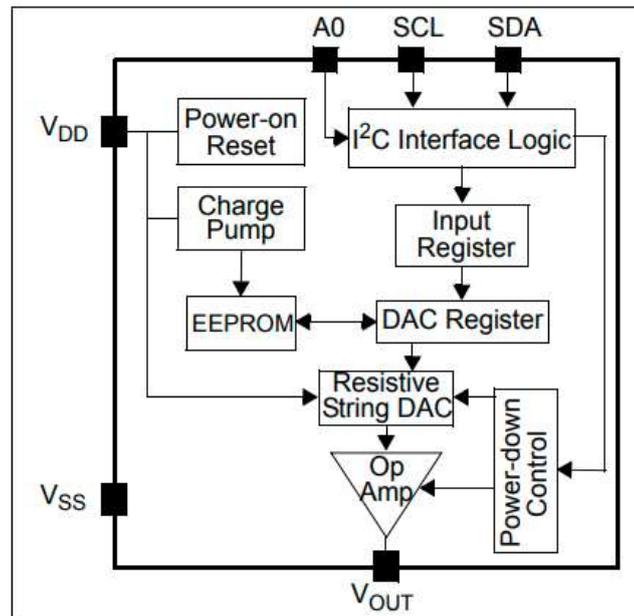


Figura 21: Circuito Integrado MCP4725.

6.1.3. Selección del hardware de Subsistema Interfaz de Usuario

La interfaz de usuario, requiere cumplir las funciones según los REQ12 y REQ13:

- Mostrar al usuario información sobre el estado del equipo:
 - Temperatura actual del equipo.
 - Estado activo/inactivo del sistema.
 - Estado encendido/apagado del sistema.
 - Nivel del tanque de GNC.

- Posibilidad por parte del usuario a encender/apagar el sistema.

Para esto, la solución fue buscar una interfaz donde la información presentada sea clara y pueda ser fácilmente interpretada por el usuario. Fueron planteadas opciones como el uso de displays de siete (7) segmentos o una pantalla LCD retroiluminada, o un display oled.

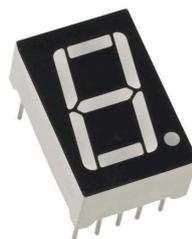


Figura 22: Display 7 segmentos.

Haciendo uso de un display de siete segmentos, solo se puede representar un parámetro a la vez, y deben utilizarse varios dígitos, o bien un código específico para poder presentar toda la información deseada.

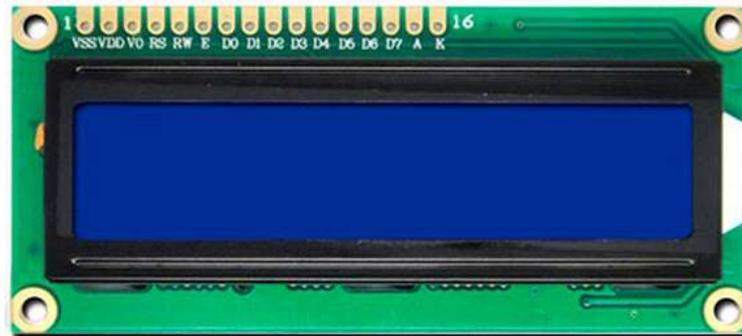


Figura 23: Pantalla LCD retroiluminada.

Entre las otras dos opciones, resultó ventajoso utilizar un display oled ya que puede ser comandado mediante puerto I2C, lo que ahorra pines, y la información puede ser distribuida en cualquier lugar de la pantalla mediante las coordenadas del pixel correspondiente. Esto último no es posible en un display lcd, ya que cada posición de la matriz 16x2 puede ser impresa con un solo dígito. Además, el CI que maneja al display oled, el SSD1307, admite funciones de desplazamiento de código, cambio de fuente, entre otras.



Figura 24: Pantalla OLED.

6.1.4. Selección del hardware de Subsistema Interfaz de Programación

Subsistema diseñado para que el instalador pueda configurar parámetros del sistema:

- Temperaturas límites superior e inferior
- Voltaje de comparación de TPS.
- Voltaje de comparación de TPS.

- Nivel mínimo de GNC.
- Porcentaje de amplificación del emulador de PRS.
- Pasos enviados al motor para su apertura y cierre total.

Para poder realizar esta tarea, el instalador debe poder visualizar mediante un display o pantalla y poder interactuar, modificar y seleccionar los parámetros. Para ello se resolvió utilizar una pantalla OLED 128x64 pixeles, similar al display utilizado en el subsistema Interfaz de Usuario debido a las mismas ventajas especificadas.

Para la manipulación de parámetros existen opciones como teclados de membrana, encoders rotativos o pulsadores individuales. La opción elegida fue la de un encoder rotativo debido a la comodidad para navegar por un menú. Esta tarea se podría realizar con 3 pulsadores de igual manera, pero con este componente disponemos de la solución en un solo dispositivo, ahorrando así en espacio.



Figura 25: Teclado de membrana.

Un teclado de membrana conlleva a la utilización de más pines innecesariamente.



Figura 26: Encoder rotativo.

De esta manera conectando ambos dispositivos a un microcontrolador para comandarlos, se logró una interfaz de muy pocos componentes, simple y fácil de utilizar. Nuevamente el microcontrolador utilizado es un ATmega328P por las razones mencionadas anteriormente.

6.1.5. Selección del hardware de Subsistema Unidad Central de Procesamiento

El procesador elegido para este sistema debe reunir los requerimientos mínimos para poder manejar los dispositivos y periféricos de los demás subsistemas:

- 3 canales de un conversor analógico/digital para el subsistema de sensores.
- 4 pines de algún puerto GPIO para funcionar como salidas digitales para la activación de actuadores.
- Puertos de comunicación:
 - 1 puerto I2C para la comunicación con MCP4725 y el display OLED. Este hace uso de 2 pines, capaz de direccionar 128 esclavos.
 - 1 puerto SPI para la comunicación con MAX6675. Este hace uso de 3 pines, capaz de direccionar múltiples periféricos.
 - 1 puerto UART para la carga del programa y la comunicación con la interfaz de programación. Este hace uso de 3 pines, con comunicación full dúplex en operación síncrona o asíncrona.
- 1 entrada digital para el interruptor de encendido/apagado, y 3 para el encoder rotativo.

De entre la amplia gama de controladores posibles, limitados por los requisitos nombrados anteriormente, se ha seleccionado un microcontrolador ATmega328P, debido a la gran cantidad de información disponible en internet, a que puede ser programado por medio de un conversor USB-TTL, sin necesidad de adquirir un programador/depurador que en la mayoría de las marcas es costoso (por ejemplo, PicKit3/4 para la familia PIC) y de su disponibilidad en el mercado. Otra razón de su elección, fue que, comparado con otras líneas o familias, disponemos de conocimientos previos muy superiores.

6.2. Diseño de software

6.2.1. Selección del lenguaje de programación y el compilador

Para la implementación del software se evaluaron el IDE de Arduino, Atmel Studio y Visual Studio Code (VSC).

El IDE de Arduino no tiene texto predictivo y presenta errores a la hora de compilar el código. Atmel Studio tiene muy poca información de guía y está más inclinado a la programación en bajo nivel haciéndolo incompatible con algunas librerías.

Se eligió Visual Studio Code porque posee las características nombradas anteriormente que los demás entornos no tienen. VSC es un entorno de desarrollo de código abierto,

multiplataforma y de licencia libre, con plugins que lo hacen compatible para programar distintas familias de microcontroladores, entre ellos el utilizado en este proyecto.

Entre los lenguajes existentes para la programación de microcontroladores tenemos Assembler, C o C++. El lenguaje elegido es C++, siendo este compatible con las librerías disponibles para comandar algunos de los dispositivos o rutinas necesarias, como el puerto de comunicación UART, y los puertos SPI e I2C. Los lenguajes restantes no resultaron convenientes porque las rutinas para el manejo de puertos conllevan una complejidad innecesaria, ya que existen librerías que realizan estas funciones y está comprobado que funcionan sin errores.

6.2.2. Software del Subsistema de Unidad Central de Procesamiento

La finalidad de este subsistema es, de manera general:

- Tomar muestras de los cuatro sensores utilizados.
- Analizar los datos de entrada y compararlos con los valores pre-configurados. También debe estar disponible ante nuevas configuraciones por medio de la IP y enviar datos a la IU.
- Accionar los actuadores que sean necesarios según las condiciones del punto anterior lo ameriten.
- Deshabilitar el sistema al existir alguna falla.

7. Implementación

Se detallará la implementación de hardware y software por el que están formados todos los subsistemas.

7.1. Implementación del hardware

Para la implementación del hardware fueron diseñadas tres placas PCB, correspondientes a la interfaz de usuario, la interfaz de programación, y la unidad central de procesamiento, junto con bloques del subsistema de sensores y actuadores.

7.1.1. Hardware del subsistema Interfaz de Usuario

El objetivo de la interfaz de usuario, es presentar información del estado del sistema al usuario/propietario del vehículo, además de tener una llave para el encendido y apagado del equipo según el requerimiento REQ13. Como posee pocos componentes, se realiza un diseño muy simple en placa preperforada donde se ubicará una pantalla oled y la llave de encendido.

7.1.2. Hardware del subsistema Interfaz de Programación

Esta interfaz es utilizada por el instalador para configurar los parámetros considerados relevantes. Está compuesta por una escasa cantidad de componentes, por lo que se ha realizado en una placa preperforada. El display oled y el encoder rotativo utilizados se fijaron en la carcasa, y haciendo uso de cableado y arrays de pines se conectaron con el microcontrolador.

No se utilizó hardware para el filtrado de las señales del encoder, ya que se realiza mediante software.

7.1.3. Hardware del subsistema UCP (partes de subsistema de sensores y actuadores)

La mayor cantidad de componentes del sistema están montados sobre la placa que conforma la UCP, ya que se incluyen módulos de otros subsistemas como el de sensores y actuadores.

Se incluyó un array de pines para el quemado del programa y la conexión de la interfaz de programación.

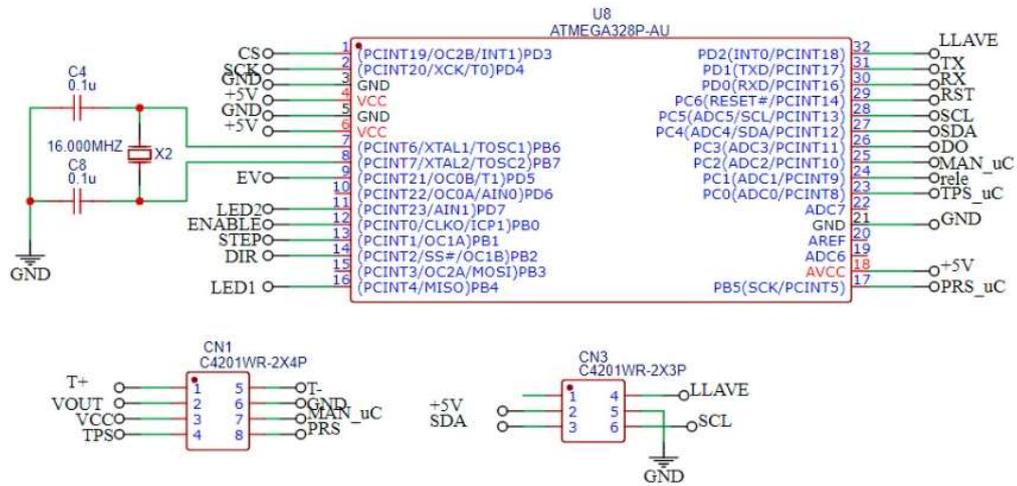


Figura 29: Diagrama esquemático Unidad Central de Procesamiento.

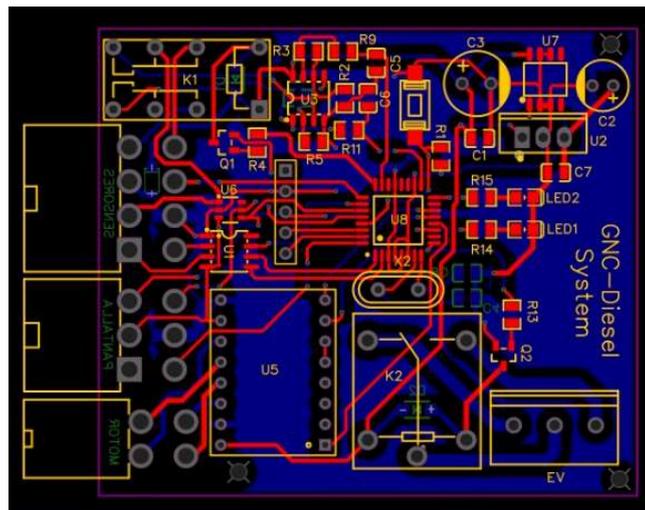


Figura 30: Diseño PCB de la UCP.

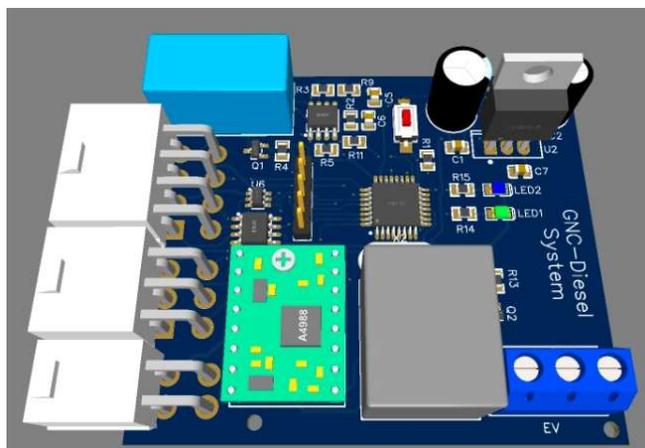


Figura 31: Diseño 3D del PCB de la UCP.

7.2. Implementación del software

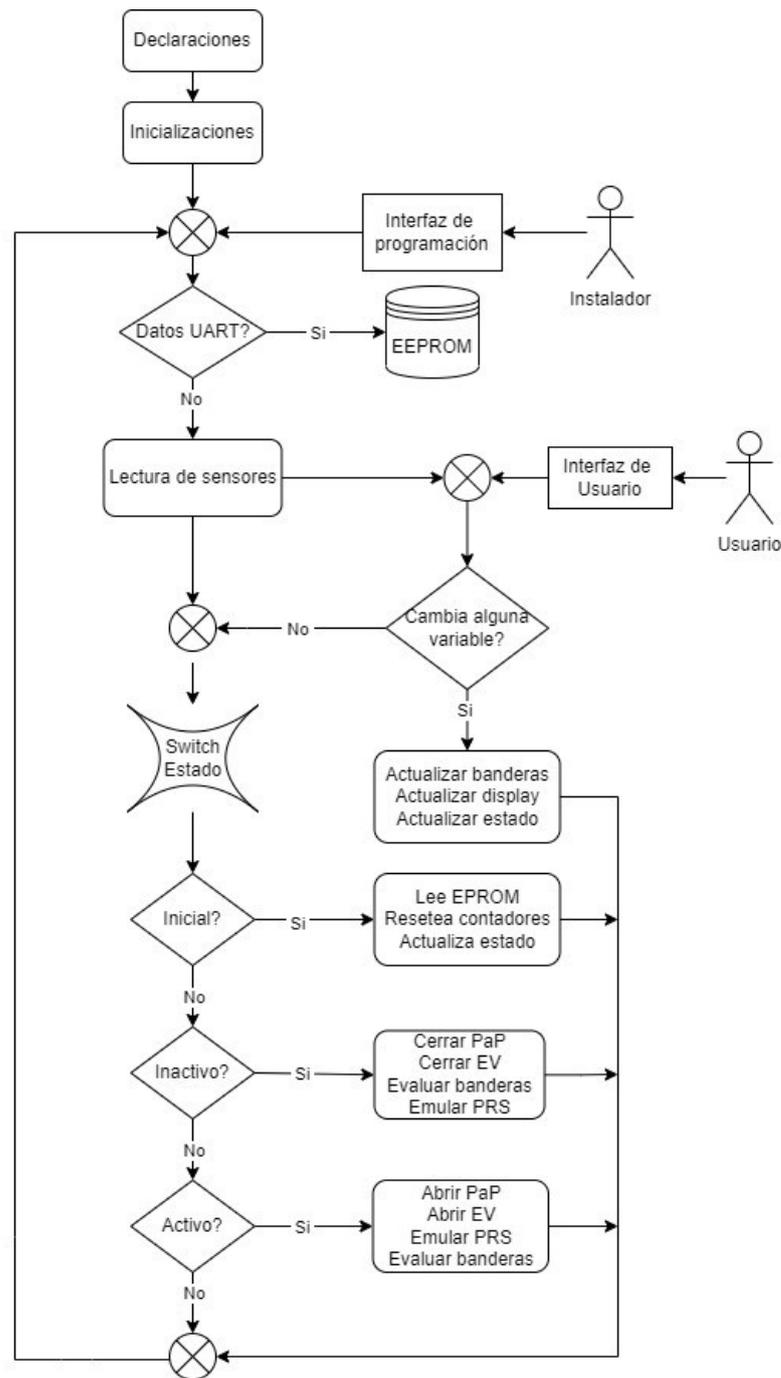


Figura 32: Diagrama de flujo general del software.

Para la implementación del software se realizó un programa para la Unidad Central de Procesamiento, y uno para la Interfaz de Programación. Estos fueron desarrollados en el entorno Visual Studio Code (VSC), en lenguaje C++ y compilado con el core de Arduino. El VSC cuenta con plugins y motores de compilación para instalar y hacerlo compatible con las familias y marcas de microcontroladores más conocidas, como por ejemplo PIC, AVR, STM32, etc.

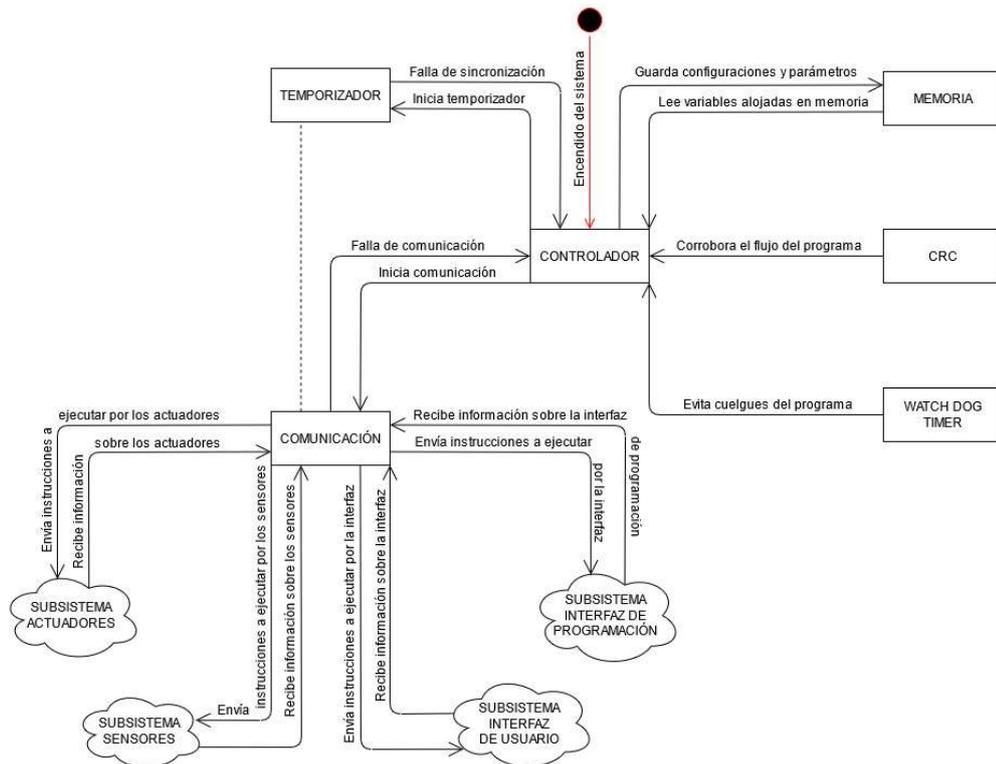


Figura 33: Diagrama de estados de la Unidad Central de Procesamiento.

Cada programa cuenta con una sección de configuraciones que se ejecuta una sola vez, y otra sección formada por un bucle infinito. Dentro de este bucle, se realizan llamados a funciones definidas para una tarea específica, y se ejecutan interrupciones del temporizador.

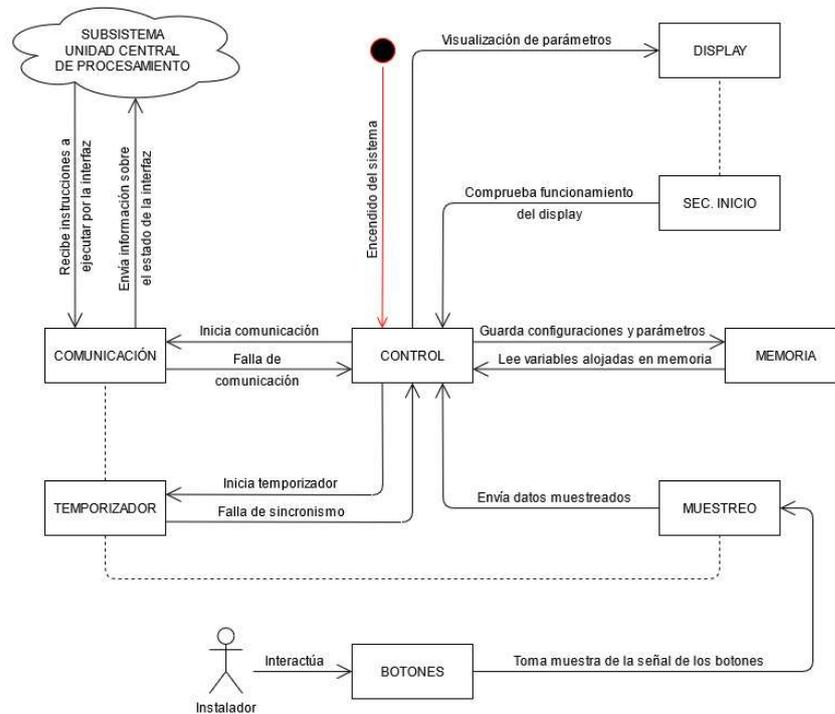


Figura 34: Diagrama de estados de la Interfaz de Programación.

7.2.1. Software de la Unidad Central de Procesamiento

Al comenzar el programa, se definen las librerías y se declaran las variables globales utilizadas, además de los prototipos de funciones y la declaración de instancias u objetos que serán utilizadas luego.

En la sección que se ejecuta una sola vez, realizamos las inicializaciones de puertos GPIO, de puerto serie, configuraciones del temporizador y se cargan valores almacenados en EEPROM. Por último, se invocará a la función para que el display oled de la Interfaz de Usuario actualice su información.

Cabe destacar que la función “mostrar_Display()” quien actualiza la información representada en el display, es llamada ante eventuales cambios en alguna de las variables y no por tiempo, ya que estas pueden permanecer sin alteraciones durante periodos prolongados, produciendo llamadas a funciones innecesarias a dicha función.

```
EEPROM.get(0,Pasos);
EEPROM.get(4,Temp_min);
EEPROM.get(8,Temp_max);
EEPROM.get(12,nivel_gnc_min);
EEPROM.get(16,dacTriggerValue);
EEPROM.get(20,tpsTriggerValue);
EEPROM.get(24,ampPorcent);

Timer1.initialize(1000);
Timer1.attachInterrupt(timer_1ms);

mostrar_Display();
```

Dentro del bucle infinito, se realizan constantemente una serie de acciones:

- Se comparan banderas y en función de éstas, se actualizan salidas y leen entradas.
- Se ejecuta una estructura Switch, quien realiza llamado a funciones según el estado en que se encuentre el sistema.
- Se atienden desbordes de temporizadores para realizar tareas a intervalos fijos de tiempo.
- Se verifica si llegaron datos por puerto serie.

Fuera de bucle loop, se realiza la implementación de las funciones. El programa utiliza funciones específicas para objetivos muy puntuales, y de esta manera se puede llamar a la función necesaria cuando se requiera. Estas funciones son:

- void serialEvent (void) – Función utilizada para atender y procesar los datos que llegan al puerto serie. Esta función no recibe ningún parámetro, ni devuelve ningún valor, ya que es llamada automáticamente cuando se recibe un dato en el puerto serie. Los datos recibidos son procesados dentro de la misma función.
- void timer_1ms (double tiempo) – Función para dar una base de tiempo exacta de 1 milisegundo. Dentro de ésta se aumentan contadores para lograr tiempos múltiplos de 1 [ms]. El argumento “tiempo” es el tiempo en microsegundos que produce la interrupción. Esta función no devuelve ningún valor.
- bool Abrir_PAP (int pasos) – bool Cerrar_PAP(int pasos) – Funciones para abrir o cerrar el motor paso a paso respectivamente. Esta función se encarga de activar las secuencias correctas de pines para el driver que maneja el motor. Recibe como parámetro la cantidad de iteraciones que debe ejecutar un bucle “for” correspondiente a la cantidad de pasos para que el motor abra o cierre completamente. Devuelve true si el bucle se termina de ejecutar, false en otro caso.
- float Emular_DAC (float adc_PRS) – Función utilizada para configurar valores en el conversor MCP4725 por medio de puerto I2C. Recibe como parámetro un variable de tipo flotante correspondiente al valor leído por el conversor ADC. Devuelve otro flotante, obtenido a partir de la multiplicación del valor argumento por una constante.
- float leer_Temperatura (hex dirección puerto) – Función encargada de leer la temperatura recibida por el puerto SPI enviada por el MAX6675. Recibe como parámetro la dirección en hexadecimal del puerto SPI en la que se recibe la temperatura en formato digital. Devuelve el valor de la temperatura en grados Celsius.
- bool leer_Interruptor (int pin) – Función encargada de leer es estado de la llave de encendido/apagado del sistema. Esta llave es manipulable por el usuario. Recibe como parámetro el pin digital a leer. Devuelve el valor leído.

- float leer_NivelGNC(int pin) – Función para leer el valor analógico entregado por el manómetro. Recibe como parámetro el pin analógico a leer. Devuelve el valor leído representado en 10 bits (0-1023).
- bool mostrar_Display(bool temp, bool interr, bool nivelGNC, bool estado) – Función para actualizar la información en la pantalla. Recibe como parámetro, estado de banderas que cambian su valor, cuando alguno de los parámetros se actualiza. De esta manera, esta función sólo modifica la sección del display correspondiente a la variable actualizada. Devuelve true si se ejecuta correctamente, false en caso contrario.

7.2.2. Software de la Interfaz de Programación

La interfaz de programación tiene como objetivo que el instalador pueda configurar parámetros mediante un menú, para luego enviarlos a la UCP y queden guardados en EEPROM.

De esta manera, el programa se centra principalmente en:

- Lectura de los pulsos del encoder rotativo, detectando sentido de giro y presión de switch.
- Mostrar en el display oled la información actualizada.
- Guardar las variables que el instalador configura, para luego ser enviadas a la UCP.

Dicho esto, el programa no reviste complejidad, pero hay que tener en cuenta ciertos puntos para que la interfaz funcione de manera fluida:

- Hacer filtrado por software para evitar rebotes en los pulsos del encoder.
- Actualizar el display ante cada pulso detectado.
- Detectar e informar si los datos fueron correctamente recibidos por la UCP.

8. Validación y verificación

Es necesario someter al sistema a validaciones para asegurar que cumple las funciones esperadas y verificar que lo haga correctamente.

Para ello se realizan un test que consiste en pruebas del sistema que comprueban el funcionamiento del sistema en su totalidad, integrando todos los subsistemas desarrollados en la ejecución de los casos de prueba.

8.1. Matriz de trazabilidad

La matriz de trazabilidad es una herramienta que se utiliza para saber qué requerimientos quedan cubiertos por cada prueba. En la Tabla 6 se muestra la matriz de trazabilidad de los requerimientos funcionales del sistema.

8.2. Arquitectura del banco de pruebas

Para verificar que el sistema cumple con los requerimientos definidos para el mismo, surge la necesidad de crear un banco de pruebas que será utilizado en la ejecución de los casos de prueba propuestos en secciones posteriores.

Este banco consiste en una placa de madera que está dividida en tres partes. Como se muestra en la Figura 35, en la parte izquierda se encuentran los sensores: una llave seccionadora de ventilador que simula el comportamiento del manómetro (MAN), una sonda de temperatura (TK), dos potenciómetros uno para simular el TPS y el otro para el PRS. En el medio, se encuentra la Interfaz de Programación (IP), la Interfaz de Usuario (IU) y la Unidad Central de Procesamiento (UCP). Y en la parte derecha se encuentran los actuadores: el motor paso a paso (PaP), el conversor digital-analógico al que denominamos emulador (EM) y la electroválvula (EV).

Este banco de pruebas además dispondrá de un simulador de temperatura y de una llave que simule el contacto del vehículo.

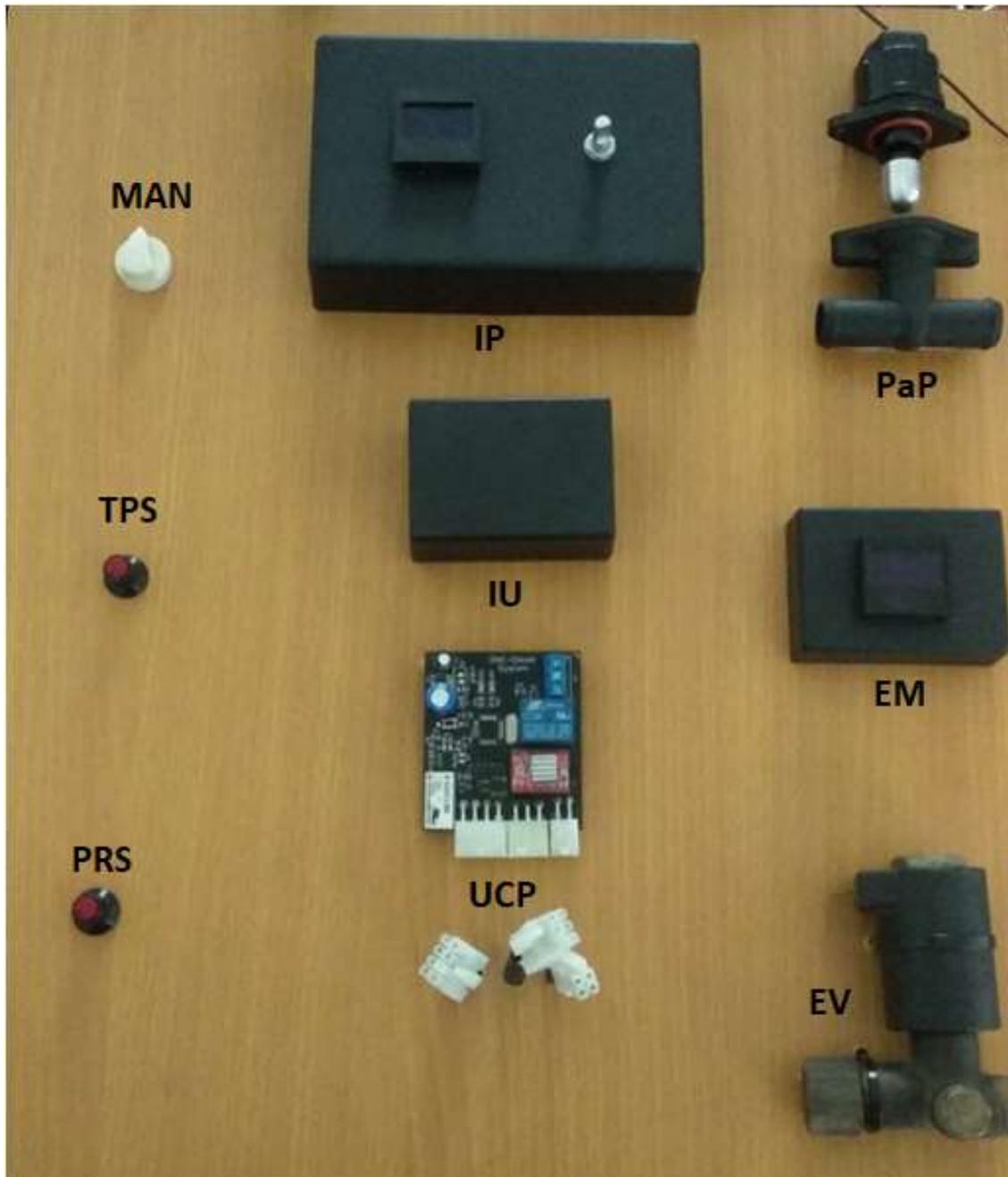


Figura 35: Banco de pruebas del sistema.

8.2.1. Simulador de temperatura

Para simular el comportamiento del sistema con respecto a los cambios de temperatura a la que estará expuesta la sonda TK, utilizaremos una estación de soldado marca Hony modelo 936A. Esta tiene la capacidad de modificar la temperatura del lápiz soldador en un rango de temperatura de 200 a 480 [°C]. A través de un tubo de aluminio pondremos en contacto la punta del lápiz soldador que por conducción transmitirá la temperatura hacia el extremo del sensor.



Figura 36: Estación de soldado Hony 936A.

8.2.2. Herramientas adicionales

Para completar el banco de pruebas, se dispondrá de una fuente de tensión continua regulable para simular la alimentación de la batería del vehículo, Figura 37, y de un multímetro digital para la medición de tensiones, Figura 38.

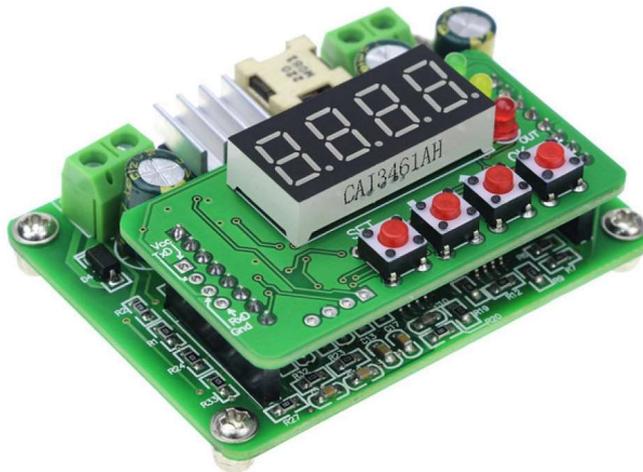


Figura 37: Fuente de alimentación Step-Down LM2596 B3603.



Figura 38: Multímetro digital Sanwa CD771.

8.3. Casos de prueba para test de sistema

A continuación, se detallan los diferentes casos de prueba definidos para validar los requerimientos del sistema.

8.3.1. Caso de prueba N°0: Verificación de la alimentación del sistema.

Se simulará dar contacto al vehículo, encendiendo la fuente de tensión del banco de pruebas, lo que debe alimentar el sistema, haciendo que la Interfaz de Usuario se encienda y muestre en pantalla los valores medidos por los sensores.

8.3.2. Caso de prueba N°1: Verificación de sensores.

El banco de pruebas será capaz de simular el comportamiento del sensor de apertura de cuerpo de mariposa (TPS) electrónico y sensor de presión de riel (PRS).

8.3.3. Caso de prueba N°2: Lectura del TPS.

Se medirá con un multímetro la señal de salida del TPS. Este debe variar su voltaje entre un mínimo de 0 [V] y un máximo de 5 [V] al mover la perilla del potenciómetro TPS. Esto simula el movimiento del cuerpo de mariposa al pisar el acelerador del vehículo.

8.3.4.Caso de prueba N°3: Lectura del PRS.

Se medirá con un multímetro la señal de salida del PRS. Este debe variar su voltaje entre un mínimo de 0 [V] y un máximo de 5 [V] al mover la perilla del potenciómetro PRS. Esto simula la variación de presión en el riel común cuando la bomba de combustible inyecta gasoil.

8.3.5.Caso de prueba N°4: Lectura de temperatura.

Se mostrará por pantalla el valor de temperatura en grados Celsius, luego de ser acondicionada por un circuito integrado dedicado. Se variará la temperatura calentando la sonda y se constatará en pantalla que el valor de temperatura aumente consecuentemente.

8.3.6.Caso de prueba N°5: Lectura nivel de GNC.

Se mostrará por pantalla el nivel de GNC. Se simulará la variación de nivel mediante una llave selectora. Si se pone la llave al mínimo en pantalla se debe reflejar este nivel. De la misma manera debe ocurrir con el nivel máximo.

8.3.7.Caso de prueba N°6: Verificación electroválvula.

Se verificará que la electroválvula al ser alimentada se accione.

8.3.8.Caso de prueba N°7: Verificación motor paso a paso.

Se verificará que, por medio de su controlador, al excitar el motor paso a paso, el vástago se cierre o abra completamente.

8.3.9.Caso de prueba N°8: Verificación conversor digital analógico.

Se verificará por medio de una pantalla los valores de entrada y de salida del emulador. Estos valores eventualmente pueden ser iguales o tener un voltaje de salida mayor que la entrada según el valor del TPS.

8.3.10. Caso de prueba N°9: Verificación relé doble inversor.

Si el sistema está en estado activo, se comprueba continuidad entre el par de contactos común y normal abierto (NA) del relé, uno correspondiente a la señal del TPS y el otro del PRS. Luego se mide la tensión entre la masa del circuito y los contactos NA. Esta

tensión debe ser distinta de cero y variar según la posición de los potenciómetros TPS y PRS.

En estado inactivo, se comprueba continuidad entre el par de contactos común y normal cerrado (NC) del relé. Luego se mide la tensión entre la masa del circuito y los contactos NC. Esta tensión debe ser distinta de cero y variar según la posición de los potenciómetros TPS y PRS.

8.3.11. Caso de prueba N°10: Verificación de conexión entre módulos.

Se comprueba que la conexión entre módulos sea a través de conectores molex. Estos poseen diferente cantidad de terminales y un único sentido para su conexión. Al conectar los módulos, estos deben encenderse y funcionar correctamente.

8.3.12. Caso de prueba N°11: Interfaz de Usuario.

Se comprueba visualmente que la Interfaz de usuario quede accesible.

8.3.13. Caso de prueba N°12: Verificar pantalla.

Se verifica que el módulo posea una pantalla donde se muestren las variables que muestra el sistema.

8.3.14. Caso de prueba N°13: Llave interruptora.

Se verifica que el módulo posea una llave interruptora en su frente accesible al usuario.

8.3.15. Caso de prueba N°14: Interfaz de Programación.

Se verifica visualmente que la Interfaz de Programación quede accesible al instalador.

8.3.16. Caso de prueba N°15: Voltaje mínimo de TPS.

Se comprobará que, al configurar el valor de voltaje mínimo del TPS, este se grabe correctamente en la memoria de la Interfaz de Programación, observando que el valor configurado sea el que se ve reflejado en pantalla luego de salir y volver a entrar al menú.

8.3.17. Caso de prueba N°16: Rango de temperatura de trabajo.

Se comprobará que, al configurar el valor mínimo y máximo de temperatura de trabajo, estos se graben correctamente en la memoria de la Interfaz de Programación, observando

que los valores configurados sean los que se ven reflejados en pantalla luego de salir y volver a entrar al menú.

8.3.18. Caso de prueba N°17: Voltaje mínimo PRS.

Se comprobará que, al configurar el valor de voltaje mínimo del PRS, este se grabe correctamente en la memoria de la Interfaz de Programación, observando que el valor configurado sea el que se ve reflejado en pantalla luego de salir y volver a entrar al menú.

8.3.19. Caso de prueba N°18: Estados del sistema.

Se verificará que el sistema muestre a través de la pantalla de la IU los dos estados posibles, activo e inactivo, en los que puede variar.

8.3.20. Caso de prueba N°19: Estado activo.

Se comprobará que al dar contacto ON a la llave interruptora, simulando un nivel de GNC por encima del mínimo y una temperatura dentro del rango de trabajo, en la pantalla de la IU se refleje el estado activo.

8.3.21. Caso de prueba N°20: Estado inactivo.

Se comprobará que estando en estado activo, la pantalla muestre estado inactivo si: apagamos por contacto la llave interruptora, o se simula nivel mínimo de GNC, o la temperatura esté por encima del máximo o por debajo del mínimo del rango de trabajo.

8.3.22. Caso de prueba N°21: Mostrar temperatura.

Se verificará que en la pantalla de la IU se muestre la temperatura expresada en grados Celsius [°C] y que coincida con la temperatura configurada en el simulador de temperatura.

8.3.23. Caso de prueba N°22: Mostrar nivel de GNC.

Se verificará que en la pantalla de la IU se muestre el nivel de GNC como barras de carga y que cada barra de carga coincida con el nivel que indica el manómetro.

8.3.24. Caso de prueba N°23: Mostrar estado de interruptor.

Se verificará que en la pantalla de la IU se muestre el estado de la llave interruptora con la leyenda ON u OFF, y que coincida con el estado verdadero de la llave.

8.3.25. Caso de prueba N°24: Mostrar estado del sistema.

Se verificará que en la pantalla de la IU se muestre el estado del sistema con la leyenda “Activo” o “Inactivo” y que corresponda con el estado actual del sistema.

8.3.26. Caso de prueba N°25: Emulando PRS.

Se comprobará que, al superar el valor de tensión configurado por la IP y estando el sistema en estado activo, comience a emular el PRS, energizando el relé doble inversor. Para ello utilizamos el multímetro en continuidad y medimos el contacto normal abierto del relé y comprobamos que ahora debe estar cerrado.

8.3.27. Caso de prueba N°26: Apertura del motor paso a paso.

Se comprobará que, al superar el valor de tensión configurado por la IP y estando el sistema en estado activo, comience a actuar el motor paso a paso abriendo el vástago para permitir el ingreso del GNC al motor. Para ello verificamos visualmente la apertura del mismo.

8.3.28. Caso de prueba N°27: No emula PRS.

Se comprobará que, al caer el valor de tensión por debajo del valor configurado por la IP y estando el sistema en estado inactivo, el sistema deje de emular el PRS, al desenergizar el relé doble inversor. Para ello utilizamos el multímetro en continuidad y medimos el contacto normal cerrado del relé y comprobamos que ahora debe estar cerrado.

8.3.29. Caso de prueba N°28: Cierre del motor paso a paso.

Se comprobará que, al caer el valor de tensión configurado por la IP y estando el sistema en estado inactivo, el sistema cerrará el motor paso a paso bloqueando el ingreso del GNC al motor.

8.3.30. Caso de prueba N°29: Cierre de electroválvula.

Se comprobará que llevando la lectura del sensor de temperatura fuera de los límites mínimo o máximo de trabajo, o cuando el nivel del GNC esté por debajo del mínimo, en cualquiera de estas dos situaciones, la electroválvula debe desenergizarse.

9. Análisis de costos

9.1. Costos de materiales

En la siguiente tabla se detallan los costos unitarios y cantidades de cada uno de los materiales utilizados para la construcción de la Unidad Central del Procesamiento, la Interfaz de Usuario y la Interfaz de Programación.

Ítem	Cantidad	Costo Unitario (USD)	Costo (USD)
Capacitor SMD 0,1 [uF]	6	0,011	0,066
Capacitor electrolítico 1[uF]	2	0,0363	0,0726
Conector macho a 90° Molex 2x4P	1	1,03	1,03
Conector macho a 90° Molex 2x3P	1	0,97	0,97
Conector macho a 90° Molex 2x2P	1	0,75	0,75
Conector hembra a cable Molex 2x4P	1	0,315	0,315
Conector hembra a cable Molex 2x3P	1	0,27	0,27
Conector hembra a cable Molex 2x2P	1	0,242	0,242
Bornera through hole 3P	1	0,63	0,63
Pin Header simple fila 40P	1	0,22	0,22
Diodo 1N4148	2	0,017	0,034
Diodo 1N4007	1	0,055	0,055
Relé doble inversor	1	1,63	1,63
Relé inversor	1	1,09	1,09
LED SMD 0805	2	0,048	0,096
Tact Switch SMD 3x6x5 Plastic head	1	0,25	0,25
Transistor 2N3904 SMD (SOT 23)	2	0,055	0,11
Resistencias SMD	11	0,055	0,605
Módulo Interfaz MAX6675	1	11,34	11,34
Regulador XL78L05A SMD	1	0,42	0,42
Polulu Driver A4988	1	1,93	1,93
Módulo DAC MCP4725	1	3,78	3,78
uC ATMEGA328P SMD	1	5,25	5,25
Cristal 16 MHz	1	0,39	0,39
Amplificador Operacional LM358	1	0,276	0,276
Display OLED 128x32 0,96"	2	8,46	16,92
Encoder rotativo KY-040	1	1,66	1,66
Llave interruptora ON-OFF 2P	1	0,884	0,884
Arduino NANO v3	1	8,07	8,07
Cables varios 0,5mm ² x metro	10	0,315	3,15

Termo-contráible x metro	1	0,48	0,48
Terminales para Molex	18	0,085	1,53
Placa PCB con circuito impreso	1	15,79	15,79
Gabinetes varios	3	27,37	82,11
Cable p/ RJ11 4 vías x metro	1	0,423	0,423
Conector RJ11	2	0,387	0,774
TOTAL			163,61

Tabla 5: Costo de materiales.

El costo total de materiales para el sistema es de USD163,61, que al cambio actual (USD1 = AR\$108,25 según BNA) suma un valor de \$17.710,78 pesos argentinos.

9.2. Costos totales

En cuanto a las horas dedicadas al desarrollo del proyecto, se tomó un costo por hora promedio de un técnico electrónico sin experiencia de \$500 = USD4,62.

Teniendo en cuenta que trabajamos dos personas y la carga horaria fue de 480hs cada uno, contemplando el diseño, ejecución, pruebas y ajustes realizados, se obtiene un costo por horas de trabajo totales de USD4.435,20 = \$480.110,40.

Sumando el costo total de materiales al costo anterior, podemos concluir que el costo final del proyecto realizado es de USD4598,81 = \$497.821,18.

En principio, el producto desarrollado será vendido exclusivamente a un solo taller, que podría amortizar la inversión con la venta de 20 equipos. Instalando mensualmente 3 equipos, la amortización en tiempo se lograría entre 6/7 meses.

10. Conclusiones

El sistema se logró implementar de manera exitosa. Las verificaciones propuestas se han llevado a cabo por medio de un banco de pruebas con características similares a las de un vehículo real, validando el cumplimiento de los requerimientos.

Existe una versión anterior al sistema propuesto en este trabajo, formada por 3 placas que, entre ellas, cumplen las mismas funciones. Una de ellas, se encarga de controlar el motor PaP, otra el control del DAC, y la última, control de temperatura. Dicha versión, está funcionando de manera correcta y demostrando su estabilidad en el tiempo en varios vehículos en la que fue instalada.

Uno de los principales desafíos, fue lidiar con los ruidos eléctricos en un vehículo real. Tienen distintos orígenes, desde el alternador hasta pequeñas oscilaciones producidos por vibraciones mecánicas. Para solucionarlos se realizó un filtrado adecuado en la fuente de alimentación del sistema, y se ha agregado histéresis en los circuitos de entrada de señales.

El sistema diseñado provee los siguientes beneficios:

- Lograr un vehículo que funcione con combustible dual Diesel-GNC
- Ahorro de dinero debido al precio del GNC (en Argentina y otros países).
- Reducir las emisiones contaminantes al medio ambiente, siendo el GNC el hidrocarburo que menos CO₂ genera.
- Operar de forma automática una vez instalado.
- Disponer de medidas de seguridad ante eventuales fallas.
- Disponer de una interfaz para facilitar la configuración de parámetros.

Es importante notar que el sistema fue diseñado en un solo módulo, ya que anterior a este trabajo, se realizaba el control de manera similar, pero en 3 placas separadas, donde el cableado y las configuraciones se volvían tediosas, además de que la tarea de cada una era muy simple y apenas se justificaba la división.

Si bien se han realizado pruebas funcionales donde el GNC es inyectado directamente en la tubería de aire que va al motor sin ningún tipo de control, no se podía controlar la demanda, produciendo sobrecalentamientos en el bloque del motor. Además de la seguridad incluida, el sistema evita el apagado inesperado del motor en ralentí, y la posibilidad de que el usuario decida cuando usar el combustible dual.

11. Trabajos futuros

Podría incluirse software para el control del motor PaP, haciendo un controlador PID, teniendo en cuenta la aceleración del TPS, de esta manera podría lograrse mejor respuesta del vehículo ante aceleraciones repentinas.

Además, investigación acerca del mapeo de las ECU de los vehículos, para tener la posibilidad de emular otros sensores además del PRS, o en su defecto poder cambiar los porcentajes de reemplazo de GNC por Diesel sin que la computadora acuse fallas.

Bibliografía

- [1] R. D. Dicco, «Indicadores Sector Eléctrico de Argentina,» S. C. de Bariloche, 2014.
- [2] O. Ravella, «EL CONSUMO ENERGÉTICO DEL SECTOR TRANSPORTE ANALIZADO DESDE LA DEMANDA.,» 2007.
- [3] R. P. Bereche, «ANÁLISIS DE LOS PROCESOS GASODINÁMICOS,» Lima,Peru, 2002.
- [4] S. y. R. Prieto, «Vehiculos híbridos a GNC,» 2016.
- [5] V. Giovagnetti, «DóndeCargo,» 09 Diciembre 2020. [En línea]. Available: <https://www.dondecargo.com.ar/detalle/-KLNfhnOboqWYgzVNXST>. [Último acceso: 24 Noviembre 2021].
- [6] C. -. C. A. d. G. N. Comprimido, «Cámara Argentina del GNC - Pasate a GNC,» CAGNC - Cámara Argentina del Gas Natural Comprimido, 2019. [En línea]. Available: <https://gnc.org.ar/>. [Último acceso: 25 Noviembre 2021].
- [7] S. G. y. R. Prieto, «Los autos eléctricos: ¿hacia un transporte más sustentable?,» Petrotecnia, Buenos Aires, 2013.
- [8] J. H. G. Seisler, «Vehículos de gas natural: una revisión (Conferencia),» Reino Unido, 2000.
- [9] N. G. N. G. V. K. Base, «Vehiculos de gas natural. Tipos de vehiculos.,» [En línea]. Available: <http://www.iangv.org/natural-gas-vehicles/vehicle-types/>. [Último acceso: 19 11 2021].
- [10] K. A. Ghazi, DUAL-FUEL DIESEL ENGINES, Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2015.
- [11] K. M. & H. Tschoeke, Handbook of Diesel Engines, Berlín, Germany: Springer & Bosch, 2009.

- [12] L. R. S.p.A., «Sistema de GNC en vehículos Diesel - Landi Renzo,» [En línea]. Available: <https://landirengo.com/ar/sistema-de-gnc-en-vehiculos-diesel>. [Último acceso: 2 Diciembre 2021].
- [13] D. I. Milladoiro, «Laboratorio diesel y taller mecánico en Santiago - Diesel Inyección Milladoiro,» [En línea]. Available: <https://www.dieselinyeccionmilladoiro.es/>. [Último acceso: 2 diciembre 2021].
- [14] GASCOMB, «Conversión de camiones diésel a gas GNC y GNL, sistema dual fuel,» GASCOMB, [En línea]. Available: https://www.gascomb.com/cap_home.html. [Último acceso: 2 diciembre 2021].
- [15] A. -. C. e. Instrumentación, «Arian - Control e Instrumentación,» [En línea]. Available: <http://www.arian.cl/downloads/nt-003.pdf>. [Último acceso: 15 Enero 2022].
- [16] P. Gauges, «Pressure Gauges,» [En línea]. Available: <https://wap.china.cn/Pressure-Gauges/167904015.html?t=description>. [Último acceso: 15 Enero 2022].

