

Agradecimientos

En primer lugar, una vez concluido este documento, me gustaría agradecer al Departamento de Máquina y Motores Térmicos, y más concretamente a mi tutor, Javier López, la oportunidad que me ha dado de realizar este trabajo en el seno de una institución como la suya y que me hayan planteado reto como el de aprender un nuevo lenguaje de programación.

Del mismo modo no puedo olvidarme de toda la gente del departamento con la que he compartido momentos: Darío, con sus explicaciones magníficas; Daniel y el Comunio; José Enrique y las obras de la sala... al igual que tampoco puedo hacerlo de la gente del ITQ, que han hecho todo lo posible para que pudiera emplear el cromatógrafo.

El cierre de este trabajo supone el poner fin a una etapa muy bonita en la vida de una persona, donde tenido la oportunidad de conocer y contar con personas estupendas, dispuestas a organizar de igual modo una cena de gala que una capea.

Finalmente, no me gustaría concluir este trabajo sin mencionar a mi familia, a quienes debo el esfuerzo realizado y el apoyo brindado en todo este camino y a las personas que han estado a mi lado en todo momento.

Resumen

En los últimos tiempos, ha tomado especial importancia en el mundo de la automoción el estudio del proceso de combustión. Para conseguirlo se emplean tanto herramientas teóricas y computacionales como instalaciones experimentales, entre las que podemos destacar las Máquinas de Compresión Rápida (RCM).

El trabajo recogido en este documento tiene como objetivo la obtención de las herramientas y el programa capaces de controlar un colector de gases que permitan realizar, a voluntad del usuario, una determinada mezcla de gases para añadirla a la RCM como comburente. La finalidad es reproducir artificialmente la Recirculación de Gases (EGR) de un Motor Convencional para que el estudio de la combustión se asemeje a todas las condiciones que se pueden dar en un motor.

El programa controlador se ha desarrollado con la ayuda de LABVIEW, de manera que se puede interactuar con él, mediante una interfaz sencilla, para introducir la composición objetivo y ver, en tiempo real, la evolución del proceso. La parte de Hardware se basa en una placa Arduino Uno, que permite tomar datos, y una serie de relés que controlan las electroválvulas del Colector en función de las órdenes que da el programa.

Finalmente, se han realizado una serie de análisis de varias muestras, con la ayuda de un cromatógrafo, para comprobar la repetitividad y exactitud del programa, así como si existe estratificación de gases en el depósito de mezcla.

Palabras Clave: Arduino, LAbVIEW, EGR sintético

Resum

En els últims temps, ha agafat especial importància en el món de l'automoció l'estudi del procés de combustió. Per a aconseguir-ho s'empren tant ferramentes teòriques i computacionals com instal·lacions experimentals, entre les que podem destacar les Màquines de Compressió Ràpida (RCM).

El treball recollit en aquest document té com a objectiu l'obtenció de les ferramentes i el programa capaços de controlar un col·lector de gasos que permeta realitzar, a voluntat de l'usuari, una determinada mescla de gasos per a afegir-la a la RCM com a comburent. La finalitat es reproduir artificialment la Recirculació de Gasos (EGR) d'un Motor Convencional per a que l'estudi de la combustió s'asemble a totes les condicions que poden ocórrer a un motor.

El programa controlador s'ha desenvolupat amb l'ajuda de LABVIEW, de manera que es pot interactuar amb ell, mitjançant una interfaç senzilla, per a introduir la composició objectiu i veure, en temps real, l'evolució del procés. La part de Hardware es basa en una placa Arduino Uno, que permet prendre dades, i una sèrie de relés que controlen les electrovàlvules del col·lector en funció de les ordres que dona el programa.

Finalment, s'han realitzat un sèrie d'anàlisis de varies mostres, amb l'ajuda d'un cromatògraf, per a comprovar la repetibilitat i exactitud del programa, així com si existeix estratificació de gasos en el dipòsit de mescla.

Paraules clau: Arduino, LabVIEW, EGR sintètic

Abstract

In the past years, the study of the combustion process has taken special importance in the automotive industry. For this study, both theoretical and computational tools, as well as experimental facilities can be used, among which we can highlight Rapid Compression Machines (RCM).

The work developed in this document aims to obtain the tools and software capable of controlling a gas manifold that allows obtaining a specific gas mixture desired by the user. This mixture will be added to the RCM as oxidizer. The goal is to artificially reproduce the Exhaust Gas Recirculation (EGR) of a conventional engine in the study of combustion, reproducing all different conditions that can occur in a real engine.

The software has been developed with the help of LabVIEW, so that the user can interact with it through a simple interface to enter the target composition and observe, in real time, the evolution of the process. The hardware part is based on an Arduino Uno board, which allows taking data, and several relays that control the electrovalves of the manifold according to the commands given by the software.

Finally, several samples have been analysed, with the help of a chromatograph, to check the repeatability and accuracy of the developed tool and if there is stratification of gases in the mixing tank.

Keywords: Arduino, LabVIEW, synthetic EGR

Índice General

Documento I: Memoria	2
Capítulo 1: Introducción	8
1.1. Motivación, justificación y objetivos	8
1.1.1. Motivación.....	8
1.1.2. Justificación	9
1.1.3. Objetivos	9
1.2. Estructura de la memoria	9
Capítulo 2: Marco teórico: conceptos y herramientas	12
2.1. Introducción	12
2.2. Recirculación de gases de Escape	12
2.3. Arduino UNO	13
2.3.1. Introducción	13
2.3.2. Software	14
2.3.3. Placa Arduino UNO.....	15
2.4. LabVIEW	16
2.4.1. Introducción	16
2.4.2. Panel frontal de LabVIEW.....	17
2.4.3. Diagrama de Bloques de LabVIEW	19
2.4.4. LabVIEW Interface For Arduino (LIFA).....	21
Capítulo 3: Descripción de la Instalación	24
3.1. Introducción	24
3.2. Máquina de Compresión Rápida	25
3.3. Colector de gases	26
3.3.1. Sensor de presión.....	28
3.3.2. Electroválvulas.....	29

3.3.3. Caja de Conexiones	29
3.4. Depósito de mezcla	30
3.5. Botellas de gases	31
3.6. Bomba de Jeringa	32
3.7. Bomba de Vacío	33
Capítulo 4: Hardware y Software Desarrollados	34
4.1. Introducción	34
4.2. Hardware	35
4.2.1. Introducción	35
4.2.2. Fuente de alimentación	35
4.2.3. Circuito Impreso	36
4.2.3.1. Componentes	36
4.2.3.2. Dimensionado de la Resistencia	37
4.2.3.3. Diagrama de conexiones	38
4.2.3.4. Negativo	39
4.2.3.5. Impresión y montaje	40
4.2.4. Cableado de conexión	42
4.2.5. Configuración final del Hardware	43
4.3. Software	44
4.3.1. Introducción	44
4.3.2. Requisitos	44
4.3.3. Funcionamiento Interno	45
4.3.3.1. Inicialización	46
4.3.3.2. Cálculo de la Composición	46
4.3.3.3. Secuencia de llenado	48
4.3.3.4. Cierre de la conexión	55
4.3.4. Funcionamiento a nivel Usuario	56
4.3.4.1. Partes de la Interfaz	56
4.3.4.2. Procedimiento de llenado	58
4.3.4.3. Errores de conexión	61

Capítulo 5: Validación del conjunto y estudio de repetitividad y estratificación	62
5.1. Introducción	62
5.2. Toma de muestras	62
5.3. Cromatógrafo de gases	63
5.4. Estudio de estratificación.....	64
5.4.1. Resultados	65
5.4.2. Conclusiones.....	68
5.5. Número de muestras necesarias	68
5.6. Estudio de repetitividad.....	69
5.7. Validación del conjunto	71
Capítulo 6: Conclusiones y trabajos futuros	74
6.1. Conclusiones	74
6.2. Trabajos futuros	75
Anexos	76
Anexo I: Cálculo de fracciones molares y presiones parciales del EGR sintético	78
Bibliografía	81
Documento II: Presupuesto	82
Capítulo 1: Presupuesto del trabajo	84
1.1. Introducción.....	84
1.2. Recursos empleados	85
1.2.1. Recursos informáticos	85
1.2.2. Recursos de personal	86
1.2.3. Recursos materiales	86
1.2.4. Recursos para la instalación experimental.....	87
1.2.5. Recursos de instalaciones	87

1.3.	Desglose de costes unitarios.....	87
1.3.1.	Coste de materiales y software unitario	87
1.3.1.1.	<i>Equipos informáticos</i>	87
1.3.1.2.	<i>Software</i>	88
1.3.2.	Coste de amortización y explotación de equipos	88
1.3.3.	Coste unitario de personal cualificado.....	89
1.3.4.	Coste unitario de oficina	89
1.4.	Desglose de costes totales.....	90
1.4.1.	Coste de recursos informáticos.....	90
1.4.2.	Coste total de personal cualificado	90
1.4.3.	Coste total de material adquirido	91
1.4.4.	Coste total de explotación	92
1.4.5.	Coste total de instalaciones	92
1.5.	Resumen del presupuesto total.....	93

Documento I

MEMORIA

Índice General

Capítulo 1: Introducción	8
1.1. Motivación, justificación y objetivos	8
1.1.1. Motivación.....	8
1.1.2. Justificación	9
1.1.3. Objetivos	9
1.2. Estructura de la memoria	9
Capítulo 2: Marco teórico: conceptos y herramientas	12
2.1. Introducción	12
2.2. Recirculación de gases de Escape	12
2.3. Arduino UNO	13
2.3.1. Introducción	13
2.3.2. Software	14
2.3.3. Placa Arduino UNO.....	15
2.4. LabVIEW	16
2.4.1. Introducción	16
2.4.2. Panel frontal de LabVIEW.....	17
2.4.3. Diagrama de Bloques de LabVIEW	19
2.4.4. LabVIEW Interface For Arduino (LIFA).....	21
Capítulo 3: Descripción de la Instalación	24
3.1. Introducción	24
3.2. Máquina de Compresión Rápida	25
3.3. Colector de gases	26
3.3.1. Sensor de presión.....	28
3.3.2. Electroválvulas.....	29
3.3.3. Caja de Conexiones	29
3.4. Depósito de mezcla.....	30

3.5. Botellas de gases.....	31
3.6. Bomba de Jeringa.....	32
3.7. Bomba de Vacío	33
Capítulo 4: Hardware y Software Desarrollados	34
4.1. Introducción.....	34
4.2. Hardware.....	35
4.2.1. Introducción	35
4.2.2. Fuente de alimentación.....	35
4.2.3. Circuito Impreso	36
4.2.3.1. Componentes.....	36
4.2.3.2. Dimensionado de la Resistencia.....	37
4.2.3.3. Diagrama de conexiones	38
4.2.3.4. Negativo	39
4.2.3.5. Impresión y montaje.....	40
4.2.4. Cableado de conexión	42
4.2.5. Configuración final del Hardware.....	43
4.3. Software	44
4.3.1. Introducción	44
4.3.2. Requisitos	44
4.3.3. Funcionamiento Interno.....	45
4.3.3.1. Inicialización	46
4.3.3.2. Cálculo de la Composición	46
4.3.3.3. Secuencia de llenado	48
4.3.3.4. Cierre de la conexión	55
4.3.4. Funcionamiento a nivel Usuario.....	56
4.3.4.1. Partes de la Interfaz	56
4.3.4.2. Procedimiento de llenado.....	58
4.3.4.3. Errores de conexión	61

Capítulo 5: Validación del conjunto y estudio de repetitividad y estratificación	62
5.1. Introducción	62
5.2. Toma de muestras	62
5.3. Cromatógrafo de gases	63
5.4. Estudio de estratificación.....	64
5.4.1. Resultados	65
5.4.2. Conclusiones.....	68
5.5. Número de muestras necesarias	68
5.6. Estudio de repetitividad.....	69
5.7. Validación del conjunto	71
Capítulo 6: Conclusiones y trabajos futuros	74
6.1. Conclusiones	74
6.2. Trabajos futuros	75
Anexos	76
Anexo I: Cálculo de fracciones molares y presiones parciales del EGR sintético	78
Bibliografía	81

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación, justificación y objetivos

1.1.1. Motivación

Los motores de combustión interna alternativos han sido empleados masivamente durante los últimos 40 años. El rápido crecimiento de su uso ha provocado que, de una forma gradual, se haya ido incrementando la preocupación de los estamentos gubernamentales acerca de la calidad del aire, tanto en las ciudades como en su entorno. Esto es debido, básicamente, a las emisiones contaminantes generadas a partir del uso de estos motores.

A raíz de este problema, tanto los gobiernos de todo el mundo como las agencias medioambientales pusieron en marcha una serie de normativas de obligado cumplimiento a través de un duro proceso de homologación. Así, se diseñó y estableció en Europa un calendario de aplicación de estas normativas, que incluyen cada vez límites de emisiones más restrictivos y severos. Con el objetivo de cumplirlas, las empresas automovilísticas han tenido que desarrollar una serie de nuevas tecnologías, modos de funcionamiento y combustibles que permitan ajustar las emisiones de los motores a semejantes límites.

Por otro lado, el cercano agotamiento de ciertos recursos naturales como el petróleo, provoca la necesidad de encontrar combustibles alternativos y sustitutos de los convencionales. La Máquina de Compresión Rápida (RCM) adquirida por el Departamento de Máquinas y Motores Térmicos (DMMT) permite la realización de estudios varios, como:

- Análisis de la ignición y atomización del chorro de distintos combustibles.
- Estudio del fenómeno de autoencendido por compresión de premezclas reactivas.
- Nuevos modos de combustión: combustión a baja temperatura.

Estos estudios permiten continuar desarrollando dichas nuevas tecnologías que permitan reducir las emisiones y modificar los combustibles de los motores, de modo que se puedan emplear nuevas sustancias sustituyentes de los combustibles convencionales.

1.1.2. Justificación

Dado el nivel de uso que ha alcanzado la Máquina de Compresión Rápida (RCM) en el departamento para realizar distintos estudios, se encuentra la necesidad de poder estudiar la combustión en todos los posibles modos en los que se puede dar en un motor real. Así, se aprecia que en los motores reales existe una Recirculación de Gases de Escape (EGR) en ciertos grados de carga del motor, y la RCM no dispone, actualmente, de la posibilidad de introducir como comburente un gas distinto al aire.

Con esto, se decide aprovechar el Colector de Gases (Manifold), que se instaló junto con la RCM, para crear una mezcla de gases que permita reproducir las combustiones con EGR en los motores. Para conseguir esto, será necesario desarrollar un sistema capaz de comandar a voluntad las electroválvulas de las que dispone el Colector y así crear una mezcla de gases similar al EGR de los motores convencionales.

1.1.3. Objetivos

Una vez explicadas la motivación y justificación que llevan a la realización del trabajo, se plantean una serie de objetivos que marcarán el camino a seguir a lo largo del desarrollo del mismo. Estos son los siguientes:

- Desarrollar el Software necesario que permita obtener la composición del comburente deseado y ordenar su preparación.
- Diseñar el Hardware necesario para comandar las electroválvulas del Colector de gases.
- Comprobar y validar la exactitud y repetitividad del programa a la hora de crear las mezclas demandadas.
- Analizar la posible estratificación de la mezcla en el depósito de mezcla.

1.2. Estructura de la memoria

Este proyecto consta de dos documentos: memoria y presupuesto. En el documento *Memoria* se describen la base teórica y software empleado para el diseño y desarrollo del proyecto, así como una explicación detallada de los análisis y pruebas realizadas con el conjunto para su verificación y las herramientas empleadas para ello. Así, el documento memoria queda estructurado en los siguientes capítulos:

- **Capítulo 1: Introducción.** Presenta la motivación y justificación de la realización de este trabajo y enumera los objetivos a conseguir.
- **Capítulo 2: Marco teórico: conceptos y herramientas.** Recoge las distintas herramientas de software empleadas para el desarrollo del trabajo, así como explicaciones sobre los conocimientos necesarios para la comprensión del mismo.
- **Capítulo 3: Descripción de la instalación.** Trata de explicar los distintos elementos que componen la instalación y permiten apreciar el resultado tangible del trabajo.

- **Capítulo 4: Hardware y Software desarrollados.** En él se recoge la explicación sobre el funcionamiento del Software desarrollado, tanto a nivel interno como de cara al usuario. Además se recoge la descripción del Hardware ensamblado para el trabajo.
- **Capítulo 5: Validación del conjunto y estudio de estratificación.** Este capítulo recoge el método de análisis y los resultados de distintas muestras para validar el funcionamiento del conjunto y estudiar la estratificación en el depósito de mezcla.
- **Capítulo 6: Conclusiones y trabajos futuros.** Se valorará el grado de consecución de los objetivos planteados y se plantearán los trabajos futuros que sería interesante realizar.
- **Anexo A: Cálculo de fracciones molares y presiones parciales de EGR sintético.** Recoge las ecuaciones necesarias para calcular dichas propiedades a partir de unos datos de partida.

Asimismo este *Trabajo Final de Grado* contiene también el documento *Presupuesto* en el que se recogen los costes derivados del desarrollo del mismo.

Capítulo 2

Marco teórico: conceptos y herramientas

2.1. Introducción

En el presente capítulo se introducen al lector los principales conceptos que serán necesarios para la comprensión del presente TFG. Por otro lado se aporta una visión superficial de la plataforma Arduino y su placa Arduino UNO. También se introducen las distintas herramientas teóricas empleadas para el desarrollo del mismo, como es el caso del entorno de programación de LabVIEW. Con ello se pretende que el lector empiece a tomar contacto con las herramientas y conceptos que se emplearán más adelante, de modo que se reduzcan las dificultades de comprensión del TFG.

2.2. Recirculación de gases de Escape

Tal y como indican *Desantes y Payri (2011)* y *Domenech (2013)*, la *Recirculación de Gases de Escape (EGR)* es una estrategia ampliamente empleada en los motores de combustión interna alternativos para conseguir la reducción por vía térmica de los NO_x , incrementando para ello la cantidad de gases de escape dentro de la cámara de combustión mientras esta se produce.

Esta técnica consiste en recircular gases de escape a la admisión del motor, de modo que la fracción de O_2 en la mezcla admitida en el cilindro se reduce. Por tanto, se trata de una solución activa cuya consecuencia es la disminución de las emisiones contaminantes debido a la reducción de la temperatura de llama, ya que si esta no alcanza los 2100 K no se producirá la disociación del N_2 y no se generarán NO_x . Un pequeño esquema del principio de funcionamiento de este sistema es el que se recoge en la Figura 2.2. Aquí, se puede apreciar que la recirculación de gases modifica la composición de la mezcla reactiva, por lo que en el estudio de la combustión cobra especial importancia el poder reproducir dichas condiciones

para obtener unos resultados mucho más similares a los que se darían en un motor real funcionando con este sistema.

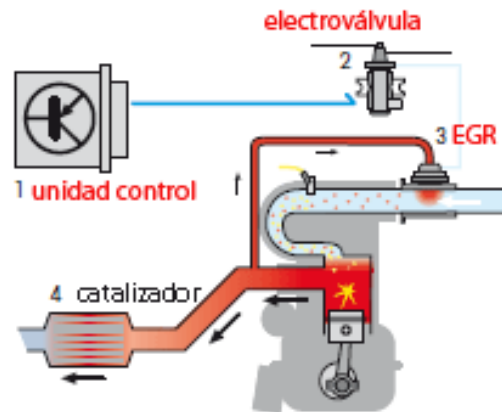
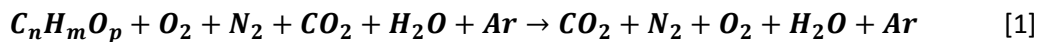


Figura 2.2 Esquema del sistema EGR en un motor

Teniendo en cuenta la reacción de combustión general entre un hidrocarburo y exceso de aire y obviando componentes muy minoritarios [1], vemos como los gases de escape están compuestos por Nitrógeno, Dióxido de Carbono, Oxígeno, Vapor de Agua y Argón. Por tanto, al mezclar EGR con el aire de admisión, se obtendrá un comburente con una menor fracción de Oxígeno que el aire puro.



Puesto que los ensayos de la RCM buscan tener la máxima exactitud posible, se tratará de generar un EGR sintético lo más similar posible al EGR real pero tratando de eliminar algunos de los gases, debido a su elevado coste, de modo que el error generado por la eliminación de estos sea prácticamente nulo. Esta simplificación se recoge y documenta en el Capítulo 4.

2.3. Arduino UNO

2.3.1. Introducción

Arduino es plataforma *Open Source* basada en un sencillo Software y Hardware. El Software es un código de programación que permite incorporar al Hardware cualquier función deseada por el desarrollador mediante una conexión USB. El Hardware consiste en una sencilla placa que incorpora un microcontrolador y que permite emplearlo como receptor y emisor de señales, o lo que es lo mismo, puede emplearse como tarjeta de adquisición y salida de datos. La ventaja de esta placa se basa en su bajo coste y su sencillez. Siendo un elemento muy pequeño, aporta una amplia variedad de opciones para proyectos que no requieran una cantidad extensa de entradas y salidas.

En este apartado se trata de introducir, en primer lugar y de forma meramente informativa, el Software e Arduino y, posteriormente, la placa Arduino UNO que es la que se empleará posteriormente para el desarrollo del TFG.

2.3.2. Software

El Software de Arduino, llamado IDE, hace que la redacción de códigos y la posterior carga de estos a la placa sea muy sencilla. Emplea un lenguaje de programación equivalente al lenguaje Java, lo que provoca que programar el microcontrolador sea relativamente sencillo.

La principal ventaja de este Software, es que puede ser instalado en cualquier Sistema Operativo, lo que coloca a Arduino en una mejor posición respecto a otros elementos que puedan emplearse como Tarjetas de Adquisición de datos, ya que estos suelen verse limitados por la necesidad de instalar su Software en un ordenador que emplee Windows como sistema operativo.

Su interfaz de uso es la que se adjunta en la Figura 2.3.2 y consiste, básicamente, en una pantalla en blanco sobre la que escribir el código a transferir a la placa. En la esquina superior izquierda, existe el botón que permite transferir el código escrito a la placa, de modo que la placa puede funcionar indefinidamente siempre y cuando se alimente desde la red a la tensión necesaria mediante un adaptador de corriente. Así se consigue que el microcontrolador pueda realizar cualquier tarea programada sin la necesidad de tener cerca un ordenador. El ordenador solo será necesario para escribir y transferir el código.

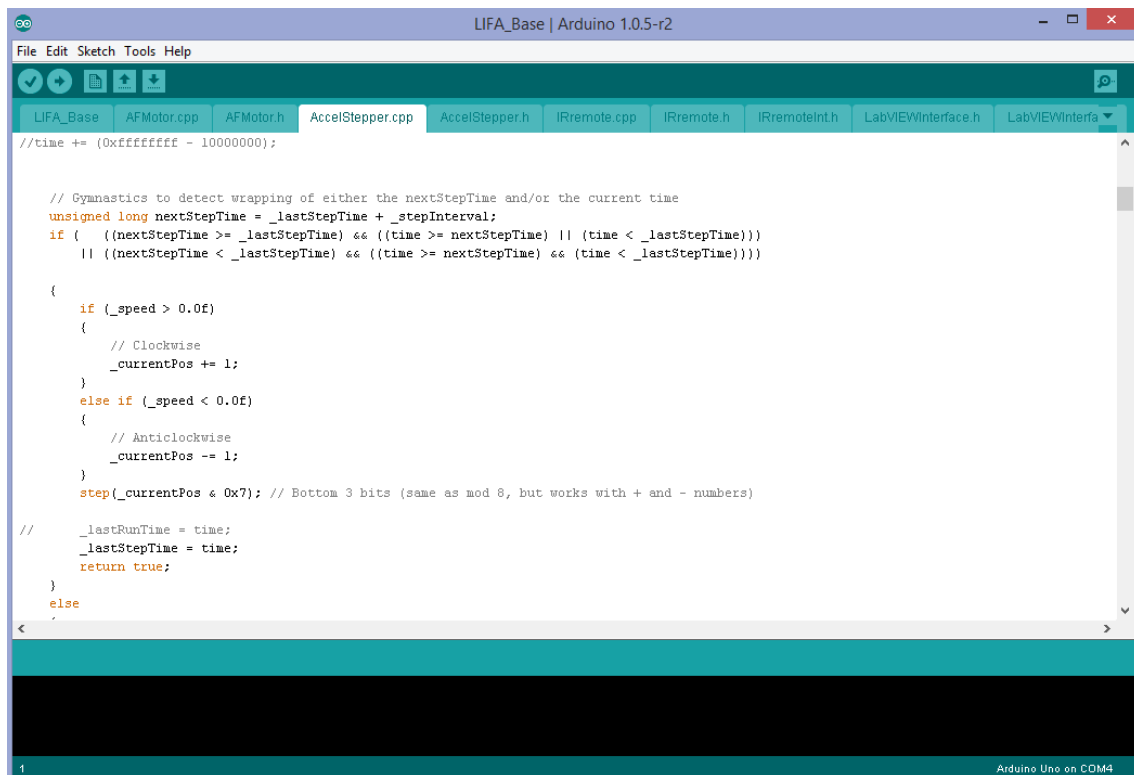


Figura 2.3.2 Interfaz del Software IDE de Arduino

Como se puede apreciar, el código se encuentra escrito en lenguaje Java, muy similar al lenguaje C, lo que permite que esta plataforma sea empleada por una amplia comunidad de usuarios, desde expertos programadores a personas que entienden la programación como un hobby o gente que pretende iniciarse en el mundo de la programación y la electrónica.

2.3.3. Placa Arduino UNO

La Arduino UNO es una sencilla placa que incorpora un microcontrolador y varios pines de entrada y salida. En las Figuras 2.3.3.A y 2.3.3.B se puede apreciar su configuración sencilla, en la que se aprecian los pines de entrada analógica, los pines digitales, la conexión de puerto USB y la entrada de alimentación auxiliar, además del microcontrolador y otros botones y pines auxiliares como los de Reset o Tierra.



Figura 2.3.3.A Placa Arduino UNO

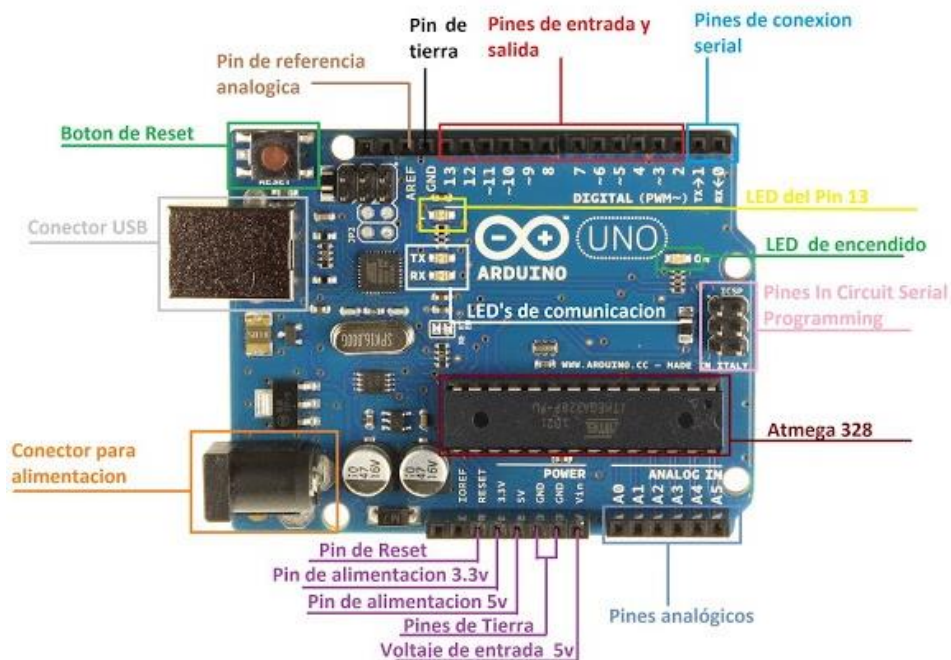


Figura 2.3.3.B Pines de la Placa Arduino UNO

La existencia de un conector USB, a través del cual se alimenta la placa, genera que esta pueda ser empleada como Tarjeta de Adquisición de Datos con 6 entradas analógicas y 14 pines digitales que pueden ser tanto de entrada como de salida, proporcionando al desarrollador una cantidad de pines más que suficiente para algunas tareas, como puede ser la desarrollada en este TFG.

Las propiedades, interesantes a la hora de instalar el Hardware necesario alrededor de la placa para llevar las entradas y salidas hasta las tensiones deseadas, se recogen en la Tabla 2.3.3 a continuación y muestran tanto de número de pines como de voltajes de operación de la placa.

Microcontrolador	ATmega328P
Voltaje de operación	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (limite)	6-20V
Pines digitales E/S	14 (de los cuales 6 pueden ser salidas PWM)
Pines digitales PWM E/S	6
Pines de entrada analógica	6
CC por pines de E/S	20 mA
CC en Pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	32 KB (ATmega328P) de los cuales 0.5 KB los emplea el código de carga
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Velocidad de reloj	16 MHz
Longitud	68.6 mm
Ancho	53.4 mm
Peso	25 g

Tabla 2.3.3 Propiedades de Arduino UNO

Como se puede apreciar, las dimensiones de Arduino UNO son reducidas y su peso prácticamente nulo, lo que permite instalarlo en casos donde el espacio es limitado. También se puede apreciar que el voltaje de operación de Arduino es de 5V, por lo que las señales de entrada al mismo deberán limitarse a ese valor para que la placa no sufra daño alguno.

2.4. LabVIEW

2.4.1. Introducción

LabVIEW es un entorno de programación capaz de generar Instrumentos Virtuales (VIs). Esto quiere decir que este programa permite crear un Panel Frontal Virtual, del mismo modo que existe, por ejemplo, en una calculadora, y posteriormente permite conectar los botones e indicadores del panel frontal mediante cables de conexión de forma gráfica, en lo que se llama Diagrama de Bloques. Así, se consigue generar una interfaz con la que interactuar con el usuario y, posteriormente, se opera con los datos insertados para realizar las actuaciones necesarias.

Con esto, en los siguientes puntos de esta memoria se trata de introducir al lector el funcionamiento de LabVIEW, tanto a nivel externo como a nivel interno. Además se describirán las distintas herramientas disponibles en LabVIEW, como pueden ser los bucles, operaciones booleanas o botones. Por otro lado se introducirá la Interfaz de conexión entre LabVIEW y Arduino, que permite la conexión continua entre los mismos.

2.4.2. Panel frontal de LabVIEW

El panel frontal es la parte del programa donde se diseña la interfaz gráfica con usuario del VI. En él se recogen las entradas procedentes del usuario y se representan las salidas visuales hacia el usuario. Un panel frontal se encuentra formado por pulsadores, botones, casillas de datos, etc... Cada uno de estos puede definirse como *control* o *indicador*. Los primeros sirven para que el usuario inserte los parámetros requeridos por el VI mientras que los segundos sirven para mostrar los resultados de la operación del VI.

El panel frontal se diseña a voluntad y conveniencia del desarrollador, de modo que facilite la interacción del usuario con el VI. Para ello se dispone de una Barra de Controles (Figura 2.4.2.A), en la cual se pueden elegir una amplia cantidad de opciones.

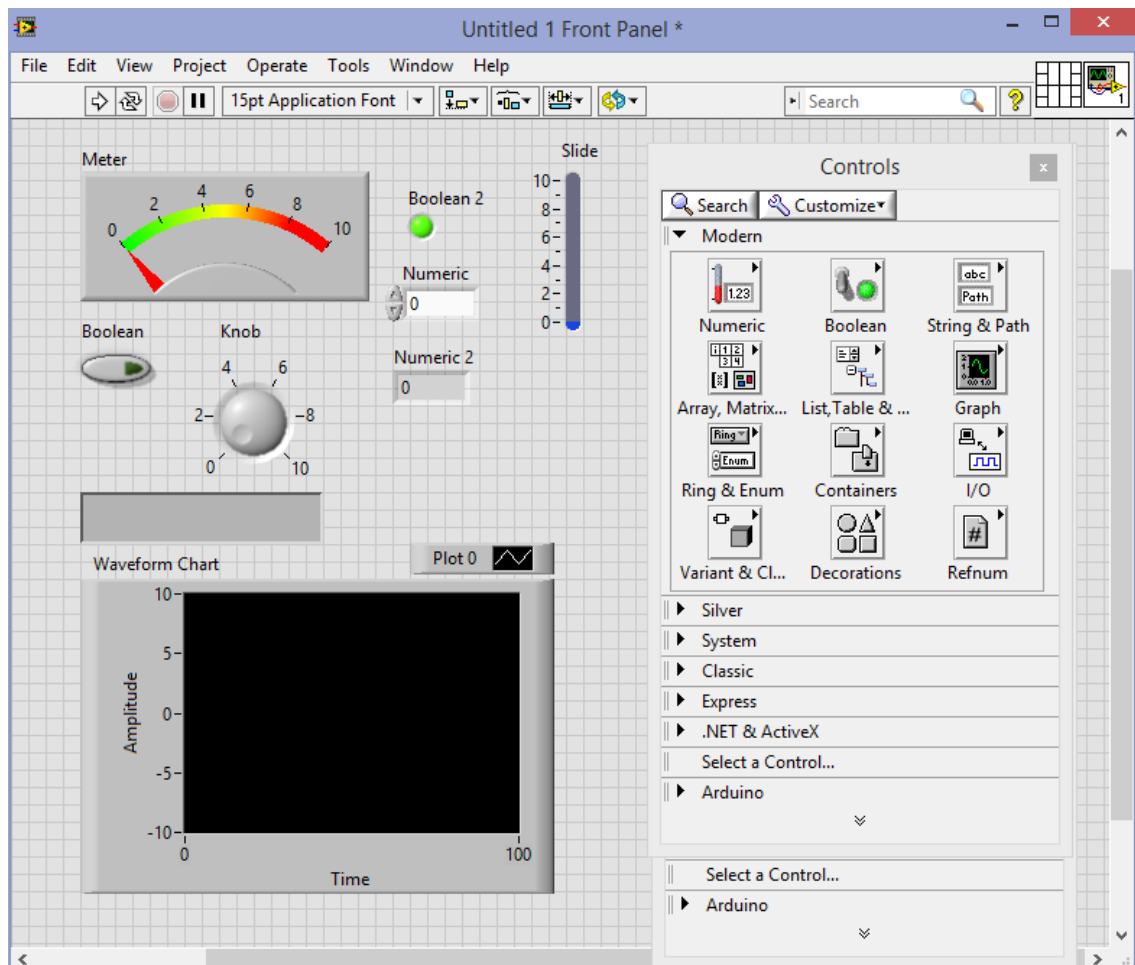


Figura 2.4.2.A Panel Frontal de LabVIEW con Barra de Controles

Como se puede apreciar, la variedad de opciones y diseños es muy amplia, pudiendo además decorar la interfaz con colores y formatos varios. Las pestañas *Modern*, *Silver*, *System* y *Classic* contienen controles e indicadores con distintos formatos para que el desarrollador emplee los que más le gusten.

Dentro de cada uno de los grupos, existen diferentes controles e indicadores. A modo de ejemplo se adjuntan en la Figura 2.4.2.B las opciones que contienen el grupo *Numeric* y el grupo *Boolean*. Entre ellos podemos apreciar algunos de los siguientes:

- *Numeric Control*: Permite que el usuario aporte al programa datos numéricos de forma manual.
- *Numeric indicator*: Permite que el usuario vea en la pantalla un resultado numérico del programa.
- *Meter*: Puede hacer las funciones de indicador o de control. En caso de ser indicador el usuario verá marcado por la aguja el valor de salida mientras que si es control el usuario insertará el valor deseado moviendo la aguja. La escala de fondo se puede elegir a voluntad del desarrollador.
- *Knob*: Funciona del mismo modo que el *Meter* pero su forma es distinta. Aporta al desarrollador todavía más variedad a la hora de diseñar la interfaz.
- *Push Button*: Permite al usuario mandar una señal T/F en función de la posición del botón. Existen varias variantes del mismo, simulando un interruptor la mayoría de ellas.
- *Round LED*: Tanto esté como el *Square LED* permiten indicar por pantalla cuando una señal está activada o desactiva de forma visual. Los colores del LED pueden elegirse a voluntad del desarrollador.

A esta pequeña lista de opciones, cabría añadir como importantes las pertenecientes al grupo *Graph*, que permite mostrar en pantalla gráficos de distintas características, *String*, que permite mostrar en pantalla o aportar al programa fragmentos de texto, o *Array*, que permite incorporar al programa conjuntos de datos, del mismo o distinto formato (cluster), o mostrarlos por pantalla.

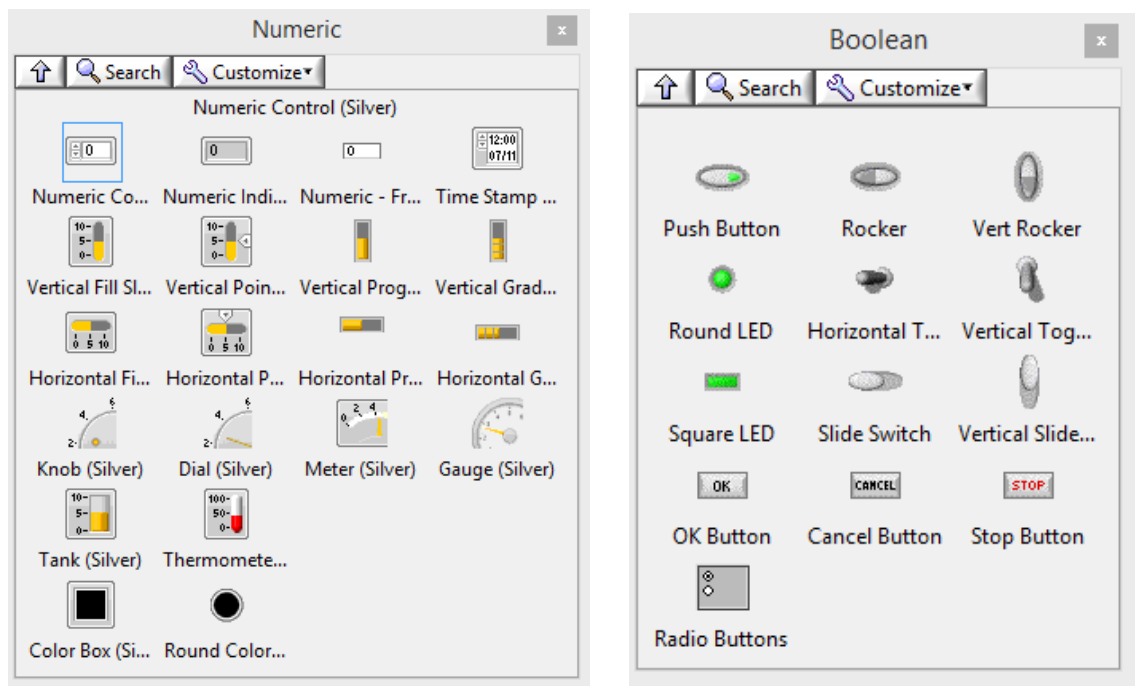


Figura 2.4.2.B Grupos de controles Numeric y Boolean

2.4.3. Diagrama de Bloques de LabVIEW

El Diagrama de Bloques es la parte donde el desarrollador escribe el programa en Lenguaje Gráfico o Lenguaje G. Esta parte es oculta para el usuario del VI y es la que se encarga de realizar los cálculos y actuaciones que se programen y las muestra en el Panel Frontal. Un ejemplo sencillo de diagrama de bloques sería el que se adjunta en la Figura 2.4.3.A, en la que también se adjunta la Barra de Funciones disponible para insertar en el programa los distintos tipos de comandos que permitan el desarrollo del mismo.

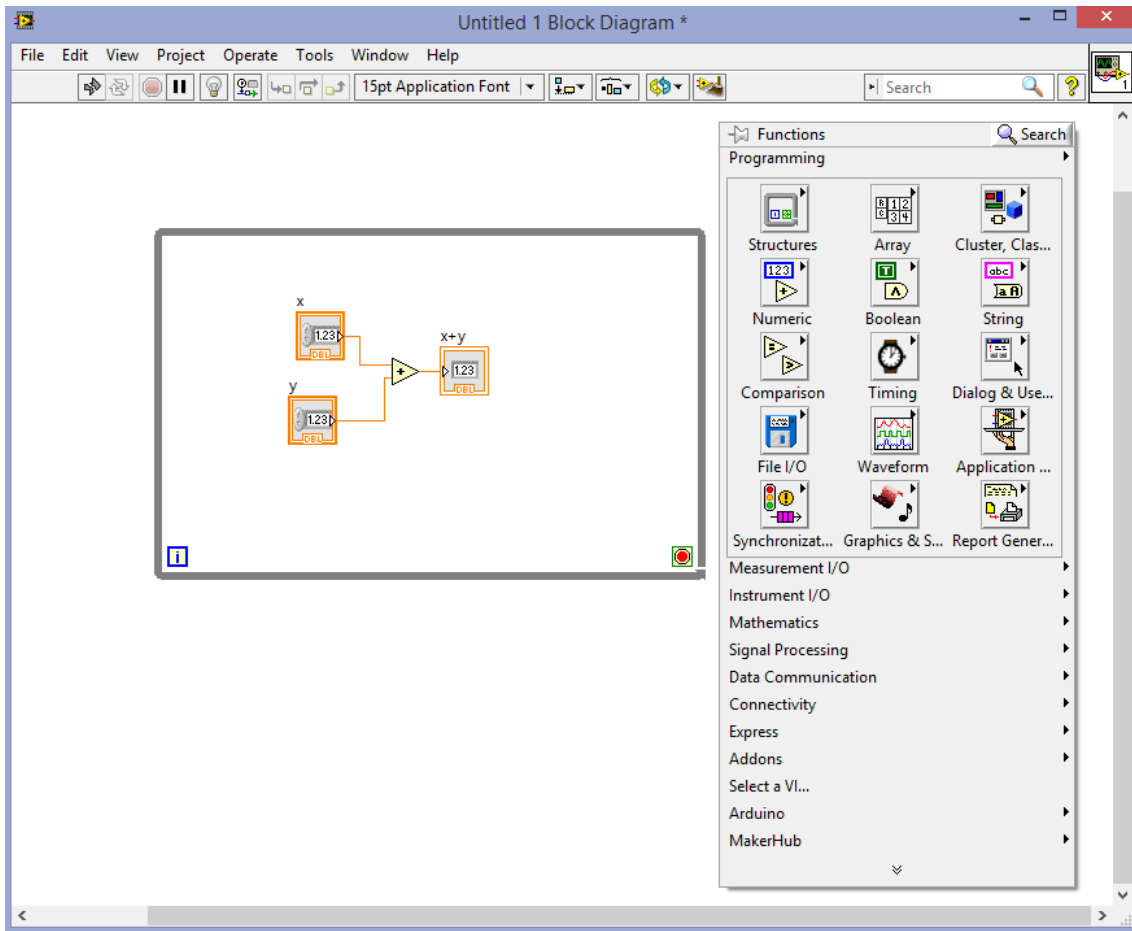


Figura 2.4.3.A Diagrama de Bloques y Funciones.

Como se puede apreciar, el Diagrama de Bloques contiene una serie de cajas. Las cajas grandes con borde gris son las estructuras, mientras que las pequeñas, que se pueden encontrar dentro o fuera de estas, son las que representan los controles o indicadores del Panel Frontal, por tanto son las que contienen la información que proviene o llegará al usuario del VI.

Si profundizamos en las estructuras, vemos que su funcionamiento es el mismo que en lenguaje C. Al tratarse de un entorno de programación gráfico, como el que usa por ejemplo Simulink, se da la particularidad de que a simple vista podemos apreciar qué está dentro de qué. Mientras que en C, para ver que hay dentro de un bucle debemos fijarnos en donde finaliza el mismo, en LabVIEW se aprecia a simple vista. Toda caja contenida dentro de otra caja, es un subnivel de la misma. Entre las estructuras, que son de lo más variadas, encontramos, a modo de ejemplo, las siguientes (ver Figura 2.4.3.B):

- *For Loop*: Es equivalente al Bucle For en lenguaje C y debemos darle el número de repeticiones que debe realizar antes de salir del Bucle.
- *While Loop*: Equivale al Bucle While en lenguaje C y se le puede dar una condición de continuación o de parada, en función de lo más conveniente para el desarrollador.
- *Case Structure*: Es un tipo de estructura versátil, puede funcionar con una condición de entrada, como equivaldría a un if...else en C, o pueden crearse varios casos en caso de que sea necesario por ejemplo programar una secuencia. En este último caso se le debe aportar en cada pasada el caso al que debe entrar la función.

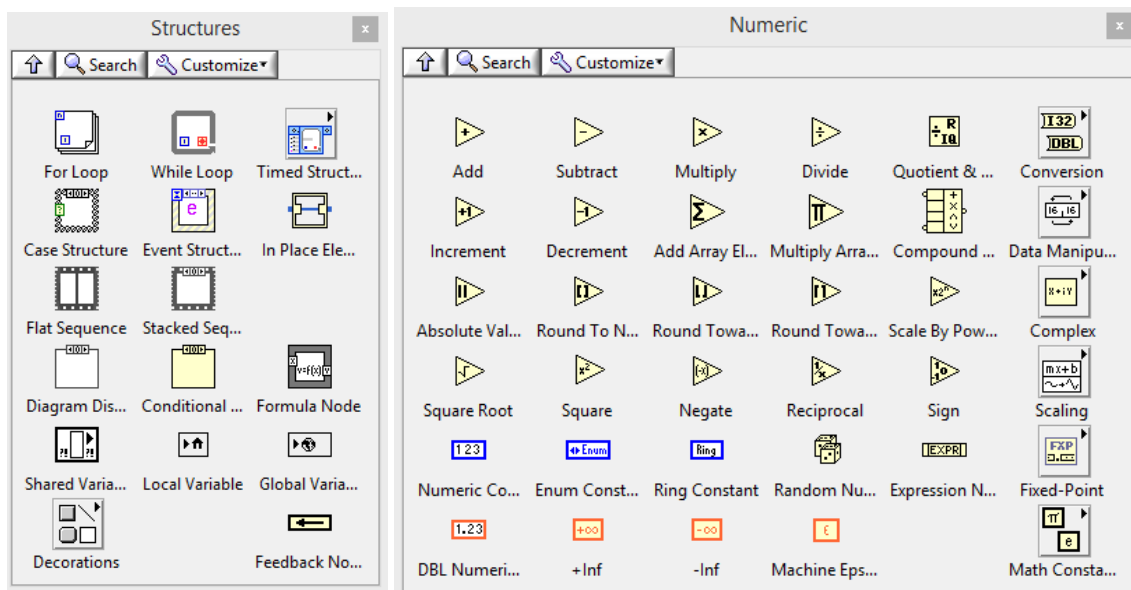


Figura 2.4.3.B Barra de Funciones: Structure y Numeric

El resto de apartados de la barra de Funciones nos permiten operar con todo tipo de elementos. A continuación se define de forma resumida el uso que se le puede dar a cada uno.

- *Numeric*: Como se puede apreciar en la Figura 2.4.3.B, en esta paleta encontramos operaciones para realizar con números. Van desde simples operaciones como suma o resta a otras más complejas como sumatorio. También permite generar constantes o Enumeraciones, siendo esto último útil a la hora de llamar a los distintos casos de un *Case Structure*.
- *Array*: Contiene los bloques que permiten trabajar con conjuntos de datos de un mismo tipo, es lo que sería una Matriz en lenguaje C. Aquí podemos desde separar la Matriz en sus componentes, filas o columnas, hasta transponerla. El apartado *Cluster* es similar pero permite trabajar con Matrices de datos de distinta naturaleza.
- *String*: Contiene las herramientas para tratar las cadenas de texto.
- *Boolean*: Contiene las operaciones booleanas básicas, así como otras más complejas como puede ser la que permite realizar una operación AND entre todos los elementos de un *Array*.

Arduino los datos que necesite y aporte a este las señales de salida acordes a la actuación necesaria para realizar la tarea demanda. Para crear dicho VI, se dispone de las herramientas descritas en los apartados anteriores, entre las que además se añaden las siguientes específicas para Arduino:

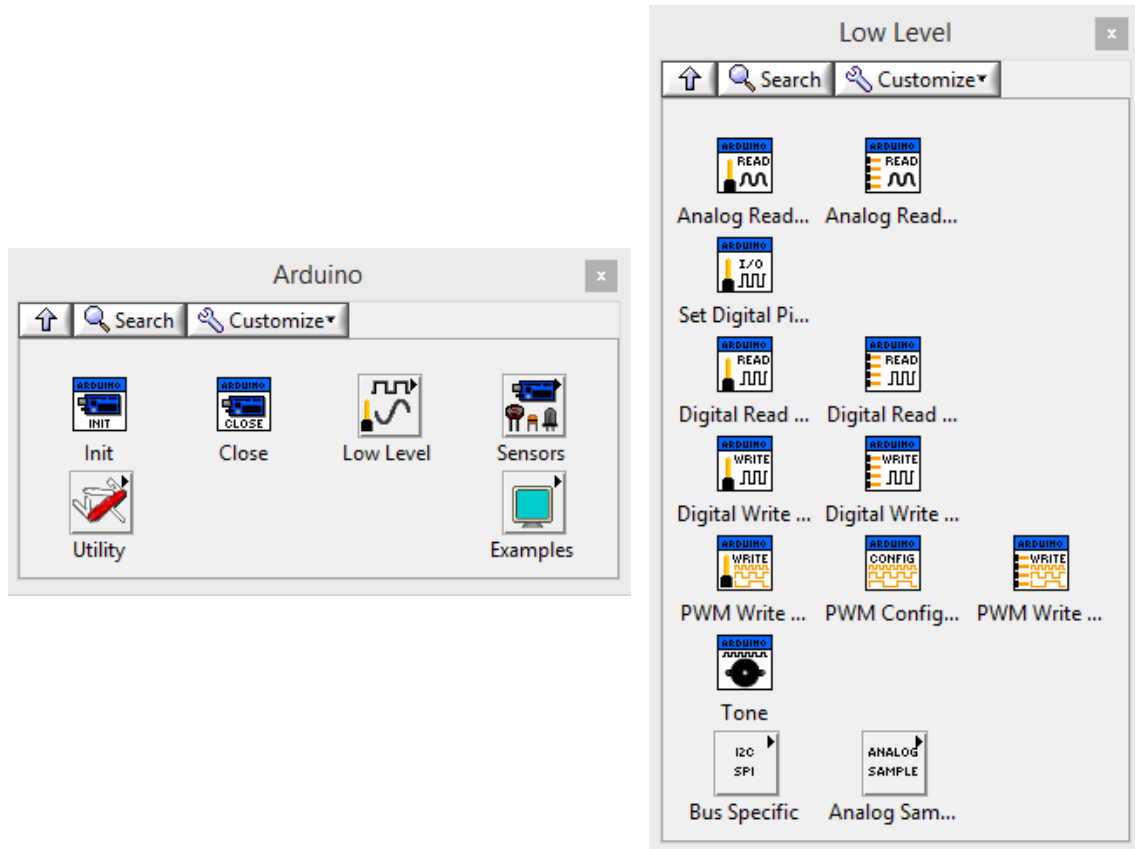


Figura 2.4.4 Funciones de LIFA

Como se puede ver, aparecen nuevas funciones que permiten, por un lado inicializar y cerrar la conexión con Arduino (*Init* y *Close*). Una vez dentro del grupo *Low Level* aparecen una serie de funciones que permiten leer y cambiar el nivel de los distintos pines de entrada y salida del Arduino, lo que facilita el uso de este en conjunto con LabVIEW.

La mayor ventaja del trabajo conjunto de ambas plataformas es el poder tener una interfaz de usuario en un PC que permite controlar a través del microcontrolador un conjunto físico, por lo que el Instrumento Virtual pasa a ser un SCADA que muestra por pantalla datos adquiridos a través de Arduino y realiza actuaciones decididas dentro del propio PC a través de la misma placa.

Capítulo 3

Descripción de la Instalación

3.1. Introducción

En el presente capítulo se introducen al lector los principales elementos de la instalación al sobre la que se va a desarrollar el trabajo. Puesto que el mismo se desarrolla como complemento para la Máquina de Compresión Rápida (RCM) del departamento, se hará una breve introducción de la máquina para que se conozca las posibilidades que aporta, sin entrar en su funcionamiento. Posteriormente se introducirán el Colector de gases y los distintos accesorios necesarios para el desarrollo del Trabajo, como son el Depósito de Almacenamiento, la Bomba de Vacío y las Botellas de Gases.

Todos estos elementos se encuentran montados en la misma sala y conectados entre sí para su uso conjunto, formando lo que es la instalación experimental sobre la que actuará el Trabajo desarrollado.

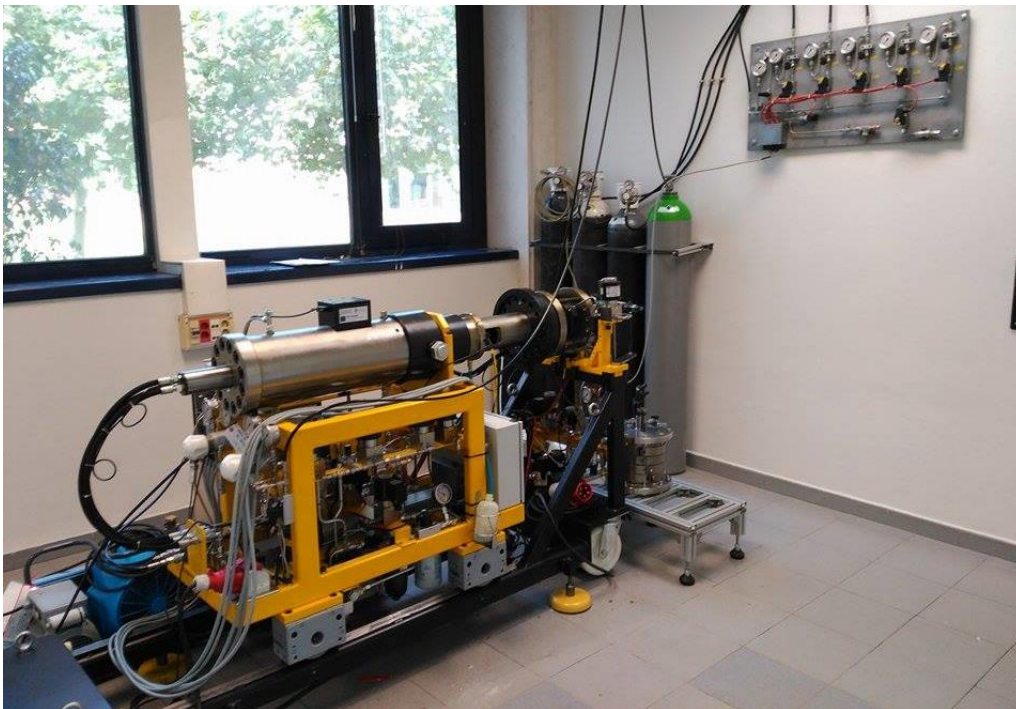


Figura 3.1 Vista del conjunto en la Sala.

3.2. Máquina de Compresión Rápida

La Máquina de Compresión Rápida (en adelante RCM) se encuentra diseñada para emular los distintos modos de operación de los motores. Puesto que no trabaja cíclicamente, solo es posible reproducir en cada ensayo una compresión y parte de una expansión. Su uso permite el estudio del autoencendido para cualquier tipo de mezcla reactiva, ya sea heterogénea u homogénea, en condiciones fácilmente controladas y con una limpieza mucho mayor que la que existe en un motor.

Por todo ello, este instrumento brinda la posibilidad de investigar cada uno de los modos en los que opera un motor real, obteniendo en este caso una visión directa del fenómeno de combustión gracias a los accesos ópticos. La posibilidad de variar la geometría de la cámara de combustión, permite además simular motores de distintas dimensiones con una sola máquina, haciéndola todavía más interesante.

La máquina se encuentra dividida en dos partes claramente diferenciadas, y que se aprecian en la Figura 3.2.A Estas son la parte conductora y la parte experimental.

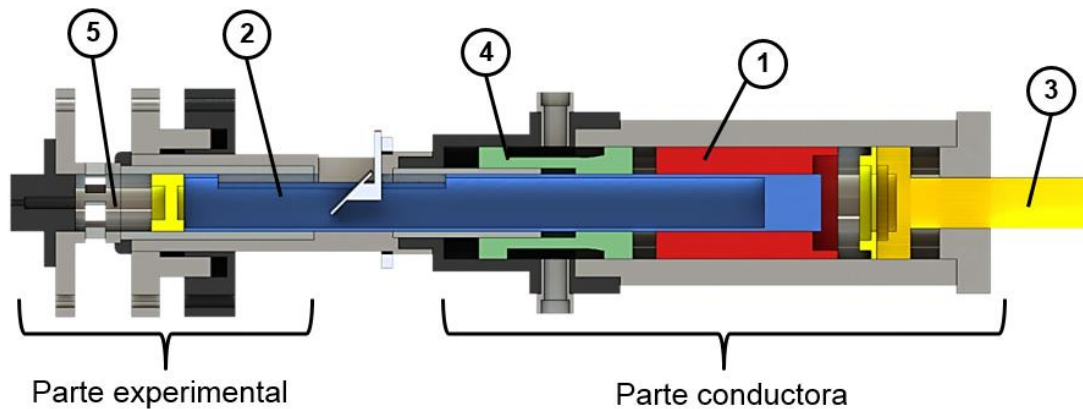


Figura 3.2.A Partes de la RCM

La **parte experimental** se encuentra compuesta en su mayor parte por la cámara de combustión donde se realizan los ensayos. Por tanto es la parte que soporta las altas presiones debidas a la combustión, que pueden alcanzar varios centenares de bares de presión.

Los principales componentes que conforman esta parte de la máquina son el cilindro, el pistón y la culata. Es interesante que estos dos últimos disponen de resistencias calefactoras que permiten incrementar su temperatura hasta los 150 ° C. Con esto, se consigue que las condiciones de ensayo se asemejen lo máximo posible a las condiciones existentes en los motores reales. Cabe destacar además que el cilindro se divide en dos partes, teniendo una de ellas pegada a la culata y que se caracteriza por tratarse de un anillo transparente que permite visionar la combustión.

La **parte conductora**, tal y como su nombre indica, es la encargada de hacer funcionar la máquina. Para ello emplea la mayor cantidad de piezas de esta. Consiste, básicamente, en dos pistones concéntricos conectados hidráulicamente, que se desplazan en sentidos opuestos y permiten desplazar el pistón operacional, y un pistón fijo que permite regular la carrera para modificar la geometría del cilindro y poder equiparar los resultados a motores de distintas

características. El objetivo que se consigue con los dos pistones coaxiales desplazándose en sentido opuesto es que haya un equilibrio inercial y se eliminen las vibraciones del conjunto.

Un esquema simplificado de la máquina se puede ver en la Figura 3.2.B, donde se nombran e identifican los componentes principales de la misma y donde pueden apreciarse elementos importantes como los 4 pistones conductores, el pistón operacional, las ventanas de cuarzo o las resistencias térmicas de la cámara de combustión.

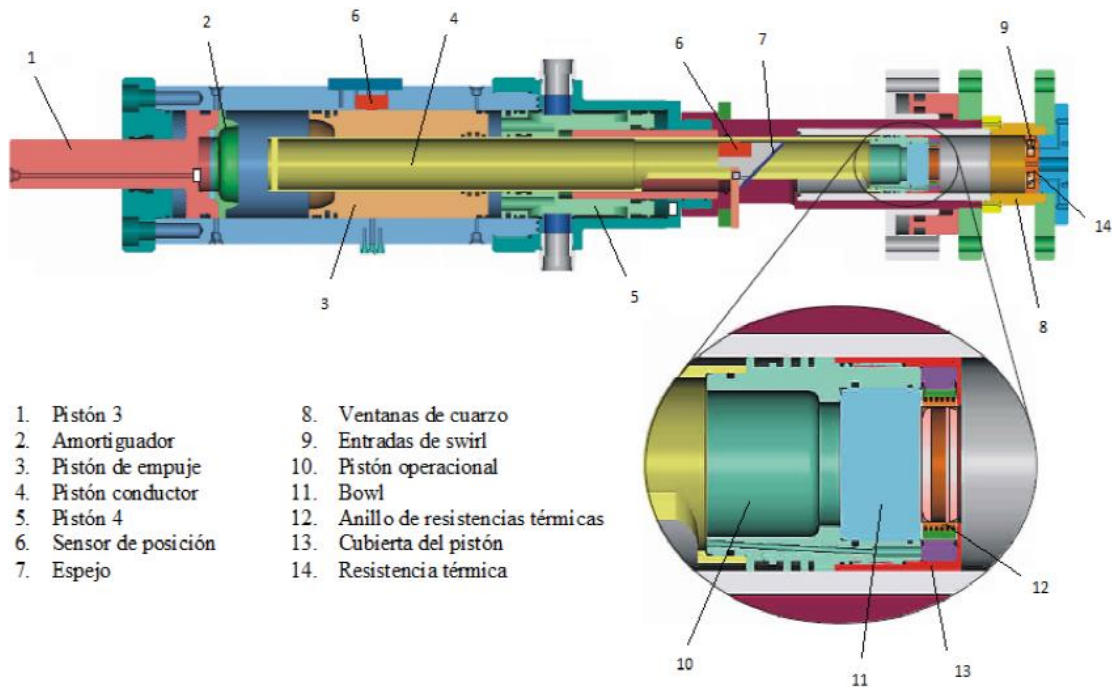


Figura 3.2.B Esquema simplificado de la RCM

Como se ha nombrado anteriormente, el objetivo principal del diseño de esta máquina es que permita adaptarse a distintos tipos de motores, ya sea en tamaño o en tipo de combustible. Del mismo modo, tiene especial interés poder analizar todos los modos de operación del motor. Para conseguir todo esto, la máquina viene equipada con una serie de accesorios. Además, el CMT ha decidido añadir otros complementos que permiten definir todavía más condiciones de ensayo que las que aportaba la propia máquina en sí.

Son todos estos complementos para dar mayor versatilidad a la máquina, los que permiten el desarrollo de este TFG, y, por tanto, pasan a introducirse todos ellos al lector a continuación.

3.3. Colector de gases

El colector de gases es el único de los complementos que se introducen al lector que fue entregado junto con la RCM por el fabricante de la misma. Se trata de un conjunto de tubos, válvulas y electroválvulas que permiten mezclar gases provenientes de sus respectivas botellas para incorporarlos posteriormente a la RCM como comburente o a un depósito auxiliar.

Este conjunto toma especial interés en el desarrollo de este TFG puesto que es el elemento tangible con el que interactúa todo el Software y Hardware diseñado. La utilidad del mismo se refleja en la versatilidad que aporta para crear mezclas de gases a voluntad del

usuario, comandando las electroválvulas que lo componen. Esto permite crear el demandado EGR sintético para que los ensayos realizados con la RCM dispongan de condiciones que representen todos los modos de funcionamiento de un motor real.

Así, este elemento debe ser presentado con la mayor cantidad de detalles posibles, de forma que se entienda su funcionamiento y se aprecien todos los componentes que lo forman. Para ello se aportan las figuras 3.3.A y 3.3.B, correspondientes, respectivamente, a una imagen del Colector en su posición actual y al esquema neumático del mismo.

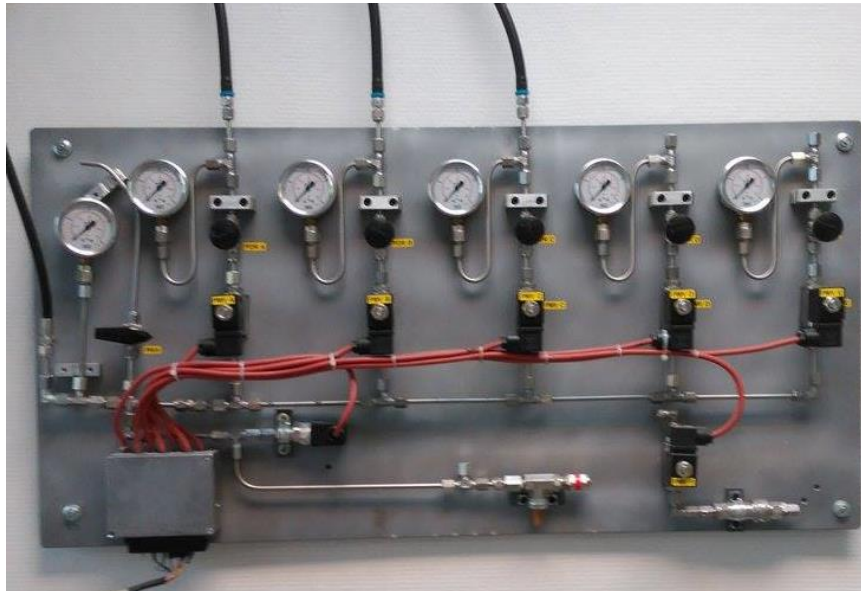


Figura 3.3.A Colector de gases en su posición actual

El conjunto está formado en total por 6 electroválvulas (una de ellas inutilizada), 1 sensor electrónico de presión absoluta, 6 manómetros, 5 válvulas reguladoras de caudal, 1 válvula de alivio, 1 válvula antirretorno y varios tubos de conexión, además de una caja de conexiones con el cableado proveniente de cada una de las electroválvulas y del sensor.

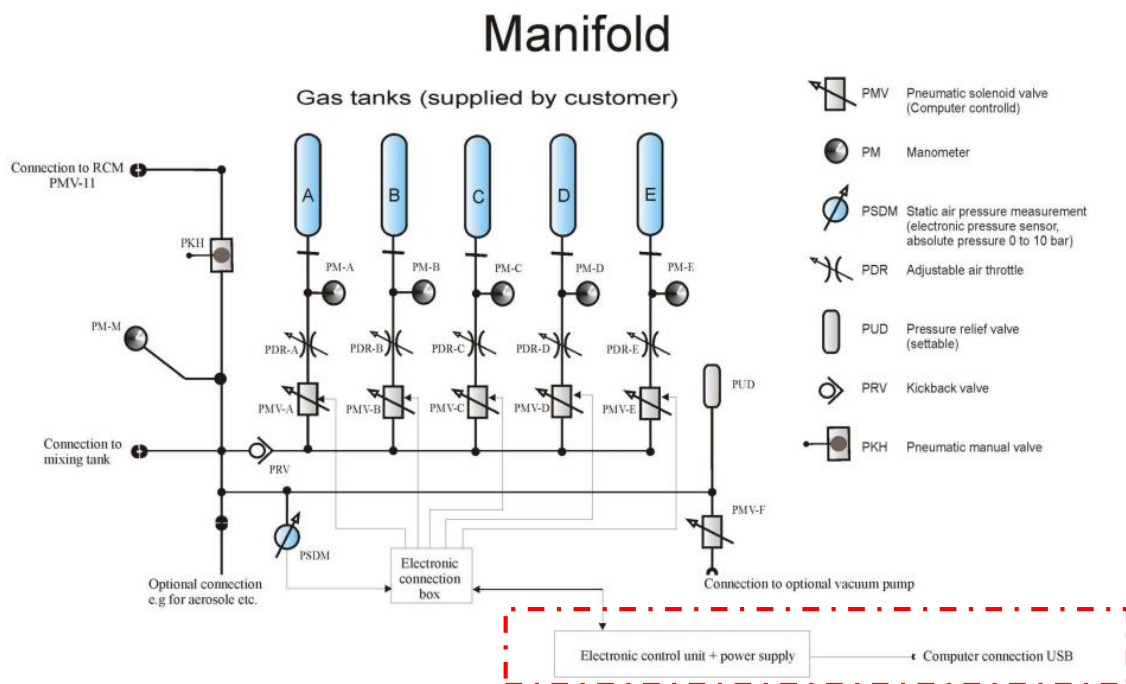


Figura 3.3.B Esquema neumático del Colector de gases

En este esquema neumático se identifica perfectamente cada uno de los componentes del Colector. Además, vienen nombrados los objetivos de este TFG, la creación de la Unidad de Control Electrónica, junto con la Fuente de Alimentación y la conexión USB con el PC que permita dar las instrucciones a la Unidad y esta las transmita al Colector. Para conseguir conectar exitosamente deberemos saber las características del Sensor y las electroválvulas, de modo que se introducen al lector a continuación.

3.3.1. Sensor de presión

Para medir la presión existente en el depósito de almacenamiento y los conductos del Colector, se dispone del sensor de presión electrónico instalado por el fabricante y que es de la marca WIKA. Se trata, concretamente, del modelo A-10 que se recoge en la Figura 3.3.1.



Figura 3.3.1 Sensor de presión

La principal ventaja de este sensor es su capacidad para medir presiones absolutas, lo que permite que no se deba corregir la señal de salida en ningún momento. Además cabe destacar que el cableado original del sensor dispone solamente de 2 cables, por lo que según sus especificaciones técnicas, nos aportará una señal de salida en mA. Otra característica beneficiosa es su versatilidad para trabajar con distintas tensiones de alimentación, por lo que se podrá elegir la tensión que más convenga.

Rango de medida	bar	0...10
Límite de sobrepresión	bar	20
Voltaje de entrada (recomendado)	V	8...30
Voltaje de entrada (límite)	V	8...35
Salida	mA	4...20
Precisión	% alcance	$\leq \pm 1$
Rango de temperatura operativo	° C	0...80
Rango de temperatura máximo	° C	-30...100
No repetitividad	% alcance	$\leq 0,1$
Deriva a largo plazo (según IEC 61298-2)	% alcance	$\leq \pm 0,1$
Ruido de señal	% alcance	$\leq \pm 0,3$
Tiempo de establecimiento	ms	< 4 ms

Tabla 3.3.1 Especificaciones del Sensor de Presión

Los datos más interesantes a la hora de diseñar el Hardware necesario y el Software, son el Voltaje de entrada del sensor y la señal de salida. En este caso vemos que la salida será en forma de una señal de entre 4 y 20 mA, correspondiendo 4 mA con 0 bar de presión y 20 mA con 10 bar de presión. Esta información será de utilidad a la hora de leer los valores de presión en el programa para comandar las electroválvulas y mostrar la presión al usuario. En cuanto al voltaje de entrada, deberá comprobarse si es compatible con el correspondiente a las electroválvulas, para así poder alimentar ambos con la misma Fuente de Alimentación.

3.3.2. Electroválvulas

Las electroválvulas instaladas en el Colector de Gases son del tipo Todo/Nada, por lo que solo se puede regular cuando abren y cierran. Para ello, se deben alimentar cuando se requiera que abran y se debe cortar la alimentación cuando se requiera que cierren. El fabricante de las mismas es Schumacher Impuls-Technik GmbH (SIT) y las propiedades vienen dadas sobre ellas tal y como se aprecia en la Figura 3.3.2 y se recoge en la Tabla 3.3.2.



Voltaje de Alimentación	24 V DC
Corriente de alimentación	750 mA
Rango de presiones	0...100 bar

Tabla 3.3.2 Especificaciones de las electroválvulas del Colector

Figura 3.3.2 Electroválvula del Colector

Con estas características, se hace evidente que la alimentación de las mismas deberá ser con una Fuente de Alimentación que nos aporte corriente continua con 24 V de tensión. Puesto que esta tensión se encuentra dentro del rango aceptado por el sensor de presión, se podrá emplear una sola fuente de tensión para alimentar los distintos elementos del Colector.

3.3.3. Caja de Conexiones

La caja de conexiones recoge el cableado proveniente de cada una de las electroválvulas y del sensor de presión para que todas las conexiones de alimentación de los mismos se realicen a partir de este punto. La posición de los cables cada una de las electroválvulas y del sensor en los pines de conexión es la que se recoge en la Figura 3.3.3.

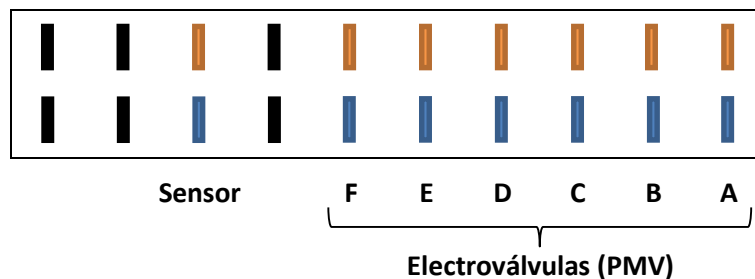


Figura 3.3.3 Posición de la conexión de cada componente

A partir de esta distribución de los cables en la caja, deberán prolongarse hasta la Unidad Electrónica de Control (Hardware) que se debe crear para poder comandar las electroválvulas.

3.4. Depósito de mezcla

El depósito de mezcla será el lugar donde se almacenen los gases a medida que va realizándose la mezcla. Este se encuentra conectado a una de las salidas del Colector y fue diseñado específicamente para el propósito para el que se emplea. Así, contiene en su tapa diversos orificios, como puede apreciarse en la Figura 3.4.

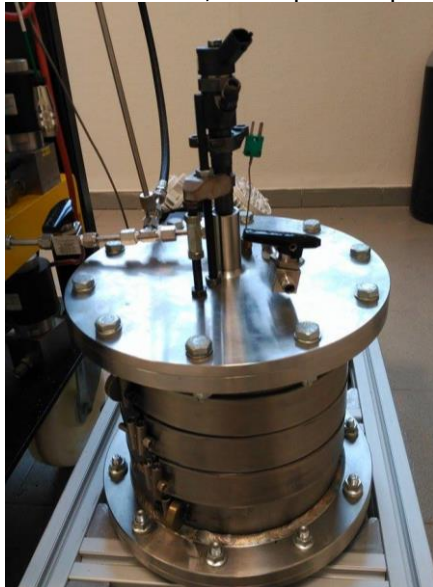


Figura 3.4 Depósito de mezcla

Uno de los orificios contiene un inyector multiorificio que permite inyectar combustible en el depósito. De este modo se consigue reproducir en el cilindro una combustión premezclada, al llegar mezclados el combustible y el comburente. Otro de los orificios corresponde a la entrada de gases desde el Colector, que además se emplea como toma de la bomba de vacío y que mediante la válvula manual, que a la izquierda en la figura, conecta el depósito con el cilindro de la RCM. Por último, encontramos un orificio conectado a una válvula manual con descarga al ambiente. Este sirve para llenar las bolsas que permiten analizar la mezcla para determinar la composición exacta de la misma, tal y como se describirá en el Capítulo 5 de la presente memoria.

Al inicio de esta memoria, se introdujo lo que es el EGR y los productos que lo componen. En aquél momento se nombró que se reduciría el número de productos, eliminando aquellos que se pudiera de modo que no se introdujeran errores en los resultados del ensayo. En el Proyecto Final de Carrera de *Escudero* (2014), se realizó un estudio sobre cuáles eran los productos de los que debe estar formado un EGR sintético para que los resultados tengan el mínimo error posible respecto a la EGR real. Las conclusiones fueron que un EGR sintético que permita realizar ensayos y genere resultados prácticamente iguales que un EGR real, debe estar compuesto de: Vapor de Agua (H_2O), Dióxido de Carbono (CO_2) y Nitrógeno (N_2). De este modo, la mezcla que se deberá crear con el Colector y almacenar en el depósito, deberá contener estos 3 gases y Oxígeno (O_2).

El método de llenado del depósito será a partir de las presiones parciales de los gases a incluir. Puesto que el agua es difícil de manipular en estado gaseoso, se incluirá al depósito en estado líquido antes de empezar a introducir los gases. Para ello se empleará una Bomba de jeringa que se introducirá más adelante. Antes de incluir el agua, se habrá realizado el vacío en el depósito y los conductos del Colector, lo que provocará una rápida evaporación de esta agua líquida. Posteriormente, se procederá al llenado de los 3 gases, empezando por el de menor presión parcial, CO_2 , continuando con el O_2 y finalizando con el N_2 , que será el componente más abundante en la mezcla.

Las presiones parciales deberán ser calculadas por el Software que se desarrolle, de modo que el usuario aporte la fracción de combustible a emplear, bien sea n-heptano, isoctano o una mezcla de ambos, la fracción másica de oxígeno y la presión objetivo y el Software obtendrá las presiones parciales y acumuladas de cada gas. Además, estas presiones

parciales también deben poder ser aportadas directamente por el usuario, sin necesidad de que las calcule el programa, siempre que así lo desee.

Una vez realizado el llenado podrá inyectarse combustible dentro del depósito a través de su inyector para ensayar combustiones premezcladas, como ocurre en motores de inyección directa, o podrá transferirse la mezcla al cilindro como comburente e inyectar el combustible en el mismo, del mismo modo que realizan los motores diésel o los nuevos motores GDI (*Gasoline Direct Injection*). Así, se consigue que la variedad de ensayos que pueden realizarse con la RCM sea muy amplia, pudiendo simular prácticamente cualquier motor y modo de funcionamiento.

Por último, y no menos importante, cabe destacar que el depósito se encuentra rodeado de resistencias calefactoras, de modo que la mezcla puede precalentarse hasta temperaturas alrededor de los 80°C. Esta característica permite que las condiciones de entrada del comburente sean más cercanas a las reales en motores sobrealimentados, añadiendo todavía más versatilidad a los ensayos que es capaz de simular la RCM.

3.5. Botellas de gases

Como se ha comentado anteriormente, se dispondrá de 3 gases para realizar la mezcla de los mismos junto con agua y generar el EGR sintético. Estos gases se encuentran almacenados cada uno en una botella acorde a las condiciones que requiere el transporte de los mismos. A la salida de las botellas, se dispone de dos manómetros, uno antes y otro después de una válvula reguladora de presión que nos permite reducirla drásticamente.



Figura 3.5.A Botellas de Gases



Figura 3.5.B Detalle manómetros

En las figuras 3.5.A y 3.5.B podemos apreciar las 3 botellas que interesan para el proceso de mezcla. De izquierda a derecha encontramos el Nitrógeno, después el Oxígeno, a continuación el Dióxido de carbono y finalmente la botella que contiene el gas de comando de la RCM, ajena al proceso de generación del EGR sintético y sin manorreductor. La existencia de los manorreductores permite que la presión de salida de las botellas no sea extremadamente elevada, de modo que se reduce la velocidad de los gases y por tanto la presión dinámica que podría llegar a medir el sensor.

Las botellas se conectan al Colecto en el mismo orden en que se encuentran posicionadas, encontrándose conectado el Nitrógeno a la electroválvula PMV-A, el Oxígeno a la PMV-B y el Dióxido de Carbono a la PMV-C. Esto es interesante, pues deberemos dar la orden a la electroválvula correcta a la hora mandar las señales, de modo que el gas que se introduzca durante ese período en el depósito sea el deseado.

3.6. Bomba de Jeringa

Para la inclusión del agua en la mezcla, se dispondrá de este elemento. Con ella, conseguimos incorporar agua líquida a la mezcla en la cantidad volumétrica exacta deseada para conseguir la fracción molar objetivo de Vapor de Agua. La elección de la misma se basa en la precisión y sencillez que tiene, así como su resistencia a la corrosión. Para mejorar todavía más su precisión, se elige una Bomba capaz de inyectar un volumen máximo de 500 μL .



Tamaño de la Jeringa	500 μL
Dimensiones conjunto	44.5x127x114.3 mm
Inexactitud	$\leq 1\%$ del volumen
Velocidad del pistón	Permite recorrer la carrera con tiempos desde 1.2 s a 800min
Carrera de la jeringa	3 cm

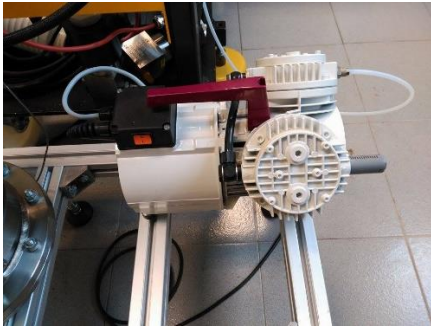
Tabla 3.6 Propiedades de la Bomba de Jeringa

Figura 3.6 Bomba de Jeringa

Cabe destacar, que el volumen seleccionado es inferior al volumen máximo que podría requerirse en las condiciones más restrictivas. Esto se solucionará realizando distintas inyecciones simultáneas. El interés de esto radica en que la precisión de la Bomba se mide respecto al volumen total que es capaz de inyectar. A menor volumen máximo, mayor precisión de la misma.

3.7. Bomba de Vacío

Antes de realizar cualquier llenado del depósito, se deberá practicar el vacío al mismo. Para ello, se dispone de una Bomba de Vacío conectada al depósito y los conductos de Colector mediante una válvula manual. Así, se consigue vaciar completamente los conductos y el depósito. Además, si se abre la válvula manual que conecta la bomba con el cilindro, se consigue vaciar este último, eliminando los gases residuales de la combustión que queden en el mismo. La activación de la bomba es manual, presionando su botón de marcha/paro.



Potencia	27 W
Capacidad de vacío	13 mbar
Alimentación	230 V
Materiales	Cabeza de Aluminio Válvulas de Acero Inoxidable

Tabla 3.7 Características de la Bomba de Vacío

Figura 3.7.A Bomba de Vacío

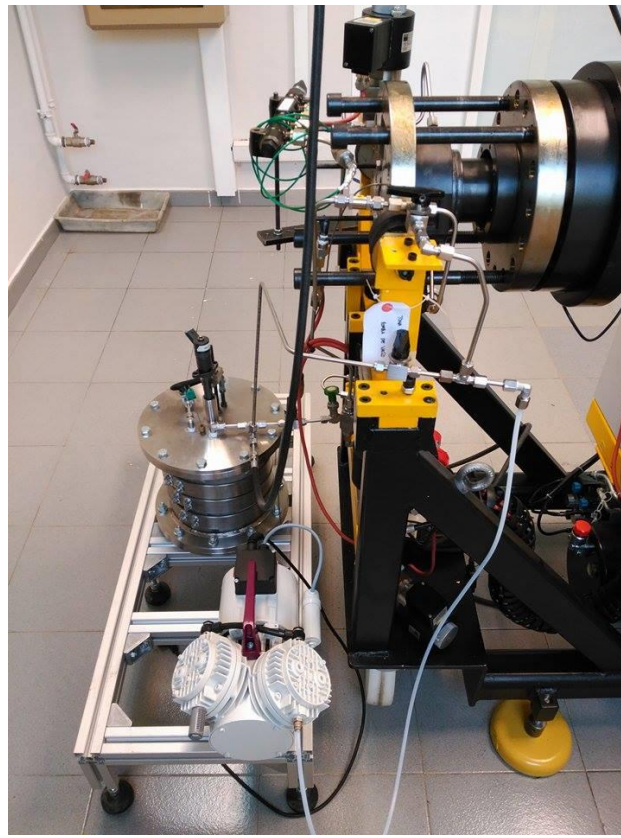


Figura 3.7.B conexionado de la bomba de Vacío

Capítulo 4

Hardware y Software Desarrollados

4.1. Introducción

Una vez conocidos todos los componentes de la instalación y sabiendo los requerimientos de cada uno de ellos, se puede pasar a decidir el Hardware que se creará para posteriormente desarrollar un Software que pueda interactuar con este, de modo que el conjunto final sea la Unidad Electrónica de Control del Colector de gases que permita generar el necesario EGR sintético.

Con esto, en este capítulo se describirán en primer lugar el conjunto físico desarrollado para comandar y alimentar las electroválvulas y el sensor, basado en la placa Arduino introducida anteriormente. En segundo lugar, se presentará el Software desarrollado, que será el encargado de dar a Arduino las instrucciones para alimentar en cada caso una de las distintas electroválvulas en función de la presión que se tenga en el Depósito en ese momento. Para describir el Software, que es un VI creado con LabVIEW y que realiza las funciones de un SCADA, se explicará tanto a nivel interno de funcionamiento como a nivel del panel frontal del usuario.

De este modo, todo aquél que lea este documento será capaz de entender lo que ocurre debajo de la interfaz visible en la pantalla. Además, también será capaz de utilizar el conjunto sin ningún problema, pudiendo crear a voluntad propia la mezcla de gases que deseen.

4.2. Hardware

4.2.1. Introducción

Tal y como se ha ido introduciendo durante el resto de la memoria, el Hardware será la parte física que será capaz de alimentar y comandar las electroválvulas del Colector. Para ello se ha dispuesto de un Arduino, que incorpora su propio microcontrolador, y se ha montado sobre un Circuito Impreso para conducir sus señales hasta las salidas hacia el Colector. Para el diseño de todo el conjunto, se ha colaborado estrechamente con los *técnicos en electrónica del departamento*, de modo que ellos han hecho el diseño del Circuito Impreso y han asesorado en la elección de Arduino como controlador. Además, han definido la mayoría de componentes que debía contener el Hardware, a excepción de la Resistencia que permite transformar la señal de corriente del sensor en una señal de tensión que pueda ser leída por el Arduino.

En este apartado se describirá el conjunto diseñado y se justificará la elección de la resistencia nombrada anteriormente, de modo que el lector pueda entender perfectamente el funcionamiento del Circuito y la función de cada uno de los componentes del mismo.

4.2.2. Fuente de alimentación

La fuente de alimentación seleccionada por los *técnicos de electrónica* es el modelo LS50-24 de la empresa fabricante TDK-Lambda. Las siglas del modelo significan que la fuente es capaz de alimentar 50 W de potencia a 24 V de corriente continua. Para ello se alimenta a la misma desde la red eléctrica a 230 V de corriente alterna. Por tanto la función de la fuente de alimentación es rectificar la señal de la red y transformarla a 24 V, que es la tensión de alimentación de las electroválvulas del Colector, tal y como se indicó en su descripción.

Las propiedades de la fuente de alimentación se recogen en la tabla 4.2.2 y en la Figura 4.2.2 podemos ver una imagen de la misma en su lugar de instalación, dentro de una caja que contendrá el conjunto que forma la Unidad Electrónica de Control del Colector de gases.



Figura 4.2.2 Fuente de Alimentación

Tensión de salida nominal	24 V DC
Máxima corriente de salida	2.2 A
Máxima potencia de salida	52.8 W
Eficiencia	86 %
Tensión de alimentación	88...264 V AC
Corriente de alimentación	1.3...0.8 A
Rango de Tensión de salida	22...27.2 V DC
Temperatura de operación	-25...70 ° C
Peso	350 g
Dimensiones	99x97x36 mm

Tabla 4.2.2 Características de la Fuente de Alimentación

Como puede apreciarse en la Figura anterior, la Fuente recibe de la red una fase y el neutro, además de un cable de toma de tierra y nos aporta una salida en corriente continua. El LED iluminado, muestra cuando la fuente está conectada a la red y, por tanto, en operación. El

potenciómetro al lado de este, permite regular la tensión de salida dentro del rango que es capaz de aportar.

Respecto a sus propiedades, destaca su reducido tamaño, que permite que sea instalada dentro de la caja elegida para ello. Además se adapta perfectamente a las necesidades de los componentes del Colector, que son los que serán alimentados con ella.

4.2.3. Circuito Impreso

El Circuito Impreso, sobre el que han sido soldados el resto de componentes del Hardware, fue diseñado por los *técnicos en electrónica* del departamento. Consiste en una serie de bandas de cobre impresas sobre una placa, de modo que la corriente circula por estas, evitando así la necesidad de cablear todos los componentes.

En primer lugar se debe partir de los componentes que se van a instalar sobre él y el conexionado de los mismos que se quiere realizar. Una vez decidido sobre un diagrama, se pasa a diseñar la posición de estos, creando un negativo de lo que posteriormente se imprimirá sobre la placa. A continuación se deberá imprimir el Circuito y se dispondrán los elementos sobre él tal y como se había definido, pasando a soldarlos para que no se muevan.

Con todo esto, a continuación se nombran los distintos componentes que formarán el Circuito electrónico que permitirá comandar las electroválvulas a voluntad del Instrumento Virtual diseñado posteriormente.

4.2.3.1. Componentes

Los componentes del Circuito Impreso son los necesarios para conseguir llevar la corriente hasta las electroválvulas y el sensor de presión, permitiendo comandar los primeros en función de las señales de salida de Arduino, que vendrán dadas por el Software. La relación de los mismos se recoge a continuación y la explicación de su conexionado se realizará en el siguiente apartado.

- **1 placa Arduino UNO** → Es el centro pensante del Circuito. Sus propiedades se describieron en el Capítulo 2, tomando aquí especial importancia que la tensión de entrada debe estar entre 7 y 12V y que la tensión de operación es de 5V.
- **8 Bornes de conexión** → Son los que permitirán conectar los cables de alimentación, sensor y electroválvulas al Circuito Impreso.
- **1 Resistencia de 249 Ω** → Su dimensionado se explicará posteriormente en un apartado dedicado a ello.
- **6 Relés TE modelo RE030024** → Puesto que el panel tiene 6 electroválvulas, el Circuito Impreso se diseña de modo que si en un futuro fuera necesario comandarlas todas, se pudiera. En este caso solo se emplearán 3 de ellos para comandar las electroválvulas de los 3 gases necesarios.

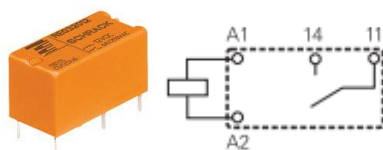


Figura 4.2.3.1.A Configuración de los Relés

La tensión de alimentación de su bobina es de 24V y su funcionamiento es sencillo, cuando se alimenta la bobina, se cierra el contacto.

- **1 Amplificador de Salidas ULN2003AN** → Consiste en un conjunto de transistores Darlington que permite amplificar salidas de tensión muy pequeñas del microcontrolador a otras de mayor tensión que puedan comandar por ejemplo los Relés. Su estructura interna es sencilla y dispone de una serie de diodos de protección que permiten proteger el microcontrolador de sobrecargas, lo que facilita su uso con bobinas.

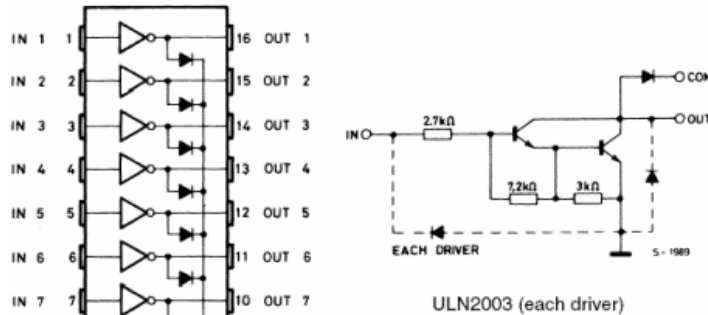


Figura 4.2.3.1.B Configuración del Amplificador

A cada una de las entradas le corresponde la salida que tiene inmediatamente enfrente de ella, de modo que las salidas tienen una continuación directa respecto de las entradas.

- **1 Regulador de Tensión On Semi MC7812B** → Permite regular la tensión a un valor de 12V.
- **2 Condensadores** → Se trata de 2 Condensadores que permiten absorber los picos de tensión que puedan producirse en el arranque y parada de la fuente de alimentación. Uno de ellos es de 2200 μF mientras que el otro es de 470 μF .

4.2.3.2. Dimensionado de la Resistencia

La Resistencia nos permitirá transformar la señal de corriente proveniente del sensor de presión en una señal de tensión que pueda ser leída por el Arduino. Para ello la resistencia deberá cumplir las dos restricciones que tenemos.

Por un lado, el fabricante del sensor indica que el valor de la resistencia debe cumplir la siguiente desigualdad.

$$\text{Carga } \Omega \leq \frac{(\text{energía auxiliar} - 8V)}{0,02 A}$$

De esta condición anterior, sabiendo que la energía de alimentación del sensor es de 24V, se tiene que la carga en Ohmios debe ser menor de 800 Ω .

Por otro lado, la tensión máxima que puede recibir Arduino es la correspondiente a su tensión de operación, por lo que esta no podrá superar los 5V. Teniendo en cuenta que la máxima tensión se dará para la corriente máxima de salida del sensor, que será de 20mA, se debe dimensionar la Resistencia para dicho valor.

$$V = R \times I \leq 5 V \rightarrow R \leq \frac{5 V}{I} \rightarrow R \leq \frac{5 V}{0,02 A} \rightarrow R \leq 250 \Omega$$

Por tanto, y con el objetivo de apurar al máximo el rango sin que en ningún momento llegue a saturar el pin analógico, se decide tomar una Resistencia de 249 Ω , cumpliendo con ambas restricciones. Con esto se consigue que para una presión de 0 bar, que corresponde a

una salida de 4mA, el valor de la tensión sea de 0,996V, mientras que para una presión de 10 bar, correspondiente a 20mA de corriente de salida, el valor de la tensión será de 4,98V, obteniendo un rango de tensión lo más amplio posible. El disponer de un mayor rango de tensiones para la señal que nos aporta la presión, otorga mayor precisión en la medida al Hardware.

4.2.3.3. Diagrama de conexiones

La conexión de cada uno de los componentes nombrados anteriormente se diseña para conseguir el propósito de comandar las electroválvulas. Para ello se debe alimentar a las mismas cuando lo decida el Software diseñado, aprovechando el microcontrolador de Arduino, que activará cada vez el Pin que sea necesario.

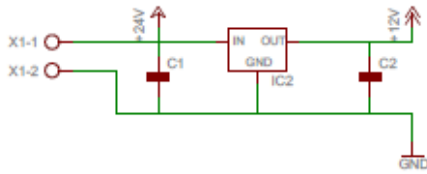


Figura 4.2.3.3.A Recepción de Energía

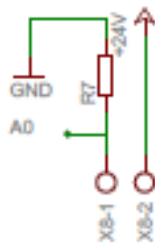


Figura 4.2.3.3.B Recepción y alimentación del Sensor

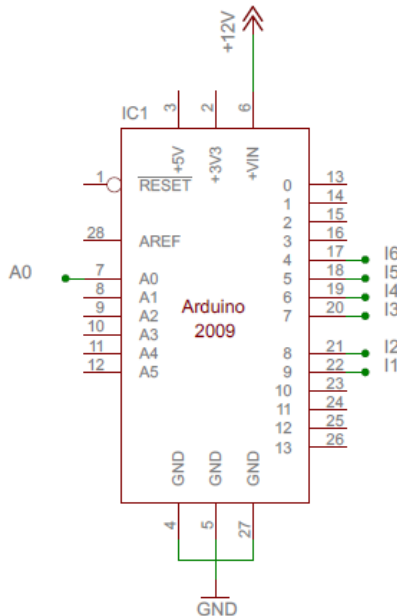


Figura 4.2.3.3.C Conexión con Arduino

En primer lugar, es necesario transferir de energía desde la Fuente de Alimentación al Circuito Impreso. Para ello se emplea un borne de conexión (X1) con el que se transmitirá la energía hacia el conjunto, teniendo en cuenta la tensión máxima a la que se puede alimentar la placa Arduino (12V). Por tanto, se debe limitar la tensión que nos aporta la Fuente de Alimentación para poder energizar la Arduino con la ayuda del Regulador de Tensión, obteniendo así la tensión deseada.

Para conectar el sensor de presión al Pin de entrada analógico de Arduino, se emplea otro borne (X8). A partir de aquí se aprovecha el cableado para alimentar el sensor y se transforma su señal de salida, en forma de corriente, a una señal de tensión con la ayuda de la resistencia de 249Ω (R7). El punto A0 se conectará con el pin analógico 0 de Arduino.

Como se puede apreciar en la Figura 4.2.3.3.C, Arduino recibirá en su Pin Analógico número 0 la señal proveniente del sensor de presión en forma de tensión. La alimentación del microcontrolador se realiza con la señal regulada a 12V a partir de la Fuente de Alimentación y a través del pin diseñado para este propósito.

En función del valor de la señal de entrada, que será la que transmita el valor instantáneo de la presión en el depósito, el Software determinará cuál de las electroválvulas debe abrir, por lo que ordenará a Arduino que active el Pin Digital de Salida que se corresponda con esa electroválvula.

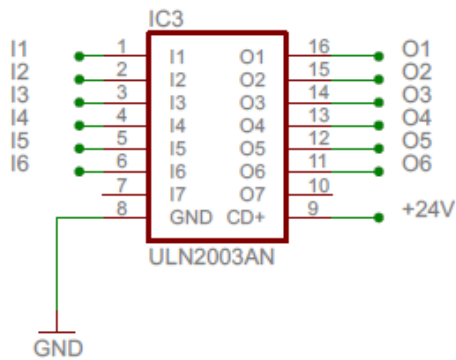


Figura 4.2.3.3.D Conexiones de Amplificador

La señal de salida de Arduino tiene una tensión de 5V. Esta señal deberá energizar la bobina del relé al que esté conectada, y debe ser de 24V, siendo necesario amplificarla con la ayuda del Amplificador ULN2003AN. Para conseguirlo, deberán conectarse las 6 salidas de Arduino con 6 de los pines de entrada del Amplificador.

Como se ha mostrado anteriormente, cada una de las entradas el Amplificador se corresponde con la salida que está justo enfrente de la misma, por lo que la entrada I1 corresponde con la salida O1 y así sucesivamente. De este modo es fácil saber cuál de los relés corresponderá con cada uno de los pines de salida de Arduino.

Como se puede apreciar en la Figura 4.2.3.3.D, la señal de salida tendrá un valor de 24V, correspondiéndose con el necesario para alimentar las bobinas de los relés.

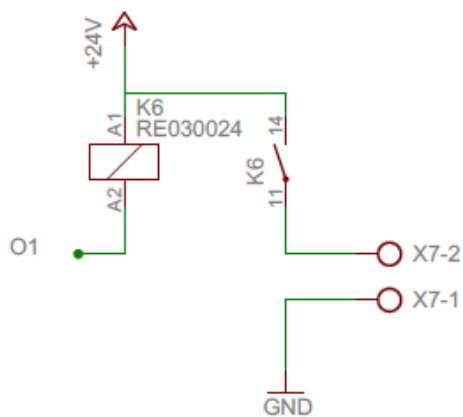


Figura 4.2.3.3.E Conexiones de los Relés

Finalmente, cada una de las salidas del amplificador se conecta a un relé, y la salida del relé, a través de un borne (X2 a X7), al cableado que se dirige hacia cada una de las electroválvulas del Colector. La alimentación de la bobina y de la que llegará a cada una de las electroválvulas una vez se cierre el contacto, es de 24V, tal y como demandan estos componentes del Colector.

4.2.3.4. Negativo

El siguiente paso en la creación del Circuito Impreso es el diseño de su negativo, de modo que todos los componentes queden recogidos y las conexiones entre ellos sean sencillas.

Cabe destacar que todo el entorno de la placa que no forme ningún circuito será la Tierra (GND) del conjunto, por lo que no hay que conseguir un punto común donde dirigir todos los puntos que deben conectarse a él. Así se consigue simplificar el esquema considerablemente, puesto que solo deberán dibujarse los conductores que lleven señales distintas de 0V.

Se puede observar que, para reducir el espacio necesario, se ha previsto la instalación del Amplificador justo en el medio de la Placa Arduino, aprovechando el hueco que quedará debajo de este. Así el tamaño del Circuito será de 160x100mm. Además, se necesitará de un puente conductor para hacer que la alimentación de Arduino (12V) supere los conductores de la señal del sensor, de modo que por arriba veremos un pequeño conductor metálico que realiza dicho puente. Este puente se encuentra dibujado en color rojo en la Figura siguiente.

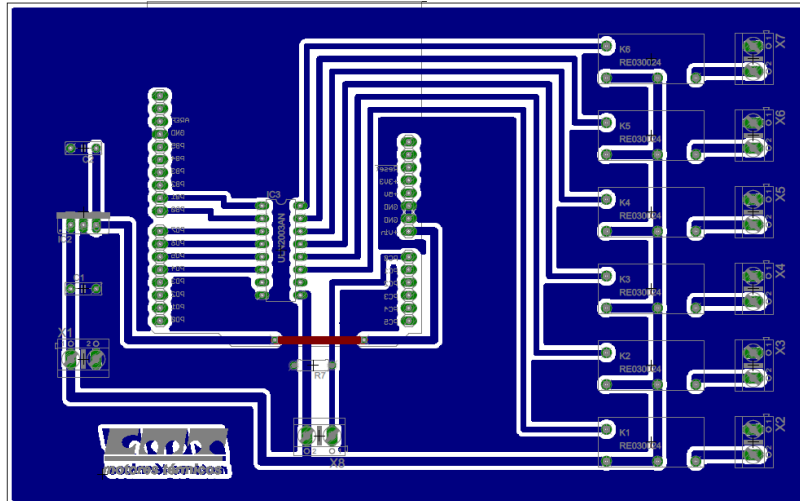


Figura 4.2.3.4 Negativo del Circuito Impreso

También se han marcado todos los componentes para que no haya ninguna duda a la hora de realizar el montaje y soldadura de los distintos componentes en su posición.

4.2.3.5. Impresión y montaje

Una vez se tiene diseñado el negativo, pasa a imprimirse el mismo sobre una placa de fibra de vidrio que contiene una ligera lámina de cobre en su superficie. Para ello se emplea una técnica de grabado fotosensible que permite marcar el circuito sobre la placa y posteriormente se elimina el cobre sobrante con distintos baños en ácidos. Por tanto este proceso debe realizarlo un especialista como son los *técnicos de electrónica* del departamento.

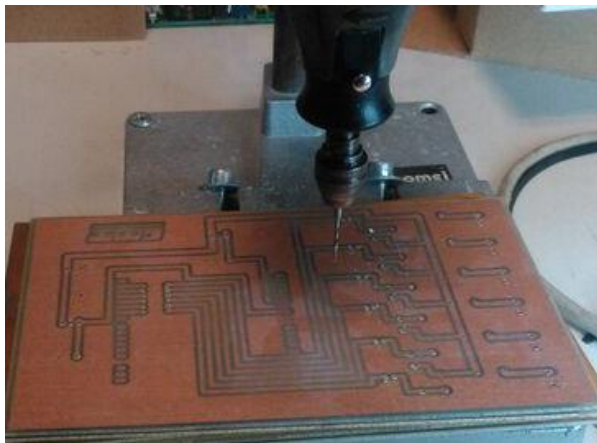


Figura 4.2.3.5.A Perforado de la placa

A continuación se realiza el grabado y el lavado de la placa para eliminar el cobre sobrante, se tiene el diseño necesario para poder empezar a montar los componentes sobre la placa. Previamente se deben realizar los orificios pasantes que permitan soldar los componentes en su posición aprovechando sus extremos. En la Figura 4.2.3.5.A se ilustra este proceso. Para la realización del mismo se contó con un taladro fijo y una broca de 0,6mm de diámetro, acorde a las patillas.

Cuando se tienen las perforaciones pasantes realizadas, se puede proceder a montar los distintos componentes sobre la placa, soldando por la parte inferior, la que contiene la lámina de cobre, las distintas patillas de los componentes, de modo que exista una buena conexión entre las mismas y el circuito de cobre que debe llegar hasta ellas. Se debe tener cuidado para que la soldadura no llegue a cruzar la zona sin cobre, ya que de este modo se tendría un cortocircuito.

Al finalizar este proceso, los componentes quedan bien sujetos al Circuito Impreso y cada uno en su posición de diseño. En este momento, el conjunto ya se encuentra disponible para que se conecten a los distintos bornes los cables correspondientes. Por un lado se deberá conectar la alimentación al borne X1, el sensor deberá conectarse en el orden correcto al borne X8 y el cableado proveniente de cada una de las electroválvulas se deberá conectar en el orden deseado a los bornes que van desde X2 hasta X7. En este caso se decide conectar la PMV-A, que controla el N₂, al borne X2 y así sucesivamente. La conexión se realiza simplemente con un destornillador, de modo que la sujeción de los cables a los bornes es lo suficientemente rígida para que no se desconecten con el transporte del conjunto.

El resultado final es un Circuito Integrado que, por un lado, se ve con las distintas soldaduras que sujetan los componentes y el dibujo de los distintos conductores de electricidad (Figura 4.2.3.5.B), y por el otro se pueden apreciar los distintos componentes que forma el Circuito sobre el mismo, de modo que todos quedan en su posición de diseño (Figura 4.2.3.5.C).

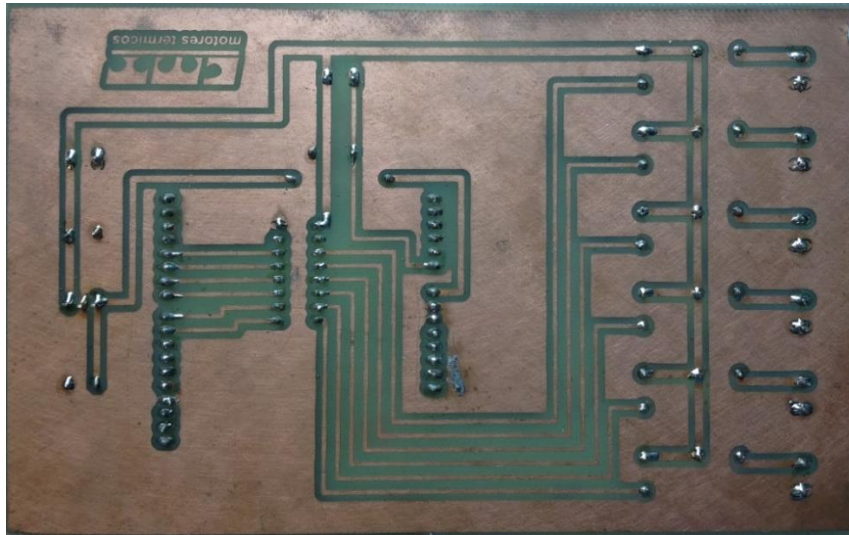


Figura 4.2.3.5.B Parte Inferior del Circuito Integrado Soldado

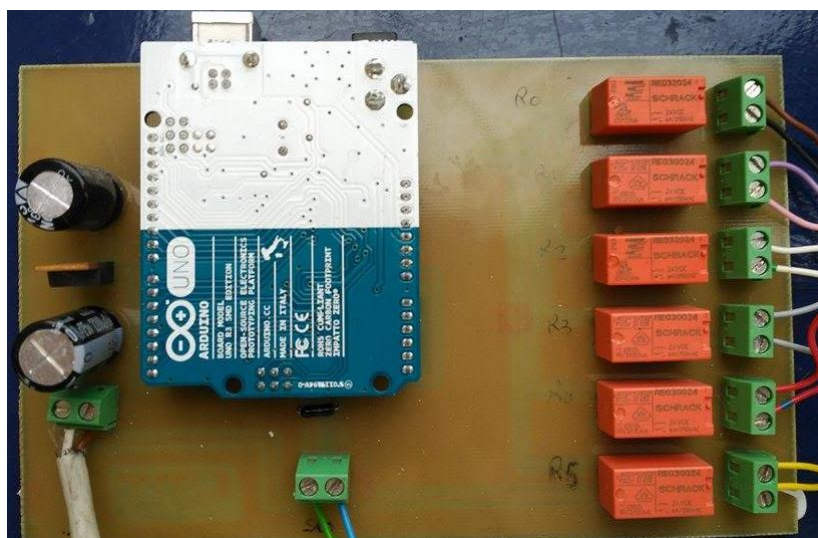


Figura 4.2.3.5.C Parte Superior del Circuito Integrado con Componentes Soldados y conexiones

Se puede apreciar en la última figura la disposición de cada uno de los elementos sobre el circuito, exceptuando el Amplificador que se aprecia en la figura anterior debajo de Arduino.

4.2.4. Cableado de conexión

El cableado de conexión es el que permite conectar los distintos elementos a alimentar por el Circuito Impreso con el mismo, es decir, son todos los cables que provienen del Colector y que se recogen en la Caja de Conexiones del mismo. A partir de aquí, todos estos se conducen hacia la Unidad Electrónica de Control, que se encontrará dentro de una caja acorde, mediante un cable con 12 conductores finos.

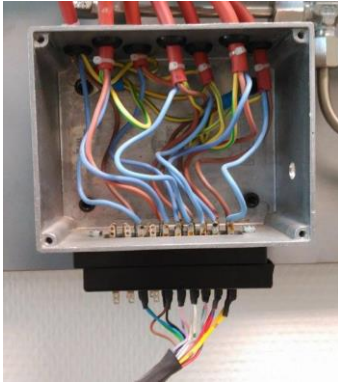


Figura 4.2.4.A Cableado de Conexión en el Colector

Cada una de las electroválvulas se conecta a unos cables de un color distinto, tal y como se recoge a continuación:

PMV-A	Amarillo
PMV-B	Rojo
PMV-C	Gris
PMV-D	Blanco
PMV-E	Rosa-Morado
PMV-F	Negro-Marrón
Sensor de presión	Azul-Verde

Tabla 4.2.4 Correspondencia entre Componentes y Colores del cableado

Para identificar cada uno de los cables, en aquellos en los que ambas fases son de un mismo color, se tiene uno de ellos marcado con bandas de un color distinto, aunque en las electroválvulas no son significativas las fases, pues no tienen una polaridad definida.

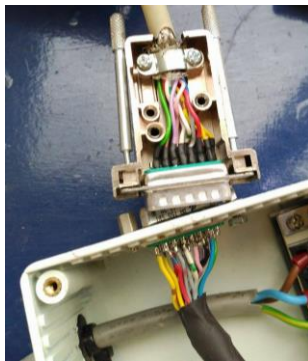


Figura 4.2.4.B Conector Cable-Caja

En el otro extremo del cable, se ha instalado un conector, de forma que la parte macho del mismo se queda en el cable mientras que la hembra se encuentra en la superficie de la Caja que contiene el conjunto. Para ello se han soldado los cables en ambos elementos de modo que tengan continuidad, es decir, el cable amarillo sin marcas continuará siendo igual una vez haya pasado el conector. Así el seguimiento de las conexiones es mucho más sencillo y a simple vista se sabe que cable conectar a cada relé. Una vez se introducen ya dentro de la caja, los cables se recogen para dirigirlos todos juntos hacia los relés y conectar cada uno al que le corresponde, tal y como se indicó anteriormente.

El otro cableado necesario, es el de alimentación. En primer lugar se necesita un cable que permita conectar la Fuente de Alimentación a la red, lo que se realiza con un cable de 3 conductores que en su extremo tiene un enchufe macho que permite conectarlo a una toma de corriente. Este cable entra en la caja a través de un orificio de su diámetro y dentro de la misma se conecta a los distintos bornes de la fuente de alimentación (ver Figura 4.2.2). A partir de las salidas de la fuente de alimentación, a 24V DC, se toman 2 conductores que se llevan al borne X1 del circuito impreso para alimentarlo a dicha tensión.

Con esto, solo quedará conectar la placa Arduino al PC para empezar a operar.

4.2.5. Configuración final del Hardware

Cuando se han realizado todas las conexiones y soldaduras necesarias, el conjunto pasa a cerrarse dentro de una caja de dimensiones reducidas, de modo que se termina teniendo una caja de 190x110x60mm que contiene en su interior todo el Hardware necesario.

Esta caja lleva junto a ella el cable de alimentación desde la Red, mientras que el resto de cableado se le conecta a dos conectores distintos. Por un lado el conector que recibe el cableado proveniente del Colector y por otro lado el puerto USB de la placa Arduino, que permite su conexión con el PC para recibir órdenes.

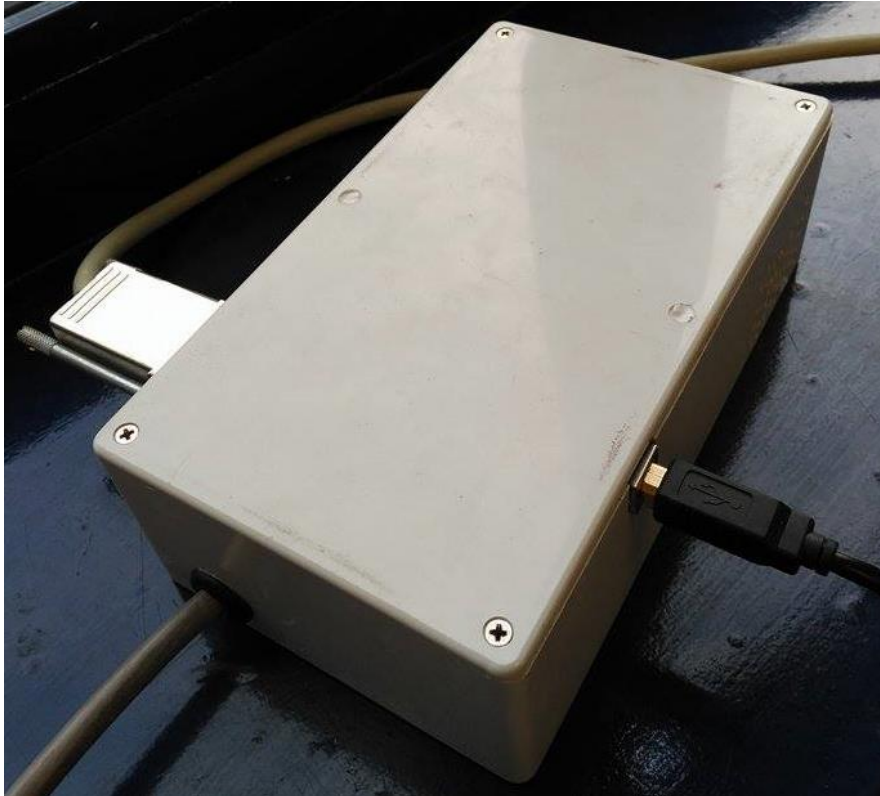


Figura 4.2.5 Unidad Electrónica de Control del Colector de Gases (Hardware)

Puede verse en la Figura la caja definitiva que engloba en su interior a los distintos componentes descritos en los apartados anteriores. Su reducido tamaño permite colocarla en cualquier lugar cercano al ordenador que le dará las órdenes de activación de las electroválvulas. Cabe destacar que mientras que los cables de alimentación y USB pueden desplazarse junto con la Caja a cualquier lugar, el cable de conexión con el Colector debe permanecer unido a este. La longitud del mismo se ha sobredimensionado ligeramente para que el cable llegue con facilidad hasta la Sala de Control de la RCM, donde se hallará el conjunto Unidad Electrónica de Control-PC Controlador.

Una vez definido el Hardware que permitirá comandar las electroválvulas y recibir la señal del sensor de presión, pasa a desarrollarse el Software que dará las órdenes a Arduino. Para ello se empleará LabVIEW y su interfaz para Arduino (LIFA), por lo que previamente se deberá transferir a Arduino el Código LIFA_base que permite su conexión con LabVIEW. (Ver apartado 2.4.4. de la presente memoria).

4.3. Software

4.3.1. Introducción

El Software será el programa que reciba las señales de Arduino y le aporte al mismo las órdenes necesarias para abrir en cada momento la electroválvula que deba en función de la presión instantánea existente en el depósito de almacenamiento.

Se tratará de un Instrumento Virtual creado con LabVIEW, por lo que dispondrá de una Interfaz de Usuario (Panel Frontal) y de un Diagrama de Bloques en el que se desarrolle el código de programación en Lenguaje G.

En este apartado, se expondrán tanto el funcionamiento a nivel interno del Software, explicando las funciones que realiza en cada momento, como el funcionamiento a nivel Usuario del mismo. Además, antes de esto, se recogerán los requisitos de funcionamiento del programa indicados por el responsable de ensayos de la RCM.

4.3.2. Requisitos

Los principales Requisitos del Software son los siguientes:

- Deberá mostrar la presión instantánea en el depósito.
- Deberá mostrar el estado de la conexión entre Arduino y en el PC, de modo que puedan detectarse posibles caídas de la misma.
- Se debe poder calcular las fracciones molares y presiones parciales de la mezcla, en la propia interfaz del programa, a partir de la fracción másica de Oxígeno deseada, el combustible a introducir y la presión objetivo.
- Las presiones parciales podrán introducirse manualmente en cualquier momento.
- El llenado se iniciará y parará a voluntad del Usuario.
- Deberá iluminarse una LED que muestre cuál de las electroválvulas se encuentra abierta en cada momento.
- Se indicará en la pantalla en qué situación se encuentra el programa.
- Podrá cerrarse el programa en cualquier momento.
- La secuencia de llenado será mediante presiones parciales. Con el objetivo de evitar que posibles picos de presión causados por la propia presión dinámica del gas que se esté introduciendo en ese momento o por medidas erróneas del sensor, se deberá pausar la secuencia de llenado después de cerrar por primera vez la entrada de un gas, para posteriormente comprobar otra vez la presión y abrir esa misma válvula en caso de que la presión siga siendo inferior al límite de presión definido para ese gas. Una vez se abre una electroválvula por segunda vez, cuando cierre se abrirá la del siguiente gas. Esta secuencia permitirá reducir los errores causados en la lectura, de modo que la precisión de obtención de la mezcla objetivo sea mayor. Por tanto, la secuencia de llenado se realizará siguiendo el siguiente esquema:

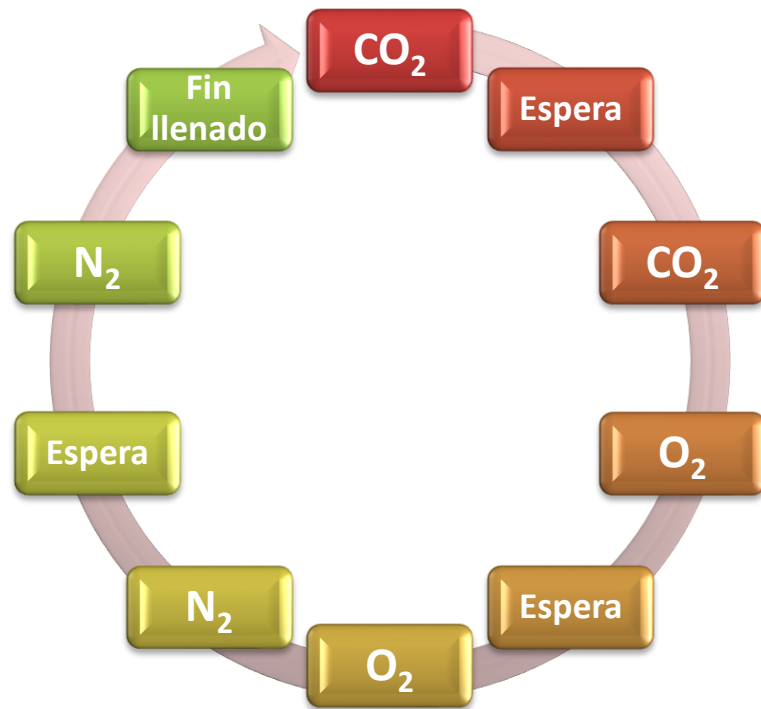


Figura 4.3.2 Esquema de la secuencia de llenado

4.3.3. Funcionamiento Interno

Esta estructura interna podrá apreciarse sencillamente gracias a las distintas cajas que indican la existencia de un Bucle en LabVIEW. Con su lenguaje, cada tipo de caja simula un tipo de bucle, al cual se le deben dar sus condiciones de entrada o salida. Una caja contenida dentro de otra, significa que la caja interna se encuentra en un subnivel del código, es decir, un bucle se encuentra dentro de otro.

El funcionamiento interno del sistema se basa en un Bucle While que se ejecuta hasta pulsar el botón de paro del programa. Dentro de este, se tiene una condición dada por el botón de marcha y paro del llenado. Si este no se encuentra presionado, el programa se decanta por un Bucle While que permite calcular las presiones parciales y la composición del EGR deseado, mientras que si el botón de inicio del llenado se presiona, el programa se decanta por otro Bucle While que contiene la secuencia de llenado del Esquema anterior. Esta condición permite que el programa empiece a cumplir los primeros requerimientos, como es la existencia de un botón que permita al usuario decidir cuándo empieza y termina un llenado a su voluntad.

Para la explicación más detallada del funcionamiento interno del Software, se procede a presentar por partes las distintas partes del programa: Inicialización, Cálculo de la composición, Proceso de llenado y Cierre de la conexión.

4.3.3.1. Inicialización

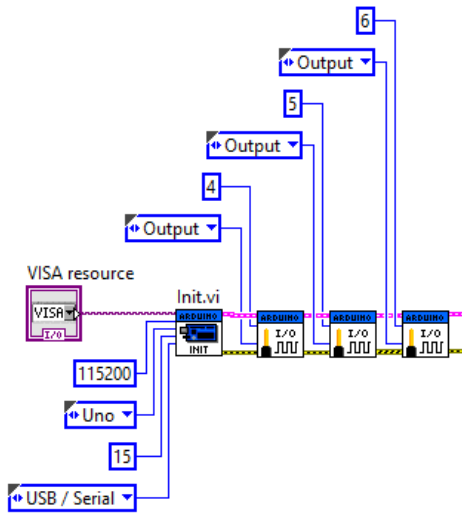


Figura 4.3.3.1 Inicialización de Arduino

La inicialización del programa tiene como objetivo arrancar la conexión entre Arduino y el Software. Para ello se emplea la función *Init.vi* de LIFA. En ella se define el tipo de placa Arduino que se va a emplear, el puerto mediante el que se realizará la conexión y el número de bytes por paquete de datos.

Además, en la inicialización se define la configuración de los pines digitales de salida. En este caso se trata de los pines 4, 5 y 6 que corresponderán, respectivamente, a N₂, O₂ y CO₂. Esto podría ser distinto en caso de que la conexión del cableado difiriera de la definida anteriormente en la presente memoria.

4.3.3.2. Cálculo de la Composición

Antes de iniciar el llenado, es decir, mientras el botón de Inicio/Paro del llenado no se encuentra presionado o no se pulsa el botón de parada del programa, este se decanta dentro del Bucle While externo, por el caso False (Señal del botón es False).

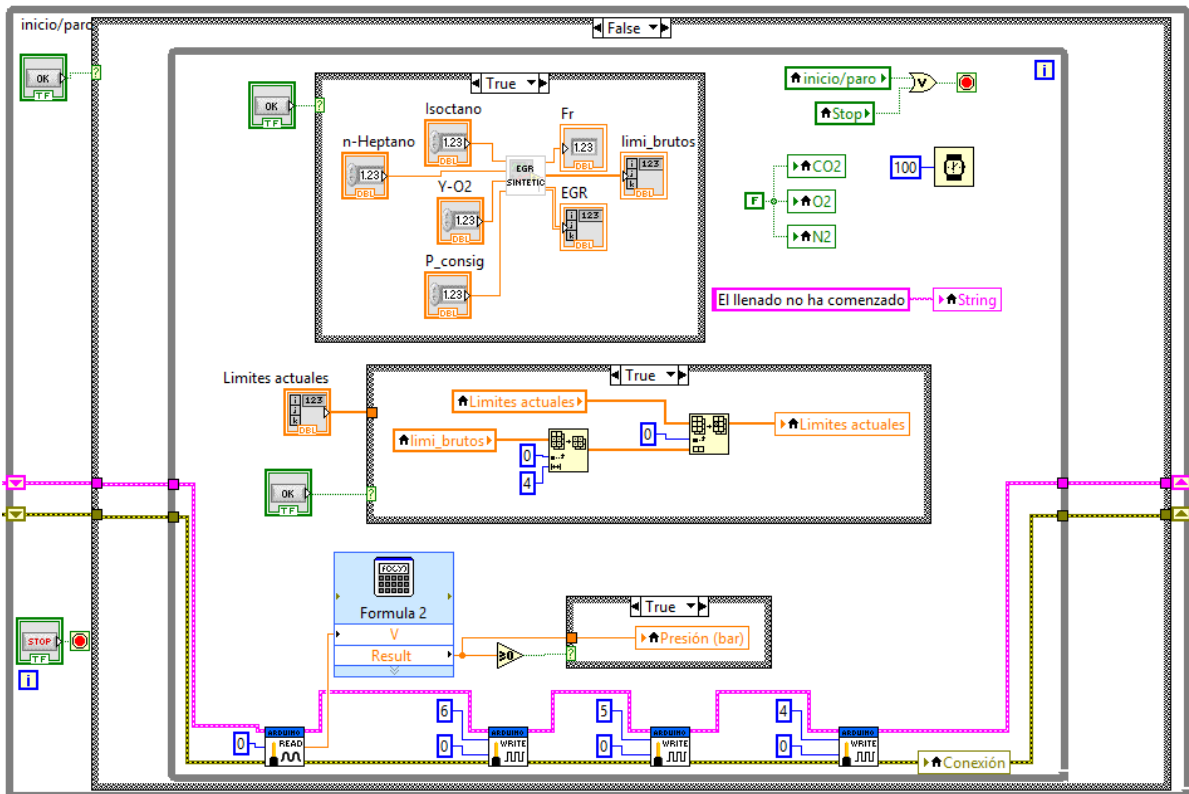


Figura 4.3.3.2.A Código con botón de Inicio abierto

Como puede verse, en este caso las 3 electroválvulas se encuentran cerradas, pues con la ayuda de LIFA, se ha ordenado a Arduino que sitúe el nivel de las 3 salidas en 0, por lo que los LEDS indicadores del estado de las electroválvulas permanecerán apagados. Puesto que en este momento el llenado todavía no se ha iniciado, el programa muestra en la pantalla la leyenda “El llenado no ha comenzado”.

Además se toma la señal del sensor para controlar en todo momento la presión que se tiene en el depósito. Para ello, se debe transformar la señal de voltaje que recibe y nos aporta Arduino en valores equivalentes de presión. Como ya se anunció, debido a la elección de una resistencia de 249Ω , se tendrá que para 10 bar de presión, Arduino recibirá 4,98V, mientras que para 0 bar, recibirá 0,996V. Realizando una regresión lineal, se tiene que el valor de la presión vendrá dado por:

$$\text{Presión (bar)} = 10 \times \frac{V_{in} - 0,996}{4,98 - 0,996}$$

Esta ecuación se implementa aprovechando el *nodo fórmula* de LabVIEW. Conocer la presión en esta fase permite al usuario determinar cuándo se ha alcanzado el vacío en el depósito, pudiendo proceder a la parada de la Bomba para dar inicio al llenado del depósito.

Antes de esto, el programa da la opción de calcular las fracciones másicas y los límites de presión a partir de los datos objetivo que aporte el usuario. Para ello se ha desarrollado la función *EGR SINTETIC*, cuyo esquema se adjunta en la Figura 4.3.3.2.B.

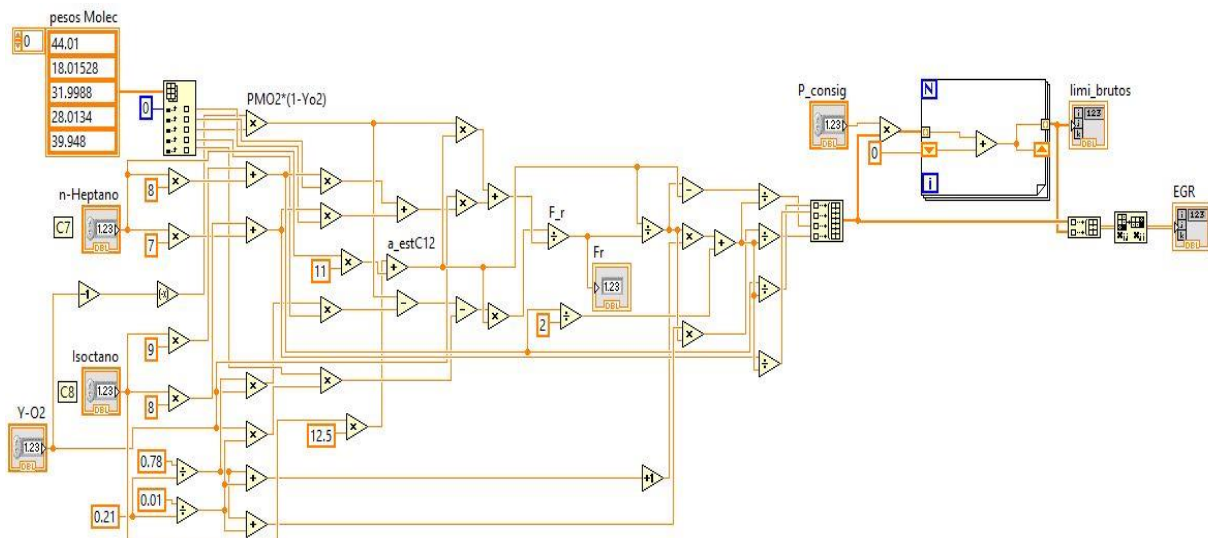


Figura 4.3.3.2.B Función *EGR SINTETIC*

Esta función parte de los pesos moleculares de cada uno de los componentes que forman el EGR sintético (ver Ecuación 1, apartado 2.2) e implementa las ecuaciones recogidas en el **Anexo 1**. Para ello el usuario deberá aportar, mediante controles del panel frontal, el tanto por uno de cada tipo de combustible a inyectar (n-Heptano e Isoctano) y la fracción másica de O_2 deseada. Con estos datos, siguiendo las ecuaciones, se obtiene un vector con las fracciones molares de cada componente.

Sabiendo la Presión objetivo aportada por el usuario pueden calcularse las presiones parciales de cada gas y con la ayuda de un Bucle For autoindexado, se consigue obtener los límites de presión acumulada para cada uno. Esto se obtiene sumando la presión parcial de

cada uno a la presión acumulada de aquellos que se encuentran por debajo en la secuencia. Finalmente el vector de fracciones molares y el de límites de presión se unen en una matriz y la función aporta al código base el vector de límites de presión (*limi_brutos*) y dicha matriz (*EGR*).

Una vez obtenidos los límites de presión con la función *EGR SINTETIC*, estos pueden transferirse desde el vector *limi_brutos*, hasta el vector *límites actuales*, que se comporta como un control y por tanto admite también que los valores de presión se incluyan de forma manual y se modifiquen en cualquier momento, cumpliendo el requerimiento que pedía esta opción. Este vector, es el que se tomará para obtener los límites de presión de cara a realizar la secuencia de llenado.

A partir de este momento se podrá proceder a realizar el llenado del depósito con la composición definida. Cuando se pulse el botón de inicio del llenado, el bucle actual finalizará y el programa cambiará al caso TRUE.

4.3.3.3. Secuencia de llenado

Una vez presionado el botón de inicio del llenado, el programa cambia el camino de la ejecución. En ese momento se dirige hacia la parte del código que contiene la secuencia de llenado representada en los Requisitos.

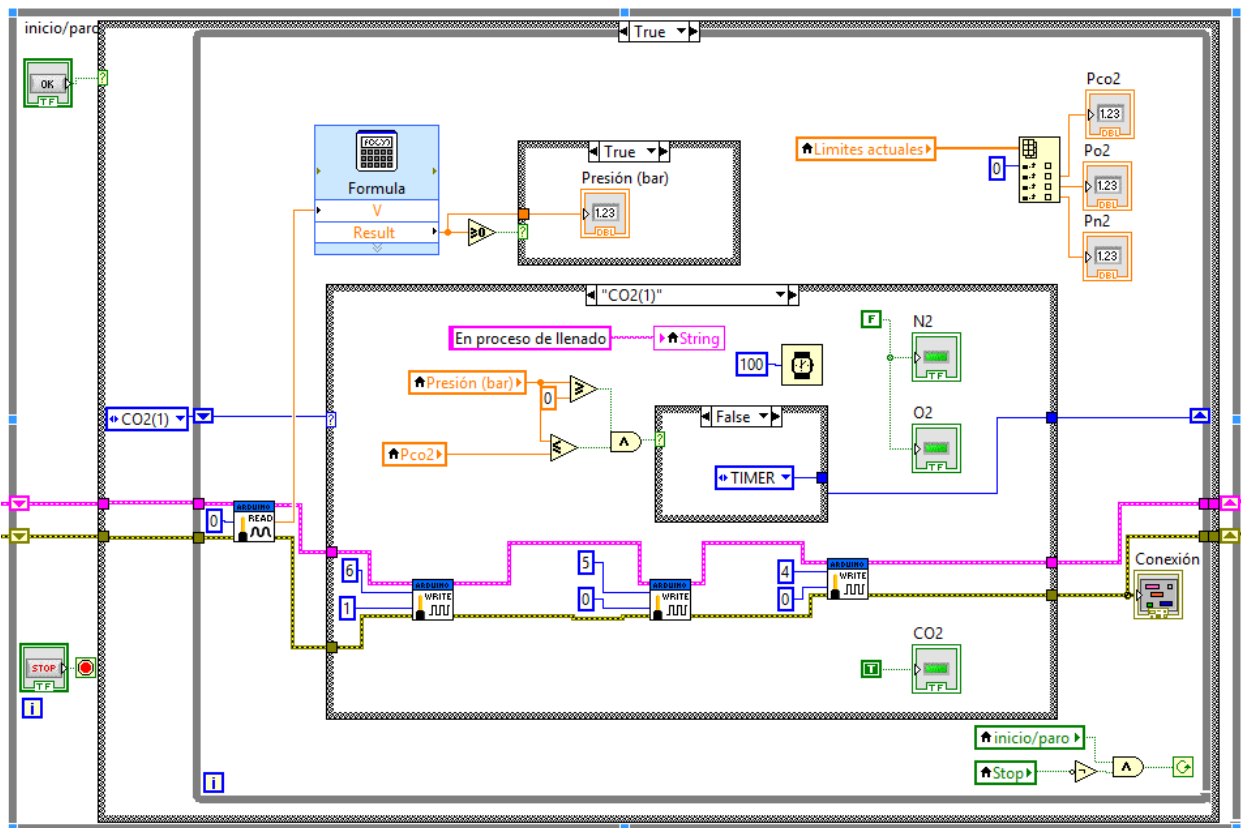


Figura 4.3.3.3 Código con botón de Inicio cerrado

Esta parte del código, al igual que la anterior, contiene un Bucle While que se realiza continuamente mientras no se presione el botón de paro del llenado o paro del programa. Dentro del mismo, se tiene la lectura de la presión indicada por el sensor de presión, empleando la misma fórmula que anteriormente, y la descomposición del vector de Límites de presión en los límites de presión para cada uno de los gases, de modo que estos valores se

pueden emplear posteriormente para comparar con la presión instantánea del depósito y determinar que debe hacer Arduino.

Pasando a analizar más concretamente la parte correspondiente a la secuencia de llenado del depósito, se ha decidido implementarla con el uso de un *Case Structure*. Para este propósito se han definido 10 casos, uno por cada estado requerido. Puesto que el primer caso, el inicial, es la apertura de la electroválvula de CO₂, se le debe dar al selector de casos este mismo como caso inicial. Para cada nueva pasada de lectura, el selector toma el valor que se indicó a la salida de la pasada anterior, haciendo uso del *Shift Register*.

A. Primera etapa

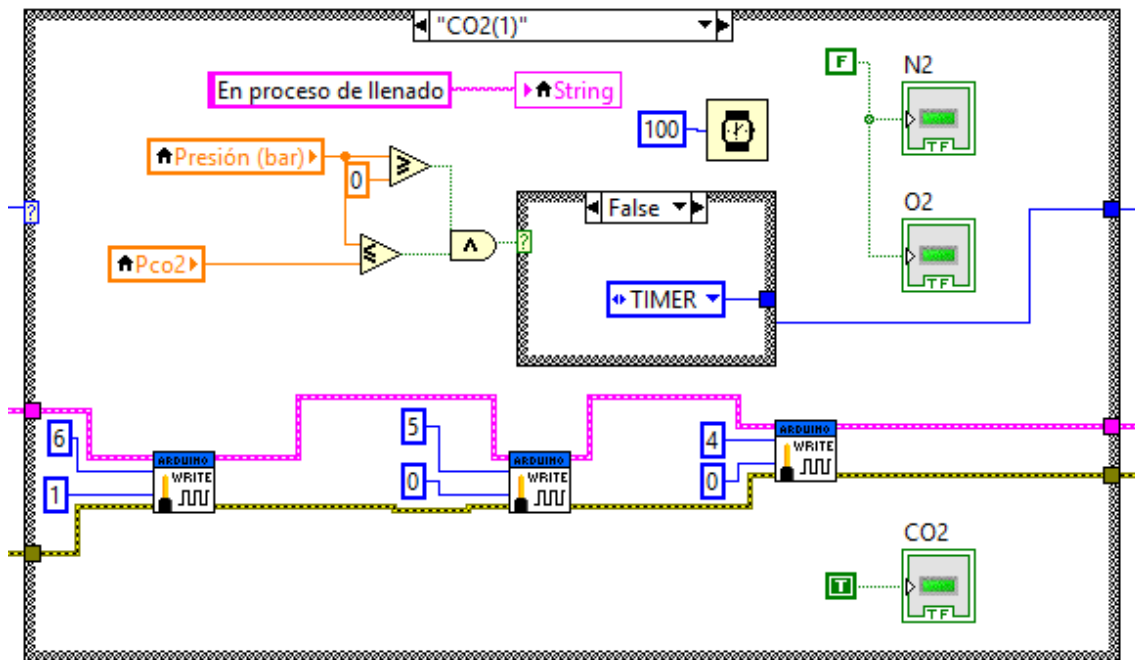


Figura 4.3.3.3.A Primera etapa de la secuencia

Una de las características común a todas las etapas de la secuencia de llenado, es que en la pantalla se muestra la leyenda "En proceso de llenado" para que el usuario pueda saber a simple vista si el llenado sigue realizándose correctamente.

En esta primera etapa, al tratarse de llenado de CO₂, se activa la salida número 6 de Arduino y se iluminará el LED indicativo de que la electroválvula de CO₂ se encuentra abierta. Mientras se cumpla la condición de que la presión instantánea en el depósito es menor que el límite de presión calculado o dado para dicho gas, la función continuará seleccionando este mismo caso. En el momento en que dicha condición deje de cumplirse, el selector de casos se situará en la posición TIMER, que conduce a la siguiente etapa de la secuencia.

Cabe destacar que se ha añadido a cada una de las etapas primarias de apertura de una electroválvula un temporizador de 100ms, de modo que el usuario pueda apreciar todas las lecturas que se obtienen, puesto que la actualización de valores sin temporizador es tan rápida, que el usuario no llegaba a apreciar valores exactos de la presión. Así, se obtiene una frecuencia de muestreo de presión de 10 lecturas por segundo. Con esto, además, se consigue eliminar algunos picos de presión que provocarían un cambio de etapa prematuro.

B. Segunda etapa

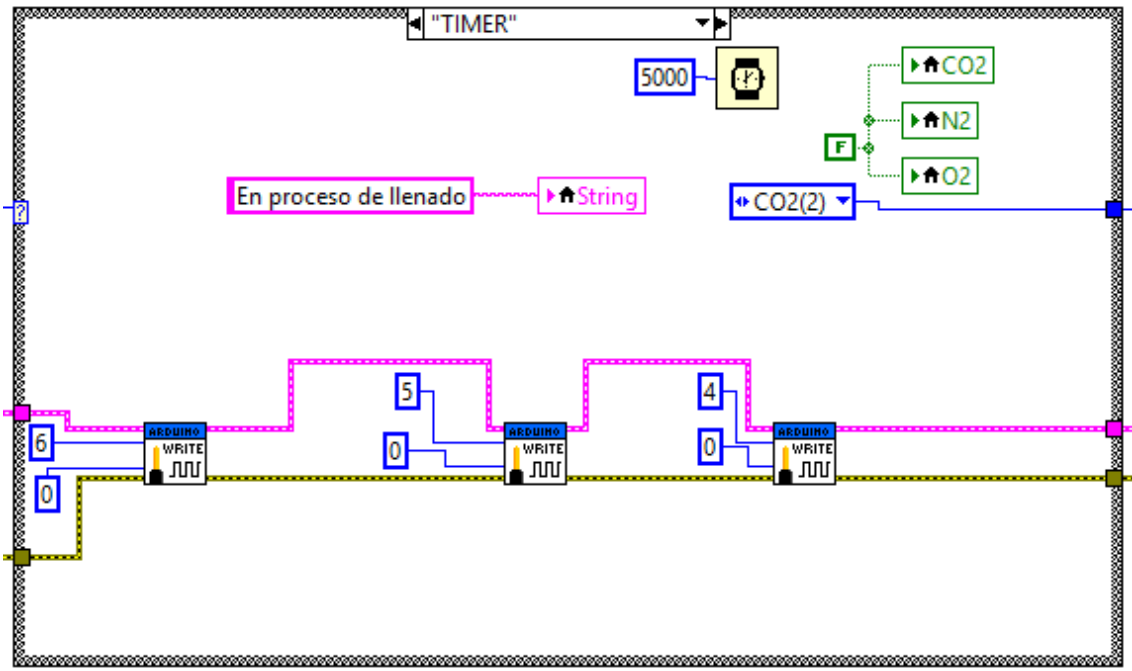


Figura 4.3.3.3.B Segunda etapa de la secuencia

Esta segunda etapa representa el estado de espera del programa para que se establezca la presión, tanto en el depósito como en el conducto, una vez se ha superado por primera vez el límite de presión del CO₂. El tiempo de espera definido es de 5s y durante este tiempo todas las electroválvulas permanecen cerradas, al igual que los LEDs indicativos. Una vez pasados los 5s, el selector genera la transición a la tercera etapa.

C. Tercera etapa

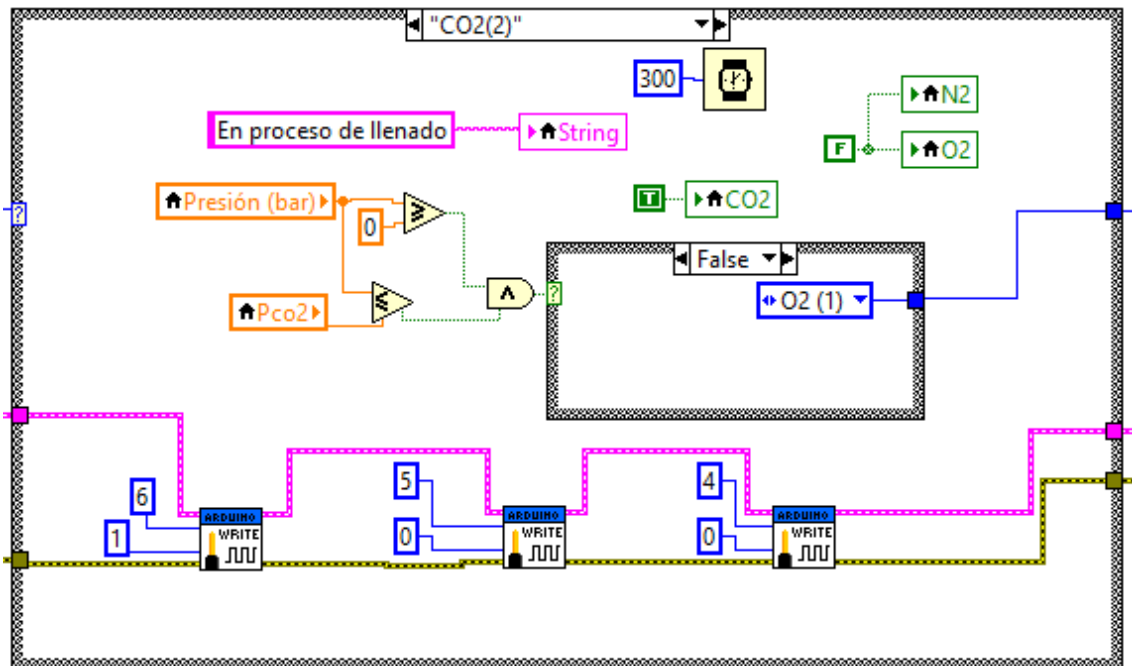


Figura 4.3.3.3.C Tercera etapa de la secuencia

La tercera etapa de la secuencia es exactamente igual que la primera, con la diferencia de que en el momento de dejar de cumplirse la condición, es decir, la presión supera otra vez el límite de presión del CO₂, el selector pasa a la siguiente etapa, apertura de la electroválvula del O₂ y cierre de la electroválvula que se tenía abierta.

Cabe destacar que en esta etapa y en todas las segundas aperturas de electroválvulas, es decir, aquéllas etapas posteriores a un tiempo de espera, se ha reducido la frecuencia de toma de datos del sensor a 3,33 lecturas por segundo, tratando de conseguir una mayor precisión en la presión a la hora de cambiar de etapa.

D. Cuarta etapa

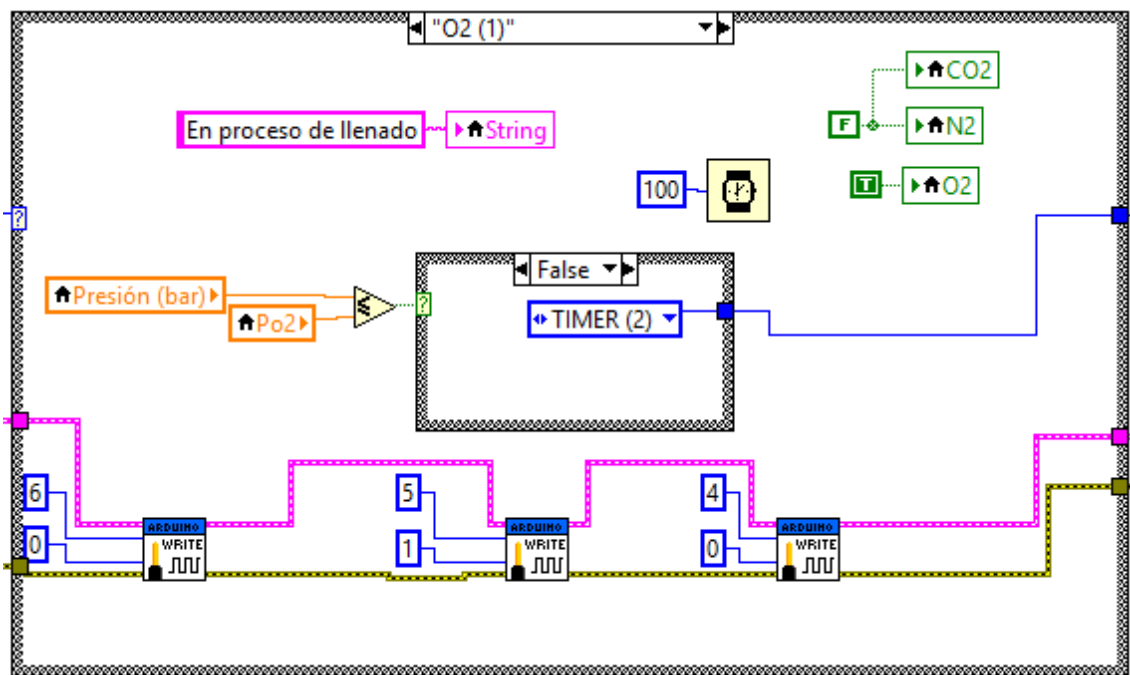


Figura 4.3.3.3.D Cuarta etapa de la secuencia

A partir de este momento, la presión ya es superior al límite de presión del CO₂, por lo que se cierra esta electroválvula (pin 6) y se abre la electroválvula que controla el O₂ (pin 5). Al mismo tiempo, pasa a iluminarse el LED indicativo de que dicha electroválvula se encuentra abierta.

Del mismo modo que en la etapa 1, mientras la presión instantánea del depósito continúe por debajo del límite de presión que se tiene para el O₂, el selector de etapas seguirá manteniéndose en la etapa actual. En el momento se alcance el límite, el selector pasará a la siguiente etapa (TIMER 2), para continuar con la secuencia requerida.

Cabe destacar que en todo momento los límites de presión pueden ser actualizados por el Usuario y automáticamente el programa los actualiza al valor nuevo que se haya dado, pero lo que ya haya ocurrido, no puede modificarse. Es decir, si llegados a esta etapa se detecta que el límite de presión de CO₂ era erróneo, no se podrá corregir la mezcla ya introducida en el depósito por razones obvias, y deberá detenerse el llenado y realiza un nuevo vaciado del depósito para volver a iniciar el llenado de nuevo con los límites correctos. Si el error se hubiera dado en el límite de O₂ durante esta etapa, solo con actualizarlo habría bastado.

E. Quinta etapa

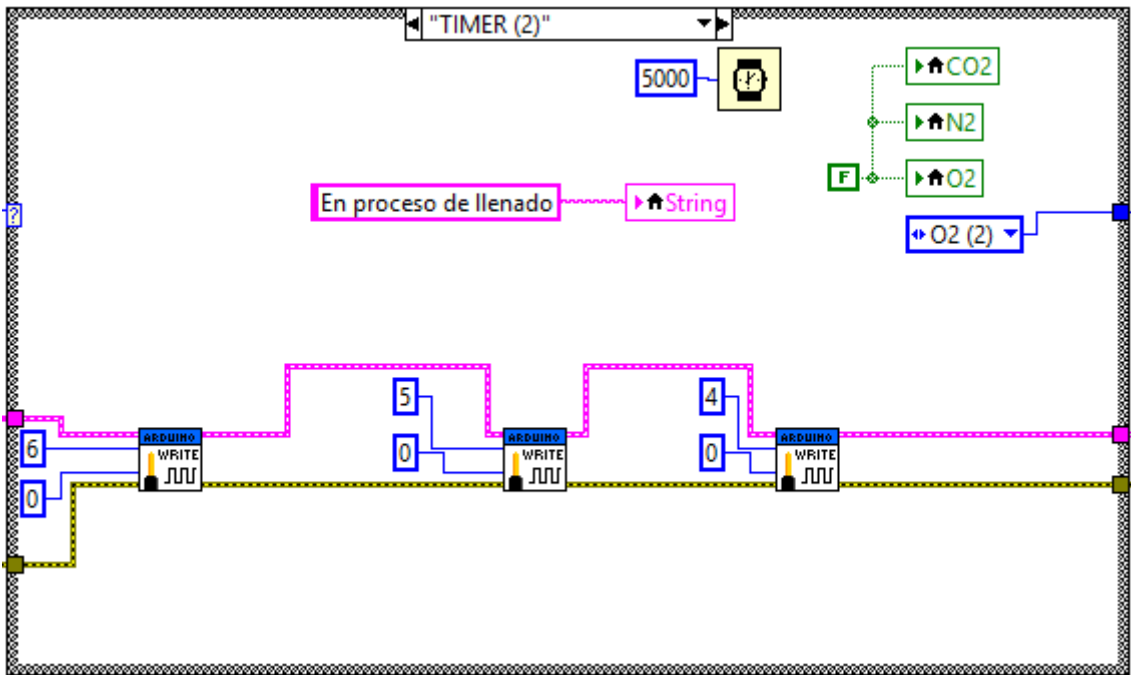


Figura 4.3.3.3.E Quinta etapa de la secuencia

Esta quinta etapa de la secuencia es idéntica a la etapa 2 con la salvedad de que una vez agotado el tiempo de espera, el selector dirige la secuencia hacia la etapa 6 (O₂ (2)) en lugar de hacia la etapa 2. Es decir, el selector conduce el programa hacia la segunda apertura de la electroválvula que controla el flujo de O₂.

F. Sexta etapa

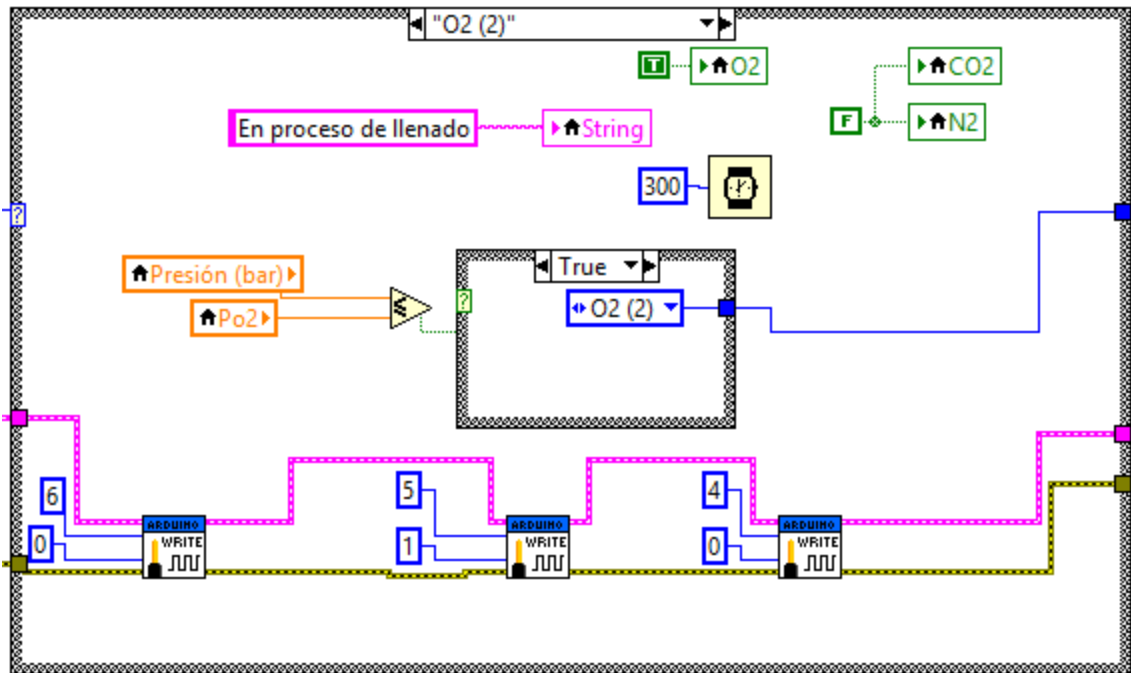


Figura 4.3.3.3.F Sexta etapa de la secuencia

En la sexta etapa vuelve a abrirse la electroválvula que controla el Oxígeno, y se realiza un segundo llenado mientras la presión se mantenga por debajo del límite establecido. Una vez superado, el selector de caso conduce al programa hacia la siguiente etapa, que será la primera apertura de la electroválvula controladora del flujo de N₂.

G. Séptima etapa

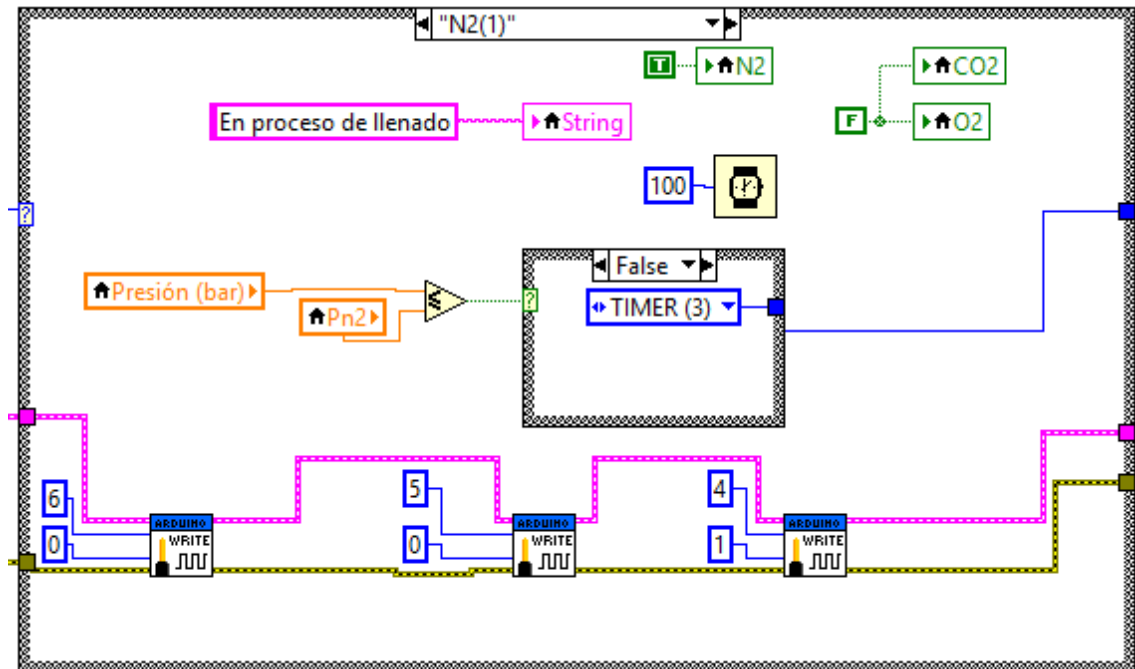


Figura 4.3.3.3.G Séptima etapa de la secuencia

La séptima etapa, tal y como se puede ver en el esquema de la secuencia requerida, corresponde con la primera apertura de la electroválvula controladora del flujo de N₂. Por tanto, se debe indicar a Arduino que su pin pase a tener un nivel lógico alto, de modo que se pueda energizar la electroválvula. El resto de pines deben mantenerse en nivel lógico bajo para que sus electroválvulas estén cerradas. El LED indicador de la apertura de la válvula se mantendrá encendido para que el Usuario visualice que gas está entrando al depósito.

Cuando se haya alcanzado por primera vez el límite de presión de dicho gas, es decir, se alcance la que será la presión objetivo dada por el usuario para el cálculo de las presiones límite de cada gas, el selector dirigirá el programa hacia la etapa correspondiente al último de los temporizadores.

Las presiones límite suelen tomarse entre los 8 y 9 bar, por lo que en este punto se tendrán valores de dicho orden. Valores superiores a 10 bar no se introducirán, pues el límite de medida del sensor de presión es ese. En caso de que el sensor midiera valores por encima de su límite, se tendría una saturación de la entrada analógica de Arduino, cosa que haría que el usuario viera por pantalla una presión ligeramente superior a 10 y constante, mientras que la presión real en el depósito seguiría subiendo. La sobretensión que soportaría Arduino, podría causar la rotura del microcontrolador, por lo que se recomienda forzosamente no demandar al conjunto presiones mayores a 10 bar.

H. Octava etapa

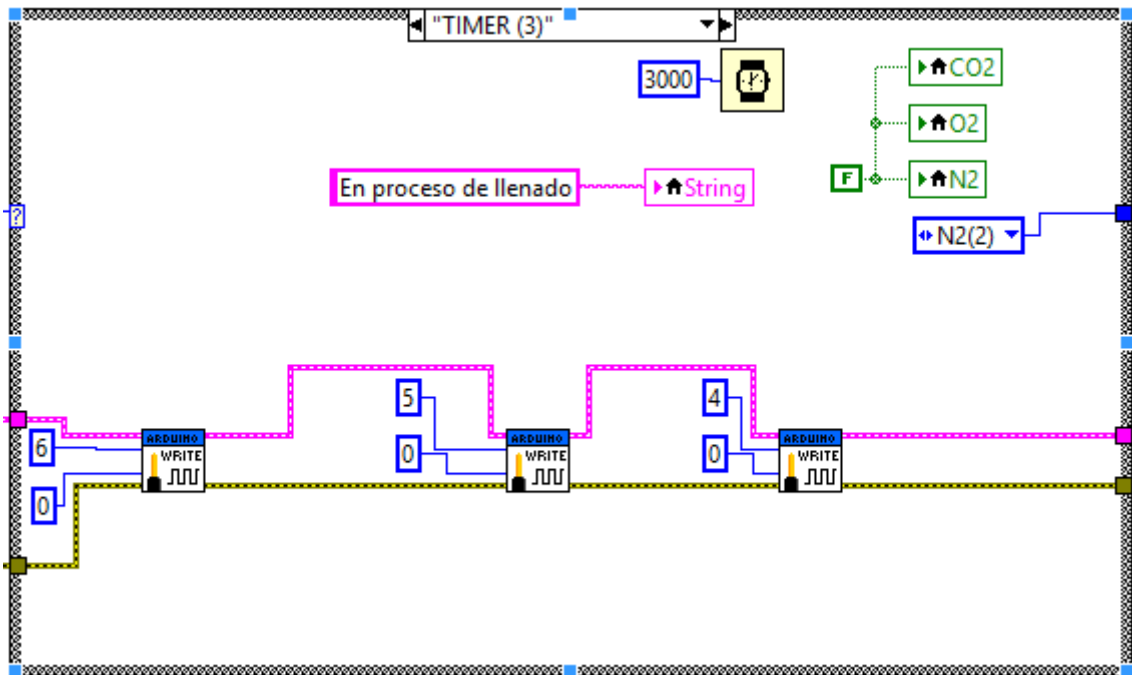


Figura 4.3.3.3.H Octava etapa de la secuencia

Esta octava etapa vuelve a ser un temporizador que conduce a la segunda apertura del último de los gases. En este caso se ha reducido el tiempo de espera a 3s, para limitar así las posibles pérdidas de presión debidas a fugas por los orificios en la tapa del depósito. Al igual que en los anteriores temporizadores, todas las electroválvulas se encuentran cerradas.

I. Novena etapa

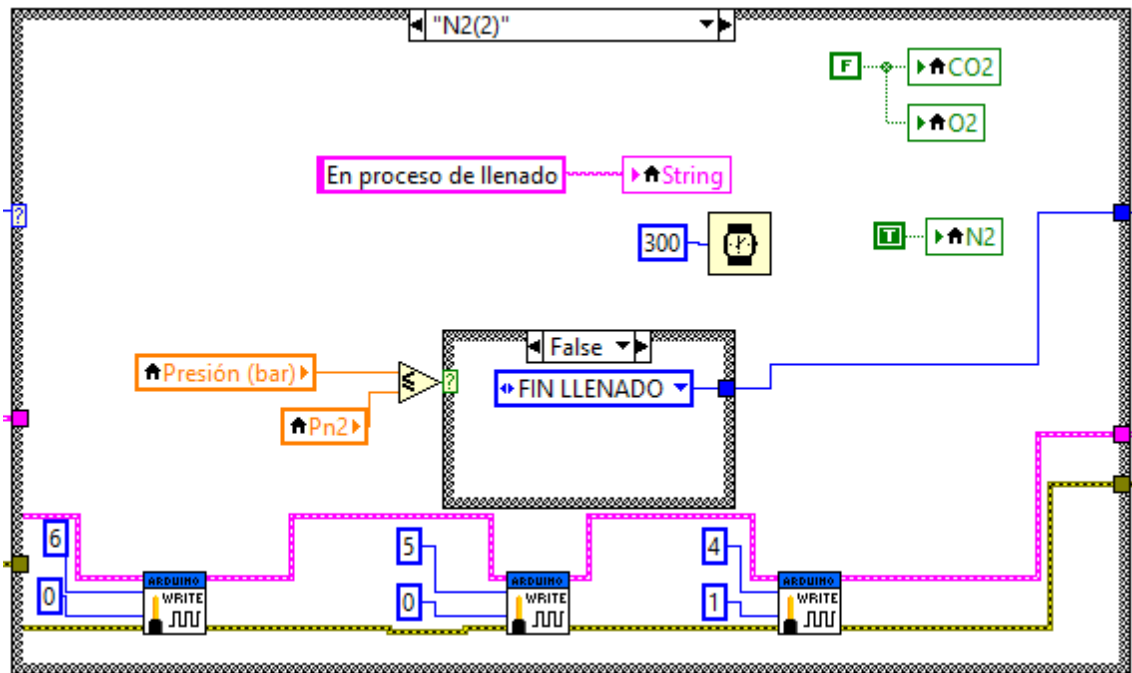


Figura 4.3.3.3.I Novena etapa de la secuencia

Al igual que las otras segundas aperturas, la frecuencia de toma de datos del sensor es de 3,33 lecturas por segundo. Esta etapa mantendrá la electroválvula del N₂ abierta hasta que se alcance definitivamente la presión objetivo, con lo que el selector pasará al estado de reposo final (FIN LLENADO) y la secuencia habrá finalizado hasta nuevo arranque.

J. Décima etapa

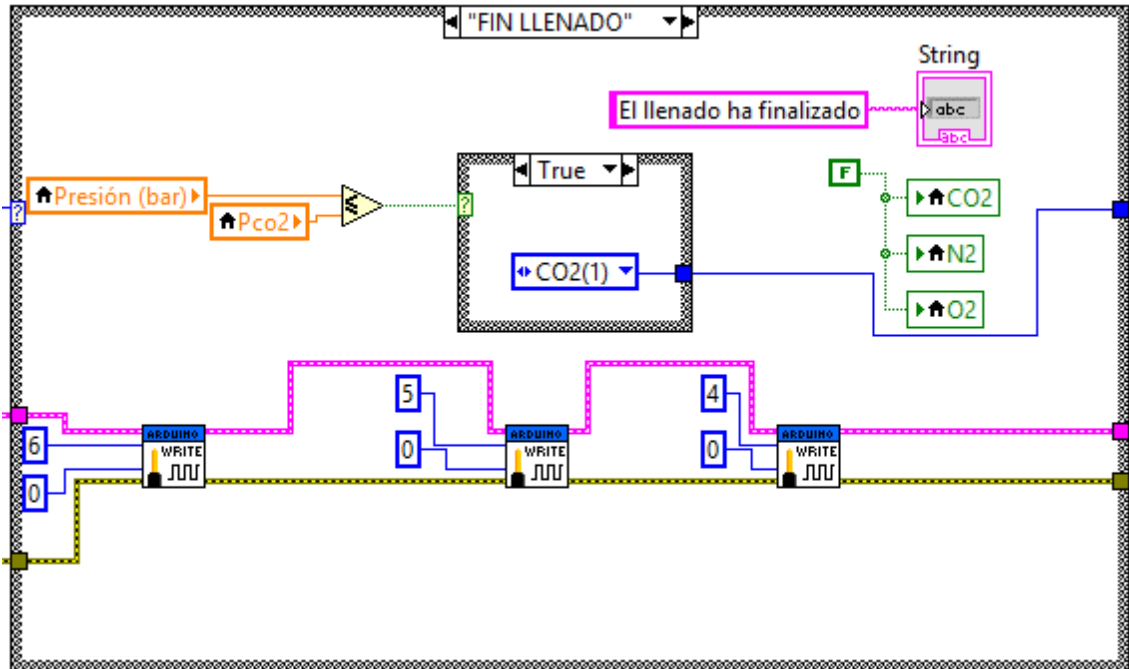


Figura 4.3.3.3.J Décima etapa de la secuencia

La etapa que marca el fin del llenado, pasa a cerrar todas la electroválvulas y muestra en pantalla la leyenda “El llenado ha finalizado”, para que el usuario sepa que aunque el botón de inicio/paro del llenado este activado, este ha finalizado y ya puede cambiar la posición del mismo. La condición existente en esta etapa es la necesaria para que cuando se vuelva a dar al botón de inicio, con una presión inferior al límite de CO₂, es decir, con el vacío realizado al conjunto, el selector pase al primero de los casos, de modo que la secuencia puede volver a iniciarse sin ningún problema.

En caso de que se realizará el vacío al depósito con el botón de inicio presionado, en el momento que la presión del depósito descendiera por debajo del límite de presión para CO₂ en ese momento, el selector cambiaría a la primera etapa y abriría la válvula de dicho gas, no permitiendo así la realización del vacío al conjunto.

4.3.3.4. Cierre de la conexión

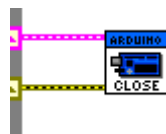


Figura 4.3.3.4 Close

Para cerrar la conexión con Arduino, una vez se ha clicado sobre el botón de *Parar programa*, se emplea la función *Close.vi*, aportada por LIFA. De este modo, la placa y el puerto quedan preparados para una próxima conexión.

4.3.4. Funcionamiento a nivel Usuario

El usuario, al abrir el programa, encontrará una sencilla interfaz de usuario a través de la cual recibirá la información necesaria para seguir la evolución del proceso de llenado y aportar los datos requeridos para que este pueda producirse a voluntad del usuario. En el momento que crea conveniente, deberá arrancar la ejecución del mismo, por lo que a partir de ese momento se empezará a ejecutar el código explicado anteriormente y se inicializará la conexión con Arduino, apareciendo en pantalla los primeros datos de presión.



Figura 4.3.4 Interfaz inicial del programa

4.3.4.1. Partes de la Interfaz

Como puede apreciarse en la figura anterior, la Interfaz de Usuario queda claramente dividida en 6 partes.

La primera de ellas, *Conexión*, muestra el estado de la conexión instantánea entre Arduino y el PC a través de un *Cluster* de datos. Además cuenta con el apartado *VISA resource* que permite introducir al programa el puerto en el que se encuentra conectado Arduino en caso de que este no lo detecte automáticamente.

A su lado se encuentra la sección donde se muestra al usuario la Presión instantánea en el depósito en tiempo real. Vemos como al inicio del programa, si el depósito no se ha llenado o vaciado previamente, se encuentra a presión atmosférica. En esta sección también puede verse la leyenda que muestra el programa en cada una de sus fases.

En la franja central se concentran las dos secciones que permiten calcular la mezcla a incluir en el depósito. Por un lado, el bloque de la izquierda, contiene 4 controles numéricos que permiten al usuario introducir los valores demandados por la función *EGR SINTETIC*, descrita anteriormente. En este mismo bloque, aparece el botón *Calcular*, de modo que cuando es presionado, los resultados aparecen en el bloque central de la derecha. Aquí se tiene un indicador que muestra en la pantalla los valores de la matriz *EGR*, por lo que se tiene la columna *Gas fractions*, que muestra los valores de las fracciones molares de cada uno de los gases, y la columna *Límites Presión*, que muestra los límites de presión acumulados que se han calculado. En caso de que estos últimos sean los límites deseados para realizar el llenado, presionando el botón *Transferir* estos pasarán a siguiente bloque. Cabe destacar que también se calculan los valores para el vapor de agua. Esto se debe a que, como se ha dicho, el agua se incluirá antes de iniciar el llenado, una vez se ha realizado el vacío, por lo que su presión parcial se deberá sumar a la de cada uno de los gases para obtener los límites de presión de cada uno.

El bloque inferior izquierdo contiene el control donde introducir manualmente los límites de presión deseados. Este control puede admitir los límites que desee dar el usuario, o puede indicar los *Límites presión* calculados anteriormente. Para esto último deberá haberse presionado el botón *Transferir*, tal y como se ha indicado. Por tanto, los límites mostrados en esa matriz, son los límites instantáneos que el programa toma para comandar las electroválvulas. Es importante cerciorarse de que estos son correctos antes de proceder al llenado del depósito, para así evitar posibles errores que provoquen el tener que parar el proceso posteriormente y repetirlo. En este mismo bloque se encuentra también la columna de LEDs llamada *Estado*, en la cual se indica al usuario de forma sencilla cual es la electroválvula que se encuentra abierta en cada momento.

Por último, en la parte inferior derecha, se encuentran dos botones. El primero de ellos, *Iniciar/Parar Llenado*, permite realizar la acción que su propio nombre indica. Para que el usuario pueda saber si el botón se encuentra presionado o no, este cambia de color. Así, se tiene que cuando el botón no está presionado, su color es rojo, mientras que cuando lo está, su color es verde. Esta característica aporta sencillez en el uso del programa de cara al usuario, ya que este no debe recordar en qué posición ha dejado el botón. El otro de los botones, *Parar programa*, permite detener la ejecución del código y cerrar la conexión con Arduino, de modo que deberá ser presionado siempre que se haya terminado de usar el programa.

Como se puede apreciar, la interfaz diseñada tiene una estructura sencilla e intuitiva. Además aporta al usuario todos los datos necesarios para que puede seguir el proceso de forma completa y detectar posibles fallos, como puede ser una pérdida de la conexión. Su uso no es nada complejo, demandando del usuario solamente aquellos datos estrictamente necesarios para poder llevar a cabo el llenado a voluntad del mismo.

A continuación, pasa a explicarse las distintas fases del llenado que podrá ver el usuario en la interfaz. Estas fases se corresponden con las descritas anteriormente.

4.3.4.2. Procedimiento de llenado

Al iniciar el programa, puesto que el botón de *Iniciar/Parar Llenado* no se encuentra presionado (Color rojo), todas las electroválvulas se encontrarán cerradas. En este momento, el usuario deberá introducir manualmente los límites de presión deseados en la columna *Límites actuales* o, en su defecto, calculas con la ayuda del programa, tal y como se ha explicado anteriormente.

Antes de poder iniciar el llenado, deberá cerciorarse que estos son correctos y que, además, ya se ha realizado el vacío al depósito. Esto se comprueba con el valor de la presión mostrada en la pantalla. La situación antes de dar al botón para iniciar el llenado debe ser la siguiente:



Figura 4.3.4.2.A Situación antes del llenado

Una vez alcanzada esta situación, el depósito estará listo para admitir la mezcla, el usuario deberá parar la bomba de vacío y presionar el botón *Iniciar/Parar Llenado*, que pasará a estar en color verde. Esta acción provocará que el programa inicie la secuencia de llenado, abriendo la primera de las electroválvulas, la del CO₂. En la Figura 4.3.4.2.B se recoge la situación de la interfaz una vez se ha iniciado el llenado del depósito.



Figura 4.3.4.2.B Situación durante el llenado

Como se puede apreciar, en el momento recogido en la figura, el indicador LED muestra que la electroválvula correspondiente al CO₂ se encuentra abierta. Puesto que la presión todavía no ha alcanzado el límite mostrado para este gas, se deduce que el código se encuentra realizando la primera etapa del llenado. Esto quiere decir que el usuario todavía deberá ver como se abren las electroválvulas correspondientes a los otros dos gases. Durante todo ese proceso, como se ya dijo, el usuario verá debajo de donde se indica la presión instantánea, la leyenda “En proceso de llenado”.

En este punto, si el usuario detectará errores en las presiones parciales, podría modificarlos a voluntad sin repercusiones para el llenado, a no ser que el límite de presión parcial de CO₂ nuevo ya haya sido rebasado por la presión instantánea del depósito, en ese caso, deberá detenerse el llenado y realizarse de nuevo el vaciado del depósito para empezar de nuevo el proceso.

Una vez realizada toda la secuencia de llenado del depósito, se alcanzará la etapa final del llenado, en la que todas las electroválvulas quedarán cerradas y así deberán indicarlo los LED de estado de las mismas.



Figura 4.3.4.2.C Situación al terminar el llenado

Una vez alcanzada la presión objetivo, que será el límite de presión del N₂, el llenado habrá finalizado. Por tanto, todas las electroválvulas se cierran y el programa muestra la leyenda "El llenado ha finalizado". Llegados a este punto, la mezcla se encuentra lista para ser empleada en la RCM o para realizar la inyección de combustible que permita crear una premezcla reactiva en el depósito, de modo que el ensayo se realizará con inyección indirecta.

En cualquier caso, y para tener constancia de la mezcla exacta que se va a emplear en el ensayo, se debe tomar una muestra de la mezcla creada para posteriormente analizarla con la ayuda de un cromatógrafo, tal y como se hará en el siguiente capítulo. Para esto se emplearán unas bolsas herméticas y se usará la descarga al ambiente que tiene el depósito en su tapa, cerrada por una válvula manual.

Antes de realizar este proceso, es conveniente pulsar de nuevo el botón de *Iniciar/Parar Llenado*, de modo que quede de color rojo. Así, en caso de que la presión del depósito baje por debajo del límite del CO₂, cosa que solo podría darse si el depósito se descarga completamente al ambiente y el límite es mayor de 1 bar, la secuencia no volverá a iniciarse hasta que el usuario no presione de nuevo el botón.

4.3.4.3. Errores de conexión

Los errores de conexión pueden darse en algunas situaciones, al estar trabajando con puertos USB del ordenador. El usuario deberá comprobar si Arduino se encuentra correctamente conectado al PC para eliminar así posibles errores. De todos modos, el programa detecta el error que se ha dado e informa al usuario de que ha ocurrido.

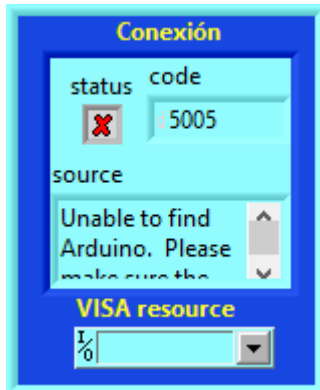


Figura 4.3.4.3 Error de detección

Como se puede apreciar en la figura, en este caso se muestra un código de error con un pequeño texto explicativo de que ocurre. En este caso, el motivo más obvio es que Arduino no se encuentra conectada a un puerto USB, por lo que se recomienda revisar las conexiones.

Otros errores, pueden deberse a que LabVIEW no tiene control sobre el puerto USB en el que se encuentre conectado Arduino. En este caso, a solución pasaría por cerrar el programa y volver a ejecutar. Muchas veces, este error viene generado por que la última vez que se empleó el programa no se cerró la conexión entre ambos.

Para evitar posibles errores, es muy recomendable presionar el botón de *Parar programa* antes de cerrar la ventana del mismo. Esto se debe a que la conexión con Arduino se cierra una vez se ha presionado este botón, tal y como se indicó en la descripción del código.

Otros errores que puedan darse, deberán interpretarse en función de la descripción del error que nos aporte el programa. Se recomienda que cuando se detecta un error se pruebe a parar la ejecución del programa presionando el botón *Parar programa*. Una vez detenido el programa, se desconecta y vuelve a conectar la conexión USB entre Arduino y el PC y se prueba a volver a ejecutar el programa. Generalmente el error deberá solucionarse de este modo. En caso de que no sea así, deberá comprobarse la configuración de los puertos USB. En principio, el PC a emplear se deja preparado para que todo funcione correctamente, futuras modificaciones de esta configuración podrían generar nuevos errores.

Capítulo 5

Validación del conjunto y estudio de repetitividad y estratificación

5.1. Introducción

Una vez desarrollado y puesto en marcha el conjunto, es momento de validar que los resultados que aporta son los deseados, es decir, que las muestras creadas son acordes a la demanda realizada por el Usuario.

Para este propósito se analizará, con la ayuda de un cromatógrafo, la exactitud de los resultados. Además se realizará un estudio de la repetitividad del conjunto a la hora de crear una misma mezcla y otro estudio de estratificación de la mezcla dentro del depósito.

Transportar las mezclas hasta el cromatógrafo es un proceso delicado, puesto que al ser mezclas muy similares al aire, pueden verse alteradas por este. Para conseguirlo, se dispone de bolsas herméticas que permiten tomar muestras de las mezclas y transportarlas sin que se vean contaminadas por el aire y así analizar la verdadera composición de las mismas.

Cabe destacar, que al no encontrarse instalada la bomba de jeringa, el agua no podrá introducirse en la mezcla, por lo que la fracción molar perteneciente al agua, pasará a formar parte de la fracción molar de CO_2 , que es la especie siguiente en la secuencia de llenado.

En este apartado se explicará inicialmente el proceso de toma de muestras y análisis de las mismas, para lo cual se introducirá el cromatógrafo. Posteriormente se aportarán los resultados obtenidos y su interpretación, tanto para dar el visto bueno al conjunto como para incluir las conclusiones a las que se llega en ambos estudios.

5.2. Toma de muestras

La toma de muestras de cada una de las mezclas se realiza con la ayuda de bolsas herméticas para muestras de gases. En concreto se emplean unas de la marca Restek, que vienen equipadas con una válvula con tubo a través de la cual se toma y extrae la muestra.

El tubo de toma de muestra de la válvula, se introduce en la salida del depósito diseñada para tal efecto, y posteriormente se abre primero la válvula manual del depósito y una vez se

ha establecido flujo de la mezcla, se abre la válvula de la bolsa, para lo cual se debe rotar la cabeza de la misma.

Disponer de una salida en el depósito con esta configuración, y que las bolsas tengan en su válvula ese pequeño tubo, propicia que la toma de muestras sea factible. En el caso de que el depósito de mezcla no contuviera esta salida, sería imposible tomar muestras y por tanto, no se habría podido evaluar la composición de las mezclas generadas.

Las bolsas para la toma de muestras deben emplearse después de haber sido sometidas a un completo proceso de vacío, de modo que en su interior no puedan contener gases que puedan dañar las muestras tomadas.



Figura 5.2 Toma de muestra de la mezcla

5.3. Cromatógrafo de gases

Para analizar las muestras de los distintos llenados, se emplea un Cromatógrafo de gases del Instituto de Tecnología Química (ITQ), que se encuentra al lado del departamento donde se desarrolla el presente trabajo. Se trata de un cromatógrafo de la marca Bruker, en concreto el modelo 450-GC, fabricado por el grupo Varian que fue absorbido por Bruker.

El método de funcionamiento es sencillo e intuitivo por lo que con una pequeña explicación por parte del técnico responsable del cromatógrafo, cualquier usuario puede estar capacitado para realizar análisis e interpretar los datos.

Para empezar a analizar, antes de nada, se debe preparar la secuencia de análisis a realizar. Para ello, el cromatógrafo se encuentra conectado a un ordenador que lleva incorporado el Software para tal efecto, llamado *Galaxie*. Este programa permite definir el nombre con el que guardar los resultados del análisis y el método de análisis a emplear.

Los métodos de análisis fueron desarrollados por los técnicos del ITQ, desde donde se indicó que el método más apropiado para el análisis de nuestras muestras es el llamado *RRGA_last* puesto que está diseñado para identificar los gases de las muestras que se quieren analizar entre otros.

Una vez seleccionado el método y definida la secuencia de análisis a realizar, se procede a poner en ejecución la misma, de modo que el cromatógrafo pasa a estar disponible para llevar a cabo los distintos análisis. Es interesante realizar antes de los análisis propios, unos cuantos análisis de aire, que permitirán calibrar y calentar el cromatógrafo, de modo que no incurra en errores al realizar los análisis. A medida que vayan realizándose estos, el programa marcará en color verde aquellos que se encuentren realizados, como en la figura anterior.

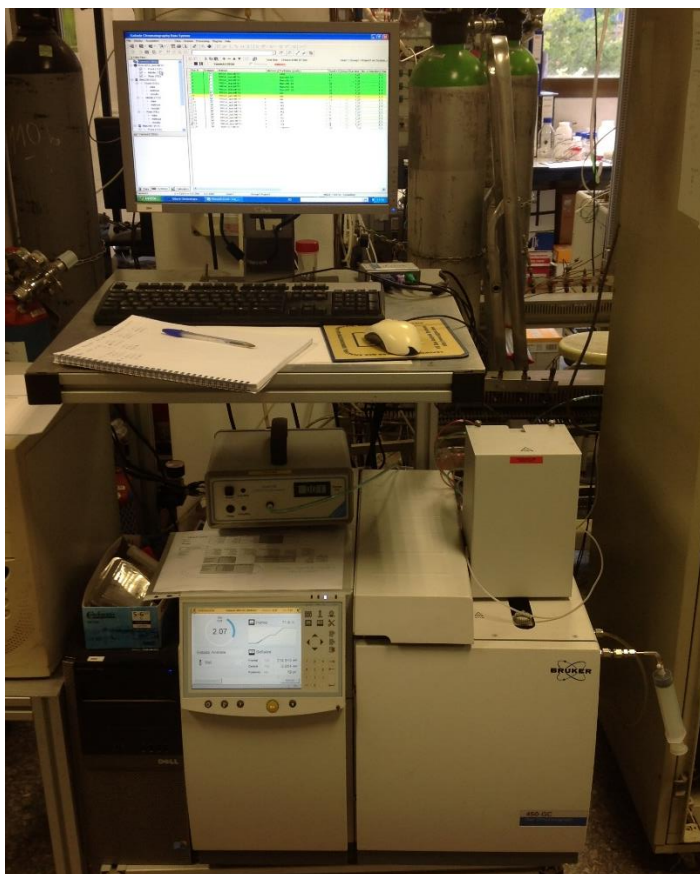


Figura 5.3 Conjunto del cromatógrafo

Teniendo el cromatógrafo preparado puede empezar introducirse la muestra en el cromatógrafo con la ayuda de una jeringa con válvula que limita la posible contaminación de la misma (ver figura). Una vez se ha introducido toda la muestra que se tiene en la jeringa, se presiona el botón de inicio del análisis, justo debajo de la pantalla táctil del cromatógrafo.

Después de poco más de 7 minutos, la muestra ha sido analizada y se almacena el documento con los resultados en el PC controlador del cromatógrafo. Los resultados vienen dados en las unidades de la señal detectada por el cromatógrafo, $mV \cdot min$. Para

obtener los resultados en forma de fracciones molares se deben obtener unos factores de respuesta. El cálculo de los factores se realiza mediante el análisis de una muestra conocida. En este caso, el cálculo de los mismos se realiza con distintos análisis de aire, de modo que sabiendo la composición molar del aire, y viendo los valores en $mV \cdot min$ recogidos por los distintos análisis de aire, se pueden obtener estos sencillos factores de conversión.

A partir de este momento, ya se puede proceder a analizar los resultados, pues se tendrá la composición molar exacta de cada una de las mezclas y podrá compararse esta con las fracciones molares objetivo que se le dieron al programa a la hora de generar la mezcla.

5.4. Estudio de estratificación

El estudio de estratificación realizado consiste en tomar varias muestras de un mismo llenado del depósito habiendo dejado transcurrir unos tiempos determinados. Una vez tomadas y analizadas las muestras, se procede a su interpretación. Cabe destacar que cada una de las muestras es analizada 2 veces, de modo que se limitan los posibles errores generados por el cromatógrafo al realizar los análisis.

En el presente estudio, se han realizado dos llenados distintos. Para el primero de ellos se toman muestras a los 0, 10, 20 y 30 minutos de la finalización del llenado, mientras que para el segundo se añade además una muestra a los 45 minutos.

Una vez analizados, se ha procedido a determinar si existe alguna diferencia significativa entre las distintas muestras, lo que sería un indicativo de que la mezcla ha estratificado dentro del depósito de mezcla.

Para comprobar de forma visual y sencilla se han representado por un lado en error porcentual en la fracción molar respecto al objetivo frente al tiempo (2), y por otro un gráfico de barras con una barra para cada instante, de modo que se aprecia a simple vista si existe variación entre la mezcla.

$$\varepsilon = \frac{X_i - X_{obj}}{X_{obj}} \cdot 100 \quad (2)$$

Además para tener una validación numérica de la variabilidad, se ha definido un error relativo máximo entre valores de muestras secuenciales del 1.5%, de modo que los errores introducidos por el cromatógrafo queden abarcados dentro de ese error máximo.

$$\varepsilon_i = \frac{X_i - X_{i-1}}{X_{i-1}} \cdot 100 \leq 1.5 \% \quad (3)$$

5.4.1. Resultados

5.4.1.1. Primer caso

Para el primer llenado se decidió introducir al programa para calcular las presiones parciales una fracción másica de oxígeno del 15%. De este modo, las fracciones molares objetivo eran:

$$X_{CO_2} = 9.438\% \quad X_{O_2} = 13.5378\% \quad X_{N_2} = 77.025\%$$

Una vez analizados los resultados, se obtiene en primer lugar la siguiente gráfica:

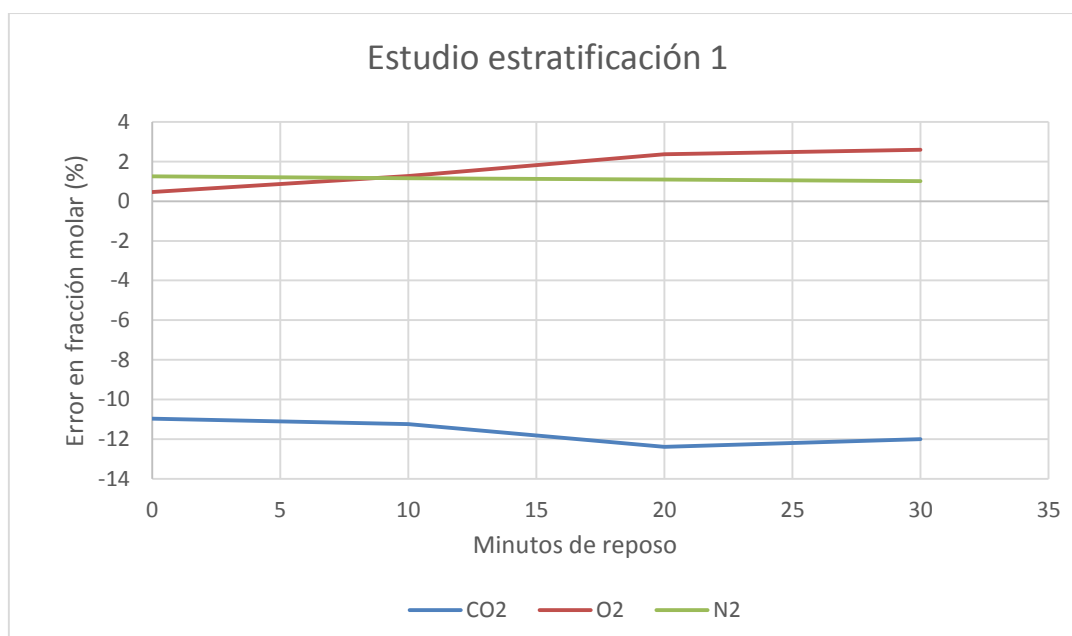


Figura 5.4.1.1.A Gráfico de errores en fracción molar

La linealidad de los valores de los distintos errores deja entrever que no hay indicio alguno de posible estratificación en el depósito, pero para confirmar esta posibilidad, deberán aprovecharse las otras dos herramientas de evaluación que se han nombrado.

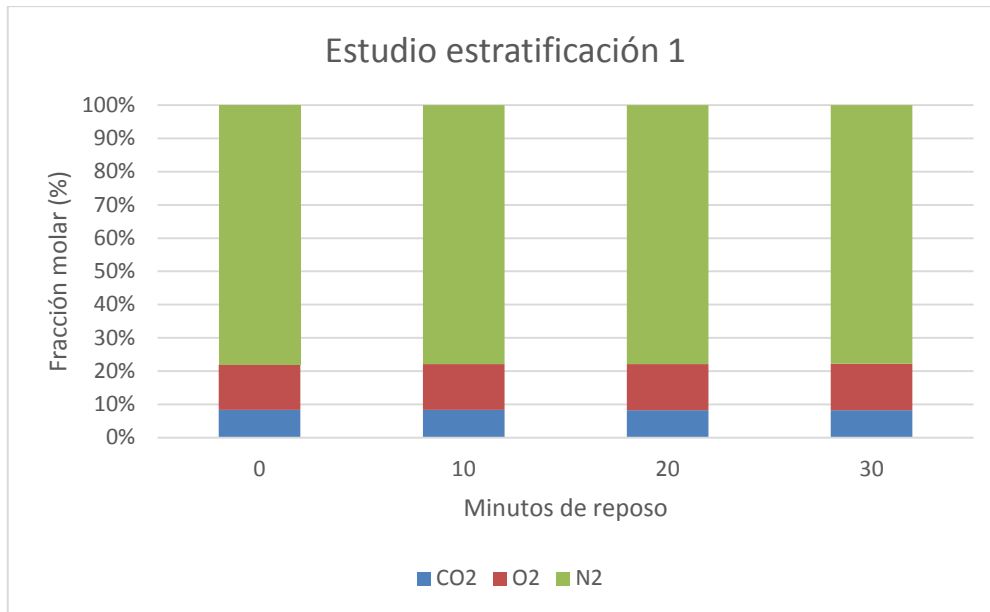


Figura 5.4.1.1.B Gráfico composición de las muestras

A simple vista, se aprecia que la composición de cada una de las muestras es prácticamente idéntica. Para confirma definitivamente que esto es así, se recurre a los valores numéricos de errores entre muestras secuenciales.

	0	10	20	30
CO ₂	-0.29862203	-1.28879824	0.4334367	
O ₂	0.80739958	1.08089356	0.21320032	
N ₂	-0.10862166	-0.05164375	-0.083966	

Tabla 5.4.1.1 Resultados numéricos de errores relativos

A la vista de los resultados numéricos, se comprueba que la estratificación no se ha manifestado en este primer caso de análisis, pudiéndose comprobar en cada uno de los 3 indicadores que se han desarrollado con tal propósito.

5.4.1.2. Segundo caso

Para el segundo llenado se decidió introducir al programa para calcular las presiones parciales una fracción másica de oxígeno del 21%. De este modo, las fracciones molares objetivo eran:

$$X_{CO_2} = 2.54\% \quad X_{O_2} = 18.988\% \quad X_{N_2} = 78.475\%$$

Como se puede apreciar, este caso es muy similar al aire, pues la composición del aire sería la dada para una fracción másica de aire del 23%. Esta característica, genera que la fracción molar objetivo de CO₂ sea muy baja. Por tanto, cualquier ligero error existente en el llenado, al calcularlo con la ecuación (2), como la fracción objetivo es muy pequeña también, se generan altos porcentajes de error.

En este análisis no se está analizando la exactitud del conjunto, sino si se produce fenómeno de estratificación o no dentro del depósito al dejar la mezcla reposando en él durante un tiempo determinada. Así que los errores que se calculan solo sirven para comprobar si estos son constantes y, por tanto, la composición de las distintas muestras es la misma.

Dicho esto, puede procederse al análisis de este segundo caso, que permitirá seguir confirmando la hipótesis de la no existencia de estratificación, o por el contrario descartarla.

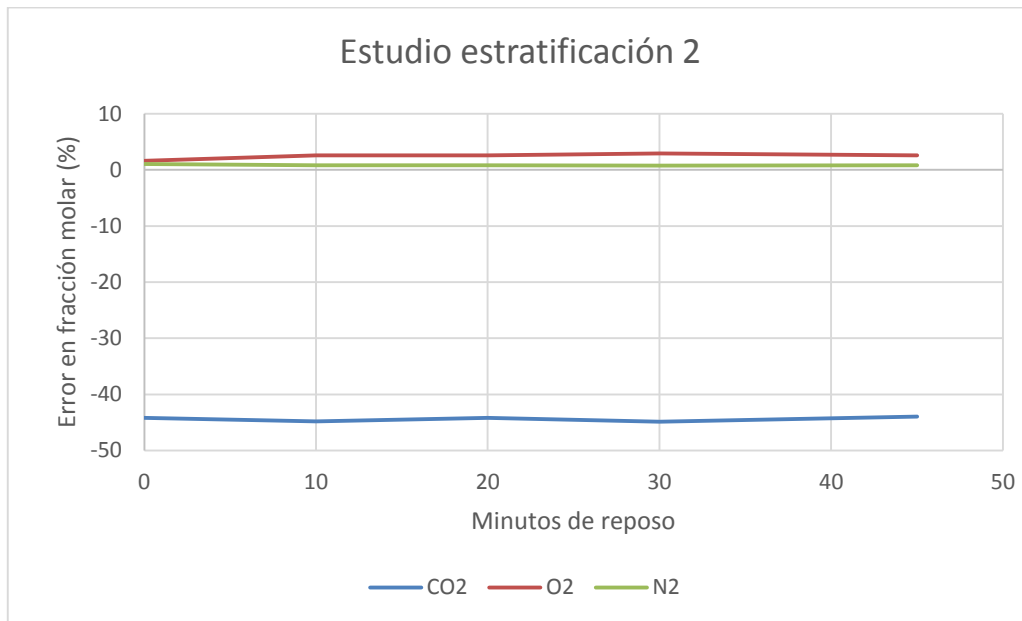


Figura 5.4.1.2.B Gráfico de errores en fracción molar

La casi perfecta linealidad de los valores de los distintos errores deja entrever que no hay indicio alguno de posible estratificación en el depósito. Para confirmar esta posibilidad, deberán aprovecharse las otras dos herramientas de evaluación para este caso. Cabe indicar que aunque el error del CO₂

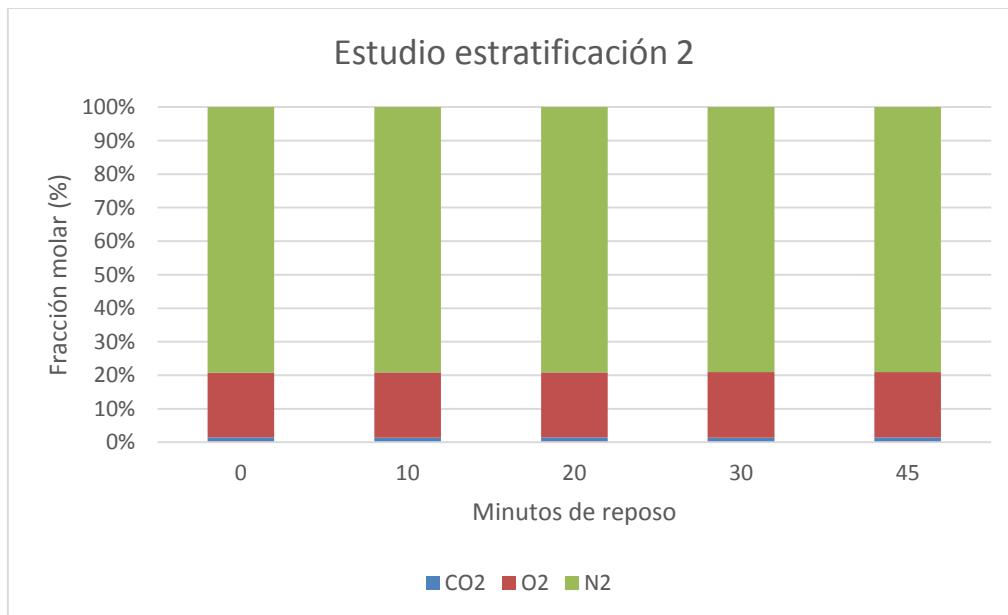


Figura 5.4.1.2.B Gráfico composición de las muestras

Este segundo gráfico de barras indica que la mezcla creada se mantiene constante para cada una de las muestras, incluso cuando ya han pasado 45 minutos desde que se llenó el depósito. Para definitivamente poder confirmar la hipótesis de la no existencia de estratificación, deben comprobarse los valores numéricos obtenidos en este segundo estudio.

	0	10	20	30	45
CO ₂	-1.17450674	1.15811375	-1.1617322	1.57262079	
O ₂	0.97723654	-0.01863715	0.31978058	-0.29557964	
N ₂	-0.21678978	-0.01590427	-0.0579371	0.04520821	

Tabla 5.4.1.2 Resultados numéricos de errores relativos

Todos los valores calculados cumplen la condición definida al inicio de este apartado a excepción del valor de error relativo entre la medida de CO₂ de 30 minutos y la de 45 minutos. La cantidad en la que esta medida sobrepasa el error no es para nada significativa, y mucho menos si se tiene en cuenta el valor medido en estos ensayos, puesto que se tienen medidas de 1.4% y 1.42%. El problema es que al ser valores tan pequeños, al emplear la ecuación (3) y dividir por un valor pequeño, el error porcentual se eleva rápidamente para errores absolutos muy pequeños.

Dicho todo esto, se pueden tomar como válidos todos los valores de errores relativos de la tabla anterior.

5.4.2. Conclusiones

Una vez realizado el estudio de estratificación para dos llenados distintos y con distinta composición, a la vista de los resultados, se concluye que la mezcla no estratifica dentro del depósito de mezcla.

5.5. Número de muestras necesarias

Para determinar la repetitividad del sistema se necesita saber el número de muestras necesarias para que la medida sea representativa.

Se define un error (absoluto o relativo) y se calcula el número de muestras necesarias para que la semi-amplitud de nuestro intervalo de confianza con un nivel de confianza del 95% sea menor que dicho error.

En este caso se define el error W y el error relativo P (en porcentaje) como:

$$W = \frac{P}{100} \bar{x}$$

Donde \bar{x} es el valor medio de nuestra respuesta (en este caso el valor medio de la fracción molar de cada una de las especies).

Como el intervalo de confianza se define:

$$IC = [\bar{x} - \mu, \bar{x} + \mu]$$

Con:

$$\mu = \frac{t_{\alpha/2, n-1}}{\sqrt{n}} \sigma$$

Donde $t_{\alpha/2, n-1}$ es el valor de la distribución t de Student para el cuantil $1 - \alpha/2$ y n-1 grados de libertad, σ representa la desviación típica y n el número de muestras.

Para que el error sea menor que la semi-amplitud del intervalo de confianza:

$$\mu = \frac{t_{\alpha/2, n-1}}{\sqrt{n}} \sigma \leq W = \frac{P}{100} \bar{x}$$

Se selecciona el nivel de confianza del 95% $\rightarrow \alpha = 0.05 \rightarrow$ se necesita la t de Student para el cuantil $1 - \alpha/2 = 0.975$.

Comienza así un proceso iterativo, en el cual se asume un número de muestras n , con ese valor se busca la t de Student de cuantil 0.975 y $n-1$ grados de libertad y finalmente se comprueba si se cumple la desigualdad anterior.

Realizado el proceso iterativo se obtiene un valor de $N=11$, por lo que este será el número de muestras necesarias en el caso más desfavorable.

5.6. Estudio de repetitividad

Para realizar el estudio de repetitividad se hacen llenados sucesivos del depósito con las mismas condiciones de entrada al programa. Puesto que se ha comprobado que no existe estratificación en el depósito, las muestras se toman en el instante 0 después del llenado, procediendo posteriormente a su vaciado.

Con esto, se realizan tres estudios distintos y para evaluar su repetitividad se obtienen los valores de la media de composición, representativa para 11 muestras, la desviación estándar de las 11 muestras y el coeficiente de variabilidad, en el que se basará el estudio para ver la repetitividad.

5.6.1. Resultados

5.6.1.1. Primer caso

Para el primer llenado se decidió introducir al programa para calcular las presiones parciales una fracción másica de oxígeno del 21%. De este modo, las fracciones molares objetivo eran:

$$X_{CO_2} = 2.54\% \quad X_{O_2} = 18.988\% \quad X_{N_2} = 78.475\%$$

Una vez analizadas las 11 muestras se llega a los siguientes resultados:

	Media	Desviación estándar	Coficiente de variabilidad
CO ₂	0.01343624	0.00239329	17.8121705
O ₂	0.19386133	0.00548971	2.83177069
N ₂	0.79270243	0.00614589	0.77530797

Tabla 5.6.1.1 Resultados repetitividad

A la vista de los resultados, se aprecia que la repetitividad es muy buena, pues aunque el coeficiente de variabilidad del CO₂ es ligeramente elevado, como se comentó anteriormente esto se debe al pequeño valor que tiene la media, pues al dividir por la media la desviación estándar, el valor del coeficiente se dispara. El resto de casos permitirán demostrar si se confirma la repetitividad del conjunto. Cabe destacar que el gas más importante en este estudio es el Oxígeno, pues es este el que influye en la combustión, siendo el resto menos importantes.

5.6.1.2. Segundo caso

Para el segundo llenado se decidió introducir al programa para calcular las presiones parciales una fracción másica de oxígeno del 17%. De este modo, las fracciones molares objetivo eran:

$$X_{CO_2} = 7.14\% \quad X_{O_2} = 15.35\% \quad X_{N_2} = 77.5\%$$

Analizadas las 11 muestras se tienen los siguientes resultados:

	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variabilidad
CO ₂	0.050396	0.00196071	3.89059809
O ₂	0.14695413	0.00157208	1.06977335
N ₂	0.80264988	0.00234116	0.29167897

Tabla 5.6.1.2 Resultados repetitividad

Como puede apreciarse, la variabilidad de los tres gases es prácticamente imperceptible, lo que denota una alta repetitividad del sistema en estos llenados también.

5.6.1.3. Tercer caso

Para el tercer y último llenado se decidió introducir al programa para calcular las presiones parciales una fracción másica de oxígeno del 11%. De este modo, las fracciones molares objetivo eran:

$$X_{CO_2} = 13.89\% \quad X_{O_2} = 9.93\% \quad X_{N_2} = 76.1\%$$

Analizadas las 11 muestras se tienen los siguientes resultados:

	Media	Desviación estándar	Coefficiente de variabilidad
CO ₂	0.05488047	0.00260553	4.74765071
O ₂	0.09198416	0.00432792	4.70507263
N ₂	0.85313536	0.00235968	0.27658865

Tabla 5.6.1.3 Resultados repetitividad

Este último ensayo, permite confirmar definitivamente que la repetitividad del conjunto es muy buena, siendo la variabilidad de composición de cada una de las muestras inferior al 5%.

Que el programa sea repetitivo es importante a la hora de crear muestras, pues permitirá reproducir condiciones similares para distintos ensayos con la RCM, de modo que la influencia por la variabilidad del EGR sintético creado será prácticamente nula.

5.6.2. Conclusiones

Una vez realizado el estudio de repetitividad para tres condiciones de llenado distintas y con distinta composición, a la vista de los resultados, se concluye que el conjunto es repetitivo con una variabilidad inferior al 5% en la composición de la mezcla

5.7. Validación del conjunto

Con los valores de la media de los estudios de repetitividad anteriores, se procede a validar la exactitud del conjunto a la hora de crear distintas mezclas. Para ello se calcula el error relativo entre la media de las 11 muestras de cada caso y el valor objetivo que se perseguía al realizar esos mismos llenados, según la siguiente fórmula:

$$\varepsilon (\%) = \frac{\bar{x} - X_{obj}}{X_{obj}} \cdot 100$$

Con esto, se procede a realizar la validación.

5.7.1. Resultados

Los resultados obtenidos, en el mismo orden que en el estudio anterior, son los siguientes:

5.7.1.1. Primer caso

Con la media de estas 11 muestras, y los objetivos aportados anteriormente, se tienen estos valores de errores:

	Media	Objetivo	Error relativo
CO ₂	0.01343624	0.025375	-47.0492867
O ₂	0.19386133	0.189875	2.09944945
N ₂	0.79270243	0.78475	1.01337074

Tabla 5.7.1.1 Errores relativos

Tal y como recoge *Escudero (2014)*, un error relativo determinado en el valor del oxígeno, se traduce en un error relativo del mismo orden de magnitud en el factor tiempo de retraso de una combustión. La influencia del resto de errores es prácticamente despreciable, por lo que pese a que también se tendrán en cuenta, es el error de O₂ el que determinará si los resultados son válidos o erróneos.

En este primer caso, se aprecia un gran error en el CO₂, como se viene repitiendo en cada uno de los análisis de este caso, esto se debe a los bajos valores objetivo que se perseguían en este caso, siendo, con diferencia, el caso más crítico. En cuanto al error en el O₂, se puede decir que se consiguen valores del mismo muy buenos, pues en ensayos experimentales es difícil obtener una precisión mucho mejor que el 2% que se obtiene en este. Para el caso del N₂ puede decirse que el conjunto es muy exacto al introducirlo.

De este primer caso se concluye que el programa aportará muestras de EGR sintético válidas para realizar análisis con la RCM y que aporten resultados muy precisos.

5.7.1.2. Segundo caso

Con la media de estas 11 muestras, y los objetivos aportados anteriormente, se tienen estos valores de errores:

	Media	Objetivo	Error relativo
CO ₂	0.050396	0.071375	-29.3926484
O ₂	0.14695413	0.1535	-4.26441187
N ₂	0.80264988	0.775125	3.55102403

Tabla 5.7.1.2 Errores relativos

Este segundo caso, aporta resultados mucho mejores en cuanto al error del CO₂. Lo que denota que a medida que aumenta la cantidad del mismo, se gana en precisión. El estudio de estratificación ya dejó entrever que esto sucedía así, pues para el primer caso el error del dióxido se reducía a cerca del 10%. Volviendo a este estudio, es interesante continuar viendo que las composiciones en nitrógeno, y, sobre todo, la más importante, la de oxígeno, tienen errores bajos, denotando una buena precisión del conjunto a la hora de crear mezclas.

5.7.1.3. Tercer caso

Con la media de estas 11 muestras, y los objetivos aportados anteriormente, se tienen estos valores de errores:

	Media	Objetivo	Error relativo
CO ₂	0.05488047	0.1389955	-60.516366
O ₂	0.09198416	0.09925	-7.32074379
N ₂	0.85313536	0.760625	12.1624143

Tabla 5.7.1.3 Errores relativos

A la vista de los resultados de este tercer caso, se advierte que por algún motivo desconocido, las muestras fueron contaminadas con aire. Esta contaminación puede provenir de un mal funcionamiento de la válvula de las bolsas herméticas o de fugas a la hora de tomar una pequeña cantidad de cada una de las bolsas con ayuda de la jeringa.

Lo que si queda claro, es que para la validación de resultados, este caso debe ser descartado por motivos obvios. Pues aunque a la hora de realizar los llenados se comprobó que la presión límite de CO₂ se alcanzaba satisfactoriamente, los resultados denotan que parte de ese CO₂, que debería ser más abundante que el propio oxígeno, se perdió a la hora de introducir la mezcla al cromatógrafo.

5.7.2. Conclusiones

Se concluye que el programa es válido a la hora de generar mezclas con un error máximo en el oxígeno inferior al 5%, por lo que hará a la RCM incurrir en un error en el tiempo de retraso igual o inferior, debido a la correlación existe entre ambos errores y documentada por Escudero (2014)

Capítulo 6

Conclusiones y trabajos futuros

6.1. Conclusiones

Una vez concluido el trabajo, puede decirse que los objetivos iniciales planteados han sido resueltos satisfactoriamente, y se pueden aportar las siguientes conclusiones:

- Se ha diseñado el Hardware necesario para crear la Unidad Electrónica de Control del colector de gases, tanto para alimentar como para poder comandar las electroválvulas.
- Se ha desarrollado el Software controlador del Hardware anterior, de forma que ambos en conjunto forman la Unidad Electrónica de Control y permiten comandar el colector para crear la mezcla deseada por el usuario. Este Software cumple con todos los requisitos demandados en el planteamiento del mismo
- La validación del programa ha resultado exitosa, y se ha comprobado que la repetitividad del mismo es muy buena.
- Se concluye que no existe estratificación de la mezcla una vez creada, existiendo una distribución uniforme dentro del depósito de mezcla a lo largo del tiempo y desde el primer instante.

Además, es interesante indicar que se han iniciado relaciones con el ITQ para el análisis de muestras, cosa que se podrá aprovechar para analizar las muestras que se emplearán en cada ensayo, de modo que se conozca la composición exacta que se incluirá en la RCM.

6.2. Trabajos futuros

Concluido el Trabajo Fin de Grado, se detecta la necesidad inherente de realizar unos trabajos futuros de cara a poner en pleno funcionamiento definitivo el conjunto desarrollado. Los más destacados son:

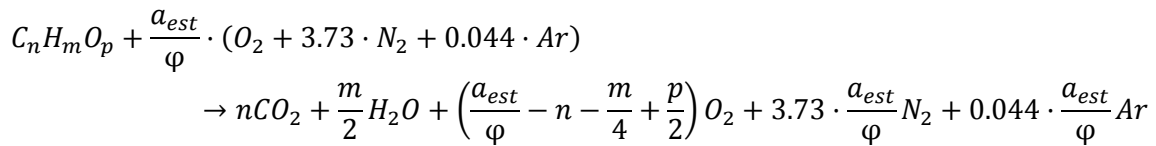
- Instalar la Bomba de Jeringa, de modo que pueda empezar a incluirse agua en la mezcla. En caso de que sea necesario comandar alguna de las electroválvulas para dicho fin, podría desarrollarse un nuevo Software similar al ya desarrollado para comandar solamente esa electroválvula o podría aprovecharse el existente y modificarse según las necesidades.
- Configurar el inyector del depósito para poder empezar a crear mezclas reactivas dentro del mismo.
- Realizar un estudio para cuantificar las fugas del depósito de mezcla
- Fijar el depósito y la bomba a la estructura soporte para que no puedan caerse.
- Con la experiencia adquirida, desarrollar una base de datos con los errores típicos de conexión entre Arduino y el PC.
- Realizar ensayos en la RCM con las mezclas creadas por el conjunto.
- Instalar el Hardware en una posición permanente donde no moleste y esté accesible.

Anexos

Anexo I

Cálculo de fracciones molares y presiones parciales del EGR sintético

El EGR sintético estará formado por los productos de una combustión completa de un hidrocarburo $C_nH_mO_p$ con aire seco estándar, de modo que se obtenga en los productos de la combustión la concentración de oxígeno deseada por el usuario. Apoyándonos en *Payri (2013)*, se tiene:



Donde $a_{est} = n + \frac{m}{4} - \frac{p}{2}$. La reacción anterior solo es válida para mezclas pobres.

Si el usuario desea un EGR con una fracción másica de oxígeno Y_{O_2} dada, debe cumplirse:

$$Y_{O_2} = \frac{PM_{O_2}}{PM_{mezcla}} \cdot X_{O_2} = \frac{PM_{O_2}}{PM_{mezcla}} \cdot \frac{\frac{a_{est}}{\varphi} - n - \frac{m}{4} + \frac{p}{2}}{n + \frac{m}{2} + \frac{a_{est}}{\varphi} - n - \frac{m}{4} + \frac{p}{2} + 3.73 \cdot \frac{a_{est}}{\varphi} + 0.044 \cdot \frac{a_{est}}{\varphi}} \\ PM_{mezcla} \cdot \frac{Y_{O_2}}{PM_{O_2}} = \frac{\frac{a_{est}}{\varphi} - n - \frac{m}{4} + \frac{p}{2}}{\frac{m}{4} + \frac{p}{2} + 4.77 \cdot \frac{a_{est}}{\varphi}} \quad [1]$$

El peso molecular de la mezcla de productos de la combustión se puede calcular como:

$$PM_{mezcla} \\ = \frac{n \cdot PM_{CO_2} + \frac{m}{2} \cdot PM_{H_2O} + \left(\frac{a_{est}}{\varphi} - n - \frac{m}{4} + \frac{p}{2}\right) \cdot PM_{O_2} + 3.73 \cdot \frac{a_{est}}{\varphi} \cdot PM_{N_2} + 0.044 \cdot \frac{a_{est}}{\varphi} \cdot PM_{Ar}}{\frac{m}{4} + \frac{p}{2} + 4.77 \cdot \frac{a_{est}}{\varphi}}$$

Sustituyendo en la expresión [1] se obtiene que:

$$\left(n \cdot PM_{CO_2} + \frac{m}{2} \cdot PM_{H_2O} + \left(\frac{a_{est}}{\varphi} - n - \frac{m}{4} + \frac{p}{2}\right) \cdot PM_{O_2} + 3.73 \cdot \frac{a_{est}}{\varphi} \cdot PM_{N_2} + 0.044 \cdot \frac{a_{est}}{\varphi} \cdot PM_{Ar}\right) \cdot \frac{Y_{O_2}}{PM_{O_2}} = \frac{a_{est}}{\varphi} - n - \frac{m}{4} + \frac{p}{2}$$

Donde todos los términos son conocidos, dependientes del combustible utilizado o declarados por el usuario, exceptuando el dosado relativo φ . A φ se le conocerá como dosado relativo auxiliar, y será el parámetro a determinar para poder conocer las fracciones molares de cada especie en el EGR sintético. Despejando la expresión anterior:

$$\begin{aligned} \frac{Y_{O_2}}{PM_{O_2}} \cdot \left(n \cdot PM_{CO_2} + \frac{m}{2} \cdot PM_{H_2O} - \left(n + \frac{m}{4} - \frac{p}{2} \right) \cdot PM_{O_2} \right) + \frac{Y_{O_2}}{PM_{O_2}} \cdot \frac{a_{est}}{\varphi} \\ \cdot (PM_{O_2} + 3.73 \cdot PM_{N_2} + 0.044 \cdot PM_{Ar}) = \frac{a_{est}}{\varphi} - n - \frac{m}{4} + \frac{p}{2} \\ \frac{a_{est}}{\varphi} - Y_{O_2} \cdot \frac{a_{est}}{\varphi} - \frac{Y_{O_2}}{PM_{O_2}} \cdot \frac{a_{est}}{\varphi} \cdot (3.73 \cdot PM_{N_2} + 0.044 \cdot PM_{Ar}) \\ = \frac{Y_{O_2}}{PM_{O_2}} \cdot \left(n \cdot PM_{CO_2} + \frac{m}{2} \cdot PM_{H_2O} \right) - Y_{O_2} \cdot a_{est} + a_{est} \\ \varphi = \frac{a_{est} \cdot \left[(1 - Y_{O_2}) - \frac{Y_{O_2}}{PM_{O_2}} \cdot (3.73 \cdot PM_{N_2} + 0.044 \cdot PM_{Ar}) \right]}{a_{est} \cdot (1 - Y_{O_2}) + \frac{Y_{O_2}}{PM_{O_2}} \cdot \left(n \cdot PM_{CO_2} + \frac{m}{2} \cdot PM_{H_2O} \right)} \\ \varphi = \frac{PM_{O_2} \cdot (1 - Y_{O_2}) - Y_{O_2} \cdot (3.73 \cdot PM_{N_2} + 0.044 \cdot PM_{Ar})}{PM_{O_2} \cdot (1 - Y_{O_2}) + \frac{Y_{O_2}}{a_{est}} \cdot \left(n \cdot PM_{CO_2} + \frac{m}{2} \cdot PM_{H_2O} \right)} \end{aligned}$$

Si se trabajase con mezclas PRF de isoctano y n-heptano se debe tener en cuenta la siguiente:

Isoctano: i-C₈H₁₈

n-Heptano: n-C₇H₁₆

Por tanto, para una mezcla PRF con un tanto por uno "a" de isoctano y un tanto por uno "b" de n-heptano, se obtiene que:

$$\begin{aligned} n &= 8 \cdot a + 7 \cdot b \\ m &= 18 \cdot a + 16 \cdot b \\ p &= 0 \\ a_{est} &= 8 \cdot a + 7 \cdot b + \frac{18 \cdot a + 16 \cdot b}{4} = 12.5 \cdot a + 11 \cdot b \end{aligned}$$

Con lo que la expresión del dosado relativo auxiliar queda:

$$\varphi = \frac{PM_{O_2} \cdot (1 - Y_{O_2}) - Y_{O_2} \cdot (3.73 \cdot PM_{N_2} + 0.044 \cdot PM_{Ar})}{PM_{O_2} \cdot (1 - Y_{O_2}) + \frac{Y_{O_2}}{12.5 \cdot a + 11 \cdot b} \cdot ((8 \cdot a + 7 \cdot b) \cdot PM_{CO_2} + (9 \cdot a + 8 \cdot b) \cdot PM_{H_2O})}$$

Donde:

- a = Tanto por uno de isoctano en la mezcla PRF
- b = Tanto por uno de n-heptano en la mezcla PRF

Conocido el dosado relativo auxiliar es trivial obtener las fracciones molares de la mezcla inerte que compone el EGR sintético:

$$X_{CO_2} = \frac{n}{\frac{m}{4} + \frac{p}{2} + 4.77 \cdot \frac{a_{est}}{\varphi}}$$

$$X_{H_2O} = \frac{\frac{m}{2}}{\frac{m}{4} + \frac{p}{2} + 4.77 \cdot \frac{a_{est}}{\varphi}}$$

$$X_{O_2} = \frac{\frac{a_{est}}{\varphi} - n - \frac{m}{4} + \frac{p}{2}}{\frac{m}{4} + \frac{p}{2} + 4.77 \cdot \frac{a_{est}}{\varphi}}$$

$$X_{N_2} = \frac{3.73 \cdot \frac{a_{est}}{\varphi}}{\frac{m}{4} + \frac{p}{2} + 4.77 \cdot \frac{a_{est}}{\varphi}}$$

$$X_{Ar} = \frac{0.044 \cdot \frac{a_{est}}{\varphi}}{\frac{m}{4} + \frac{p}{2} + 4.77 \cdot \frac{a_{est}}{\varphi}}$$

Una vez se tiene la fracción molar de cada uno de los gases, obtener la presión parcial de cada uno de ellos es sencillo, simplemente se multiplica la fracción molar por la presión objetivo:

$$P_{CO_2} = X_{CO_2} \cdot P_{obj} \quad P_{H_2O} = X_{H_2O} \cdot P_{obj} \quad P_{O_2} = X_{O_2} \cdot P_{obj} \quad P_{N_2} = X_{N_2} \cdot P_{obj}$$

$$P_{Ar} = X_{Ar} \cdot P_{obj}$$

Y para obtener los límites de presión, se deberá acumular la presión de aquellos gases que se hayan introducido previamente en el depósito.

$$\lim P_{H_2O} = P_{H_2O}$$

$$\lim P_{CO_2} = \lim P_{H_2O} + P_{CO_2}$$

$$\lim P_{O_2} = \lim P_{CO_2} + P_{O_2}$$

$$\lim P_{N_2} = \lim P_{O_2} + P_{Ar} + P_{N_2}$$

Para el cálculo de los límites se tiene en cuenta la secuencia de llenado, introduciendo en primer lugar el agua líquida con la Bomba de jeringa y posteriormente los gases con la ayuda del Software y Hardware diseñados.

Puesto que en las mezclas de EGR sintético no se va a incluir Argón, se decide incluir su pequeña fracción como nitrógeno, de acuerdo a los ensayos que se realizar para comprobar su afección a los resultados, se comprobó que no introduce error alguno, al tratarse de un gas inerte y no influir en la combustión, igual que el nitrógeno.

Bibliografía

- [1] Boylestad R.L. y Nashelsky L. (2009). *Electrónica: teoría de circuitos y dispositivos electrónicos*. Ed. Pearson, México, 2009
- [2] Broatch A. y Novella R. (2013). Apuntes de Motores para automoción. *Tema 5: Estrategias para reducir las emisiones*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- [3] Comunidad de usuarios de LabVIEW. Foros de National Instruments. < <http://forums.ni.com/> >
- [4] Comunidad de usuarios de Arduino. Foros de debate. < <https://forum.arduino.cc/> >
- [5] Domenech V. (2013). *Estudio de nuevas estrategias para el control de la combustión en modos parcialmente premezclados en motores de encendido por compresión*. Tesis doctoral. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- [6] Escudero E. (2014): *Puesta a punto de una Máquina de Compresión Rápida para el estudio del proceso de autoencendido: Diseño del sistema de preparación de EGR sintético y análisis de la repetitividad de la máquina*. Proyecto Final de Carrera. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- [7] Payri F. y Desantes J.M. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Valencia: Ed. Reverté/ Ed. UPV
- [8] Payri R. (2013): Apuntes de la asignatura Combustión y Generación de Calor. *Tema 2: Termoquímica de la Combustión*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- [9] Ruíz J.M. (2012). *Herramientas gráficas para la programación de Arduino*. Recurso recuperado de < <http://josemanuelruizgutierrez.blogspot.com.es/> >

Documento II

Presupuesto

Índice general

Capítulo 1: Presupuesto del trabajo	84
1.1. Introducción	84
1.2. Recursos empleados	85
1.2.1. Recursos informáticos	85
1.2.2. Recursos de personal	86
1.2.3. Recursos materiales	86
1.2.4. Recursos para la instalación experimental.....	87
1.2.5. Recursos de instalaciones	87
1.3. Desglose de costes unitarios.....	87
1.3.1. Coste de materiales y software unitario	87
1.3.1.1. Equipos informáticos.....	87
1.3.1.2. Software	88
1.3.2. Coste de amortización y explotación de equipos	88
1.3.3. Coste unitario de personal cualificado.....	89
1.3.4. Coste unitario de oficina	89
1.4. Desglose de costes totales.....	90
1.4.1. Coste de recursos informáticos.....	90
1.4.2. Coste total de personal cualificado	90
1.4.3. Coste total de material adquirido	91
1.4.4. Coste total de explotación	92
1.4.5. Coste total de instalaciones	92
1.5. Resumen del presupuesto total.....	93

Capítulo 1

Presupuesto del trabajo

1.1. Introducción

El presente documento muestra los costes derivados de la realización del Trabajo fin de Grado. *Diseño y Desarrollo de la Unidad Electrónica de Control de un Colector de Gases para Generar EGR Sintético*. La mayoría de las tareas del trabajo se han centrado en el diseño y montaje del Hardware y el desarrollo del Software creados, aunque se tendrán en cuenta el uso que se ha dado a la instalación donde se encuentra el Colector y a la del Cromatógrafo. En el presente capítulo se presentan los gastos incurridos en materias de material, software, personal y de oficina.

Los gastos nombrados forman parte de los distintos presupuestos parciales que unidos dan forma al presupuesto total del proyecto. Los precios que se toman corresponden a tarifas vigentes y actuales de los bienes, habiéndose realizado estimaciones realistas y coherentes en los casos que así lo requerían.

A cada uno de los costes ha aplicado su correspondiente IVA por un valor del 21%, puesto que ninguno de los bienes adquiridos o trabajos realizados pertenecen a las categorías reducidas de este impuesto.

En este presupuesto no se incluye un beneficio económico ni un factor de gastos generales, puesto que ha sido encomendado por el mismo departamento donde se ejecuta. En caso de que fuera para una empresa externa, deberían añadirse dichos factores.

A continuación pasan a introducirse los factores que se emplearán a lo largo del documento, siendo el primero de ellos la amortización.

Donde

$$amort = \frac{VC-VR}{n} \quad (1.1)$$

amort: amortización [€/año]

VC: valor de compra [€]

VR: valor residual al final del período [€]

n: período de amortización [años]

Otro de los factores a emplear será la tasa horaria que se define del siguiente modo:

$$t_h = \frac{\text{amort}}{\text{horas}_{\text{trabajadas/año}}} \quad (1.2) \quad \text{Donde}$$

t_h : tasa horaria [€/hora]
 $\text{horas}_{\text{trabajadas/año}}$: horas trabajadas al año

Los precios unitarios referentes al personal se calculan teniendo en cuenta las horas trabajadas al año según las ecuaciones 1.3 y 1.4.

$$\text{horas}_{\text{trabajadas/año}} = \left(\frac{\text{semana}}{\text{año}} - \frac{\text{semana}_{\text{vacas/ festivo}}}{\text{año}} \right) \cdot \frac{\text{horas}_{\text{trabajadas}}}{\text{semana}} \quad (1.3)$$

$$\text{Coste horario} = \frac{\text{Salario bruto anual}}{\text{horas}_{\text{trabajadas/año}}} \quad (1.4)$$

1.2. Recursos empleados

Se definen a continuación los distintos recursos empleados para la correcta realización de este trabajo. Una vez se tengan claros estos elementos, podrá procederse a calcular el precio unitario de cada uno para posteriormente calcular el presupuesto total del trabajo.

1.2.1. Recursos informáticos

Para la realización del trabajo se ha requerido el uso de equipos informáticos y recursos varios, para así poder llevar a cabo el diseño del Hardware y el desarrollo del Software entre otros.

Descripción	Unidades
PC1. Ordenador portátil ASUS [®] A55V	1
PC2. Ordenador para conectar con Hardware	1
Licencia Microsoft Office [®] 2013	1
Licencia LabVIEW [®] 2013	1
Licencia IDE Arduino [®]	1
Complemento LIFA de LabVIEW [®]	1
Cromatógrafo de gases Bruker [®] 450-GC	1

Tabla 1.1 Equipos informáticos y software empleados

1.2.2. Recursos de personal

Descripción	Unidades
Alumno	1
Ingeniero Industrial	1
Técnico de laboratorio de química	1
Técnico de electrónica	1
Profesor Titular de Universidad	1

Tabla 1.2 Personal específico

1.2.3. Recursos materiales

Para la construcción del Hardware, se han empleado una serie de materiales que se recogen en este apartado.

Descripción	Unidades
Placa Arduino UNO	1
Cable de 12 hilos	1
Conector MIDI	1
Caja de electrónica 190x110x60mm	1
Fuente de alimentación	1
Resistencia de 249Ω	1
Relés RE030024	6
Amplificador de salidas ULN2003AN	1
Regulador de tensión 12V	1
Bornes de conexión	8
Placa de Circuito Impreso 160x100mm	1
Condensador 2200μF	1
Condensador 470μF	1

Tabla 1.3 Materiales para el Hardware

1.2.4. Recursos para la instalación experimental

Descripción	Unidades
Colector de gases	1
Depósito de mezcla	1
Bomba de vacío	1
Botellas de gases	3
Bomba de jeringa	1
Bolsas herméticas	20

Tabla 1.4 Instalación experimental

1.2.5. Recursos de instalaciones

Descripción	Unidades
Oficina	1
Permiso de oficina	1
Seguro de oficina	1
Sala de ensayos	1

Tabla 1.5 Recursos de espacio

1.3. Desglose de costes unitarios

Para entender mejor el destino de todos los fondos dedicados al proyecto, se procede a descomponerlos todos en apartados, de modo que quede claramente diferenciado el precio unitario de cada una de las unidades definidas.

1.3.1. Coste de materiales y software unitario

1.3.1.1. Equipos informáticos

El precio de adquisición de estos equipos no deberá tenerse en cuenta, puesto que se habían adquirido con anterioridad a la realización del proyecto. Así, solo se deberá tener en cuenta el gasto de amortización de los mismos.

En el caso de los ordenadores, podemos obtener el precio unitario según el coste de amortización. Sabiendo que el precio de cada ordenador fue de 750 €, y estableciendo un periodo de amortización de 5 años, se tiene un precio unitario aproximado de 0.1€/h, incluyendo los gastos de mantenimiento de los mismos.

Por otro lado, el coste de explotación de cromatógrafo ha sido aportado por el ITQ, teniendo un valor de 50 €/h.

1.3.1.2. Software

El software se considerará amortizado y su valor residual cuando expire el tiempo de duración de la licencia, es decir, después de un año. Las horas trabajadas a lo largo de un año, son 1800, por lo que este valor permitirá calcular la tasa horaria de cada licencia.

Los programas empleados con licencia son:

- **Licencia de LabVIEW®**

El precio de la licencia de LabVIEW necesaria, de uso profesional, es de 3310€.

Aplicando la ecuación 1.2, se obtiene la tasa horaria de utilización del mismo.

$$t_{h\text{ LabVIEW}} = \frac{3310}{1800} = 1.84\text{€/hora} \quad (1.6)$$

- **Licencia de LabVIEW interface for Arduino (LIFA) de LabVIEW®**

El precio de este complemento es de 0€, pues se puede adquirir directamente desde LabVIEW. Por tanto la tasa horaria es nula.

$$t_{h\text{ LIFA}} = \frac{0}{1800} = 0.00\text{€/hora} \quad (1.7)$$

- **Licencia de IDE de Arduino®**

Arduino es una plataforma *Open Source* que aporta su software de manera gratuita y sin licencia, por lo que su tasa horaria es nula.

$$t_{h\text{ IDE}} = \frac{0}{1800} = 0.00\text{€/hora} \quad (1.8)$$

- **Licencia de Microsoft Office®**

El valor de la licencia estándar de este software es de 80€. Con esto se obtiene una tasa horaria de utilización de:

$$t_{h\text{ Office}} = \frac{80}{1800} = 0.04\text{€/hora} \quad (1.9)$$

1.3.2. Coste de amortización y explotación de equipos

En este apartado se anotan los costes derivados del uso y desgaste de las instalaciones, así como su coste. En este caso, puesto que se han tenido que comprar distintos elementos para su instalación, se deberá tener en cuenta tanto su coste unitario como su amortización en el uso. El coste global de los elementos descritos anteriormente, ha sido de 23695.11€. Tomando un periodo de amortización de 10 años, considerando que el valor residual al final del mismo es nulo, y que el coste de mantenimiento y explotación asciende a 300€/año, se

tiene una tasa horaria de 1.80€/h. Cabe añadir en este caso, que el coste de utilización de la sala de ensayos es de 40€/h, incluyendo un técnico de laboratorio en dicho precio.

1.3.3. Coste unitario de personal cualificado

Para calcular el coste de los diferentes profesionales que han participado en el Trabajo, se toman los valores orientativos basados en la ley de presupuestos para el año actual.

- **Coste unitario del alumno**

El alumno ha estado realizando el trabajo durante 450 horas sin retribución alguna para tal fin, por tanto:

$$\text{Coste horario}_{\text{Alumno}} = 0.00\text{€/hora} \quad (1.10)$$

- **Coste unitario de un Ingeniero Industrial**

El tutor de este TFG posee el título de Ingeniero Industrial y se ha encargado de la supervisión del proceso. Teniendo en cuenta el salario bruto de 21000.00 €/año, se tiene:

$$\text{Coste horario}_{\text{Ing.Ind}} = \frac{21000}{1800} = 11.67\text{€/hora} \quad (1.11)$$

- **Coste asociado al Profesor Titular de Universidad**

Teniendo en cuenta el salario bruto anual para tal cargo de 42000.00 €/año, se tiene:

$$\text{Coste horario}_{\text{Prof.tit.}} = \frac{42000}{1800} = 23.33\text{€/hora} \quad (1.12)$$

- **Coste unitario de un Técnico en electrónica y un Técnico de laboratorio químico.**

Tomando el salario bruto aproximado de 18000.00 €/año, el coste de los técnicos será:

$$\text{Coste horario}_{\text{tecnico.}} = \frac{18000}{1800} = 10\text{€/hora} \quad (1.13)$$

1.3.4. Coste unitario de oficina

El coste medio de alquiler de oficinas en la ciudad de Valencia es de 300€/mes, incluyendo gastos de luz, agua, calefacción, material de oficina, permisos y seguro correspondientes.

1.4. Desglose de costes totales

En este apartado se muestran los costes totales de cada una de las partes, incluyendo el impuesto del valor añadido que marca la normativa vigente.

1.4.1. Coste de recursos informáticos

Concepto	Periodo (h)	Coste unitario(€/h)	Importe (€)
PC1	400	0.10	40.00
PC2	20	0.10	2.00
LabVIEW	350	1.84	644.00
LIFA + IDE	350	0.00	0.00
Microsoft Office	60	0.04	2.40
TOTAL (sin IVA)			688.40
IVA (21%)			144.56
TOTAL			832.96

Tabla 1.6 Coste total de recursos informáticos

El coste total de los recursos informáticos empleados es de

OCHOCIENTOS TREINTA Y DOS EUROS CON NOVENTA Y SEIS CÉNTIMOS

1.4.2. Coste total de personal cualificado

Concepto	Periodo (h)	Coste unitario(€/h)	Importe (€)
Alumno	450	0.00	0.00
Ingeniero Industrial	300	11.67	3501.00
Profesor Titular de Universidad	40	23.33	933.20
Técnicos	2 x 30	10.00	600.00
TOTAL (sin IVA)			5034.20
IVA (21%)			1057.18
TOTAL			6091.38

Tabla 1.7 Coste total de personal

El coste total del personal implicado es de

SEIS MIL NOVENTA Y UN EUROS CON TREINTA Y OCHO CÉNTIMOS

1.4.3. Coste total de material adquirido

Concepto	Unidades	Coste unitario (€/ud)	Importe (€)
Colector de gases	1	18700.00	18700.00
Depósito	1	2398.00	2398.00
Bomba de vacío	1	847.00	847.00
Bomba de jeringa	1	1000.00	1000.00
Botellas de gases	3	52.00	156.00
Bolsas herméticas	20	22.50	450.00
Arduino UNO	1	23.50	23.50
Cable de 12 hilos	1	12.00	12.00
Conector MIDI	1	7.82	7.82
Caja de electrónica	1	15.23	15.23
Fuente alimentación	1	48.91	48.91
Resistencia 249Ω	1	1.51	1.51
Relés RE030024	6	2.80	16.80
Amplificador ULN2003AN	1	0.60	0.60
Regulador tensión	1	0.38	0.38
Bornes conexión	8	0.37	2.96
Placa Circuito Impreso	1	13.57	13.57
Condensador 2200μF	1	0.71	0.71
Condensador 470μF	1	0.12	0.12
TOTAL (sin IVA)			23695.11
IVA (21%)			4975.97
TOTAL			28671.08

Tabla 1.8 Coste total de material adquirido

El coste total de material adquirido es de

VIENTIOCHO MIL SEISCIENTOS SETENTA Y UN EUROS CON OCHO CÉNTIMOS

1.4.4. Coste total de explotación

Concepto	Unidades	Coste unitario(€/ud)	Importe (€)
Ensayos de generación de mezclas	80 h	1.80	144.00
Análisis con cromatógrafo	35 h	50.00	1750.00
Impresión de Circuito Impreso	1 ud	22.00	22.00
TOTAL (sin IVA)			1916.00
IVA (21%)			402.36
TOTAL			2318.36

Tabla 1.9 Coste total de explotación de instalaciones

El coste total de explotación es de

DOS MIL TRESCIENTOS DIECIOCHO EUROS CON TREINTA Y SEIS CÉNTIMOS

1.4.5. Coste total de instalaciones

Concepto	Unidades	Coste unitario(€/x)	Importe (€)
Oficina	2 meses	300.00	600.00
Sala de ensayo	80 h	40.00	3200.00
TOTAL (sin IVA)			3800.00
IVA (21%)			798.00
TOTAL			4598.00

Tabla 1.10 Coste total de instalaciones

El coste total de explotación es de

CUATRO MIL QUINIENTOS NOVENTA Y OCHO EUROS

1.5. Resumen del presupuesto total

Finalmente, se suman todos los costes asociados a cada parte para obtener el presupuesto total del proyecto desarrollado.

Concepto	Presupuesto(€)
Recursos informático	832.96
Personal cualificado	6091.38
Material adquirido	28671.08
Explotación	2318.36
Instalaciones	4598.00
TOTAL	42511.78

Tabla 1.11 Coste total de explotación de instalaciones

El presupuesto total del presente proyecto asciende a

CUARENTA Y DOS MIL QUINIENTOS ONCE EUROS CON SETENTA Y OCHO CÉNTIMOS