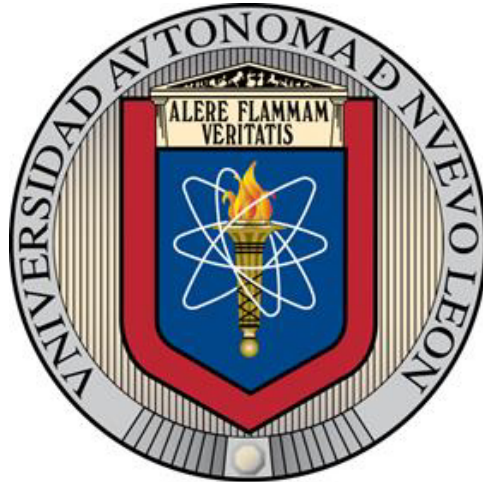


**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**TESIS**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL  
AUTOMÁTICO APLICADO A UN MOTOR CFR  
PARA EL ESTUDIO FÍSICO-QUÍMICO DE LA  
COMBUSTIÓN**

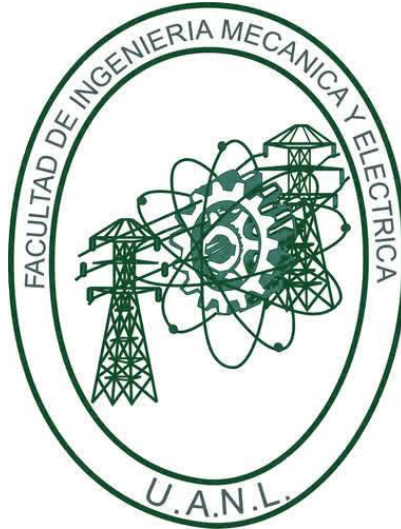
**POR**

**PABLO GÓMEZ-GORDO VILLA**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON  
ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE**

**MAYO, 2017**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**TESIS**

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL  
AUTOMÁTICO APLICADO A UN MOTOR CFR  
PARA EL ESTUDIO FÍSICO-QUÍMICO DE LA  
COMBUSTIÓN**

**POR**

**PABLO GÓMEZ-GORDO VILLA**

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA CON  
ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE**

**DIRECTOR  
DR. SIMÓN MARTÍNEZ MARTÍNEZ**

**MAYO, 2017**

# Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Subdirector de Estudios de Posgrado

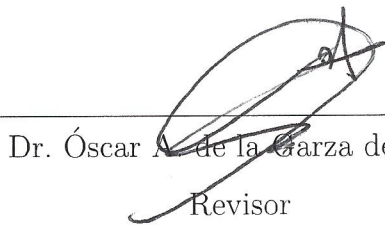
Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Desarrollo de un sistema de control automático aplicado a un Motor CFR para el estudio físico-químico de la combustión», realizada por el alumno Pablo Gómez-Gordo Villa, con número de matrícula 1770311, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Tesis



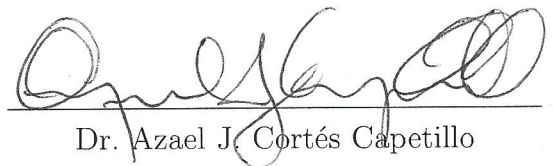
Dr. Simón Martínez Martínez

Director



Dr. Óscar A. de la Garza de León

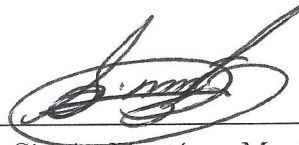
Revisor



Dr. Azael J. Cortés Capetillo

Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, mayo 2017

# AGRADECIMIENTOS

---

A mi director de tesis, el Dr. Simón Martínez Martínez. Su extensa experiencia profesional y en investigación y su visión innovadora han dado lugar a la realización de muchos proyectos de investigación de alto impacto para el sector energético del país, reafirmando con esto, su compromiso con la sociedad, la industria y la comunidad científica. Su participación ha sido crucial en la solución efectiva de los problemas técnicos y de ejecución, relacionados con éste y otros trabajos de investigación e innovación tecnológica. Además, ha sido para mí un gran ejemplo de liderazgo humano porque supo transmitirme la pasión que le mueve en todo lo que hace. Ya sea trabajando en el laboratorio, disfrutando de una carne asada o viendo a Tigres campeón, la intensidad que le caracteriza al realizar todas las actividades del día a día se contagia, convirtiéndolo en un referente, gran educador y, por supuesto, en un buen jefe.

A la coordinación del programa de máster representada por el Dr. Fausto A. Sánchez Cruz, por permitirme continuar mis estudios dentro del Grupo de Energías Térmica y Renovable (GETR) y por su apoyo atento en todos los trámites académicos, por su ejemplo de constancia y disciplina en el trabajo.

A todos los doctores y maestros del grupo de investigación, muchos de los cuales fueron muy buenos profesores, de esos que no se olvidan. Especialmente al Dr. Óscar A. de la Garza de León por su amistad y compromiso con el trabajo bien hecho, y al MC. Miguel García Yera, ambos con su experiencia en máquinas y motores térmicos me han permitido aprender más y disfrutar más de la ingeniería

mecánica. Al Dr. Miguel Platas Garza y al Dr. Santos Méndez Díaz, por la ayuda prestada en el ámbito de la instrumentación y el control.

Al Grupo de Investigación en Procesos Energéticos y Medioambientales (GPEM) de la Universidad de Castilla - La Mancha, en especial al Dr. Octavio Armas Vergel, cuya buena relación y compromiso con otros grupos de investigación promueven la movilidad internacional de estudiantes.

A mi familia y amigos de España, por ser soporte y apoyo allá donde voy.

A todos mis compañeros y amigos que me han acompañado en este tiempo en México. Gracias a todos ellos por hacer de ésta, una experiencia completa. Con ellos, he podido conocer desde dentro este país tan espectacular y disfrutar de su gastronomía, de sus estados y ciudades, pero sobre todo, de sus gentes. ¡Gracias de corazón a mis compadres! Hernán A. Ramírez, Alberto J. Arenas, Víctor E. Sánchez, Omar Torres y J. Gerardo Falcón, por su amistad y confianza. Y gracias a mis compañeros de laboratorio, Luis F. Rúa y Guillermo Rubio por su paciencia y colaboración.

A todos los servicios sociales que participaron con la mejor de las actitudes en las tareas del laboratorio del Motor CFR.

Al equipo de trabajadores de la universidad. A las secretarías de la Subdirección de Estudios de Posgrado. A los trabajadores de los talleres de soldadura, carpintería, electricidad y mantenimiento. Al equipo de compras y almacén y a sus proveedores. Todos ellos han respondido con profesionalidad y prontitud, contribuyendo así, a la consecución de los objetivos de este trabajo de máster.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) por el apoyo brindado a lo largo de este programa académico. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo otorgado a través de la beca número 664123 desde enero de 2015 a diciembre 2016.

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>IV</b>
<b>Acrónimos</b>	<b>XXIV</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Antecedentes . . . . .	5
1.2.1. Breve historia del Motor CFR . . . . .	5
1.2.2. Sistemas de inyección indirecta de gasolina . . . . .	6
1.2.3. Autoignición . . . . .	11
1.3. Estado del arte: últimos modelos ASTM-CFR . . . . .	16
1.3.1. Motor F1/F2 gasolina . . . . .	16
1.3.2. Motor F5 diésel . . . . .	18
1.4. Hipótesis . . . . .	19
1.5. Objetivos . . . . .	20
1.5.1. Objetivo general . . . . .	20

---

1.5.2. Objetivos específicos . . . . .	20
1.6. Metodología . . . . .	22
1.6.1. Fase 1: Obra Civil . . . . .	22
1.6.2. Fase 2: Instrumentación de la instalación . . . . .	23
1.6.3. Fase 3: Sistemas de control . . . . .	24
1.6.4. Fase 4: Validación experimental y ensayos con combustión . . . . .	25
<b>2. Descripción técnica de la máquina térmica</b>	<b>26</b>
2.1. Elementos del banco de ensayos . . . . .	28
2.2. Motor eléctrico y sistema de arranque . . . . .	30
2.3. Motor de combustión . . . . .	32
2.3.1. Sistemas de admisión y escape . . . . .	32
2.3.2. Culata del motor . . . . .	33
2.3.3. Sistema de lubricación . . . . .	35
2.3.4. Refrigeración de la culata . . . . .	37
2.3.5. Caracterización de la culata . . . . .	39
<b>3. Puesta a punto de los sistemas de medida</b>	<b>44</b>
3.1. Medida de temperaturas . . . . .	44
3.2. Medida de presiones . . . . .	46
3.2.1. Presiones en admisión y escape . . . . .	47
3.2.2. Presión del aceite . . . . .	49

---

3.3. Medida del régimen de giro . . . . .	51
3.4. Sensor de uno por vuelta . . . . .	53
3.5. Medida de presión en cámara . . . . .	55
<b>4. Puesta a punto de los sistemas de control</b>	<b>61</b>
4.1. Calentamiento del aire de admisión . . . . .	61
4.2. Sistema de variación de la relación de compresión . . . . .	63
4.2.1. Servomotor y transmisión . . . . .	63
4.2.2. Límites finales de carrera . . . . .	65
4.2.3. Descripción del drive SX . . . . .	67
4.2.4. Diseño mecánico . . . . .	68
4.3. Sistema de inyección de combustible . . . . .	70
4.3.1. Sistemas de preinyección . . . . .	70
4.3.2. Descripción y caracterización hidráulica del inyector . . . . .	73
4.3.3. Metodología para la caracterización hidráulica del inyector . . . . .	74
4.4. Sistema de ignición . . . . .	77
4.5. Sistema de emergencia . . . . .	78
<b>5. Validación experimental del sistema de control</b>	<b>79</b>
5.1. Introducción . . . . .	80
5.2. Descripción general del sistema: selección del hardware y de la estrategia de programación . . . . .	80

---

5.2.1. Estrategia de programación . . . . .	80
5.2.2. Selección del hardware . . . . .	83
5.2.3. Estructura del código en el entorno de programación . . . . .	85
5.3. Adquisición de variables en tiempo real . . . . .	87
5.4. Comunicación con el FPGA del sistema de control . . . . .	88
5.5. Detección de la posición del pistón y del cigüeñal . . . . .	91
5.5.1. Encoder incremental . . . . .	91
5.5.2. Sensor de uno por vuelta . . . . .	93
5.6. Sincronización de la medida de la presión en cámara . . . . .	94
5.7. Controlador difuso . . . . .	96
5.7.1. Estrategia de programación del controlador difuso. . . . .	96
5.7.2. Validación del control del calentamiento del flujo de trabajo del motor. . . . .	98
5.8. Controlador de la relación de compresión . . . . .	100
5.8.1. Control del servomotor . . . . .	101
5.8.2. Comunicación RS-232C del drive SX . . . . .	101
5.8.3. Validación del posicionamiento de la culata . . . . .	102
5.9. Control de la inyección . . . . .	105
5.9.1. Etapa de potencia. . . . .	105
5.9.2. Validación del pulso de inyección . . . . .	106
5.9.3. Sincronización del pulso de inyección. . . . .	108

---

5.10. Control de la ignición . . . . .	109
5.11. Sistema de emergencia . . . . .	111
5.12. Interfaz de usuario . . . . .	112
5.12.1. Interfaz de las variables en tiempo real . . . . .	113
5.12.2. Interfaz del control de la relación de compresión . . . . .	114
5.12.3. Interfaz de la medida de presión en cámara . . . . .	115
5.12.4. Interfaz del estado del sistema . . . . .	116
5.12.5. Interfaz del sistema de control del calentamiento . . . . .	117
5.12.6. Interfaz del sistema de control de la inyección. . . . .	118
<b>6. Resultados</b>	<b>119</b>
6.1. Resultados . . . . .	121
6.1.1. Resultados en la creación de infraestructura . . . . .	121
6.1.2. Resultados en la instalación mecánica del Motor térmico CFR	123
6.1.3. Resultados en la implementación de los sistemas de medida y de control . . . . .	125
6.1.4. Resultados y validación experimental del código de control pa- ra motores de combustión interna alternativos. . . . .	128
<b>7. Conclusiones globales</b>	<b>140</b>
7.1. Conclusiones . . . . .	140
7.2. Trabajos futuros . . . . .	142

---

<b>A. Diseño mecánico</b>	<b>143</b>
A.1. Diseño del distribuidor de presión . . . . .	143
A.2. Dibujo del soporte del encoder incremental . . . . .	145
A.3. Adaptador del sensor de medida de la presión en cámara . . . . .	147
A.4. Herramienta para retirar el sensor de presión en cámara . . . . .	148
A.5. Cople tipo mordaza para unir la flecha de la relación de compresión a la transmisión . . . . .	149
A.6. Cople directo para transmitir el giro del servomotor a la transmisión .	151
A.7. Brida de unión entre el servomotor y la transmisión . . . . .	152
A.8. Soporte del bloque transmisión-servomotor del sistema de variación de la relación de compresión . . . . .	153
A.9. Soporte de los sensores de final de carrera del sistema de variación de la relación de compresión . . . . .	154
A.10. Portainyector y precámara de inyección . . . . .	155
<b>B. Esquemas eléctricos de la instalación</b>	<b>157</b>
<b>C. Comandos de comunicación con el drive</b>	<b>172</b>
<b>D. Relación de Compresión</b>	<b>174</b>
<b>E. Protocolo de arranque</b>	<b>180</b>
<b>F. Protocolo de paro</b>	<b>182</b>

---

Bibliografía . . . . .	183
------------------------	-----

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

1.1. Logotipo GETR . . . . .	1
1.2. Logotipo LIITE . . . . .	2
1.3. Mercado abierto de gasolinas y diésel. . . . .	4
1.4. Primer motor CFR creado por <i>Waukesha</i> . . . . .	5
1.5. Otros modelos de <i>Waukesha</i> . . . . .	6
1.6. Sistema de inyección indirecta gasolina. 1- Sensor de hilo caliente. 2- Válvula de mariposa. 3- Common-rail. 4- Inyector gasolina. 5- Válvula de admisión. 6- Bujía. 7- Sensor de posición del árbol de levas. 8- Sonda Lambda I. 9- Convertidor catalítico primario. 10- Sonda Lambda II. 11- Convertidor catalítico principal. 12- Sensor de temperatura del motor. 13- Pistón. 14- Sensor de posición del cigüeñal. 15- Tanque de combustible. 16- Bomba de combustible eléctrica. . . . .	7
1.7. Inyección sincronizada con la apertura de la válvula de admisión. 1- Entrada de combustible. 2- Inyector gasolina. 3- Válvula de admisión. 4- Aire de entrada. 5- Gas de escape. 6- Parte superior del pistón. . . . .	9
1.8. Inyección anterior a la apertura de la válvula de admisión. 1- Entrada de combustible. 2- Inyector gasolina. 3- Válvula de admisión. 4- Aire de entrada. 5- Gas de escape. 6- Parte superior del pistón. . . . .	10

1.9. Señal de presión en cámara cuando aparece combustión anormal. 1- Ignición en el punto correcto ( $Z_a$ ). 2- Ignición muy adelantada ( $Z_b$ ). 3- Ignición muy atrasada ( $Z_c$ ). . . . .	11
1.10. Proceso desde pre-ignición hasta el súper-knock: (a) Ignición espontánea por punto caliente, (b) llama e ignición por chispa, y (c) detonación final del gas [1]. . . . .	16
1.11. Modelo F1/F2 gasolina de <i>Waukesha</i> . . . . .	17
1.12. Modelo F5 diésel <i>Waukesha</i> . . . . .	18
1.13. Metodología del proyecto. . . . .	22
1.14. Diagrama esquemático de la distribución del laboratorio. . . . .	23
2.1. ASTM-CFR. . . . .	28
2.2. Máquina CFR. 1- Bancada de concreto. 2- Motor eléctrico. 3- Estación de control. 4- Motor CFR. . . . .	28
2.3. Diagrama general de la instalación. . . . .	29
2.4. Bancada y motor eléctrico. . . . .	30
2.5. Bancada y motores. . . . .	32
2.6. A- Válvulas de admisión y de escape. B- Salida de refrigerante. C- Cámara de combustión. D- Pistón. E- Entrada de refrigerante. F- Mecanismo para variar la relación de compresión. G- Engrasadores. H- Palanca de fijación de la relación de compresión. I- Rosca del cilindro. J- Micrómetro. K- Camisas para el paso de refrigerante. L- Balancín. M- Bujía. N- Segmento. . . . .	35

2.7. Conexión del circuito de aceite. A- Respiradero del cárter. B- Entrada de aceite al filtro. C- Toma de medida para presión del aceite. D- Salida de aceite del filtro. F- Salida de la bomba a filtro. H- Toma de medida para la temperatura del aceite. I- Válvula para la calibración de la presión. . . . .	36
2.8. Refrigeración de la cabeza del motor. . . . .	38
2.9. Geometría básica del motor de combustión. . . . .	39
2.10. Volumen de la cámara de combustión para diferentes relaciones de compresión. . . . .	42
3.1. Esquema de la colocación de los sensores de presión (azul) y temperatura (rojo). . . . .	45
3.2. Conexión de termopares tipo K al módulo <i>NI 9213</i> . . . . .	46
3.3. Distribuidor de presiones. . . . .	48
3.4. Conexión de transductores de presión al módulo <i>NI 9203</i> . . . . .	48
3.5. Conexiones del sensor de presión del aceite. . . . .	50
3.6. Configuración del sensor de presión del aceite. . . . .	50
3.7. Instalación del encoder incremental y sensor de uno por vuelta. . . . .	51
3.8. Conexión del encoder al <i>CompactRIO</i> . . . . .	53
3.9. Funcionamiento del sensor de efecto Hall. a- Posición del sensor para una rueda de un solo diente. b- Señal de salida característica. 1- Conexión eléctrica. 2- Carcasa del sensor. 3- Soporte. 4- Anillo de ajuste de goma. 5- Imán permanente. 6- Detector Hall. 7- Rueda de pulsos. . . . .	54
3.10. Sensor de presión en cámara <i>KISTLER 6061B</i> . . . . .	55

---

3.11. Sección de la culata del motor y montaje del sensor de presión en cámara. 1- Admisión de gases. 2- Salida de gases. 3- Pistón. 4- Flecha para variar la relación de compresión. 5- Desplazamiento de la culata para variar la relación de compresión. 6- Sensor de presión en cámara y adaptador. 7- Válvula de admisión. . . . .	56
3.12. Conexión eléctrica del sensor con el sistema de medida. . . . .	58
3.13. Configuración del amplificador. . . . .	59
4.1. Instalación de las resistencias en el banco de pruebas. 1- Filtro de aire. 2- Remanso de admisión. 3- Resistencia 1. 4- Resistencia 2. . . . .	62
4.2. Conexión de la tarjeta SCR19Z. . . . .	63
4.3. Conexiones principales del drive. . . . .	67
4.4. Unión mecánica de la transmisión al motor CFR. . . . .	68
4.5. Unión mecánica de la transmisión al servomotor. . . . .	69
4.6. Soporte del bloque transmisión-servo. . . . .	69
4.7. Soporte de los finales de carrera. 1- Final de carrera superior (HOME). 2- Final de carrera inferior. . . . .	70
4.8. Mecanismos que influyen en la generación de la mezcla. . . . .	71
4.9. Diagrama esquemático del sistema de inyección implementado. . . . .	72
4.10. Sistema de inyección implementado. . . . .	73

4.11. Inyector de combustible de accionamiento electromagnético. 1- Entrada de combustible. 2- O ring de goma. 3- Cuerpo del inyector. 4- Conexión eléctrica. 5- Soporte de plástico para los terminales. 6- Filtro. 7- Polo interno. 8- Resorte de la válvula. 9- Bobina. 10- Válvula de aguja. 11- Bola de la válvula. 12- Asiento de la válvula. 13- Orificios del inyector. . . . .	74
4.12. Preparación de la instalación para la caracterización hidráulica de inyectores gasolina. . . . .	75
4.13. Masa inyectada por evento de inyección para diferentes duraciones de pulso eléctrico. . . . .	76
4.14. Diagrama eléctrico del sistema de ignición. 1- Ignition driver. 2- Bobina. 3- Diodo de activación por arco. 4- Bujía . . . . .	77
5.1. Diagrama de flujo software-hardware del sistema de control. . . . .	82
5.2. Elementos principales del sistema de control. . . . .	83
5.3. Diagrama esquemático de dependencia del sistema de control. . . . .	84
5.4. Arquitectura interna y comunicación del Compact RIO. . . . .	85
5.5. Estructura del proyecto en LabVIEW. 1- Ordenador principal y hardware externo (cRIO). 2- VI principal donde se encuentra la interfaz de usuario. 3- Módulos del cRIO configurados en tiempo real (RT). 4- Chip FPGA. 5- Módulos configurados en FPGA y que dependen de este chip. 6- Elemento de memoria FIFO para la comunicación entre RT y FPGA. 7- VIs en el chip FPGA. 8- VIs en RT. . . . .	86
5.6. Arquitectura FPGA. . . . .	89
5.7. Comunicación del procesador real-time con el chip FPGA del <i>CompactRIO</i> . . . . .	90

---

5.8. Comunicación en la programación híbrida de un cRIO. . . . .	90
5.9. Imagen de la señal A del encoder incremental obtenida con un osciloscopio digital. . . . .	92
5.10. Validación de la detección del PMS. Señal de la presión en cámara (rojo). Pulso del sistema de control tras detectar el PMS (verde). . .	93
5.11. Señal de presión en cámara construida a partir de 60 puntos de medida por vuelta del cigüeñal. . . . .	95
5.12. Estructura de un controlador difuso. . . . .	96
5.13. Definición de variables y funciones de membresía. . . . .	97
5.14. Simulador del sistema desarrollado. . . . .	98
5.15. Prueba de sensibilidad del sistema de calentamiento. . . . .	99
5.16. Control del servomotor. . . . .	100
5.17. Error de posición en movimientos sucesivos en la misma dirección. . .	102
5.18. Error en movimientos combinados sin tomar en cuenta el juego mecánico de los engranajes. . . . .	103
5.19. Error en movimientos combinados teniendo en cuenta el juego mecánico de los engranajes. . . . .	104
5.20. Circuito etapa de potencia para la apertura del inyector. . . . .	105
5.21. Pulso de 200 $\mu$ s generado por el sistema de control. . . . .	107
5.22. Pulso de 500 $\mu$ s medido en el sistema de control (azul) y pulso medido en los terminales del inyector (verde). . . . .	108

5.23. Señal de presión en cámara con el motor en arrastre (rojo), pulso de inyección del sistema de control (azul) y pulso en el inyector (verde). Configuración de dos ciclos por inyección. . . . .	109
5.24. Señal de presión en cámara con el motor en arrastre (rojo), pulsos de inyección del sistema de control (azul) y pulso de ignición (verde). . . . .	110
5.25. Interfaz de usuario. . . . .	112
5.26. Gráficas e indicadores de las variables medidas en tiempo real. 1- Menú de señales. 2- Gráficas. 3- Indicadores de presiones (azul) y temperaturas (naranja). . . . .	113
5.27. Interfaz de usuario para el control de la relación de compresión. 1- Pulsadores para controlar el sistema. 2- Relación de compresión introducida por el usuario. 3- Relación de compresión más cercana conocida. 4- Indicadores de movimiento del servo. . . . .	114
5.28. Interfaz de usuario para la medida de la presión en cámara. 1- Pulsador de adquirir para iniciar una medida. 2- Gráfica con 20 ciclos del motor. 3-4- Pulsador para guardar datos. 5- Amplitud del filtro de media móvil. 6- Gráfica de n ciclos. 7- Escala del amplificador del sensor de presión. . . . .	115
5.29. Interfaz del estado del sistema de emergencia. 1- Indicadores de estado. 2- Velocidad del motor. 3- Pulsador de STOP para detener la ejecución del programa. . . . .	116
5.30. Interfaz del control del calentamiento de los gases de escape. 1- Gráfica de la evolución de la temperatura a la entrada de la admisión del motor. 2- Pulsador que detiene el calentamiento. 3- Temperatura real (medida). 4- Temperatura de ensayo (consigna). . . . .	117

5.31. Interfaz del control del sistema de inyección. 1- Pulsador para comenzar la inyección. 2- Pulsador para comenzar la ignición. 3- Control de adelanto de la chispa. 4- Controles para configurar la inyección. 5- Controles de visualización de gráficas. 6- Plot. . . . .	118
6.1. Modificación de la infraestructura del laboratorio. . . . .	121
6.2. Instalación mecánica del Motor CFR. . . . .	123
6.3. Instalación de los sistemas de medida y control. . . . .	125
6.4. Evolución temporal de la presión en cámara del motor para una temperatura de entrada igual a 27 °C y diferentes relaciones de compresión.128	
6.5. Evolución temporal de la presión en cámara del motor para diferentes temperaturas de entrada y diferentes relaciones de compresión. . . . .	129
6.6. Comportamiento de la presión en cámara en función del ángulo de giro del cigüeñal para una RC = 4.46 en condiciones de arrastre y combustión. Temperatura del flujo: (a) 27 °C (b) 60 °C (c) 70 °C (d) 80 °C. . . . .	133
6.7. Comportamiento de la presión en cámara en función del ángulo de giro del cigüeñal para una RC = 6 en condiciones de arrastre y combustión. Temperatura del flujo: (a) 27 °C (b) 60 °C (c) 70 °C (d) 80 °C. . . . .	134
6.8. Comportamiento de la presión en cámara en función del ángulo de giro del cigüeñal para una RC = 8 en condiciones de arrastre y combustión. Temperatura del flujo: (a) 27 °C (b) 60 °C (c) 70 °C (d) 80 °C. . . . .	135
6.9. Comportamiento de la presión en cámara en función del ángulo de giro del cigüeñal a diferentes temperaturas para una RC = 4.46. . . . .	136
6.10. Comportamiento de la presión en cámara en función del ángulo de giro del cigüeñal a diferentes temperaturas para una RC = 6. . . . .	137

- 
- 6.11. Comportamiento de la presión en cámara en función del ángulo de giro del cigüeñal a diferentes temperaturas para una  $RC = 8$ . . . . . 137
- 6.12. Dispersión cíclica para una  $RC = 4.46$  y temperatura ambiente del flujo de trabajo. . . . . 138
- 6.13. Comportamiento de la presión en cámara en función del ángulo de giro del cigüeñal para una  $RC = 6$  y temperatura igual a  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Adelanto de la ignición (a)  $30^{\circ}$  APMS, (b)  $3^{\circ}$  APMS. . . . . 139

# ÍNDICE DE TABLAS

---

1.1. Parámetros de funcionamiento para los test de knock en gasolinas de motores de aviación y de transporte de personas. . . . .	14
1.2. Comparación de los modelos CFR Gasolina/Diésel. . . . .	19
2.1. Características del motor síncrono. . . . .	30
2.2. Regímenes de giro de los motores. . . . .	31
2.3. Dimensiones del cilindro . . . . .	34
2.4. Sistema de lubricación . . . . .	37
2.5. Resultados de las medidas experimentales obtenidos durante la caracterización de la culata del motor.. . . .	41
3.1. Transductores absolutos de presión . . . . .	47
3.2. Transductor de presión de aceite . . . . .	49
3.3. Conexión del codificador angular 10 terminales. . . . .	52
3.4. Funcionamiento de los pulsadores del amplificador. . . . .	60
4.1. Características del motor de posición. . . . .	64
4.2. Transmisión multiplicadora 30:1. . . . .	65

---

4.3. Sensores inductivos de final de carrera. . . . .	66
4.4. Válvula de inyección gasolina. . . . .	73
4.5. Masa inyectada por evento de inyección. . . . .	76
4.6. Características de la bobina del sistema de ignición. . . . .	78
6.1. Presiones máximas en la cámara de combustión medidas para una relación de compresión constante de 16. . . . .	130
6.2. Matriz de experimentos para los ensayos de validación. . . . .	132
A.1. Transmisión del giro del cigüeñal . . . . .	145
D.1. Relación de compresión según la lectura del micrómetro. . . . .	175
D.2. Relación de compresión según la lectura del micrómetro. Continuación I.	176
D.3. Relación de compresión según la lectura del micrómetro. Continuación II. . . . .	177
D.4. Relación de compresión según la lectura del micrómetro. Continuación III. . . . .	178
D.5. Relación de compresión según la lectura del micrómetro. Continuación IV. . . . .	179

# ACRÓNIMOS

---

APMS-	Antes del Punto Muerto Superior
ASIC-	Application-Specific Integrated Circuit
ASTM-	American Society for Testing and Materials
CFR-	Cooperative Fuel Research
CGBT-	Centro General de Baja Tensión
cRIO-	CompactRIO
DPMS-	Después del Punto Muerto Superior
ECU-	Electronic Control Unit
FPGA-	Field Programmable Gate Array
MEC-	Motor de Encendido por Compresión
MEP-	Motor de Encendido Provocado
MOSFET-	Metal–Oxide–Semiconductor Field-Effect Transistor
NI-	National Instruments
PMI-	Punto Muerto Inferior
PMS-	Munto Muerto Superior
RC-	Relación de Compresión
SCR -	Silicon Controlled Rectifier
TDC-	Top Dead Center

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

## 1.1 MOTIVACIÓN

Como parte de la actividad docente e investigadora del Grupo de Energías Térmica y Renovable (GETR), desde hace años se apuesta por el estudio y desarrollo de la Ciencia de los Combustibles. Este interés por los nuevos combustibles se materializa en los laboratorios que el GETR ha creado en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) de la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL).



Figura 1.1: Logotipo GETR

Los laboratorios de investigación cuentan con tecnología punta para evaluar combustibles fósiles, biocombustibles y mezclas de ambos. Para poder emplear combustibles de forma segura y eficiente en máquinas térmicas y en procesos industriales, es necesario caracterizarlos adecuadamente con el objeto de conocer su composición

química, su poder calorífico, las condiciones de ignición, el octanaje y los productos resultantes de la combustión, además de las condiciones termodinámicas en las que se producen los cambios de fase y las modificaciones en su consistencia y viscosidad. Con el conocimiento obtenido en la caracterización es posible desarrollar mezclas de combustibles que satisfagan necesidades específicas, además de asegurar que los productos de la combustión no pongan en riesgo la salud e integridad de los seres humanos, además de ser respetuosos con el medio ambiente [2].

Los procesos de mezclado entre líquidos o entre gases, la atomización de líquidos como el combustible en la cámaras de combustión, el transporte de especies contaminantes, la transferencia de calor, el transporte de partículas, los flujos granulares, los flujos multifásicos y los flujos capilares, entre otros, son los objetos de estudio en estos laboratorios. Crear conocimiento en estas áreas permite mejorar la eficiencia de dispositivos como quemadores industriales de combustibles gaseosos, líquidos o particulados, intercambiadores de calor, turbomáquinas, motores térmicos, compresores, sistemas de inyección de combustible, generadores de vapor, secadores, hornos, entre otros [3].



Figura 1.2: Logotipo LIITE

Todas estas pruebas se pueden llevar a cabo en tres de los laboratorios que el Grupo de Investigación ha puesto en marcha a lo largo de sus años de actividad. Aunando esfuerzos intelectuales por parte de los estudiantes y personal investigador, así como, recursos económicos obtenidos de la estrecha relación con las empresas y las entidades gubernamentales, hoy es posible contar con los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE), de los que cabe destacar, para este trabajo, los siguientes:

- Laboratorio de Ciencia de los Combustibles.
- Laboratorio de Fenómenos de Transporte.
- Laboratorio de Físico Química de la Combustión.

El último laboratorio aquí citado es donde se realiza la presente investigación. Este laboratorio cuenta con una instalación basada en un motor de combustión interna alternativo (MCIA) y de compresión variable. El motor, como se explicará en los apartados siguientes, se diseñó en 1928 como instrumento de medida del octanaje de las gasolinas, destacando que hoy sigue siendo el estándar aceptado a nivel mundial.

La principal motivación es contribuir al crecimiento del GETR y de la sociedad, esto, desarrollando una instalación experimental única en su tipo, para el estudio de las propiedades físico-químicas de la combustión. Que el laboratorio cuente con un motor de combustión de tanto interés histórico y con unas características tan especiales, como principal herramienta de análisis y estudio aumenta el valor del trabajo realizado. Es también de mucho interés el carácter multidisciplinar del proyecto, puesto que especialidades como la ingeniería térmica y mecánica, y la ingeniería electrónica y de control, han de estar en sinergia para hacer operativa la instalación.

En lo referente a la situación energética de México, es importante destacar la apertura de mercado de gasolinas y diésel, que desde el año 2017 comienza a realizarse en el país.



Figura 1.3: Mercado abierto de gasolinas y diésel.

En 2017, los mercados de gasolinas y diésel en México transitarán de un modelo de proveedor único, encargado de abastecer a todo el país, a un esquema abierto y competitivo, en el que más jugadores compartirán la responsabilidad de llevar combustibles a todo el territorio nacional [4].

En este contexto es necesario que, tanto las empresas privadas como las entidades académicas y grupos de investigación, den una respuesta acertada a los cambios socio-económicos del país, promoviendo proyectos de innovación tecnológica que sirvan a la sociedad y a la industria.

Este trabajo de investigación se enmarca dentro de la respuesta del GETR a la apertura económica, desarrollando laboratorios de certificación y prueba de combustibles que posibiliten la apertura de mercado de los combustibles en México. Este trabajo ha sido desarrollado bajo el marco del proyecto de Ciencia Básica del CONACYT Solicitud 239943, titulado “ DETERMINACIÓN DEL GRADO DE REACCIÓN Y SU EFECTO EN LA EMISIÓN DE CONTAMINANTES DE UNA COMBUSTIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES UTILIZANDO COMBUSTIÓN FRÍA”.

## 1.2 ANTECEDENTES

### 1.2.1 BREVE HISTORIA DEL MOTOR CFR

En 1920 se crea el comité *Cooperative Fuel Research (CFR)*. Su objetivo principal era crear una manera de definir y medir las características de combustión de las gasolinas, para responder a la necesidad de las refinerías y de los fabricantes de motores [5].

En 1928 el comité CFR decide estandarizar un motor monocilíndrico para realizar esta tarea (Figura 1.4). El diseño elegido para su fabricación fue desarrollado por *Waukesha Motor Company*. Este primer motor fue diseñado y fabricado en 45 días por el equipo de *Waukesha* [6].

Diversas compañías compitieron creando otros motores similares, pero tenían desventajas a favor del creado por *Waukesha*. Su diseño ha sobrevivido hasta la actualidad manteniendo la misma geometría en la cámara de combustión.

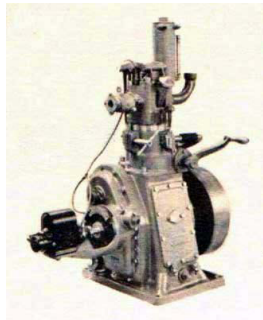
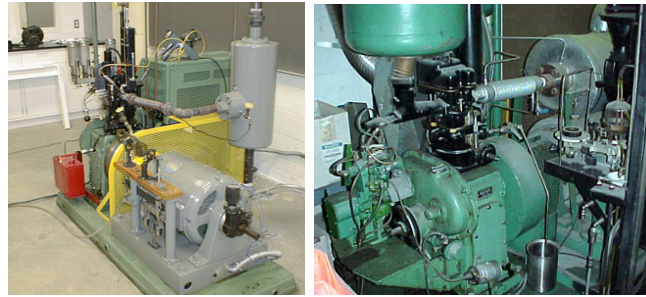


Figura 1.4: Primer motor CFR creado por *Waukesha*.

La sencillez del diseño y la capacidad de variar la relación de compresión rápidamente fueron dos factores decisivos en la elección de este motor. Más de 80 años después se sigue utilizando el estándar realizado por *Waukesha* para medir el octanaje de los combustibles [7].

Otros diseños de la compañía americana destacan por haber sido utilizados comúnmente en la industria petrolera; como el *CFR Dyno*, *Octane*, *Cetane*, y *Aviation Super Charged*. Estos motores fueron fabricados en serie durante la Segunda Guerra Mundial, principalmente, la unidad *Aviation Super Charged*, que permitió el desarrollo de gasolinas de octanaje 100 y 115/145 para los aviones de combate.



(a) CFR Dynamometer. (b) *Aviation Super Charged*.

Figura 1.5: Otros modelos de *Waukesha*

## 1.2.2 SISTEMAS DE INYECCIÓN INDIRECTA DE GASOLINA

### Descripción del sistema

En motores gasolina con inyección indirecta, la formación de la mezcla aire/combustible comienza fuera de la cámara de combustión, en el conducto de admisión. Desde su aparición en el mercado, estos motores y los sistemas de control evolucionaron hasta sustituir por completo a los motores carburados. La capacidad de medida del combustible y el control preciso de la inyección propiciaron esto [8]. En la Figura 1.6 se presenta un esquema típico de estos sistemas.

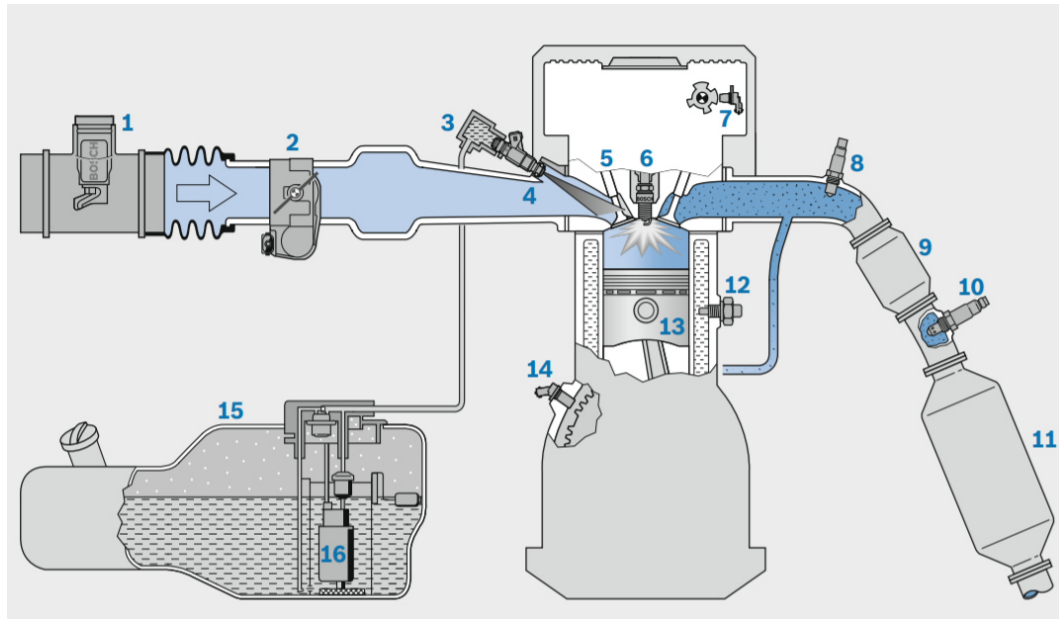


Figura 1.6: Sistema de inyección indirecta gasolina. 1- Sensor de hilo caliente. 2- Válvula de mariposa. 3- Common-rail. 4- Inyector gasolina. 5- Válvula de admisión. 6- Bujía. 7- Sensor de posición del árbol de levas. 8- Sonda Lambda I. 9- Convertidor catalítico primario. 10- Sonda Lambda II. 11- Convertidor catalítico principal. 12- Sensor de temperatura del motor. 13- Pistón. 14- Sensor de posición del cigüeñal. 15- Tanque de combustible. 16- Bomba de combustible eléctrica.

La unidad de control electrónica (ECU) calcula la cantidad de combustible necesario en relación a la masa de aire que en ese momento está entrando al motor y además, determina el momento en el que se debe llevar a cabo la inyección para satisfacer la demanda de potencia [9].

La ECU controla principalmente; el tiempo de inyección, la apertura de los inyectores, el tiempo de ignición y la posición de la válvula de mariposa, una vez conocida la masa de combustible a inyectar. Para realizar esta tarea es de vital importancia la información de algunos sensores como el de régimen de giro del cigüeñal y posición árbol de levas, así como el sensor de caudal másico de aire.

En motores de inyección indirecta gasolina, el combustible es inyectado antes de la válvula de admisión. Para tal efecto, la bomba eléctrica debe suministrar el combustible al inyector a la presión indicada (aproximadamente 4.5 bar). La mezcla se introduce en el cilindro durante el tiempo de admisión y las correcciones en la cantidad de combustible inyectado se realizan con la información del sensor Lambda.

### **Formación de la mezcla aire/combustible**

La formación de la mezcla comienza desde la inyección en el conducto de admisión del motor y se extiende durante el tiempo de admisión y compresión hasta el punto de ignición. Este proceso es complicado dado que muchos factores influyen en el mismo: las características macroscópicas y de transporte del chorro de combustible, la introducción del aire y el combustible inyectado en el cilindro y la homogeneización de la mezcla antes de la ignición son algunos de ellos [8].

La correcta adaptación de los procesos nombrados anteriormente influyen de manera directa en la buena preparación de la mezcla. Además de éstos, existen otros parámetros de suma importancia como la temperatura del motor, el instante en que se realiza la inyección, el flujo de aire, la generación de gotas de combustible o la focalización del chorro. A continuación se explican en detalle algunos de estos parámetros.

- **Formación de gotas:** En el momento siguiente a la apertura del inyector, se crea una nube de pequeñas gotas que comienzan a evaporarse. Sin embargo, cuando el motor está frío es muy poca la cantidad de gotas que se evaporan en el conducto de admisión y el combustible queda impregnado en la pared como una película. La mezcla como tal, se lleva a cabo en el interior del cilindro. De otra forma, si el motor está caliente, una gran porción de las gotas se evaporan en el conducto de admisión, finalizando el proceso de mezcla en el interior del cilindro.

- **Instante de inyección:** El instante de inyección tiene una gran influencia en la formación de la mezcla y en la emisión de hidrocarburos [8].

- **Inyección sincronizada con la apertura de la válvula de admisión (Figura 1.7).** En este caso, la inyección ocurre cuando la válvula está abierta. Si el motor está frío, provoca que el combustible se desplace hasta la pared opuesta del cilindro y se generen depósitos de combustible líquido que no va a reaccionar, aumentando las emisiones no tratadas. Actualmente este tipo de inyección solo se utiliza para aumentar la potencia del motor cuando éste está operando a la temperatura normal de funcionamiento.

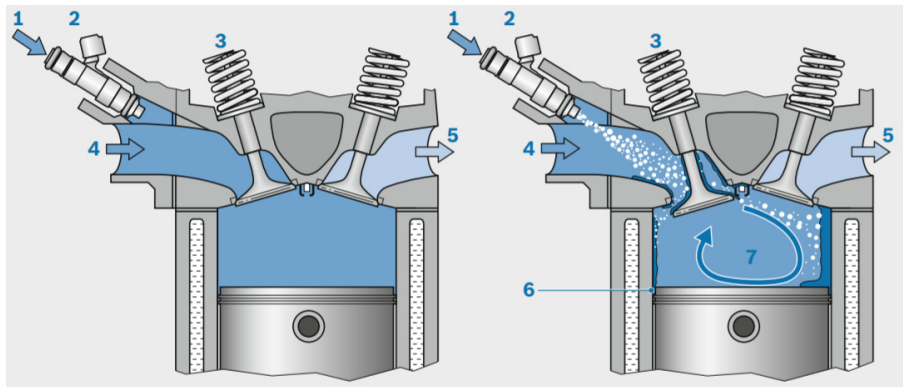


Figura 1.7: Inyección sincronizada con la apertura de la válvula de admisión. 1- Entrada de combustible. 2- Inyector gasolina. 3- Válvula de admisión. 4- Aire de entrada. 5- Gas de escape. 6- Parte superior del pistón.

- **Inyección anterior a la apertura de la válvula de admisión (Figura 1.8).** El combustible es forzado a pasar por el centro de la cámara de combustión en condiciones frías, evitando la acumulación de combustible en las paredes del cilindro. En operación a temperatura normal, el proceso de mezcla inicia antes del ingreso al cilindro, lo que promueve la homogeneización y mejor preparación de la mezcla.

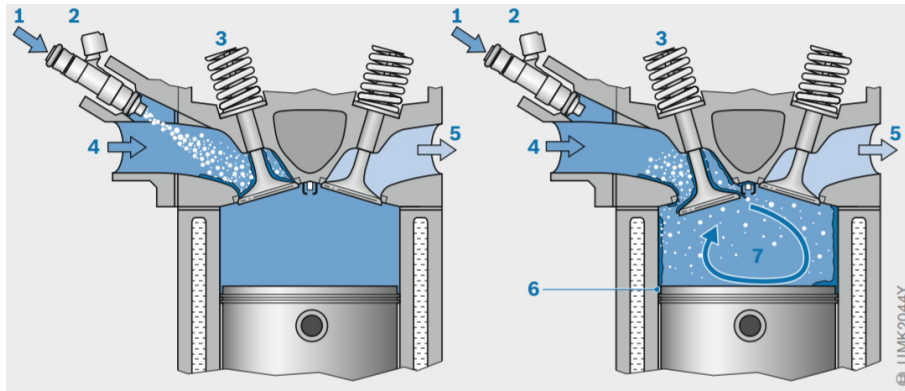


Figura 1.8: Inyección anterior a la apertura de la válvula de admisión. 1- Entrada de combustible. 2- Inyector gasolina. 3- Válvula de admisión. 4- Aire de entrada. 5- Gas de escape. 6- Parte superior del pistón.

- **Flujo de aire:** El flujo de aire está supeditado al régimen de giro del motor, a la geometría del sistema de admisión y al tiempo de apertura y levantamiento de la válvula de admisión. En la mayoría de los casos también se cuenta con una válvula de control de flujo. El objetivo es introducir el aire necesario en el tiempo disponible para conseguir una buena homogeneización de la mezcla antes del momento de ignición [8].
- **Presión en la admisión:** Si existe una presión diferencial entre el conducto de admisión y la cámara de combustión, en el momento de la apertura de la válvula, el flujo creado propiciará el transporte de la mezcla hacia el interior. Si la presión en el conducto de admisión es mucho mayor, el proceso anterior ocurre a mayor velocidad, provocando turbulencias que mejoran la formación de la mezcla. Si en algún momento, la presión en la cámara de combustión es mayor que en el conducto de entrada de gases, los productos de la combustión anterior fluirán hacia el conducto de admisión [8].

### 1.2.3 AUTOIGNICIÓN

#### 1.2.3.1 AUTOIGNICIÓN DESPUÉS DEL DISPARO DE LA CHISPA

El término históricamente conocido como *combustion knock*, es el resultado de la ignición espontánea de una porción de la mezcla del gas en la cámara de combustión, antes de la propagación de la llama generada por la chispa (Figura 1.9. Cuando se produce esta combustión anormal, se produce una liberación rápida de la energía química que se propaga a través de la mezcla restante no quemada, causando altas presiones locales. Las grandes ondas de presión y los gases calientes quemados en el cilindro son la principal causa de fallas mecánicas del motor debido al aumento del estrés térmico y mecánico [10].

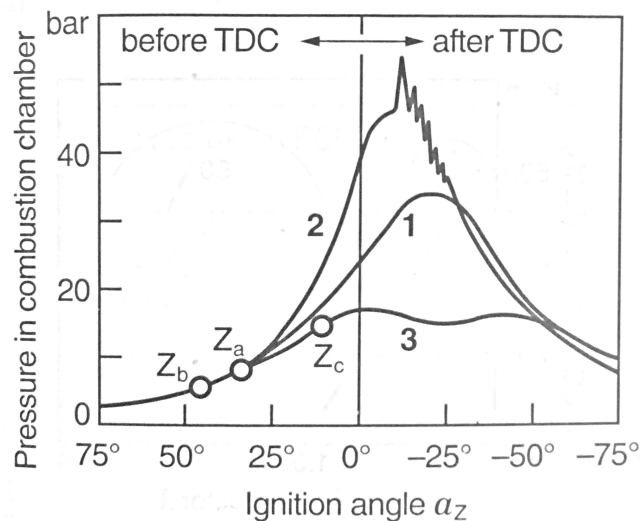


Figura 1.9: Señal de presión en cámara cuando aparece combustión anormal. 1- Ignición en el punto correcto ( $Z_a$ ). 2- Ignición muy adelantada ( $Z_b$ ). 3- Ignición muy atrasada ( $Z_c$ ).

La bujía genera la chispa un momento antes de que el pistón alcance el punto muerto superior, puesto que para iniciar la mezcla aire/combustible es necesario que

pasen unos milisegundos (el tiempo de ignición varía con respecto al régimen de giro del motor). El frente de flama se extiende de forma ordenada a través de la mezcla comprimida por el pistón. Después de la compresión y la ignición, algunas porciones de la mezcla todavía sin quemar pueden alcanzar temperaturas que provoquen la autoignición. Como resultado se obtiene una combustión no controlada que como se mencionó anteriormente es precursor de fallas en el motor.

Esta combustión no controlada produce ondas de presión que se propagan a través de la cámara de combustión hasta chocar con las paredes del cilindro generando un ruido metálico característico de este fenómeno. Los pulsos generados por las ondas de presión son medibles. Un ejemplo de la señal de knock es la representada en la imagen 1.9 donde se adelantó el momento de ignición para provocar el fenómeno [11].

### 1.2.3.2 MÉTODO HUCR Y CCR

Por sus siglas en inglés *Highest useful and critical compression ratio* (HUCR), este método desarrollado por **HR Ricardo** [12] define la relación de compresión crítica como la primera detonación audible con una temperatura definida y cuando la ignición y la formación de la mezcla están ajustadas para dar la mayor eficiencia. Otros autores como **JM Capbell et al.** [13], definieron un método similar al de HR Ricardo para evaluar la relación de compresión crítica de diferentes hidrocarburos, llamado CCR (*Critical compression ratios*).

Los dos métodos mencionados antes dependían del motor y de las condiciones en las que se realizaban los ensayos, por lo que no eran válidos si se cambiaba el motor o los parámetros de operación. Esto condujo a comparar el combustible desconocido con la mezcla de otros dos combustibles de referencia. En Inglaterra se utilizaba tolueno y heptano y en los Estados Unidos anilina y combustible de referencia.

### 1.2.3.3 MÉTODO ASTM-CFR

The Cooperative Fuel Research Committee (CFR) utilizó como combustibles de referencia los siguientes [14].

- n-heptano (número de octano = 0).
- 2,2,4-trimetilpentano (número de octano = 100).

Para combustibles con número de octano mayor a 100 se utilizaban mezclas de isooctano y tetraetilo de plomo.

Los combustibles de referencia eran colocados en el sistema de alimentación de combustible junto con el combustible desconocido en tres alimentadores separados.

Originalmente se definió el método *Research* ASTM D908 para la evaluación de los combustibles. Sin embargo, el desempeño de algunos combustibles medido con este método, no era el mismo que durante su uso en vehículos viajando en carretera, donde la exigencia era mayor. Por ello, se definió el método *Motor* que fue desarrollado para tener una mayor correlación entre el desempeño de los combustibles en carretera y en el laboratorio. En la Tabla 1.1 se detallan los parámetros de cada método [14].

Nótese la diferencia en el régimen de giro del motor, el avance de la ignición y la temperatura de la mezcla en la admisión de los métodos descritos en la Tabla 1.1. Al verse incrementada la temperatura de los gases de entrada y la velocidad del motor, si se prueba un combustible sensible a la temperatura, el número de octano será mas bajo en el método *Motor*. Teniendo en cuenta esta consideración se puede definir la sensibilidad del combustible como la diferencia entre los números de octanos obtenidos en los dos ensayos.

Tabla 1.1: Parámetros de funcionamiento para los test de knock en gasolinas de motores de aviación y de transporte de personas.

Método	ASTM	NO	rpm	Ignición	T_Ref	T_Gas	P_Gas
-	-	-	-	[°]	[°C]	[°C]	[PSI]
Motor	D357	0-100	900	14-26	100	37.78	11-15
Research	D908	0-100	600	13	100	15.56	11-15
Research	D1656	100-116	600	13	100	15.56	11-15
Supercharge (Rich Mix)	D909 D1948	85-100 100-161	1800	45	190.56	107.22	54.4
Aviation (Lean Mix)	D614	70-100 100-161	1200	35	190.56	51.67	

Nomenclatura: ASTM- Nombre del ensayo. NO- Número de octano. rpm- Régimen de giro. Ignición- Ángulo de avance de la chispa. T\_Ref- Temperatura del refrigerante. T\_Gas- Temperatura del gas de entrada. P\_Gas- Presión del gas de entrada.

#### 1.2.3.4 FACTORES QUE PROVOCAN LA APARICIÓN DE AUTOIGNICIÓN

- Demasiado adelanto en la ignición: Avanzando el momento de la ignición de la mezcla, se produce con anterioridad el aumento de la temperatura en la cámara de combustión, lo que genera además el aumento de la presión.
- Alta densidad de carga en el cilindro: La densidad de carga en el cilindro, por lo general se aumenta para dar respuesta a una demanda de carga del motor mayor. Si aumenta la densidad en el cilindro aumenta la temperatura durante la compresión.
- Grado del combustible: Combustibles con menor número de octano tendrán más tendencia al knock.

- Alta relación de compresión: Esto provoca mayores temperaturas y presiones en el cilindro durante la compresión.
- Mala refrigeración: Provoca el calentamiento excesivo de la culata y los gases de la cámara de combustión.
- Geometría del motor: La geometría del motor afecta a la generación de turbulencia durante la preparación de la mezcla. La tendencia del motor al knock puede verse aumentada por la geometría del mismo [8].

#### 1.2.3.5 AUTOIGNICIÓN ANTES DEL DISPARO DE LA CHISPA

La tendencia de los fabricantes a disminuir el tamaño de los motores de gasolina modernos y la implementación de los sistemas de inyección directa, promueven la aparición de la pre-ignición. La bajada de las prestaciones del motor provocada por la disminución de su volumen, es contrarrestado con la implementación de sistemas sobralimentados. A medida que la presión del flujo de trabajo aumenta, aumenta también el la eficiencia, pero este incremento en la presión está limitado por la aparición de la autoignición [9].

Los puntos descritos anteriormente sobre los factores que promueven la aparición de knock, además provocan la aparición de pre-ignición antes del disparo de la chispa.

Comparada con la combustión normal, este tipo de combustión prematura provoca el aumento de la temperatura y de la presión de la mezcla antes del tiempo correcto, lo que resulta en una combustión severa, llamada por algunos autores súper-knock, que puede dañar el motor de forma permanente.

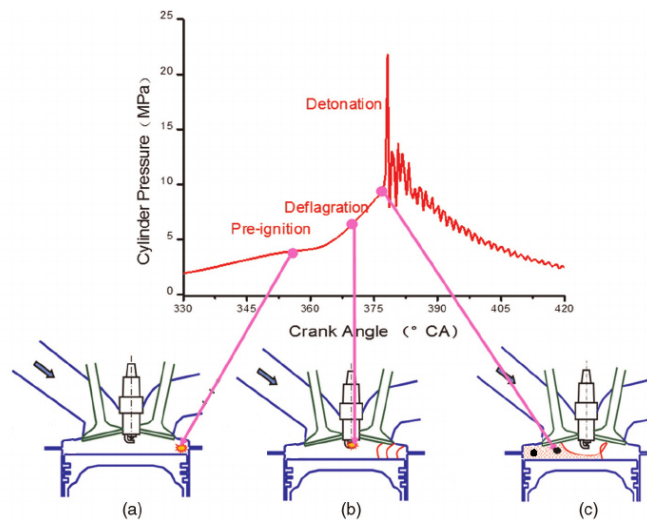


Figura 1.10: Proceso desde pre-ignición hasta el súper-knock: (a) Ignición espontánea por punto caliente, (b) llama e ignición por chispa, y (c) detonación final del gas [1].

En la Figura 1.10, se muestra este fenómeno. Las consecuencias del mismo se derivan de la explosión de parte de la mezcla en la carrera de compresión del pistón.

## 1.3 ESTADO DEL ARTE: ÚLTIMOS MODELOS ASTM-CFR

### 1.3.1 MOTOR F1/F2 GASOLINA

Aunque el primer motor fue fabricado en 1929, hoy en día la geometría no ha cambiado. Tampoco lo han hecho los materiales o la distribución de la bancada. Donde si existen cambios sustanciales es en la electrónica que gobierna las máquinas de *Waukesha*. En la Figura 1.11 se muestra la versión 2015 del motor de gasolina.



Figura 1.11: Modelo F1/F2 gasolina de *Waukesha*.

Los modelos F1/F2 del año 2015 siguen siendo, a nivel mundial, el estándar de medida de la resistencia a la explosión de las gasolinas. Estos motores tienen un rango de medida de octanaje de 40-120, y pueden realizar las pruebas en dos modos que se describen a continuación [15].

- *Research Method (RON)*: 600rpm.
- *Motor Method (MON)*: 900rpm.

La metodología para realizar la prueba es la misma en los dos modos. Solo varía la velocidad de giro. El número de octanos de un combustible está definido por la norma ATSM D2699/D2700 IP 236/237 [16]. Ambos ensayos comparan el combustible a medir con otros dos estándares de octanaje conocido que difieren en dos octanos. El ensayo consiste en variar la relación de compresión del motor hasta que el medidor de detonaciones detecta la aparición de knock. Finalmente, el octanaje del combustible a medir se obtiene por interpolación.

### 1.3.2 MOTOR F5 DIÉSEL

Para la medición del número de cetano existe un modelo nuevo como el que se presenta en la Figura 1.12. El modelo *Waukesha CFR F5* es un estándar globalmente aceptado para determinar el número de cetano y certificar la calidad de la inflamación de combustibles diésel. Fue introducido en el mercado en 1938 y todavía hoy es referencia a nivel mundial. Las normas para determinar el número de cetano y la calidad de la inflamación de los combustibles diésel existen las normas ASTM D613 y EN ISO 5765 [17].



Figura 1.12: Modelo F5 diésel *Waukesha*.

Debido a que estos motores son un estándar de medida para conocer la resistencia a la explosión de los combustibles, la geometría y los materiales del bloque motor no han variado a lo largo de los años. Sin embargo, los sistemas de medida y control se han ido adaptando a los nuevos tiempos, sustituyendo los antiguos indicadores analógicos por pantallas táctiles y automatizando el proceso de medición. En la tabla 1.2 se comparan los modelos gasolina y diésel [18].

Tabla 1.2: Comparación de los modelos CFR Gasolina/Diésel.

<b>Modelo</b>	<b>F1/F2</b>	<b>F5</b>
Combustible	Gasolina	Diesel
Relación de compresión	4:1 a 18:1	8:1 a 36:1

Fuente: CFR Engines Inc.

La empresa que tiene permiso de distribución y venta de los motores de *Waukesha* es *GE Power*. Existe poca información sobre los nuevos sistemas de control y medida de los modelos más modernos por razones obvias, pero es posible identificar en la información de venta algunas de las actualizaciones más significativas. Por ejemplo, la interfaz hombre-máquina está programada con el software de *National Instruments (NI)*, *LabVIEW*. También se sustituye la palanca manual para variar la relación de compresión por un motor eléctrico y la participación del operario, en el proceso de medida, se ha disminuido considerablemente.

## 1.4 HIPÓTESIS

Desarrollar un sistema de control y registro de variables termodinámicas y de operación con tecnología de última generación, que permita realizar ensayos de forma segura para estudiar el proceso de combustión, sin que el principio original para el cual fue diseñada la máquina se vea afectado.

## 1.5 OBJETIVOS

### 1.5.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general de esta investigación, es desarrollar un código de control para motores de combustión interna. Para ello, es necesario diseñar e implementar un sistema de adquisición de datos y de control para la máquina térmica *Waukesha CFR* que es la herramienta principal con la que se validará el código. Al finalizar la investigación, la máquina debe estar operativa junto con todos los sistemas auxiliares. Además, los sistemas de medida y de control de la instalación deben estar incluidos en una interfaz gráfica hombre-máquina global. Con todo lo anterior, se tendrá la certeza de que los ensayos que se realicen son fiables para llevar a cabo investigación de vanguardia.

### 1.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para realizar ensayos con combustibles en la instalación, es necesario definir objetivos específicos que sirvan de guía hasta alcanzar el cumplimiento del objetivo general.

- Acondicionamiento del laboratorio. Para albergar una instalación de estas características, es necesario planear la distribución del lugar donde se va a situar el motor y los sistemas auxiliares del mismo, teniendo en cuenta la seguridad y confort de las personas que utilizarán la instalación.
- Instalación de los sistemas auxiliares. Se entienden como sistemas auxiliares, todos aquellos que permiten el funcionamiento correcto del motor. A modo de ejemplo se pueden nombrar los sistemas de admisión y escape de gases, el

sistema de arranque, el sistema de calentamiento del bloque motor o la bancada que sostiene la máquina.

- Arranque del motor en arrastre para comprobar el correcto funcionamiento del motor y los sistemas auxiliares, en especial, el sistema de lubricación y el sistema de arranque.
- Medida de variables en la máquina, como temperaturas y presiones, régimen de giro, presión en cámara y posición del pistón. Instalación de los sensores, transductores y amplificadores de señal que componen los sistemas de medida. Para cumplir con este objetivo será necesario preparar el hardware y programar la adquisición y el tratamiento de las señales de forma independiente.
- Puesta en marcha y validación de los sistemas de control. Para operar la máquina de forma segura es necesario automatizar algunos procesos, entre los que destacan el calentamiento del aire de admisión y la variación automática de la relación de compresión.
- Instalación y control del sistema de inyección. Para ello será necesario realizar la adaptación de la entrada del inyector a la línea de admisión, así como diseñar el porta-inyector y colocar el equipo de presurización de combustible. Además se diseñará el hardware responsable de la energización del inyector y se programará la activación del mismo.
- Arranque en arrastre con combustión. Pruebas de combustión con gasolina para verificar el correcto funcionamiento del sistema de alimentación de combustible e inyección.
- Validación del código de control y de la instalación completa mediante ensayos con combustión de gasolinas que proporcionen resultados consistentes con la literatura.

## 1.6 METODOLOGÍA

Para cumplir con los objetivos descritos en el apartado anterior se propuso la siguiente metodología representada en la Figura 1.13. Ésta queda estructurada en cuatro fases que se deben seguir para que la instalación quede operativa.



Figura 1.13: Metodología del proyecto.

### 1.6.1 FASE 1: OBRA CIVIL

La primera fase es la de Obra Civil. En esta fase se incluye todo lo referente al acondicionamiento del laboratorio. Y se deben acometer trabajos de reparación de la sala, al mismo tiempo que se planea la distribución de los elementos y espacios disponibles. Por la peculiaridad de la instalación, es necesario tener en cuenta aspectos como el punto de extracción de gases, las conexiones eléctricas de los equipos o la colocación de la estación de usuario. En la Figura 1.14 se presenta un diagrama esquemático de la distribución del laboratorio.

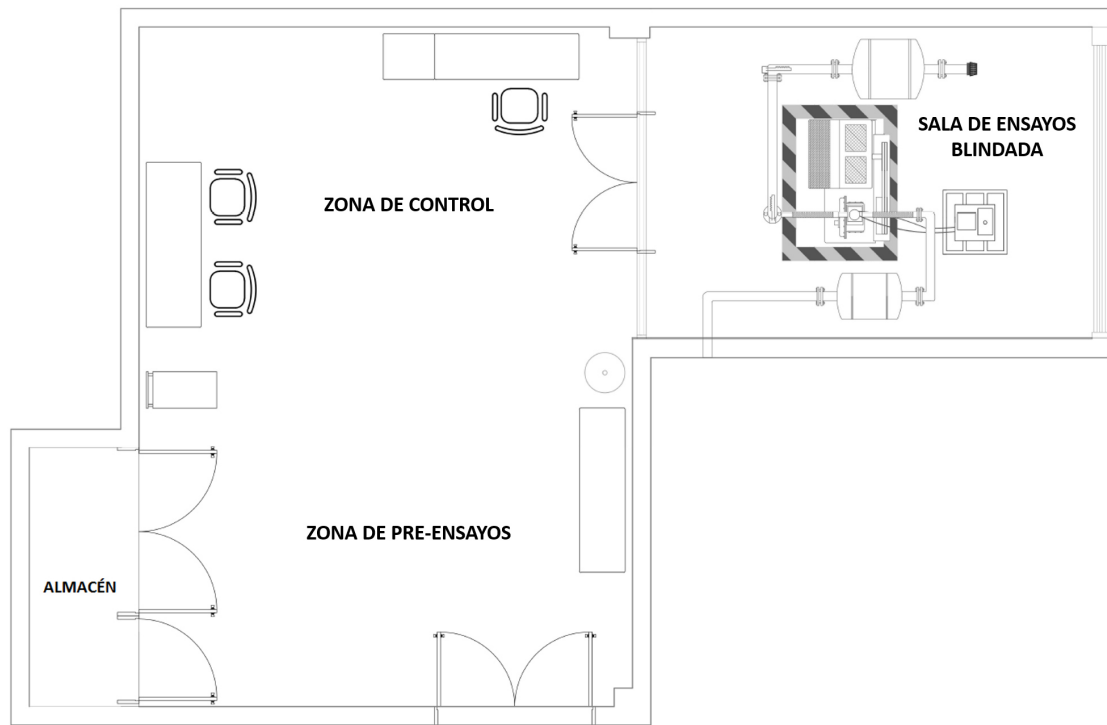


Figura 1.14: Diagrama esquemático de la distribución del laboratorio.

En la distribución del laboratorio se pueden observar diferentes zonas según el equipo y su finalidad. Existen dos salas separadas por una cristalera blindada. En una de ellas se encuentra el motor y todos los sistemas de medida, así como los sistemas auxiliares y de control. En la sala adjunta se encuentra la zona de control, pensada para albergar la estación de usuario y desde la que es posible monitorear la instalación. Por último, faltaría nombrar la zona de pre-ensayos y el almacén donde se encuentran los equipos de test y se almacena el herramental necesario para la puesta a punto de la instalación.

## 1.6.2 FASE 2: INSTRUMENTACIÓN DE LA INSTALACIÓN

En la segunda fase se lleva a cabo la instalación de todos los sensores y transductores, así como del equipo electrónico y de potencia que hará posible la lectura de

las señales de los mismos. Los sensores deben ser instalados convenientemente en el punto de medida y su conexión debe realizarse como indica el fabricante. Los cables son llevados hasta el sistema de adquisición de datos y conectados en las entradas del controlador *CompactRIO* siguiendo las especificaciones de cada dispositivo.

En esta fase también, está contemplado la programación de un interfaz gráfico que permita visualizar el valor de todas las señales y ver los datos en gráficas, así como grabarlos en memoria. Debido a que el dispositivo que gobierna toda la instalación es de la firma *National Instruments (NI)*, el software utilizado para la programación es *LabVIEW* en su versión 2015.

Será conveniente realizar arranques en arrastre para verificar el funcionamiento correcto de los sistemas de medida y para sumar horas de funcionamiento al motor. Si es necesario se realizará el cambio de aceite del motor.

### 1.6.3 FASE 3: SISTEMAS DE CONTROL

La tercera fase tiene como objetivo instalar, programar y probar todos los sistemas de control de la instalación. En el control se incluyen los siguientes sistemas:

- Sistema de calentamiento del aire de admisión.
- Sistema de variación de la relación de compresión.
- Sistema de emergencia.

Es necesario tener en cuenta que cada uno de los sistemas de control se deben instalar físicamente, programar y probar. Cada uno de ellos tiene un método distinto de programación por lo que, en esta fase, la carga de documentación será mayor y de gran importancia. Una vez realizada la instalación y terminada la programación, los sistemas de control deben pasar una prueba de validación con la que se asegura que funcionan de manera correcta y adecuada.

#### 1.6.4 FASE 4: VALIDACIÓN EXPERIMENTAL Y ENSAYOS CON COMBUSTIÓN

Una vez que todos los sistemas de medida y control estén operativos y hayan sido probados, comienza la última fase en la que se debe implementar el sistema de alimentación de combustible al motor. Para este sistema es necesario determinar el punto donde va a colocarse el inyector de gasolina, diseñar el portainyector y el sistema de presurización de combustible.

El control del sistema debe ser capaz de energizar el inyector de forma sincronizada con la apertura de la válvula de admisión y la detección del punto muerto superior del pistón. El usuario debe tener la posibilidad de configurar los grados de adelanto o atraso en la inyección y en la ignición, y el número de ciclos en los que se va a inyectar

Es de gran importancia en esta fase la propuesta final de la interfaz hombre-máquina que gobierna la instalación completa.

Esta fase termina con la validación experimental del sistema de control y de la instalación completa para dar por finalizada esta investigación.

## CAPÍTULO 2

# DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LA MÁQUINA TÉRMICA

---

---

<b>1.1. Motivación</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Antecedentes</b>	<b>5</b>
1.2.1. Breve historia del Motor CFR	5
1.2.2. Sistemas de inyección indirecta de gasolina	6
1.2.3. Autoignición	11
<b>1.3. Estado del arte: últimos modelos ASTM-CFR</b>	<b>16</b>
1.3.1. Motor F1/F2 gasolina	16
1.3.2. Motor F5 diésel	18
<b>1.4. Hipótesis</b>	<b>19</b>
<b>1.5. Objetivos</b>	<b>20</b>
1.5.1. Objetivo general	20
1.5.2. Objetivos específicos	20
<b>1.6. Metodología</b>	<b>22</b>
1.6.1. Fase 1: Obra Civil	22
1.6.2. Fase 2: Instrumentación de la instalación	23

---

1.6.3. Fase 3: Sistemas de control . . . . .	24
1.6.4. Fase 4: Validación experimental y ensayos con combustión	25

---

## 2.1 ELEMENTOS DEL BANCO DE ENSAYOS

El motor CFR y su bancada forman la máquina térmica de *Waukesha*. Oficialmente la unidad es conocida como *ASTM-CFR Engine* debido a las dos instituciones que lo desarrollaron; *American Society for Testing Materials* y *Cooperating Fuel Research Committee* [19, pág 71].

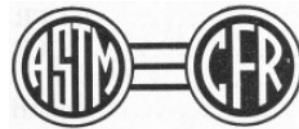


Figura 2.1: ASTM-CFR.

En este capítulo se describen todos los componentes del banco de ensayos, así como los parámetros de funcionamiento del motor CFR. Es importante para el lector tener conocimiento de lo explicado en este capítulo para entender las modificaciones que se realizaron en el motor, la colocación de sensores y el porqué de los sistemas de control implementados.

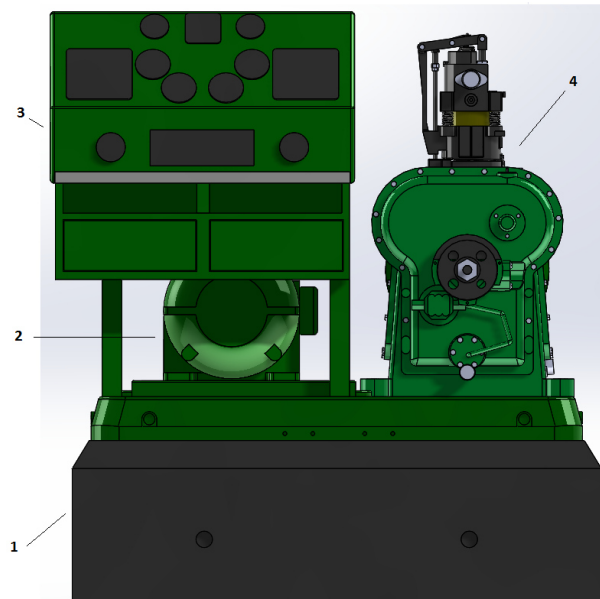


Figura 2.2: Máquina CFR. 1- Bancada de concreto. 2- Motor eléctrico. 3- Estación de control. 4- Motor CFR.

De forma general, se pueden diferenciar cuatro partes que componen la máquina. Éstas se pueden observar en la Figura 2.2. La bancada de concreto y un chasis de metal (1) sostienen el motor eléctrico (2), el motor CFR (4) y la mesa con los indicadores analógicos originales (3). En los siguientes apartados del capítulo se explican en detalle los elementos principales del banco de ensayos anteriormente enumerados.

Para que la máquina térmica opere, además de los sistemas de la bancada, son necesarios los sistemas auxiliares que permitan su correcto funcionamiento. Éstos sistemas se incluyen en el diagrama general de la Figura 2.3 y algunos de ellos serán explicados en detalle en apartados siguientes de éste y otros capítulos.

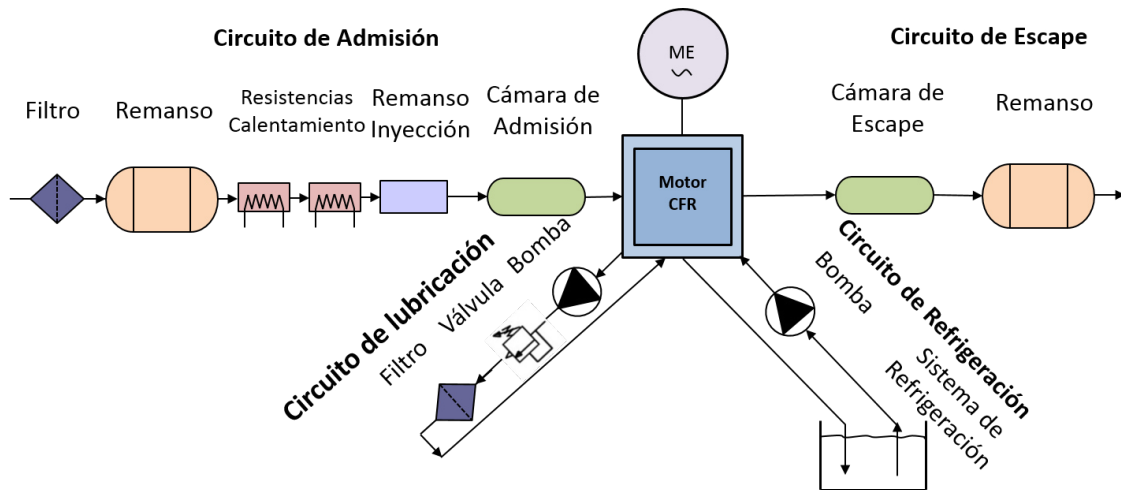


Figura 2.3: Diagrama general de la instalación.

## 2.2 MOTOR ELÉCTRICO Y SISTEMA DE ARRANQUE

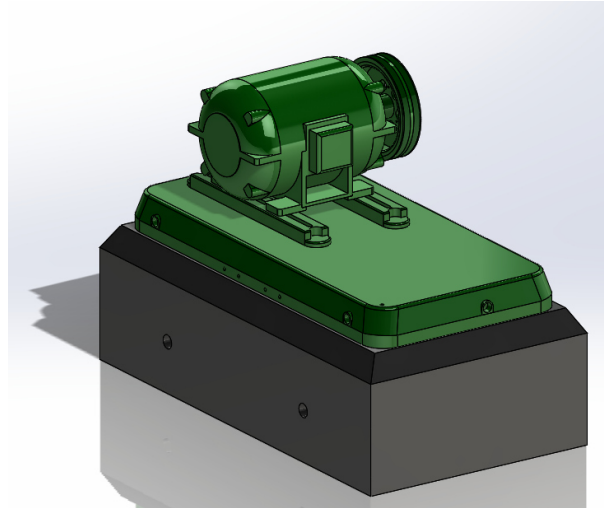


Figura 2.4: Bancada y motor eléctrico.

Sobre la bancada de concreto se sitúa un chasis de acero que sirve de base para el resto de los elementos del banco de ensayos. En la Figura 2.4 se presenta un dibujo del motor eléctrico síncrono. Este motor está conectado al motor CFR y mediante correas es capaz de iniciar el giro del motor de combustión y absorber la potencia generada por el mismo manteniendo un régimen de giro constante.

Tabla 2.1: Características del motor síncrono.

<b>Tipo</b>	<b>Descripción</b>
Potencia	4 HP
Voltaje	220/440 VAC
Intensidad	18.2/9.1 A
Fases	3
Régimen	1200 rpm

Fuente: CFR Engines Inc.

El régimen de giro debe ser constante en todo momento. Aún así, es posible variarlo cambiando la posición de las correas de los volantes conectados a los ejes de los motores. Originalmente la máquina estaba diseñada para funcionar en dos modos según el régimen de giro del motor de combustión: modo Investigación ( $600rpm$ ) y modo Motor ( $900rpm$ ) [19, pág 82]. El régimen de giro actual de los motores se presenta en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Regímenes de giro de los motores.

<b>Motor</b>	<b>Régimen de giro</b>
Eléctrico	$1285 \pm 25rpm$
Combustión	$930 \pm 20rpm$

Fuente: Medidas realizadas con tacómetro.

En el lateral izquierdo del motor se sitúa el arrancador del motor eléctrico con los botones de marcha y paro. Se optó por esta distribución porque obliga al investigador a realizar el arranque de forma manual. Esto es importante puesto que es necesario realizar una inspección visual antes de iniciar el banco de ensayos. De la misma forma, cuando se arranca el motor y antes de comenzar el ensayo, es de vital importancia observar, en el medidor analógico, que la presión de aceite alcanza su valor de trabajo ( $25 - 30psi$ ) [19, pág 160].

El motor cuenta con un sistema de conteo de las horas de funcionamiento. La maniobra que activa el reloj fue rediseñada debido a que la electrónica original no funcionaba correctamente. Se conectaron dos relevadores a los pulsadores de marcha y paro para sincronizar el arranque del motor con el reloj. En el momento del primer arranque en el laboratorio, el motor contaba tan solo con 97.85 horas de funcionamiento.

## 2.3 MOTOR DE COMBUSTIÓN

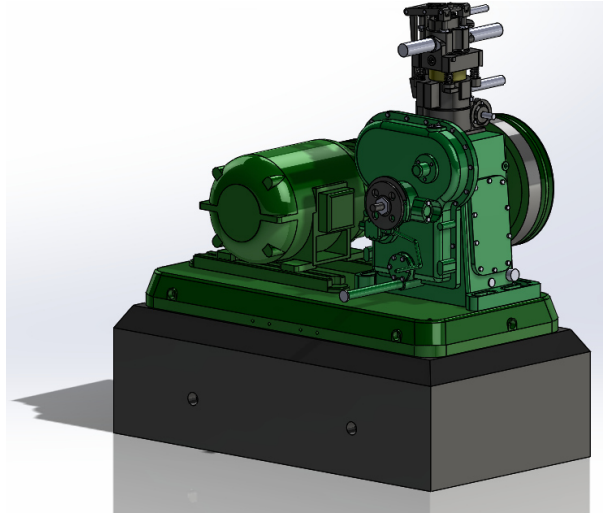


Figura 2.5: Bancada y motores.

El motor de combustión es el elemento principal de la máquina de *Waukesha*. Entre sus características, cabe destacar que es monocilíndrico y que su relación de compresión es variable. El objetivo de éste es llevar a la mezcla aire/combustible a unas condiciones de presión y temperatura tales, que sea posible la combustión.

### 2.3.1 SISTEMAS DE ADMISIÓN Y ESCAPE

En la Figura 2.3 se presentan el sistema de admisión y escape del Motor CFR. En el conducto de admisión se dispuso un filtro de aire, un remanso, dos resistencias de calentamiento y la precámara de inyección donde se encuentra el portainyector. Por su parte, el conducto de escape cuenta con otro remanso y los tubos necesarios para llevar los gases de escape hasta el punto de extracción.

Como ya se explicó, tanto el sistema de admisión como el de escape cuentan con sendos remansos. En los motores monocilíndricos existen grandes fluctuaciones

en la velocidad del flujo de gases. El volumen de estos tanques debe ser como mínimo 50 veces mayor que el volumen del cilindro [20]. Con esta configuración se consigue un estado estacionario suficiente como para realizar medidas de forma precisa.

Los tramos de conexión de los conductos de admisión y escape con el Motor CFR están fabricados con manguera flexible, puesto que la culata del motor se desplaza para variar la relación de compresión.

### 2.3.2 CULATA DEL MOTOR

El cilindro está fabricado en hierro fundido de una pieza junto con la culata del motor. La pared exterior del cilindro tiene mecanizada una cremallera. Esta geometría hace posible la unión de la cabeza con el bloque motor y además, hace posible variar la relación de compresión.

Un micrómetro situado en la cabeza del motor facilita la lectura del desplazamiento del cilindro con respecto al bloque motor. La altura del cilindro se variaba originalmente mediante un mecanismo de engranes accionados por una manivela.

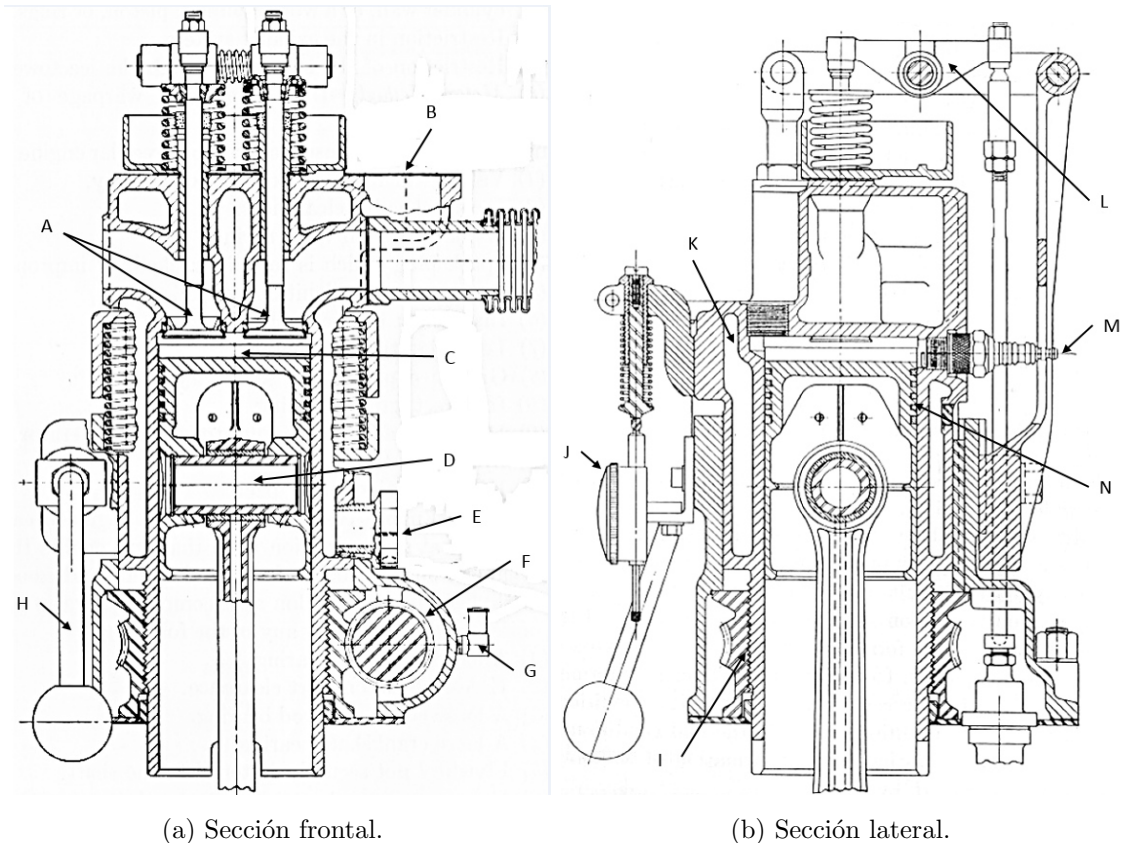
El pistón alojado en el cilindro tiene cinco segmentos, uno de aceite y cuatro de presión. Las características del pistón y del cilindro del motor se presentan en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3: Dimensiones del cilindro

<b>Cilindro</b>	
Relación de compresión	4 – 16
Diámetro interno	8.236 <i>cm</i>
Altura	20.741 <i>cm</i>
Desplazamiento de la cabeza	2.540 <i>cm</i>
Volumen cilindro desplazado	611.729 <i>cm</i> <sup>3</sup>
<b>Pistón</b>	
Altura	12.021 <i>cm</i>
Diámetro	8.225 <i>cm</i>
Carrera efectiva	11.430 <i>cm</i>
Número de anillos	5
Espesor anillo de aceite (1)	0.0481 <i>cm</i>
Espesor anillos de presión (4)	0.0336 <i>cm</i>

Fuente: Manual Motor CFR. Medidas realizadas.

En las figuras siguientes se presentan dos vistas seccionadas del bloque motor y se pueden visualizar los elementos nombrados en este apartado.



(a) Sección frontal.

(b) Sección lateral.

Figura 2.6: A- Válvulas de admisión y de escape. B- Salida de refrigerante. C- Cámara de combustión. D- Pistón. E- Entrada de refrigerante. F- Mecanismo para variar la relación de compresión. G- Engrasadores. H- Palanca de fijación de la relación de compresión. I- Rosca del cilindro. J- Micrómetro. K- Camisas para el paso de refrigerante. L- Balancín. M- Bujía. N- Segmento.

### 2.3.3 SISTEMA DE LUBRICACIÓN

El modelo del cárter del motor es CFR-48. Éste solo puede ser lubricado con aceite monogrado SAE 30 y debe ser cambiado cada 50 horas de funcionamiento [19]. Nunca se debe utilizar aceite sintético o multigrado. El circuito de lubricación bombea aceite al cigüeñal, al árbol de levas, al eje del balancín y a todos los engranes y partes móviles alojadas en el interior del cárter.

En el lateral derecho del motor hay un acceso óptico para ver el nivel de aceite. Para asegurar una buena lubricación el nivel debe quedar a la mitad de la mirilla.

La bomba de aceite está montada en el exterior del cárter, en la parte frontal del motor. Las líneas de succión y bombeo también son externas. Después de ser succionado del fondo del cárter, el aceite es bombeado a la válvula reguladora de presión de aceite para luego pasar al filtro y finalmente lubricar las partes internas del motor. En la Figura 2.7 se presenta la conexión hidráulica del sistema.

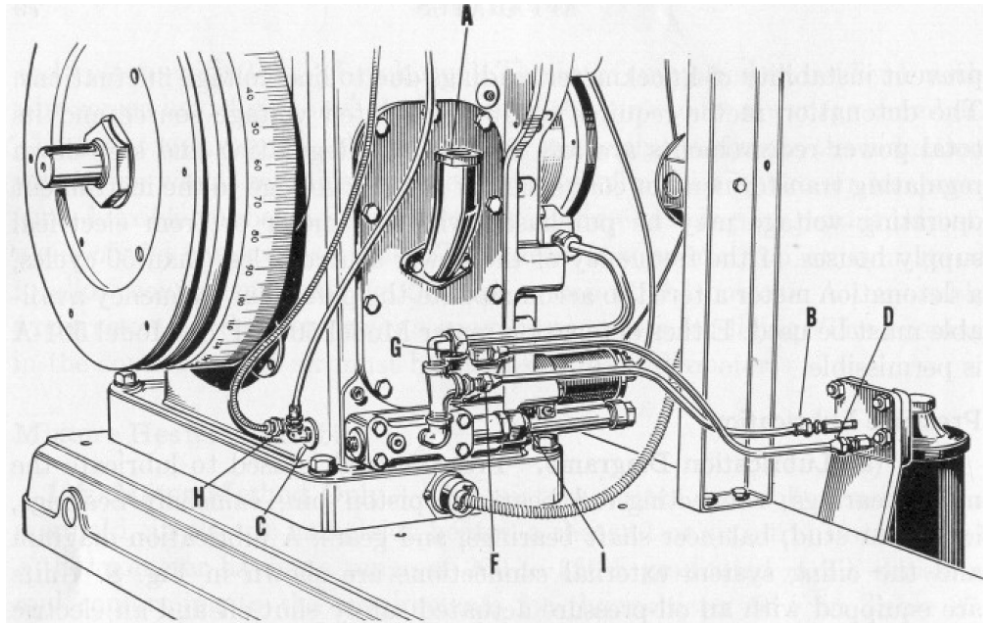


Figura 2.7: Conexión del circuito de aceite. A- Respiradero del cárter. B- Entrada de aceite al filtro. C- Toma de medida para presión del aceite. D- Salida de aceite del filtro. F- Salida de la bomba a filtro. H- Toma de medida para la temperatura del aceite. I- Válvula para la calibración de la presión.

La presión del aceite se regula manualmente mediante una válvula situada en la parte inferior izquierda de la cara frontal del motor. La presión de aceite debe estar entre los 25 y 30 *PSI*.

La temperatura del aceite puede variar dentro del rango  $90 - 160 F$  ( $32 - 71 C$ ) [19, pág 121]. No se debe sobrepasar nunca el nivel superior de temperatura. En la Tabla 2.4 se resumen las condiciones de trabajo del sistema de lubricación.

Tabla 2.4: Sistema de lubricación

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Temperatura de trabajo	$90 - 160 \text{ } ^\circ F$ ( $32 - 71 \text{ } ^\circ C$ )
Presión de trabajo	$25 - 30 \text{ PSI}$
Cambio de aceite y filtro	Cada 50 horas
Filtro	Gonher GP-28

Fuente: Manual Motor CFR.

En el panel frontal de la máquina hay instalados un indicador de presión y uno de temperatura de aceite. En el momento del arranque es necesario comprobar que la presión de aceite alcanza el rango indicado anteriormente. Si no fuese así, el sistema de emergencia implementado pararía el motor. Si no se alcanza la presión de trabajo, puede ser debido a un fallo en la bomba de aceite o a que el motor esté girando en sentido contrario. Esta falla puede ocurrir si se han intercambiado dos fases del motor eléctrico.

#### 2.3.4 REFRIGERACIÓN DE LA CULATA

El motor CFR tiene una temperatura de funcionamiento de  $70 \text{ } ^\circ C$ . Antes de arrancar hay que asegurar que la cabeza del motor está a esta temperatura. La temperatura del refrigerante puede aumentar hasta los  $100 \text{ } ^\circ C$  teniendo en cuenta el punto de ebullición del mismo. El líquido refrigerante es anticongelante común para motores fabricados en hierro, esto para evitar la corrosión en el metal.

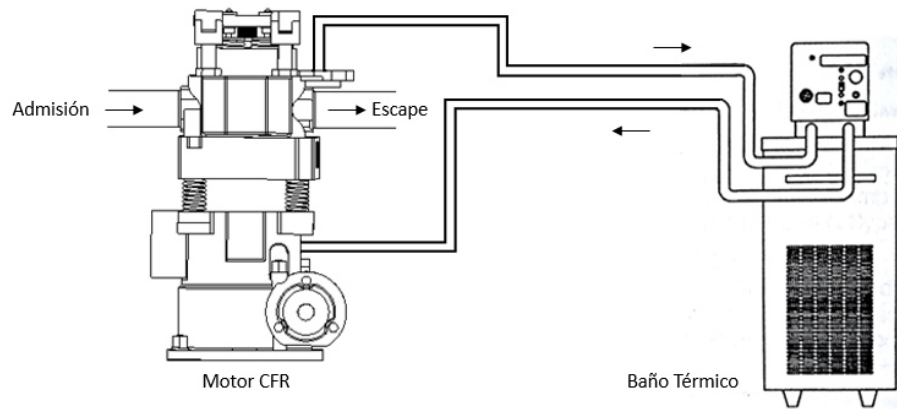


Figura 2.8: Refrigeración de la cabeza del motor.

Se sustituyó el sistema de refrigeración original de la máquina por un baño térmico de la marca *Thomas Scientific* ®. Este equipo permite controlar la temperatura de la cabeza del motor con una precisión de  $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$  [21]. En la Figura 2.8 se presenta la conexión del equipo de refrigeración con la culata del motor CFR.

## 2.3.5 CARACTERIZACIÓN DE LA CULATA

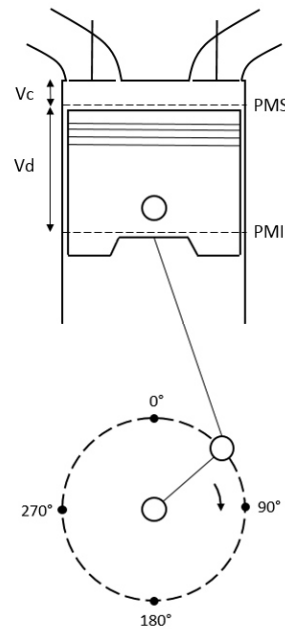


Figura 2.9: Geometría básica del motor de combustión.

Para calcular la relación de compresión de un motor es necesario determinar la relación entre el volumen máximo (volumen de la cámara de combustión  $[V_C]$  más volumen desplazado por el pistón  $[V_d]$ ) y el volumen mínimo (cámara de combustión  $[V_C]$ ). La fórmula general que lo describe es la siguiente [22].

$$RC = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_C + V_d}{V_C} \quad (2.1)$$

La relación de compresión en el motor CFR es variable gracias a que la culata puede ser desplazada según la necesidad que se tenga en cada caso. Originalmente se variaba manualmente girando una manivela situada en el lateral derecho del motor. Una vez que se alcanza la relación de compresión deseada, se puede fijar con una palanca de presión situada también en el lateral derecho de la máquina.

Según el fabricante, el desplazamiento efectivo de la culata es de una pulgada. Con ese recorrido es posible variar la relación de compresión de 4.46 a 16.00. La posición se puede medir gracias a un micrómetro instalado en la cabeza del motor cuya precisión es de milésimas de pulgada. En el manual de usuario, se incluye una tabla para comparar la lectura del micrómetro con la relación de compresión del motor.

Durante la puesta a punto se comprobó que la culata del motor tenía una carrera lineal de 1.625 pulgadas. Por lo tanto, fue necesario buscar el origen, es decir, el punto de la carrera donde la relación de compresión es igual a 16.00. Esta tarea se realizó posicionando el pistón en el punto muerto superior y llenando con aceite el interior de la cámara de combustión desde el acceso del sensor de presión en cámara. Cuando se obtuvo el volumen de la cámara de combustión indicado en el manual ( $40.8 \text{ cm}^3$ ) se instaló el micrómetro y se marcó como origen.

Se repitió el procedimiento anterior para doce relaciones de compresión menores, variando 0.1 pulgadas dentro de la carrera útil de la cabeza. Los resultados de estas medidas se presentan en la siguiente Tabla 2.5.

Tabla 2.5: Resultados de las medidas experimentales obtenidos durante la caracterización de la culata del motor..

<b>MEDIDAS TOMADAS EN MOTOR CFR - VOLUMEN</b>									
<b>D_abs</b>		<b>D_rel</b>		<b>N_rel</b>	<b>N_abs</b>	<b>M</b>	<b>P</b>	<b>V</b>	<b>RC</b>
<b>in</b>	<b>cm</b>	<b>in</b>	<b>cm</b>	<b>#</b>	<b>#</b>	<b>m in</b>	<b>bar</b>	<b>ml</b>	<b>-</b>
1.232	3.130	1.040	2.642	0.0	0.0	1.05	5.320	180.3	4.393
1.140	2.896	0.950	2.413	12.7	12.7	0.95	5.862	168.3	4.635
1.040	2.642	0.850	2.159	14.2	26.9	0.85	6.453	155.3	4.939
0.940	2.388	0.750	1.905	14.2	41.0	0.75	7.249	142.3	5.299
0.840	2.134	0.650	1.651	14.2	55.2	0.65	8.047	129.3	5.731
0.740	1.880	0.550	1.397	14.2	69.3	0.55	9.177	116.3	6.260
0.640	1.626	0.450	1.143	14.2	83.5	0.45	10.669	103.3	6.922
0.540	1.372	0.350	0.889	14.2	97.6	0.35	12.622	89.3	7.850
0.440	1.118	0.250	0.635	14.2	111.8	0.25	15.349	76.3	9.017
0.340	0.864	0.150	0.381	14.2	125.9	0.15	19.358	62.3	10.819
0.240	0.610	0.050	0.127	14.2	140.1	0.05	25.684	47.3	13.933
0.197	0.500	0.000	0.000	7.1	147.2	0	30.159	40.8	15.993

En la Tabla 2.5 cada una de las filas corresponde con una medida, estando el motor parado y el pistón en el punto muerto superior. En las columnas se representa la siguiente información:

- D\_ abs: Es la distancia absoluta medida entre la parte fija de la cabeza del motor y la culata.
- D\_ rel: Es la distancia relativa que representa el desplazamiento de la culata. Tomando como origen la posición de la culata correspondiente a una relación de compresión de 16.00.

- $N_{rel}$ : Número de vueltas relativo que realiza la flecha que varía la relación de compresión para cambiar la posición de la culata 0.1 *pulgadas*.
- $N_{abs}$ : Número de vueltas acumulado que realiza la flecha que varía la relación de compresión para cambiar la posición de la culata 0.1 *pulgadas*.
- $M$ : Lectura del micrómetro instalado en la cabeza del motor.
- $P$ : Presión medida con el sensor de presión en cámara.
- $V$ : Volumen de la cámara de combustión.
- $RC$ : Relación de compresión calculada.

Este estudio reflejado en la Tabla 2.5 sirvió para determinar el punto de origen que corresponde a una relación de compresión de 16.00. Además, aporta la información necesaria para relacionar la lectura del micrómetro instalado en el motor con la relación de compresión en la que se encuentra. Por último, se comprobó que los datos obtenidos de volumen y relación de compresión concuerdan con el manual de la máquina. Como dato extra, se incluye la medida de la presión en cámara para cada una de las relaciones de compresión contempladas en el estudio.

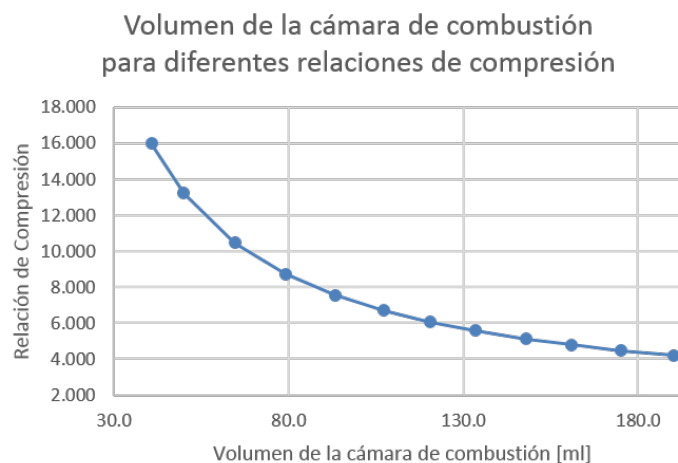


Figura 2.10: Volumen de la cámara de combustión para diferentes relaciones de compresión.

El desplazamiento de la culata se traduce en una variación del volumen disponible en la cámara de combustión. En la Figura 2.10, se muestra la relación entre el volumen de la cámara y la relación de compresión del motor.

Por último, en el Apéndice D: Relación de Compresión, se incluyen las tablas de transformación de la lectura del micrómetro a relación de compresión.

## CAPÍTULO 3

# PUESTA A PUNTO DE LOS SISTEMAS DE MEDIDA

---

---

<b>2.1. Elementos del banco de ensayos . . . . .</b>	<b>28</b>
<b>2.2. Motor eléctrico y sistema de arranque . . . . .</b>	<b>30</b>
<b>2.3. Motor de combustión . . . . .</b>	<b>32</b>
2.3.1. Sistemas de admisión y escape . . . . .	32
2.3.2. Culata del motor . . . . .	33
2.3.3. Sistema de lubricación . . . . .	35
2.3.4. Refrigeración de la culata . . . . .	37
2.3.5. Caracterización de la culata . . . . .	39

---

### 3.1 MEDIDA DE TEMPERATURAS

Para la medida de temperaturas se utilizaron termopares tipo K. Estos sensores generadores tienen una unión de dos aleaciones (cromel-alumen) y funcionan en un rango de temperaturas de  $-190$  a  $1260$  °C [23]. Las características previamente

descritas, hacen a este tipo de sensores ser los más recomendados para la instalación ya que, con un sólo tipo de sensor es posible instrumentar todo el banco de ensayos.

En la Figura 3.1 se presenta un esquema con los sensores de temperatura instalados en el banco de ensayos. Además de éstos, existen cuatro termopares cuya medida sirve para la protección de los sensores de presión. Como se explica en el apartado siguiente, los sensores de presión tienen una temperatura límite de funcionamiento que se controla mediante termopares.

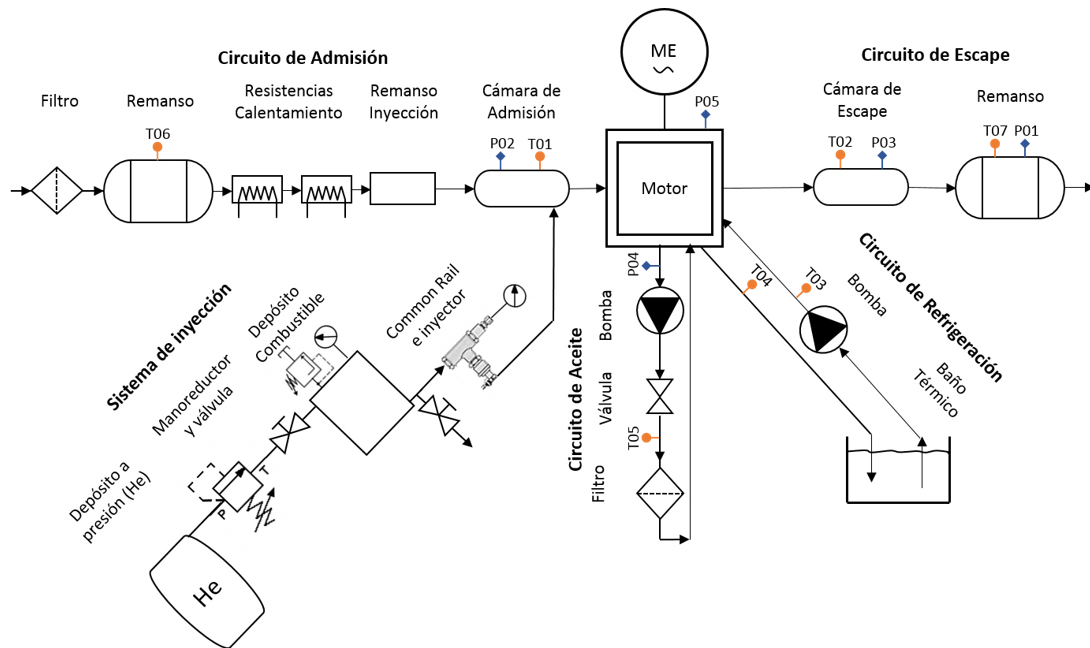


Figura 3.1: Esquema de la colocación de los sensores de presión (azul) y temperatura (rojo).

Los puntos donde se instalaron los termopares tuvieron que ser debidamente adaptados. Cada uno de los sensores fue fabricado a medida dependiendo del lugar donde se iba a instalar. Para medir correctamente, es necesario que la punta de la sonda quede en el centro del conducto, si lo que se desea medir es la temperatura de un fluido a través de una tubería, como ocurre comúnmente en la instalación. Además, es necesario que el sensor tenga un recubrimiento especial o bulbo dependiendo de la atmósfera donde se encuentre. A modo de ejemplo, cabe mencionar que

los bulbos de los termopares de escape son más robustos que los del conducto de admisión, debido a que la atmósfera a la que están expuestos es corrosiva.

La conexión eléctrica de los termopares, mostrada en la Figura 3.2 es sencilla gracias a los módulos que *National Instruments* proporciona como hardware de adquisición de datos en sistemas *CompactRIO*. El módulo seleccionado para la conexión de termopares es el *NI 9213*.

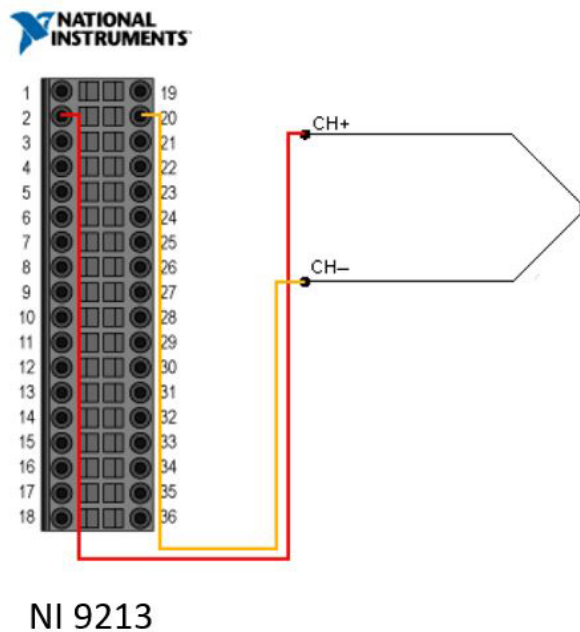


Figura 3.2: Conexión de termopares tipo K al módulo *NI 9213*.

## 3.2 MEDIDA DE PRESIONES

La medida de presiones se realiza en cinco puntos de la instalación; antes de la válvula de admisión, después de la válvula de escape, en el remanso de escape, en la cámara de combustión y como medida de seguridad, también se mide la presión del aceite.

### 3.2.1 PRESIONES EN ADMISIÓN Y ESCAPE

#### Características de los transductores

El transductor de presión en la admisión es igual que los dos instalados en la línea de escape. Los tres son transductores absolutos de la marca *PMA GmbH* modelo *P40* de tipo resistivo y con un rango de 0 a 6 *bar*. La sensibilidad de los mismos es de 2.67 *mA/bar*. Éstas características se recogen en la siguiente Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Transductores absolutos de presión

Parámetro	Descripción
Marca	PMA GmbH
Modelo	P40
Rango	0-6 bar
Sensibilidad	2.67 mA/bar
Temperatura máxima	70 °C
Alimentación	12 VDC
Señal de salida	4-20 mA

Fuente: PMA GmbH.

#### Instalación y conexión neumática

Para instalar los transductores, se diseñó un distribuidor de presiones (Apéndice A: Diseño mecánico) que sirviera de soporte para los tres transductores absolutos más el transductor de presión del aceite. El soporte tiene mecanizados dos accesos para cada sensor, uno para conectar con el punto de medida y el otro para instalar un termopar y así conocer la temperatura a la que están midiendo los sensores, ya que el exceso de temperatura podría suponer la pérdida del equipo. En la Figura 3.3 se presenta una imagen frontal del soporte instalado, quedando a la vista los

sensores de presión en la parte superior y las tomas de medida en la inferior, en la parte posterior quedan los sensores de temperatura de seguridad.

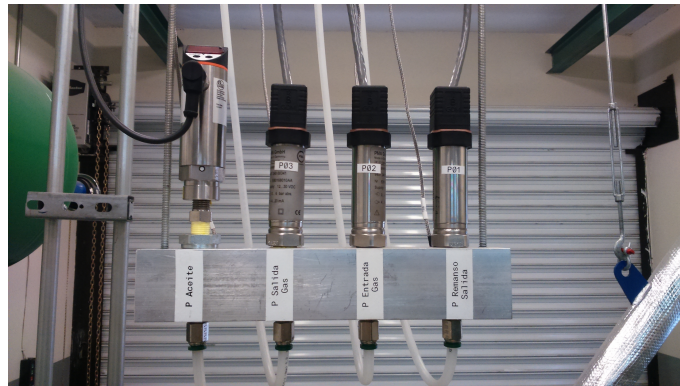


Figura 3.3: Distribuidor de presiones.

### Conexión eléctrica

La presión aplicada al sensor actúa sobre un puente de resistencias calibrado que está energizado por una tensión de 12 VDC. El cambio de resistencia en puente debido a la presión aplicada, tiene como resultado una señal de salida en corriente proporcional a la presión.

La conexión eléctrica de los transductores se realizó en serie o con la configuración de dos cables, es decir, el módulo de medida, la fuente de alimentación y el sensor quedan conectados en serie como se observa en la Figura 3.4.

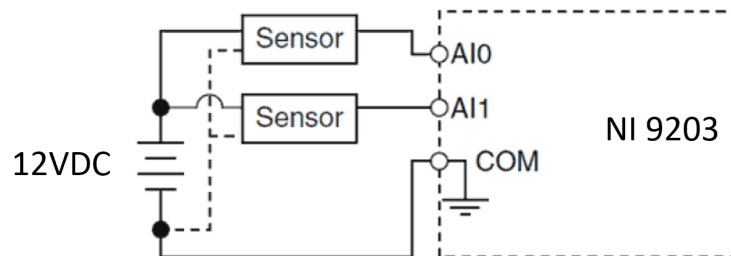


Figura 3.4: Conexión de transductores de presión al módulo *NI 9203*.

### 3.2.2 PRESIÓN DEL ACEITE

#### Características del transductor

El sensor de presión del aceite es el responsable de la seguridad de la máquina. Ante una falla en la lubricación del motor éste quedaría dañado permanentemente. Por ello, el transductor debe comprobar que después del arranque la presión del aceite se eleve hasta quedar entre los 25 y 30 *PSI*. De igual forma, si el motor se encuentra en funcionamiento normal, el sensor debe detectar una caída del nivel de presión por debajo del rango anteriormente indicado.

El modelo seleccionado para medir la presión del aceite es *PN4224* de la marca *IFM Efector*. Las características del mismo se presentan en la siguiente tabla [24].

Tabla 3.2: Transductor de presión de aceite

Parámetro	Descripción
Marca	IFM Efector
Modelo	PN4224
Rango	0-10 bar
Alimentación	110 VAC
Temperatura máxima	80 °C

Fuente: IFM Efector.

#### Conexión eléctrica

Para cumplir con su objetivo, el transductor cuenta con un display donde es visible en todo momento la presión del aceite. Además, el sensor tiene una salida programable para activar un relevador en caso de que ocurra cualquiera de los eventos de emergencia explicados anteriormente.

La conexión del dispositivo tiene una configuración de cuatro cables; dos para alimentación (110 VAC) y dos para la señal de salida, tal y como se muestra en la figura 3.5.

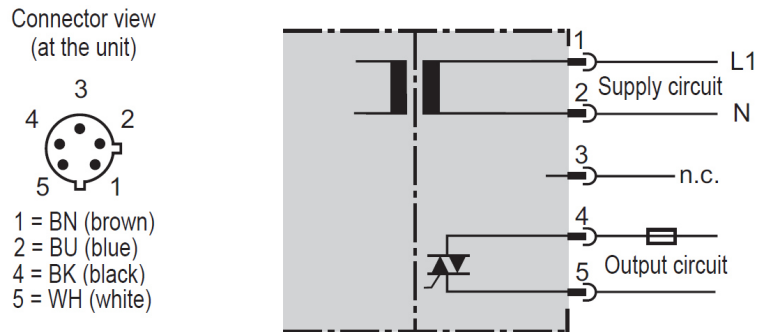


Figura 3.5: Conexiones del sensor de presión del aceite.

El sensor tiene dos modos de funcionamiento para activar la señal de salida como se muestra en la Figura 3.6. A la izquierda de la Figura 3.6, en la gráfica 1 se muestra el modo *Histéresis (HY)*, mientras que a la derecha de la misma figura, en la gráfica 2, se muestra el modo *Ventana (FE)*. La señal de salida, además, puede ser configurada de forma normalmente abierta (NO) o normalmente cerrada (NC) [24].

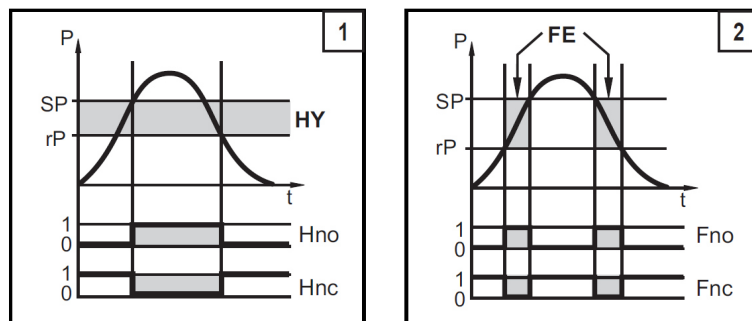


Figura 3.6: Configuración del sensor de presión del aceite.

En el caso concreto de la instalación se configuró el sensor en modo Fno, es decir, en modo ventana y salida NO.

El sensor de presión se energiza en el momento del arranque del motor, momento en el que la presión del aceite es baja, por lo que se programó la activación de la salida con un retardo de 7 segundos para dar tiempo a que el motor esté en operación normal (régimen de giro igual a 900 rpm) y el aceite alcance una presión dentro del rango de funcionamiento establecido (25-30 PSI).

### 3.3 MEDIDA DEL RÉGIMEN DE GIRO

#### Descripción del sensor

Un encoder incremental de la marca *Dynapar* serie *HC25* es el responsable de realizar tareas de gran importancia dentro de la instalación.



Figura 3.7: Instalación del encoder incremental y sensor de uno por vuelta.

- El sensor forma parte del sistema de seguridad, ya que registra el régimen de giro y el sentido del mismo. Una falla común en este tipo de motores es que, al ser arrastrados por un motor trifásico, si se intercambian dos de las fases

del arrancador, el motor gira en sentido contrario, lo que puede causar daños graves, como la ruptura de la bomba de aceite. El régimen de giro debe ser igual a 900 *rpm* y el sentido de giro en el encoder siempre debe ser a favor de las manecillas del reloj.

- En lo referente al sistema de control, es un sensor clave, puesto que marca el trigger de la medida de presión en cámara y de la inyección de combustible al motor. Como se explicará en apartados posteriores, la medida de la presión en cámara y el control de la inyección se realizan a partir del ángulo de giro del cigüeñal y de la posición del pistón, parámetros que es posible conocer gracias al encoder incremental.

### Conexión del sensor

Este codificador genera un tren de pulsos a medida que gira su eje. Su resolución es de 10 pulsos por grado [25]. El pinout del sensor se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3: Conexión del codificador angular 10 terminales.

<b><i>Pin</i></b>	<b><i>Función</i></b>
A	Señal A
B	Señal B
C	Señal Z
D	12 VDC
E	No Conectado
F	Común
G	Tierra
H	Señal NOT A
I	Señal NOT B
J	Señal NOT Z

Fuente: Manual de usuario de *Dynapar Series HC25*.

En la tabla anterior se presenta la conexión del encoder. En un encoder incremental, las señales A y B informan sobre la frecuencia de giro y la dirección de rotación mientras que señal Z emite un pulso por cada vuelta completada como se presenta en la Figura 3.8 [26].

La conexión del sensor con el *CompactRIO* se muestra en la Figura 3.8. Además de esta conexión, se alimenta al sensor con 12 VDC de la fuente de poder del cuadro de control.

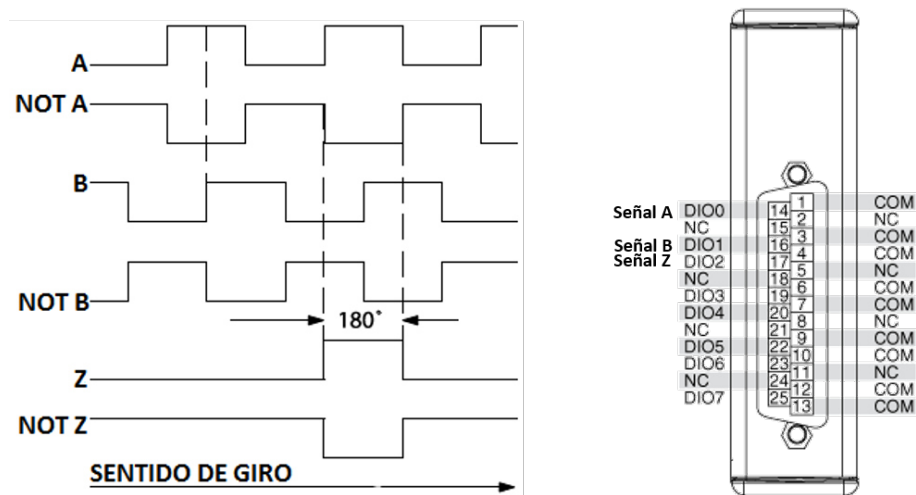


Figura 3.8: Conexión del encoder al *CompactRIO*.

Las señales A y B de la figura anterior proporcionan la información necesaria para conocer el sentido de giro y la posición del cigüeñal, mientras que la señal Z se utiliza como punto de referencia y con ella se obtiene la velocidad de giro.

### 3.4 SENSOR DE UNO POR VUELTA

En este tipo de motores es muy importante conocer en todo momento la posición del cigüeñal y por ende la posición del pistón; el punto muerto inferior (PMI) y el punto muerto superior (PMS). Con el encoder incremental, explicado en el apartado anterior, es posible conocer el incremento en la rotación del eje del cigüeñal

pero no existe ninguna referencia de la posición absoluta. Por lo tanto, es necesario marcar el inicio de cada vuelta del eje del cigüeñal tomando una referencia física.

Para cumplir con este propósito, se instaló un sensor de uno por vuelta a  $95^\circ$  (Figura 3.7) del PMS. Los grados de avance del cigüeñal son visibles en el volante de inercia del motor de combustión, siendo  $0^\circ$  la posición de PMS del pistón. Con esta referencia y el control del avance del cigüeñal indicado por el encoder, es posible conocer en todo momento la posición del pistón del motor de combustión.

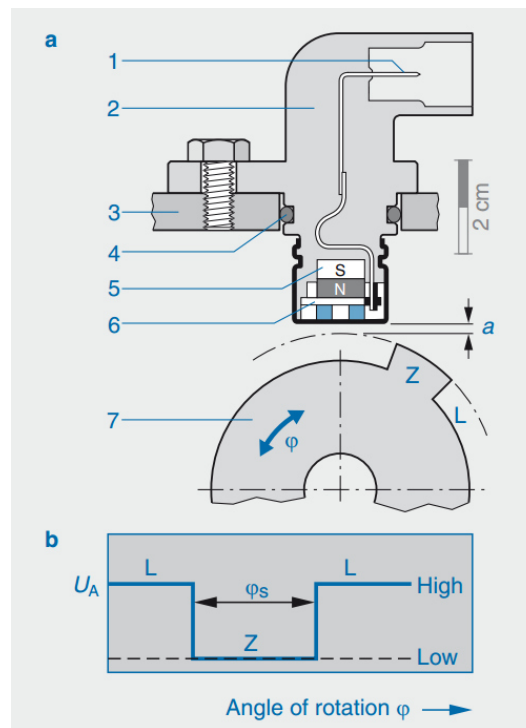


Figura 3.9: Funcionamiento del sensor de efecto Hall. a- Posición del sensor para una rueda de un solo diente. b- Señal de salida característica. 1- Conexión eléctrica. 2- Carcasa del sensor. 3- Soporte. 4- Anillo de ajuste de goma. 5- Imán permanente. 6- Detector Hall. 7- Rueda de pulsos.

Esta información es de suma importancia en sistemas como el de medida de la presión en la cámara de combustión, el sistema de inyección de combustible y el sistema de ignición.

El sensor encargado de esta tarea es un sensor de efecto Hall (Figura 3.9) comúnmente utilizado para conocer la posición del árbol de levas. El principio de funcionamiento es el efecto Hall, por el cual, el transductor detecta el cambio en la dirección del campo magnético generado al paso de un rotor de material ferromagnético segmentado que gira solidario al eje del cigüeñal [27].

Si uno de los dientes de la rueda de pulsos (Z) pasa por el detector Hall, cambia la intensidad del campo magnético generado por el imán permanente. Esto da lugar a una señal de voltaje (voltaje Hall) que es independiente de la velocidad relativa entre el sensor y la rueda de pulsos. La electrónica integrada en el sensor condiciona la señal y la emite en forma de una señal de onda cuadrada [9].

### 3.5 MEDIDA DE PRESIÓN EN CÁMARA

#### Descripción del sensor

El sensor de presión seleccionado es un *KISTLER 6061B* de la serie *ThermoCOMP*® (Figura 3.10). Estos sensores están especialmente diseñados para la medida de la presión en cámaras de combustión. Debido a la alta exigencia del proceso de medida, es necesario refrigerarlos con una mezcla de agua y un agente refrigerante.



Figura 3.10: Sensor de presión en cámara *KISTLER 6061B*.

El principio de funcionamiento del sensor es piezoeléctrico. La presión a medir actúa sobre la membrana del sensor y es convertida en una fuerza proporcional. Esta fuerza es transferida al cuarzo que emitirá una carga electrostática en respuesta a la presión aplicada [28].

El montaje del transductor se realizó de forma directa adaptando un acceso que el Motor CFR tiene situado en la cabeza. Éste era utilizado para el transductor de presión original de la máquina de *Waukesha* [19]. En la Figura 3.11, se presenta un esquema de la instalación del sensor en la culata del motor.

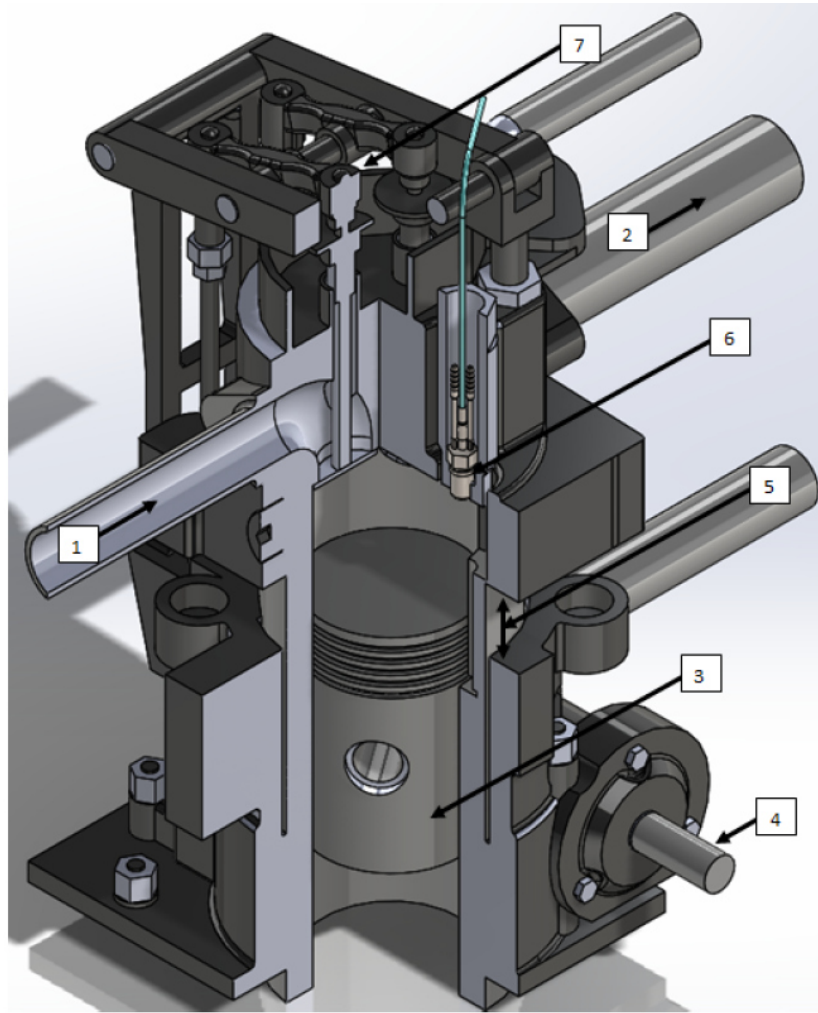


Figura 3.11: Sección de la culata del motor y montaje del sensor de presión en cámara. 1- Admisión de gases. 2- Salida de gases. 3- Pistón. 4- Flecha para variar la relación de compresión. 5- Desplazamiento de la culata para variar la relación de compresión. 6- Sensor de presión en cámara y adaptador. 7- Válvula de admisión.

En el punto 6 de la Figura 3.11 está representado el sensor de medida de la presión en cámara. En esta misma figura, se puede observar la camisa donde va

instalado el sensor. En el anexo de Diseño Mecánico se incluye el esquema de la misma. La camisa está fabricada en acero inoxidable y cumple dos funciones; sirve de extensión para poder roscar el sensor en el acceso de la culata del motor y, protege al sensor de golpes y del aceite que cae de las válvulas. Para llevar a cabo la unión del sensor con la camisa es necesaria una herramienta diseñada ex profeso. Los planos de la herramienta también se incluyen en el Apéndice A: Diseño Mecánico.

### **Refrigeración del sensor de presión**

El sensor debe ser refrigerado usando una mezcla de agua con un agente refrigerante. Es importante seguir las especificaciones sobre el líquido refrigerante y el sistema de bombeo que a continuación se describen.

- El agua debe estar desmineralizada según la norma VDE-Norm 0510.
- Se puede mezclar con uno sólo de los siguientes refrigerantes: BASF G30/G40/G48.
- Las proporciones de la mezcla deben ser de 1 parte de aditivo por cada 4 partes de agua.
- El flujo de agua debe estar entre 0.3 y 0.5 *l/min* con una presión de  $1.7 \pm 0.2$  *bar*.
- Es de suma importancia que no existan burbujas en el líquido refrigerante, si esto ocurre, la temperatura podría variar de forma brusca en los puntos donde haya burbujas y llegar a romper el cuarzo.

Es necesario que la bomba del sistema de refrigeración opere de manera constante sin pulsaciones. La temperatura del líquido refrigerante no tiene influencia en el choque térmico del sensor pero sí tiene una mínima influencia en la sensibilidad del mismo. Por tanto, no es tan importante la temperatura absoluta del refrigerante, si no que ésta sea constante. El fabricante aconseja que la temperatura del refrigerante sea igual a la temperatura a la cual es calibrado el sensor ( $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ )[28].

### Conexión del sensor con el sistema de medida

La cadena de medida, representada en la Figura 3.12, consiste en un componente piezoeléctrico conectado a un amplificador por medio de un cable altamente aislado y de bajo ruido. Del amplificador se obtiene un voltaje (0-10 VDC) proporcional a la medida del sensor que se debe conectar a un sistema de adquisición de datos, en este caso a la tarjeta NI9201 del *CompactRIO*.

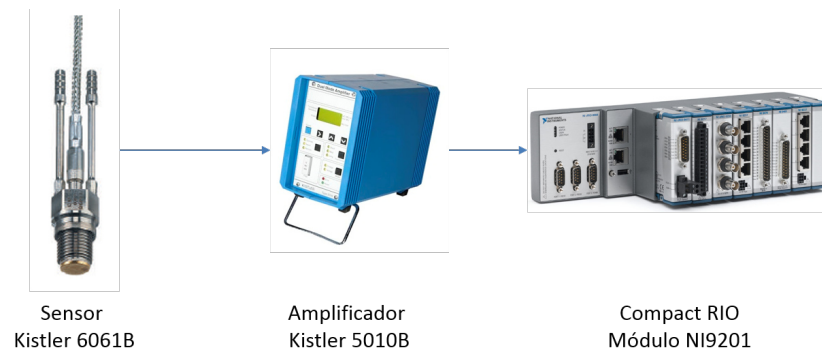


Figura 3.12: Conexión eléctrica del sensor con el sistema de medida.

Es muy importante mantener el amplificador lo más cerca posible del sensor para evitar errores en la medida por ruido eléctrico.

La capacidad de medida a altas frecuencias está limitada por la frecuencia natural del sensor y la frecuencia límite del amplificador ( $90\text{ kHz}$ ).

El amplificador seleccionado es el modelo *5010B* de la marca *KISTLER*. Es un amplificador de un sólo canal que convierte la señal de un transductor piezoeléctrico a una señal proporcional en voltaje. La unidad se puede utilizar en dos modos. El primero permite su uso para altas impedancias y el segundo para bajas impedancias. La unidad actúa como fuente constante de corriente para el transductor.

### Transductor para impedancias altas

Los transductores piezoeléctricos de alta impedancia convierten fenómenos mecánicos como presión, fuerza y aceleración en una señal eléctrica. La carga suministrada por el transductor es proporcional a la fuerza que actúa sobre el cuarzo interno. De acuerdo con esto, la medición de una variable mecánica es siempre derivada de una medición de la fuerza. Para un transductor, el factor de calibración se da en picoCoulombs negativos por unidad mecánica como  $-pC/psi$ ,  $-pC/lb$  o  $-pC/g$ , etc. El signo negativo no se debe añadir a los números de entrada en el amplificador. El signo es significativo, simplemente indica la polaridad de la señal del sensor [29].

Al utilizar transductores de alta impedancia con el equipo 5010B, la unidad será utilizado en el modo de *charge*. Cuando opera en el modo *charge*, la unidad funciona como un amplificador de carga que convierte la señal del transductor en una señal de voltaje de baja impedancia. La tensión de salida tiene un rango de  $\pm 10$  voltios. Esta tensión es relativamente alta y de baja impedancia lo que proporciona una señal legible para la mayoría de los sistemas de adquisición de datos.

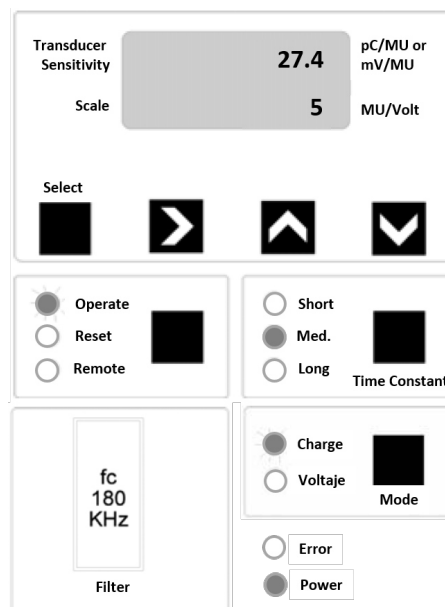


Figura 3.13: Configuración del amplificador.

### Configuración del amplificador de señal

En la Tabla 3.4 se añade una breve descripción de las funciones de cada pulsador del panel frontal del amplificador.

Tabla 3.4: Funcionamiento de los pulsadores del amplificador.

<i>Pulsador</i>	<i>Función</i>
Mode	Selecciona entre el modo <i>Charge</i> y el modo <i>Voltaje</i>
Select	Ajusta en el LCD la sensibilidad en $pC/MU$ $omV/MU$ y la escala en $MU/Volt$
Time Constant	Cambia la constante de tiempo
Operate	Prepara el equipo para funcionamiento normal
Reset	Libera sobrecargas en el amplificador
Remote	Indica que hay conectado un equipo de control remoto

Fuente: Manual de usuario de *KISTLER Type 5010B*

Para adquirir la señal del transmisor de presión se configuró la unidad como se describe a continuación. Una vez energizado, el amplificador debe quedar como se muestra en la Figura 3.13.

- Sensibilidad del transductor igual a  $-27.4pC/MU$ .
- Escala  $5 MU/Volt$ .
- Modo *Charge*.
- Constante de tiempo *Short*.

## CAPÍTULO 4

# PUESTA A PUNTO DE LOS SISTEMAS DE CONTROL

---

---

<b>3.1. Medida de temperaturas . . . . .</b>	<b>44</b>
<b>3.2. Medida de presiones . . . . .</b>	<b>46</b>
3.2.1. Presiones en admisión y escape . . . . .	47
3.2.2. Presión del aceite . . . . .	49
<b>3.3. Medida del régimen de giro . . . . .</b>	<b>51</b>
<b>3.4. Sensor de uno por vuelta . . . . .</b>	<b>53</b>
<b>3.5. Medida de presión en cámara . . . . .</b>	<b>55</b>

---

### 4.1 CALENTAMIENTO DEL AIRE DE ADMISIÓN

En el conducto de entrada del fluido de trabajo al motor, están dispuestas dos resistencias de  $2\text{ kW}$  cada una con el fin de elevar la temperatura hasta los  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ , temperatura de funcionamiento de la máquina.

En la Figura 4.1, se muestra la colocación de las resistencias en el conducto de admisión. Además, se puede observar el aislamiento del sistema para evitar la transferencia de calor a la sala.

Durante la operación del motor, con las resistencias de calentamiento activadas, los tubos de acero del sistema de admisión también almacenan calor. Por ello, es importante que una vez terminado el ensayo y apagadas las resistencias, el motor quede trabajando más tiempo para que el mismo flujo se encargue de retirar el calor contenido en los conductos.

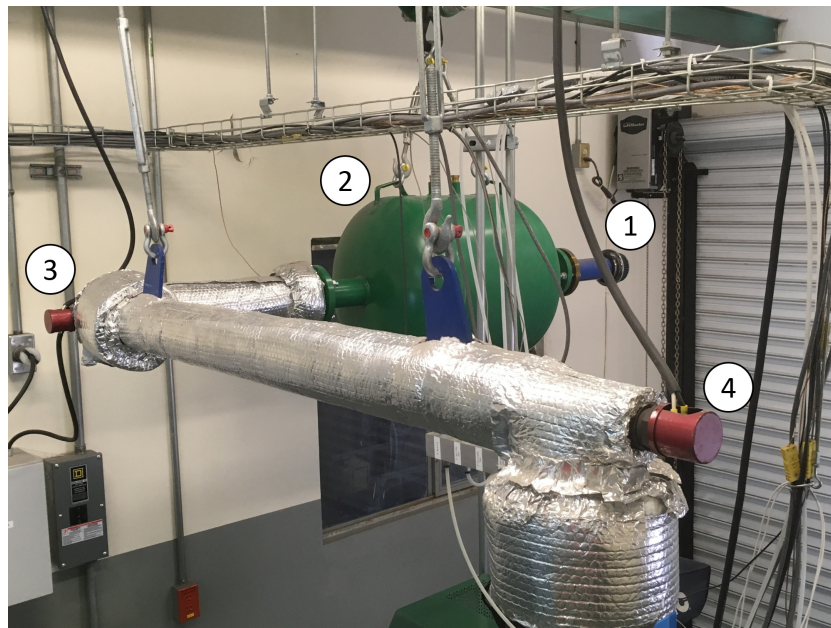


Figura 4.1: Instalación de las resistencias en el banco de pruebas. 1- Filtro de aire. 2- Remanso de admisión. 3- Resistencia 1. 4- Resistencia 2.

Para llevar a cabo el control se adquirió una tarjeta reguladora de potencia basada en un dispositivo rectificador controlado de silicio (SCR, por sus siglas en inglés). Con una entrada analógica  $4 - 20mA$ , es posible controlar el porcentaje de potencia que se aplica a la carga. El modelo utilizado fue el *SCR19Z - 12 - 040* de la marca *Omega Engineering*. El sufijo -040 se refiere al amperaje máximo que puede controlar ( $40 A$ ). En la Figura 4.2 se presenta el modo de conexión.

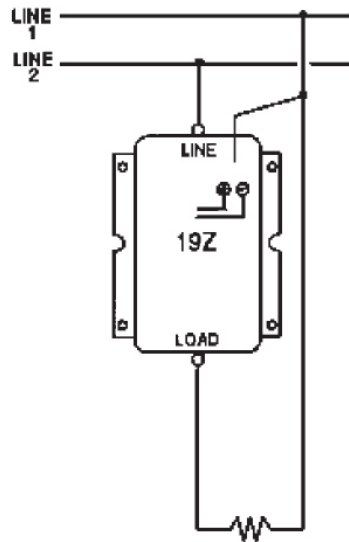


Figura 4.2: Conexión de la tarjeta SCR19Z.

La carga, formada por las dos resistencias en serie, se conectó con la tarjeta tal y como se muestra en la Figura 4.2. El control se realizó mediante el módulo de salidas analógicas *NI 9265* conectado al sistema de control, *Compact RIO*.

## 4.2 SISTEMA DE VARIACIÓN DE LA RELACIÓN DE COMPRESIÓN

### 4.2.1 SERVOMOTOR Y TRANSMISIÓN

Originalmente se utilizaba una manivela para variar la relación de compresión. Eso suponía que el operario estuviera presente en la sala del motor de combustión mientras que éste estaba en funcionamiento. A parte de las consideraciones de seguridad, el operario debía girar más de 150 veces la manivela si deseaba variar la relación de compresión 10 unidades.

Para realizar esta función de forma remota y segura, se diseñó un sistema mecánico automatizado que consta de servomotor, transmisión y sistema de control y cuya interface está incluida en el sistema general de adquisición de datos de la instalación. A continuación se explica tanto el diseño mecánico como el control de este sistema.

Antes de diseñar el mecanismo encargado de variar la relación de compresión, se midió el par a vencer para girar la flecha del motor CFR. Durante la prueba se detectó que éste no es constante en toda la carrera que realiza la culata. El par máximo medido fue de 28  $Nm$ . Los motores con control de posición, por lo general, no proporcionan pares tan altos, así que fue necesario incluir una transmisión multiplicadora (30:1) para lograr desplazar la culata a lo largo de toda su carrera.

Las características de la transmisión y del servomotor utilizados se detallan en las siguientes Tablas 4.1 y 4.2 [30].

Tabla 4.1: Características del motor de posición.

<i>Característica</i>	<i>Descripción</i>
Marca	Parker
Modelo	Compumotor S83-135
Par Motor	2.80 Nm
Resolución	25000 pulsos/vuelta

Fuente: Manual de usuario de *Parker Compumotor*

Como se indica en la tabla anterior, el par del servomotor no es suficiente para vencer la flecha del motor de la relación de compresión por lo que queda justificado el uso de una transmisión. La resolución del servomotor es suficiente para el sistema puesto que 25000 pulsos por vuelta equivalen a  $0.0144^\circ$  de avance por cada pulso del servomotor, lo que asegura un error mínimo de posición.

Tabla 4.2: Transmisión multiplicadora 30:1.

<i>Característica</i>	<i>Descripción</i>
Marca	Morse Raider
Modelo	XC1097S06
HP @ 1750 rpm	0.47
Ratio	30
Par máximo	42.59 Nm

Fuente: Manual de usuario de *Morse Raider*

La transmisión multiplica por treinta el par del servomotor a la vez que disminuye en treinta unidades la velocidad de giro, es decir, por cada treinta vueltas del servomotor, la transmisión dará una sola. El par máximo del conjunto servomotor-transmisión es suficiente para hacer girar la flecha de la relación de compresión en toda su carrera.

#### 4.2.2 LÍMITES FINALES DE CARRERA

Como se explicó en el capítulo 2, se midió el volumen de la cámara de combustión a lo largo de toda la carrera de la misma, con el fin de encontrar el punto de origen ( $RC = 4.46$ ). Una vez hallado, se llenó con aceite la cámara hasta llegar al volumen mínimo de la misma cuando la  $RC = 16$ . La medida del volumen de la cámara de combustión en las diferentes relaciones de compresión concuerda con la calculada teóricamente y con lo especificado en el manual de la máquina.

Una vez conocidas las referencias de RC máxima y mínima se pudo automatizar el proceso. Se instalaron dos sensores finales de carrera inductivos (Tabla 4.3) en los puntos máximo y mínimo y se cablearon a las entradas del drive CW, CCW y HOME. De esta forma el drive detiene el movimiento del motor por hardware sin que

importe la programación. Esto es de vital importancia para la instalación dado que si la culata se desplaza fuera de sus límites causarían daños graves en los engranajes de la flecha y en el motor de combustión.

Tabla 4.3: Sensores inductivos de final de carrera.

<i>Característica</i>	<i>Descripción</i>
Marca	IFM Efector
Modelo	IFS244
Alcance	4 mm
Tensión de alimentación	12 VDC
Conexión	Tres hilos

Fuente: Manual de usuario de *IFS244*

Para evitar los daños provocados por el giro fuera de los límites mecánicos de la máquina, se diseñó un sistema de transmisión del servo motor a la flecha de la relación de compresión que no tiene cuñas, si no que utiliza coples de presión, esto para conseguir que, ante una exigencia de par mayor, el servo patine dentro de su cople y no fuerce los engranajes de la máquina.

## 4.2.3 DESCRIPCIÓN DEL DRIVE SX

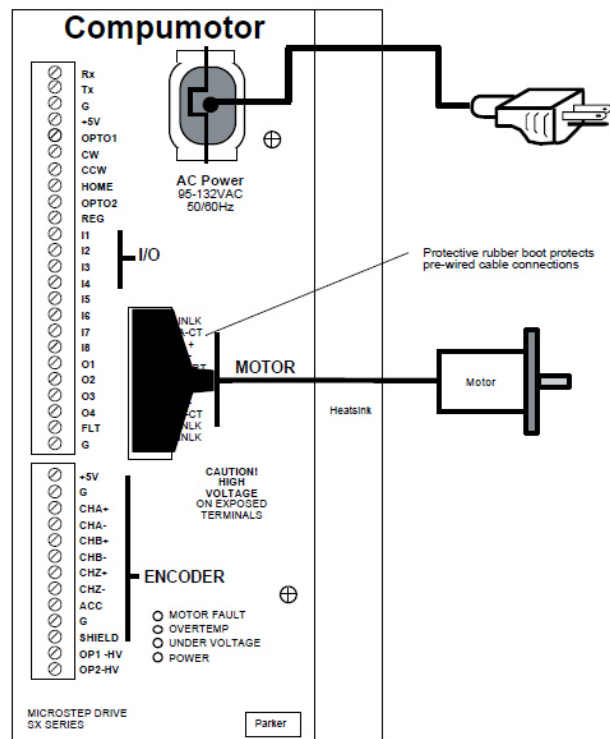


Figura 4.3: Conexiones principales del drive.

El drive SX es una unidad con capacidades integradas de indexación y microstepping. Está diseñado para impulsar motores de etapa híbrida de imán permanente de dos fases. La unidad utiliza la tecnología MOSFET para dar un alto rendimiento, proporcionando protección contra cortocircuitos, protección contra apagones, protección contra sobretensión y dispone de una fuente de alimentación incorporada. El Indexer integrado es capaz de almacenar 99 programas de movimiento múltiple en memoria RAM respaldada por batería. Cualquiera de los programas se puede seleccionar de varias maneras, incluyendo entradas BCD, controladores programables o un ordenador a través de la interfaz RS-232C [31]. Ésta última interfaz es la que se utilizó para el desarrollo de este sistema.

Las conexiones principales del drive se muestran en la Figura 4.3, donde se puede observar la conexión de alimentación, la conexión del puerto RS-232C del ordenador y la conexión de control del motor y del encoder absoluto.

#### 4.2.4 DISEÑO MECÁNICO

En las figuras siguientes se muestran dos diagramas del sistema mecánico encargado de variar la relación de compresión. Este sistema, consta de un cople tipo mordaza para transmitir el giro de la transmisión al eje de la relación de compresión (Figura 4.4) y un arreglo de cople y brida para transmitir el giro del servomotor a la transmisión (Figura 4.5). Los dibujos de todas las piezas se incluyen en el Apéndice A: Diseño Mecánico.

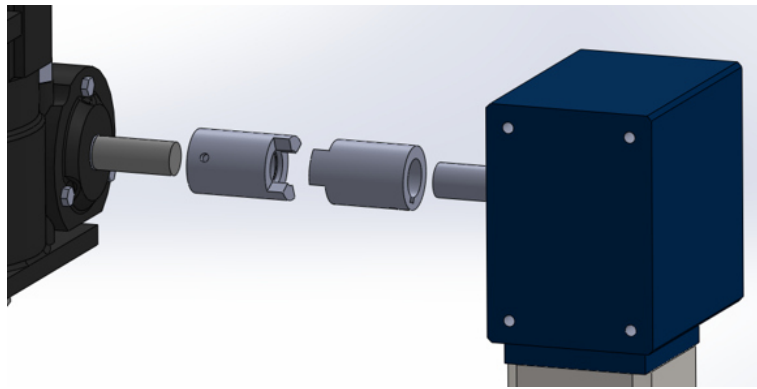


Figura 4.4: Unión mecánica de la transmisión al motor CFR.

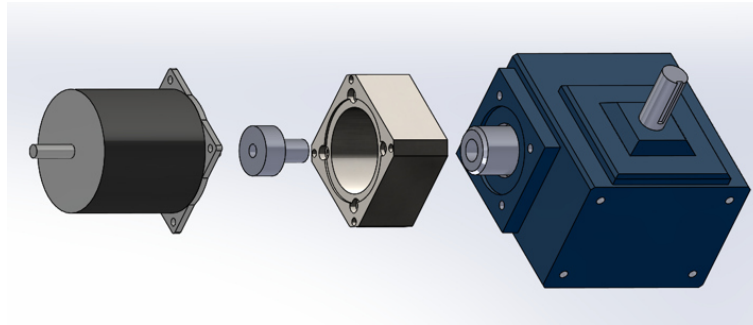


Figura 4.5: Unión mecánica de la transmisión al servomotor.

Para unir el sistema mecánico al motor CFR fue necesario diseñar un soporte que permitiera fijar todos los elementos explicados en este apartado de forma segura y que facilitara la tarea de retirar el bloque transmisión-servo si en algún momento fuese necesario. En la Figura 4.6, se presenta un esquema de cómo se diseñó tal soporte teniendo en cuenta la inclinación de la pared del cárter del motor CFR.

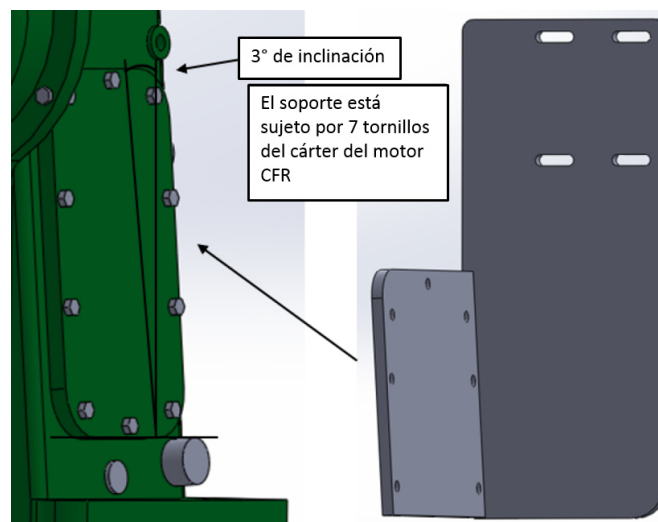


Figura 4.6: Soporte del bloque transmisión-servo.

Además, fue necesario diseñar un soporte para dos finales de carrera que detectan si la culata ha llegado al final de su desplazamiento útil. La señal del final de carrera superior, representado en la Figura 4.7 con el número uno, también sirve

de HOME para el sistema de control. Es decir, después del arranque del sistema y ante cualquier evento de emergencia, el servo desplazará la culata hasta la posición de HOME, posición en la cual la relación de compresión es la mínima. El esquema del soporte se incluye en el Apéndice A: Diseño Mecánico.

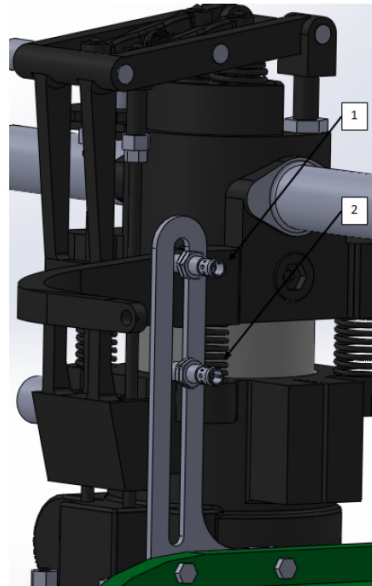


Figura 4.7: Soporte de los finales de carrera. 1- Final de carrera superior (HOME). 2- Final de carrera inferior.

## 4.3 SISTEMA DE INYECCIÓN DE COMBUSTIBLE

### 4.3.1 SISTEMAS DE PREINYECCIÓN

Los sistemas gasolina en precarga se caracterizan por el hecho de que la mezcla aire/combustible se forma fuera de la cámara de combustión [32]. La masa de combustible es inyectada en el conducto de admisión, antes de la válvula de entrada. En un sistema convencional la unidad de control electrónica toma en cuenta la posición de la válvula del acelerador, la información del sensor de caudal másico de aire y la

posición del cigüeñal para calcular en tiempo real, la masa de combustible a inyectar y el momento en que se lleva a cabo la inyección.

Comúnmente los sistemas de inyección constan de una bomba y filtro que impulsa y presuriza el combustible desde el tanque hasta el common rail, donde se encuentran dispuestos los inyectores dependiendo del número de cilindros que tenga el motor. Las presiones típicas de inyección van desde los 3 hasta los 7 bar.

La forma en que los inyectores introducen el combustible en el conducto de admisión es extremadamente importante para la calidad de la mezcla aire/combustible. Es esencial que el combustible se atomice para que se puedan dar las siguientes fases de evaporación, reacción y combustión [33]. En la Figura 4.8 se presenta un diagrama de los mecanismos que influyen en la calidad de la mezcla, donde se observa la colocación del inyector gasolina que se utilizó como modelo para este trabajo de investigación [32].

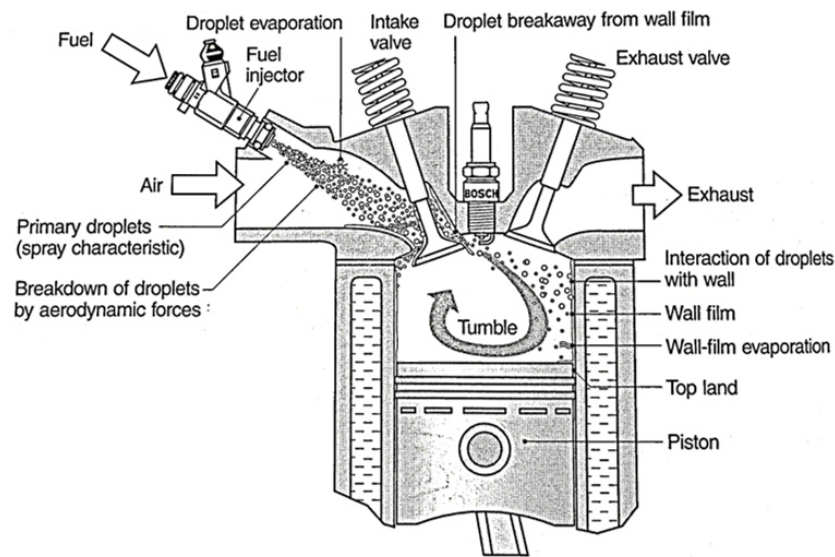


Figura 4.8: Mecanismos que influyen en la generación de la mezcla.

En la Figura 4.9 se presenta el sistema de presurización para la inyección de combustible al motor. El conjunto tiene un depósito de helio a presión seguido de

un manoreductor, el cual permite regular la presión de inyección. El helio se utiliza para presurizar el depósito de combustible que previamente ha de ser llenado. Este depósito cuenta con los sistemas de seguridad necesarios; ligas de goma en todas las uniones para sellar y evitar fugas, manómetro para visualizar la presión y válvula de seguridad y de alivio. Por último, una línea de alta presión comunica la parte inferior del depósito donde se encuentra el combustible con el common rail. En el common rail se encuentran conectados un inyector electromagnético y un manómetro.

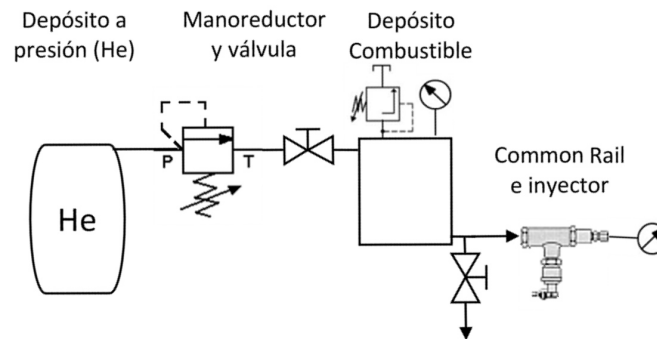


Figura 4.9: Diagrama esquemático del sistema de inyección implementado.

Para presurizar el sistema de inyección se optó por sustituir la bomba que normalmente va instalada en los automóviles por un sistema de presurización con helio. El motivo de sustituir la bomba es el de evitar roturas en la misma cuando se esté ensayando con bioalcoholes. Además, con el depósito de helio la presión de inyección se puede variar fácilmente si lo que se pretende es ensayar a diferentes presiones de inyección.

En el Motor CFR la inyección de combustible se lleva a cabo en el conducto de admisión antes de la válvula de admisión. Se diseñó un porta inyector para soportar el conjunto common rail-manómetro-inyector, dejando este último colocado a  $40^\circ$  de la horizontal, apuntando hacia la válvula de admisión [34]. En la siguiente figura se muestra una imagen del sistema instalado.

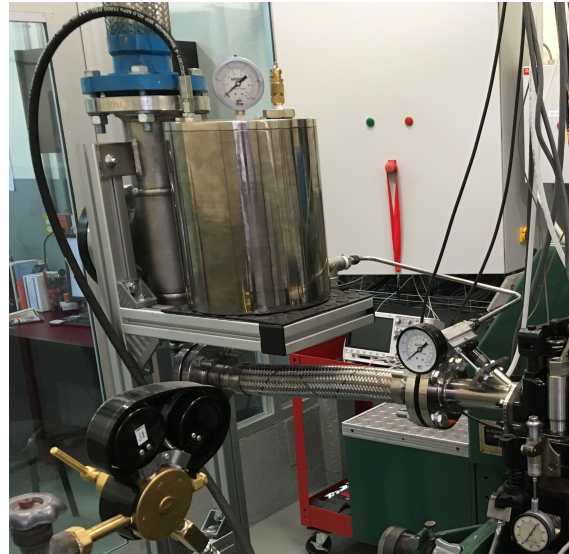


Figura 4.10: Sistema de inyección implementado.

#### 4.3.2 DESCRIPCIÓN Y CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DEL INYECTOR

El inyector seleccionado es un modelo gasolina, activado electromecánicamente. En la Tabla 4.4 se describen las características generales del inyector [35].

Tabla 4.4: Válvula de inyección gasolina.

<i>Característica</i>	<i>Descripción</i>
Marca	Delphi & Rochester MPI
Modelo	17091654
Flujo volumétrico @ 3 bar	282 [cc/min]
Tensión de alimentación	12VDC
Tipo de motores	2.4L
Usuarios	Opel, GM, Daewoo

Fuente: Características de los inyectores gasolina Delphi.

En la Figura 4.11 se presenta la geometría interna del inyector seleccionado [32].

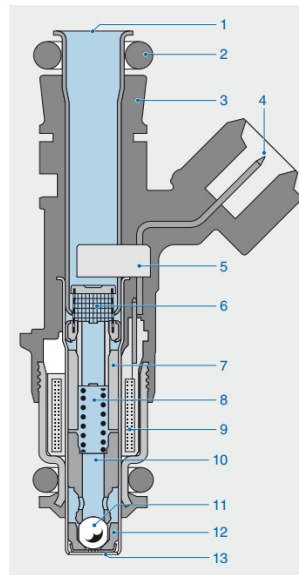


Figura 4.11: Inyector de combustible de accionamiento electromagnético. 1- Entrada de combustible. 2- O ring de goma. 3- Cuerpo del inyector. 4- Conexión eléctrica. 5- Soporte de plástico para los terminales. 6- Filtro. 7- Polo interno. 8- Resorte de la válvula. 9- Bobina. 10- Válvula de aguja. 11- Bola de la válvula. 12- Asiento de la válvula. 13- Orificios del inyector.

### 4.3.3 METODOLOGÍA PARA LA CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DEL INYECTOR

Durante la realización de este trabajo, aunque se contaba con los datos teóricos de flujo volumétrico del inyector, se llevó a cabo la caracterización hidráulica del mismo para conocer la masa inyectada para diferentes tiempos de energización. Para ello, se cargó el depósito de gasolina con 5 litros de combustible, se presurizó a 3 bar y se realizaron ensayos variando el ancho de pulso entre 700, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500 y 4000  $\mu\text{s}$ .

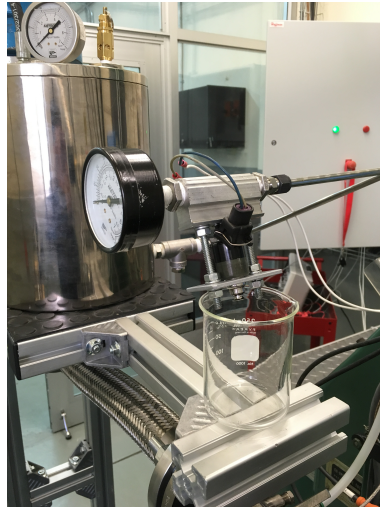


Figura 4.12: Preparación de la instalación para la caracterización hidráulica de inyector gasolina.

Como se muestra en la Figura 4.12, la instalación está pensada para retirar el conjunto common-rail-inyector con facilidad sin desarmar la línea de alta presión y poder realizar los ensayos de caracterización.

El combustible es inyectado a presión atmosférica, en un vaso de precipitados. Tras terminar el número de inyecciones seleccionado, se pesa el combustible del vaso y se calcula los gramos por inyección. Este procedimiento se repitió en cinco ocasiones para cada ancho de pulso indicado.

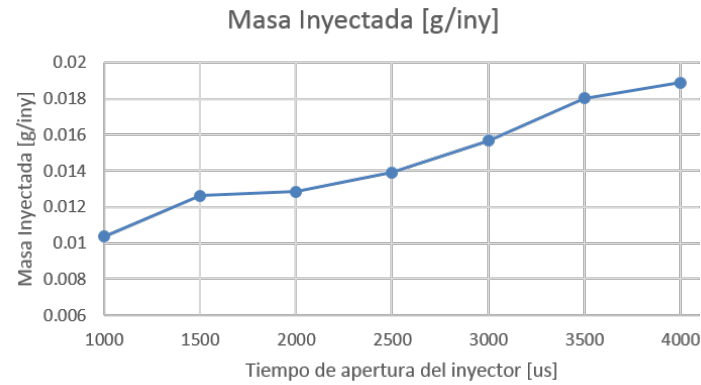


Figura 4.13: Masa inyectada por evento de inyección para diferentes duraciones de pulso eléctrico.

Los resultados de estas pruebas se muestran en la Tabla 4.5 y se representan en la Figura 4.13, donde se observa un comportamiento cercano al lineal. Estos resultados fueron utilizados durante la validación de la instalación experimental para calcular el dosado.

Tabla 4.5: Masa inyectada por evento de inyección.

Tiempo de apertura [us]	Masa inyectada [g/inj]
1000	0.010359477
1500	0.012620724
2000	0.012832955
2500	0.01392157
3000	0.015663189
3500	0.01802814
4000	0.018896984

## 4.4 SISTEMA DE IGNICIÓN

La chispa generada por el sistema de ignición entre los electrodos de la bujía, genera plasma de alta temperatura. Si las condiciones de la mezcla son adecuadas, y la chispa tiene suficiente energía, el resultado es un arco que desarrolla un frente de flama que se propaga de forma independiente en el interior del cilindro.

Una chispa eléctrica ocurre entre los electrodos de la bujía sólo, si se le aplica el voltaje necesario. Este voltaje depende de la separación entre los electrodos de la bujía y de la densidad de la mezcla.

El esquema de la Figura 4.14 muestra el circuito del sistema de ignición implementado, que consta de una bobina con una etapa de control basada en transistores de potencia y una bujía.

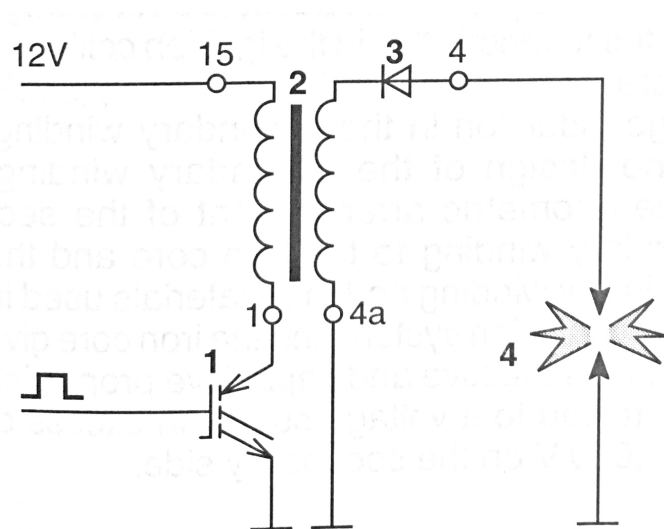


Figura 4.14: Diagrama eléctrico del sistema de ignición. 1- Ignition driver. 2- Bobina. 3- Diodo de activación por arco. 4- Bujía

El circuito genera la chispa cuando el sistema de control le envía la señal de disparo a la bobina. Las características de la bobina utilizada se muestran en la Tabla 4.6.

Tabla 4.6: Características de la bobina del sistema de ignición.

Marca	ENA
Modelo	ENAIC350801
Voltaje	38 kV
Señal de disparo	0-5 VDC
Ancho del pulso de disparo	3 ms

Para los ensayos realizados en este trabajo de investigación se utilizó una bujía equivalente a la original del motor CFR, modelo Champion D-16. La misma fue instalada en el acceso posterior del motor, donde se sitúa la bujía original. La separación entre electrodos fue fijada en 0.025", como se indica en el manual.

## 4.5 SISTEMA DE EMERGENCIA

En el Apéndice B: Esquemas Eléctricos de la Instalación, se incluyen los diagramas del sistema de emergencia. En la sala del Motor CFR, situado en el cuadro eléctrico, y en la estación de usuario se instalaron dos pulsadores de emergencia.

Los pulsadores de emergencia cumplen dos funciones; por un lado, abren un circuito lógico para avisar al sistema de control, por otro lado, abren también un circuito de potencia que corta la alimentación al motor eléctrico de la máquina CFR. Si el motor se encontrara trabajando en arrastre, éste se pararía en unos segundos, si por el contrario se estuviese trabajando con combustión y el motor de combustión estuviera girando de forma autónoma, el sistema de control, que fue avisado con la apertura del circuito lógico, detendría la inyección de combustible y el calentamiento del fluido de trabajo de admisión.

## CAPÍTULO 5

# VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL SISTEMA DE CONTROL

---

---

<b>4.1. Calentamiento del aire de admisión . . . . .</b>	<b>61</b>
<b>4.2. Sistema de variación de la relación de compresión . . . .</b>	<b>63</b>
4.2.1. Servomotor y transmisión . . . . .	63
4.2.2. Límites finales de carrera . . . . .	65
4.2.3. Descripción del drive SX . . . . .	67
4.2.4. Diseño mecánico . . . . .	68
<b>4.3. Sistema de inyección de combustible . . . . .</b>	<b>70</b>
4.3.1. Sistemas de preinyección . . . . .	70
4.3.2. Descripción y caracterización hidráulica del inyector . . .	73
4.3.3. Metodología para la caracterización hidráulica del inyector	74
<b>4.4. Sistema de ignición . . . . .</b>	<b>77</b>
<b>4.5. Sistema de emergencia . . . . .</b>	<b>78</b>

---

## 5.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se describe la herramienta desarrollada para controlar de forma remota el funcionamiento de un motor térmico con capacidad de lectura y registro de variables en tiempo real.

Es importante notar que el objetivo principal de este trabajo de investigación, se muestra cumplido en este capítulo. La principal aportación es el desarrollo de un código de control para motores de combustión. Debido a la modularidad que presenta el código, es posible escalarlo para la mayoría de las aplicaciones en motores si se toman en cuenta las especificaciones concretas en cada caso. Además, el código permite modificar todos los parámetros de funcionamiento del motor y de inyección siempre que estos modos de configuración no pongan en riesgo ni a la instalación ni al investigador.

Este código ha sido probado en el Motor CFR de forma satisfactoria, lo cual sirve para validar la programación y el sistema de adquisición y de control de variables implementado. Por tanto, otra de las aportaciones de este trabajo es la puesta en marcha de una instalación única para el estudio de la calidad de los combustibles.

## 5.2 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL SISTEMA: SELECCIÓN DEL HARDWARE Y DE LA ESTRATEGIA DE PROGRAMACIÓN

### 5.2.1 ESTRATEGIA DE PROGRAMACIÓN

Principalmente, el código debe satisfacer las necesidades del usuario final. En este caso, el investigador pretende estudiar la calidad de los combustibles en una

instalación de forma cómoda y segura, por tanto, es necesario desarrollar un sistema de control independiente al motor que contenga una interfaz de usuario comprensible y de fácil manejo. Esta interfaz debe comunicarse con un código robusto que permita al usuario configurar los diferentes modos de funcionamiento de la instalación, leer las variables en tiempo real y controlar todos los procesos del ensayo. Por todo ello, el programa debe cumplir los siguientes requisitos:

- Adquisición y registro de las señales de sensores y transductores instalados en el banco de ensayos.
- Control de las variables de los sistemas auxiliares del motor que asegure el funcionamiento correcto de la máquina.
- Los sistemas de control independientes al motor deben cumplir con las especificaciones y ser validados.
- La interfaz gráfica debe ser única y debe integrar todos los sistemas de medida y de control de la instalación.
- El sistema de emergencia integrado debe ser capaz de detener el funcionamiento del motor en el menor tiempo posible y de los sistemas de control de forma independiente.
- El código debe ser modular y escalable para ser implementado en instalaciones similares.

Para cumplir con los requisitos anteriormente descritos, se propone una programación basada en bucles paralelos intercomunicados, de tal forma que sea posible añadir nuevos bucles si la complejidad de la instalación aumenta, o ejecutar de forma selectiva algunos de los bucles existentes cuando no se desea utilizar todo el potencial del programa.

A continuación se muestra un diagrama de cómo está estructurado el código y cómo se realiza la comunicación con el hardware correspondiente.

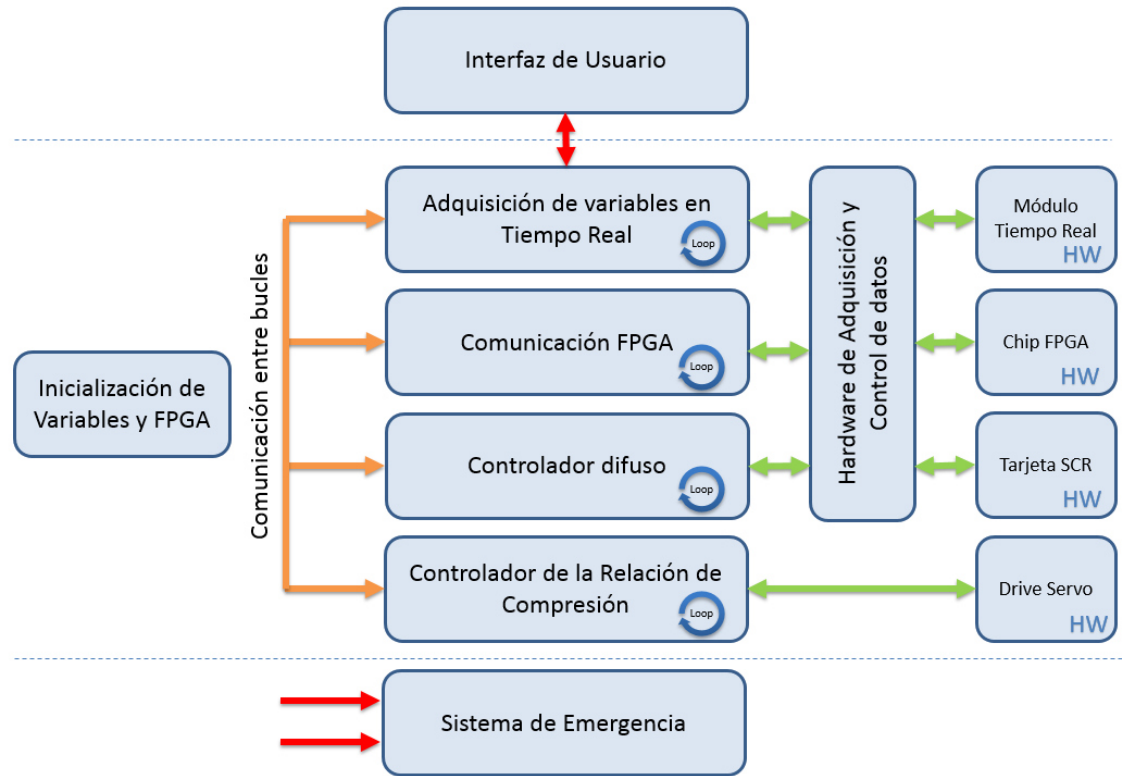


Figura 5.1: Diagrama de flujo software-hardware del sistema de control.

En la Figura 5.1 se muestra el flujo de ejecución del programa y la comunicación de cada uno de los bucles con el hardware de cada sistema. El código se ejecuta de izquierda a derecha y de abajo a arriba. Como se muestra en la figura anterior, primero se inicializan variables y se inicia el FPGA del sistema de control para luego pasar a ejecutar en paralelo los diferentes bucles. Estos bucles se pueden comunicar entre si y a la vez controlan o miden las variables de un proceso. Por lo general, cada uno de los bucles depende directamente de la conexión de un hardware específico y todos están conectados al sistema general de emergencia y a la interfaz de usuario.

En los apartados siguientes se explican en detalle cada uno de los bucles que componen el código.

## 5.2.2 SELECCIÓN DEL HARDWARE

El código se compila en un ordenador con el sistema operativo de Windows 7, en el cual, se presenta la interfaz de usuario y es posible modificar la programación. El ordenador se comunica con los dos subsistemas de control; con el drive que controla el servomotor que varía la relación de compresión y con el hardware de National Instruments empleado en la adquisición de datos y el control del resto del sistema. En la Figura 5.2 se presenta un esquema de dependencia del hardware principal.

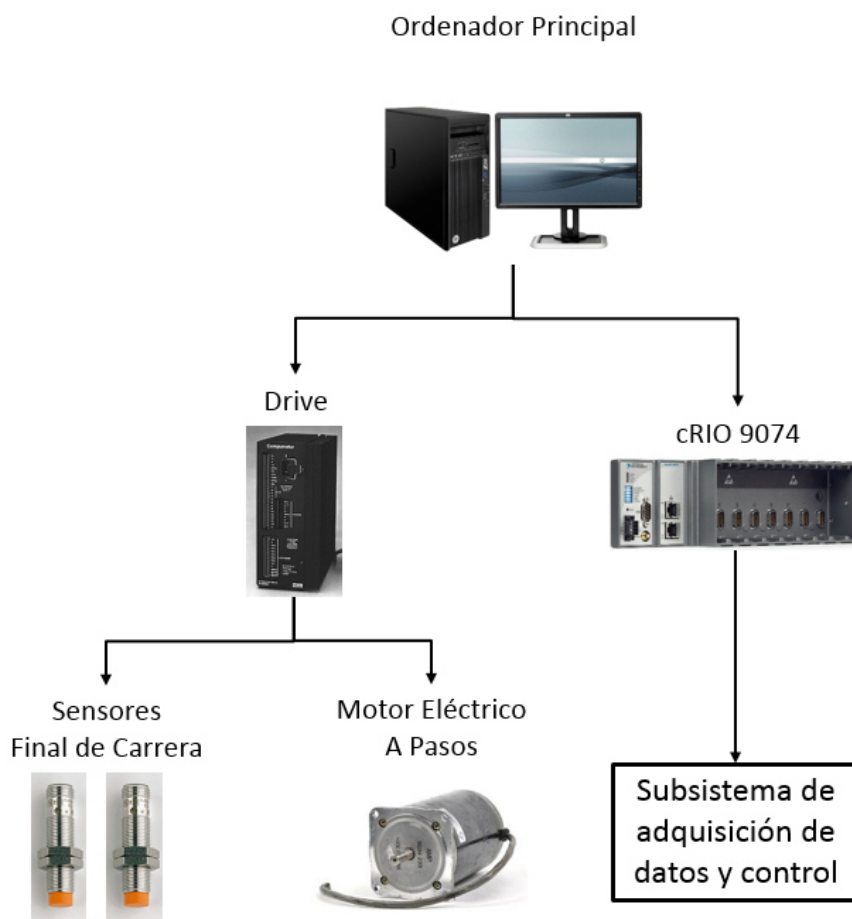


Figura 5.2: Elementos principales del sistema de control.

El elemento principal del subsistema de adquisición de datos y control es un Compact RIO modelo NI-9074 de la marca National Instruments que viene equipado con un controlador de 400 MHz y un chip FPGA de 2 Mgate [36]. Es un equipo muy versátil puesto que no tiene una arquitectura fija y se pueden intercambiar los módulos o tarjetas de entradas/salidas analógicas/digitales dependiendo de la aplicación que se esté desarrollando en cada caso. Estas características hacen que este equipo sea el más adecuado para desarrollar este trabajo. En la Figura 5.3 se presenta de forma esquemática la conexión del cRIO con el resto del hardware del sistema.

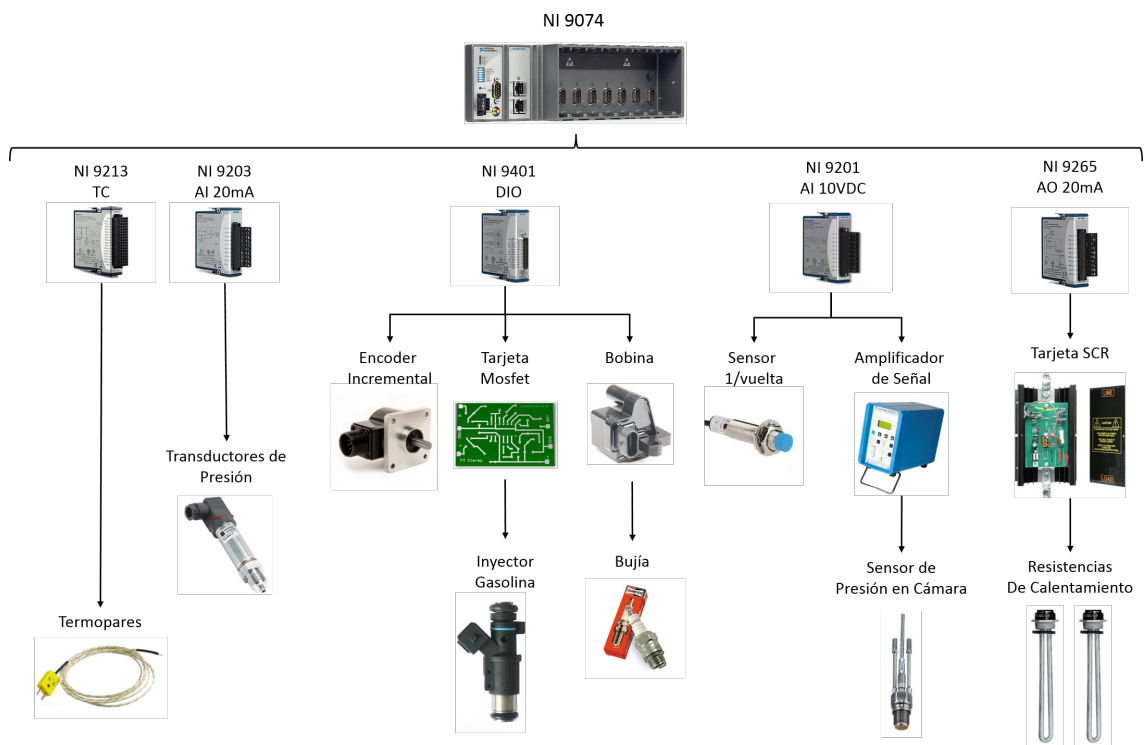


Figura 5.3: Diagrama esquemático de dependencia del sistema de control.

El equipo NI-9074 ha sido descrito anteriormente en este trabajo y también los módulos utilizados, por lo que en este apartado se explicará la configuración y la programación de este sistema.

Una de las características más interesantes de estos sistemas es la posibilidad de ser programados en modo híbrido. Esta configuración permite programar algunos módulos de entrada o salida en FPGA mientras que los demás se programan en Real Time. La arquitectura y comunicación del hardware se presenta en la Figura 5.4.

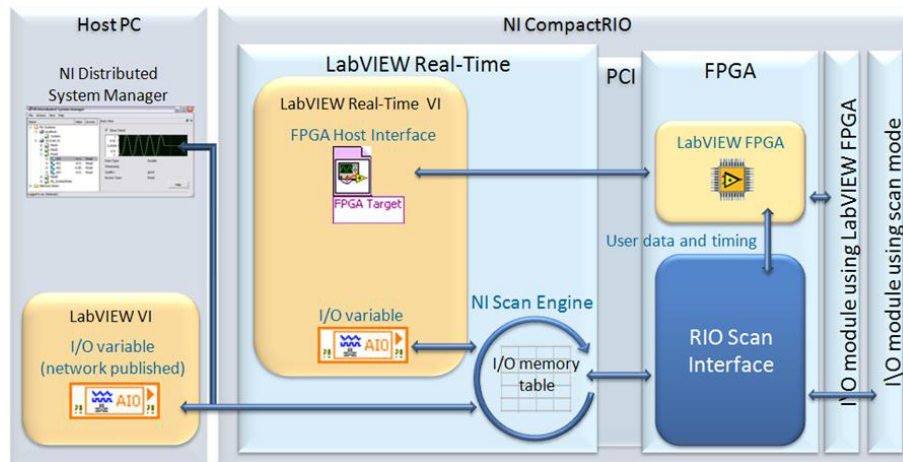


Figura 5.4: Arquitectura interna y comunicación del Compact RIO.

### 5.2.3 ESTRUCTURA DEL CÓDIGO EN EL ENTORNO DE PROGRAMACIÓN

Como ya se ha mencionado anteriormente, el programa general de control y la interfaz de usuario están desarrollados en el entorno de programación LabVIEW de National Instruments. Para realizar un proyecto con Compact RIO es necesario crear un proyecto donde sean visibles el ordenador principal, el hardware externo y los instrumentos virtuales (VI) generados en el proyecto. Además, desde la ventana del proyecto, se pueden visualizar, abrir o crear otros elementos como el módulo de FPGA o elementos de memoria como FIFOs, entre otros [37].

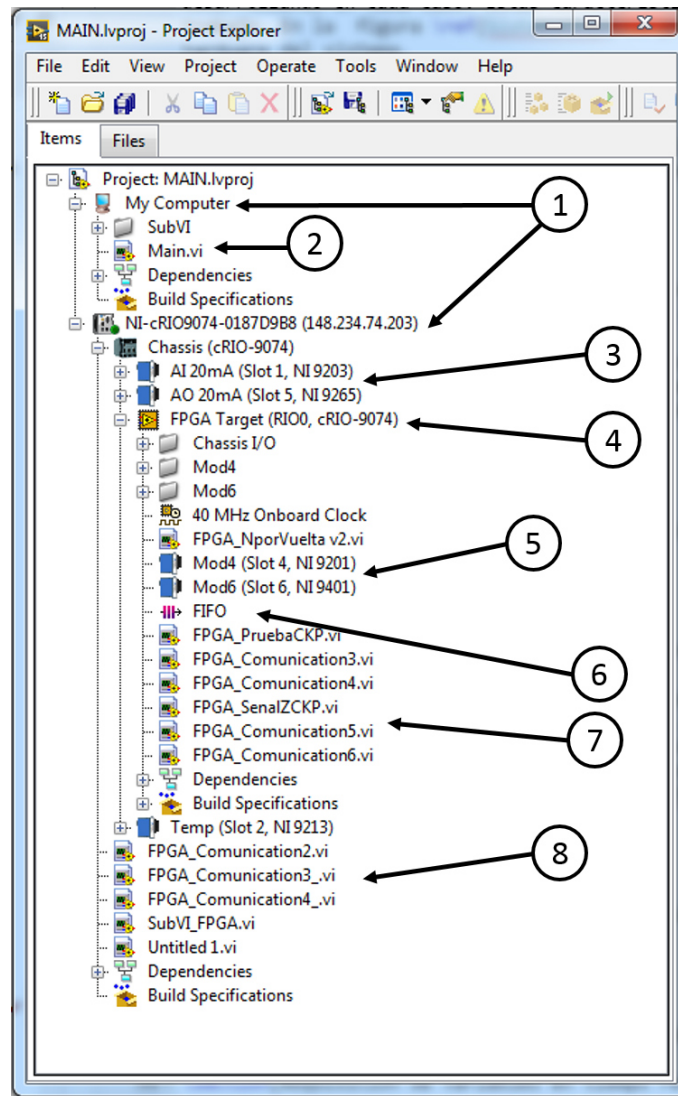


Figura 5.5: Estructura del proyecto en LabVIEW. 1- Ordenador principal y hardware externo (cRIO). 2- VI principal donde se encuentra la interfaz de usuario. 3- Módulos del cRIO configurados en tiempo real (RT). 4- Chip FPGA. 5- Módulos configurados en FPGA y que dependen de este chip. 6- Elemento de memoria FIFO para la comunicación entre RT y FPGA. 7- VIs en el chip FPGA. 8- VIs en RT.

En la Figura 5.5, se muestra la ventana de un proyecto en LabVIEW donde son visibles los elementos del mismo y la dependencia que tienen. Cada instrumento virtual creado depende de un hardware específico ya sea del ordenador principal o del cRIO. A su vez, dentro del cRIO un instrumento virtual puede estar programado

en Real Time y depender del Chasis (número 8, Figura 5.5) o estar programado en FPGA Interface y depender el chip FPGA (número 7, Figura 5.5).

De igual forma los módulos conectados al chasis del cRIO, se pueden arrastrar hasta el chip FPGA para utilizar sus puertos como variables en FPGA, siempre que tengan esta característica. Es importante tener en cuenta la importancia de la organización de cada elemento dentro del proyecto, dado que la forma de programación cambia completamente en algunos casos y con una buena gestión de los elementos de un proyecto se pueden evitar errores de comunicación entre los diferentes VIs.

### 5.3 ADQUISICIÓN DE VARIABLES EN TIEMPO REAL

Una de las especificaciones de este tipo de sistemas es el registro continuo de variables en tiempo real. En el caso concreto del Motor CFR se miden en tiempo real las presiones y temperaturas de interés termodinámico, así como temperaturas y presiones críticas de funcionamiento.

El código permite variar la frecuencia de muestreo de estas variables de forma independiente. Además, el usuario puede ver la variación temporal de las mismas en dos gráficas independientes para las presiones y las temperaturas. Es posible también, seleccionar el grupo de variables que se quieren visualizar en el plot y modificarlo mientras el programa se está en ejecución sin que se dejen de registrar el resto de variables no seleccionadas.

Este bucle del código está configurado en Scan Mode, lo que permite desarrollar aplicaciones en tiempo real con frecuencias de hasta  $1\text{ kHz}$  [38].

## 5.4 COMUNICACIÓN CON EL FPGA DEL SISTEMA DE CONTROL

En apartados anteriores ya se mencionaron las características principales del sistema integrado NI cRIO-9074. Entre las que destacan la combinación de un procesador en tiempo real y arreglos de compuertas programables en campo (FPGAs) reconfigurables en el mismo chasis para aplicaciones embebidas de monitoreo y control de máquinas. Además, integra un procesador industrial en tiempo real de 400 MHz con un FPGA con 2M de compuertas, y tiene ocho ranuras para módulos de E/S de la Serie C de NI. Este sistema tiene 128 MB de DRAM para operación embebida y 512 MB de memoria no volátil para registro de datos [39].

Los FPGAs son chips de silicio reprogramables. Ross Freeman, el cofundador de Xilinx, inventó el primer FPGA en 1985. La adopción del chip FPGA en las industrias obtuvo un gran éxito por el hecho de que los FPGAs combinan lo mejor de los circuitos integrados de aplicación específica (ASICs) y de los sistemas basados en procesador. Los FPGAs ofrecen velocidades temporizadas por hardware y fiabilidad, pero sin requerir altos volúmenes de recursos para compensar el gran gasto que genera un diseño personalizado de ASIC.

El silicio reprogramable también tiene la misma flexibilidad que un software que se ejecuta en un sistema basado en procesador, pero no está limitado por el número de núcleos de procesamiento disponibles. A diferencia de los procesadores, los FPGAs son verdaderamente paralelos por naturaleza, así las diferentes operaciones de procesamiento no tienen que competir por los mismos recursos. Cada tarea de procesamiento independiente es asignada a una sección del chip y puede ejecutarse de manera autónoma sin ser afectada por otros bloques de lógica. Como resultado, el rendimiento de una parte de la aplicación no se ve afectado cuando se agregan otros procesos [40].

En un chip FPGA puede haber desde cientos de miles hasta millones de elementos lógicos programables o puertas lógicas equivalentes. El programador, mediante un lenguaje de descripción de hardware (HDL), configura la arquitectura del circuito para su aplicación específica [41].

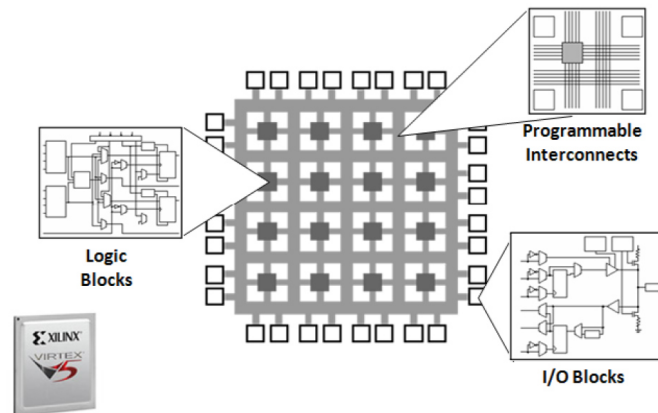


Figura 5.6: Arquitectura FPGA.

En la Figura 5.6 se presenta la estructura básica de un dispositivo FPGA. Un chip FPGA programable se compone básicamente de tres elementos: bloques de puertas lógicas, interconexiones programables y módulos de entrada y salida. El software de National Instruments permite programar el chip FPGA integrado en los equipos Compact RIO y similares.

El contar con un chip FPGA permite desarrollar aplicaciones que requieran grandes frecuencias de muestreo como las que aquí se explican. En la Figura 5.7 se presenta la arquitectura de los dispositivos Compact RIO y cómo es posible programar el chip FPGA que tienen integrado utilizando el software de National Instruments.

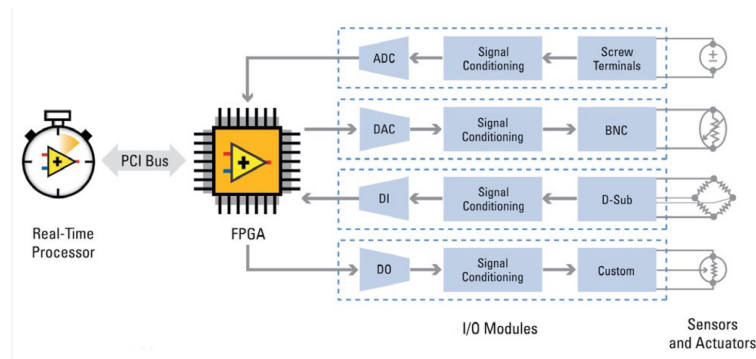


Figura 5.7: Comunicación del procesador real-time con el chip FPGA del *CompactRIO*.

Esta arquitectura hace posible la comunicación entre diferentes instrumentos virtuales estén o no programados en FPGA. Esto significa que es posible tener una aplicación híbrida en la que ciertos procesos se valgan de las altas frecuencias del chip FPGA, mientras otros procesos que no requieren tanta velocidad pueden estar programados en tiempo real.

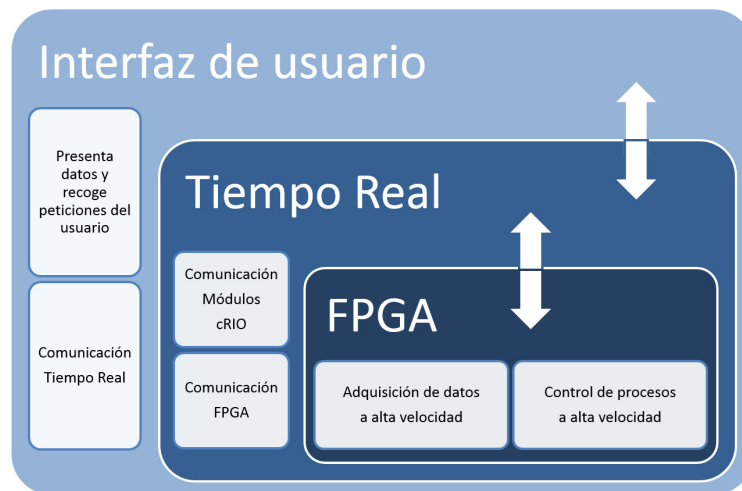


Figura 5.8: Comunicación en la programación híbrida de un cRIO.

Este es el caso de la aplicación de este proyecto. Existen tres niveles de programación en los VI del código desarrollado (Figura 5.8). El primero y de más alto

nivel es la interfaz de usuario, que está guardado en el ordenador principal y es el acceso directo del usuario a las utilidades del programa. El segundo nivel, es la programación en tiempo real donde se recoge la información de las señales que llegan a los módulos del cRIO configurados en este modo. Además en este segundo nivel se realiza la comunicación con el FPGA del cRIO. Por último se encuentra la programación de más bajo nivel, que son los VI programados en el chip reprogramable de la unidad.

## 5.5 DETECCIÓN DE LA POSICIÓN DEL PISTÓN Y DEL CIGÜEÑAL

### 5.5.1 ENCODER INCREMENTAL

El pistón se desplaza solidario al giro del cigüeñal, por ende, conociendo la posición del cigüeñal es posible saber la posición del pistón. Para conocer la posición y sentido de giro del cigüeñal se instaló un encoder incremental y un sensor de uno por vuelta como se explicó en el capítulo 3.

Para adquirir la señal del encoder incremental y del sensor de uno por vuelta fue necesario configurar el Compact RIO en modo FPGA. De no ser así las señales digitales no podrían ser adquiridas, debido a la alta frecuencia de muestreo necesaria.

El Motor CFR tiene un régimen constante de 900 *rpm*, velocidad a la que gira el encoder incremental. Esta velocidad puede ser convertida a 15 vueltas por segundo. Si en cada vuelta el sensor emite 3600 pulsos en los terminales A y B, en un segundo es necesario adquirir 54000 pulsos. Traducido a términos de frecuencia, la frecuencia del tren de pulsos será de 54 *kHz* y para adquirir la señal será necesaria una frecuencia de muestro de al menos dos veces la frecuencia de la señal [42]. En

este caso la frecuencia de muestreo seleccionada es 10 veces mayor a la frecuencia de la señal.

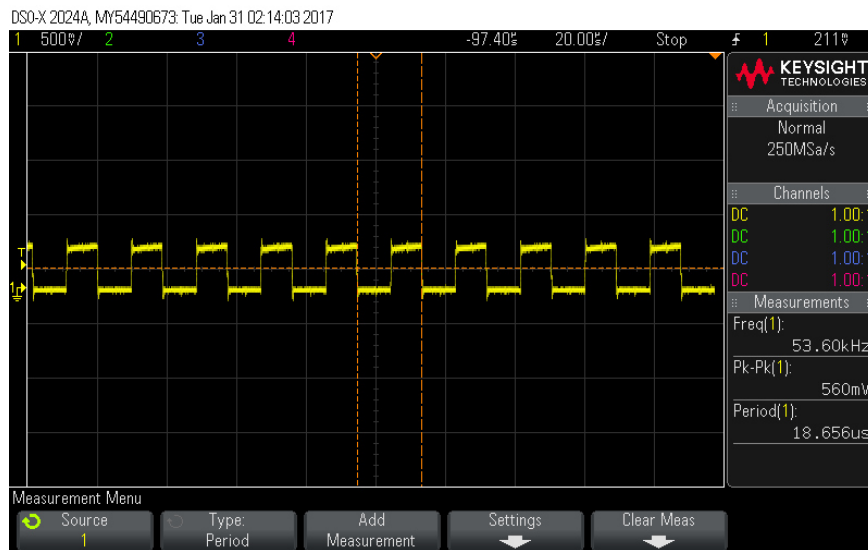


Figura 5.9: Imagen de la señal A del encoder incremental obtenida con un osciloscopio digital.

Todo lo anterior justifica la programación en FPGA frente a la programación en SCAN Mode. En la Figura 5.9 se muestra la imagen de la señal obtenida con un osciloscopio digital del tren de pulsos del encoder en su terminal A. En los cálculos del equipo de medida se observa que la frecuencia de  $53.60\text{ kHz}$  es equivalente a la calculada. Se desarrolló un programa en el entorno LabVIEW para el tratamiento de las señales, para así, conocer el régimen, el sentido de giro y el pulso del uno por vuelta.

Mediante la programación de un contador de flancos de subida se comprobó que efectivamente, el encoder emite un tren de 3600 pulsos por cada vuelta del cigüeñal en sus señales A y B mientras que se obtenían 15 pulsos por segundo en la señal Z.

El sentido de giro del motor se corresponde con el desfase entre las señales A y B, el cual, es posible conocerlo con el debido tratamiento de datos y lógica digital.

### 5.5.2 SENSOR DE UNO POR VUELTA

Las señales del encoder incremental no tienen una referencia absoluta, por lo que fue necesario crear una referencia física y tomarla como origen. De esta forma es posible, obtener más información del encoder incremental. Además del sentido de giro y el régimen del motor, con esta referencia, es posible conocer el punto muerto superior (PMS) y el punto muerto inferior (PMI). Otros datos que se pueden deducir son la apertura de las válvulas de admisión y escape.

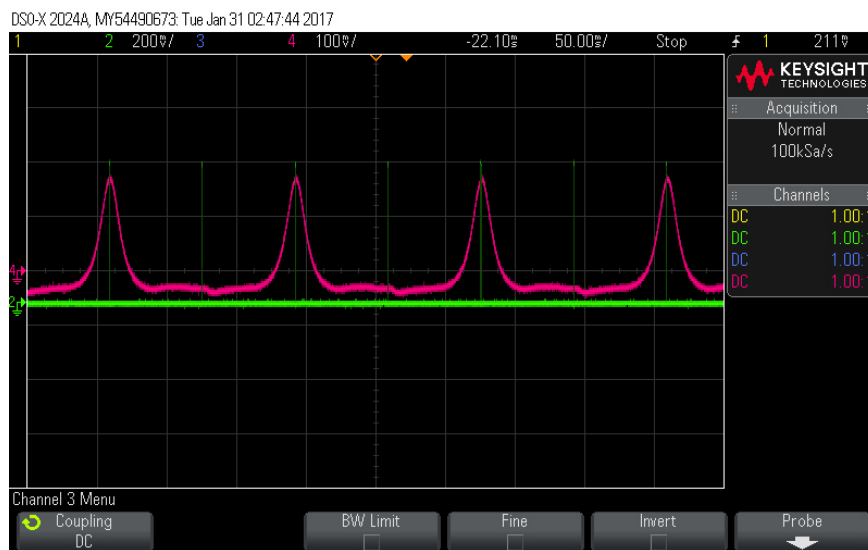


Figura 5.10: Validación de la detección del PMS. Señal de la presión en cámara (rojo). Pulso del sistema de control tras detectar el PMS (verde).

Es necesario mencionar que, el sensor de uno por vuelta está instalado a  $95^\circ$  con respecto al PMS. De esta forma, cuando el sistema detecta un flanco de subida de este sensor, debe esperar los grados correspondientes para marcar el PMS o el PMI,  $265^\circ$  o  $85^\circ$ , respectivamente.

Para contar los grados de espera antes de marcar un punto muerto del pistón, el programa utiliza la señal de el encoder incremental. Sabiendo que éste emite 10

pulsos por grado, el código debe contar 2650 pulsos del encoder si lo que se quiere detectar es el PMS o 850 pulsos si por el contrario, se quiere detectar el PMI.

En la Figura 5.10, se presenta la señal de presión en cámara y el pulso emitido por el sistema de control después de detectar el punto muerto superior del pistón en cada vuelta del cigüeñal. Con esto queda validada la programación para la detección de la posición del pistón, lo que asegura la adquisición correcta de las señales del encoder incremental y del sensor de uno por vuelta.

## 5.6 SINCRONIZACIÓN DE LA MEDIDA DE LA PRESIÓN EN CÁMARA

La presión en el cilindro es medida con un captador piezoeléctrico de la firma KISTLER, cuya instalación y características se explicaron en el capítulo 4. Se pretende medir la evolución de la presión en cámara de forma instantánea en el Motor CFR. Al variar de forma tan rápida es necesario que la toma de datos esté sincronizada mediante un elemento externo que marque el disparo de la medida y la frecuencia de la misma. Para ello, se utiliza la señal del encoder incremental explicado en el apartado anterior, el cual permite tomar el tren de pulsos que genera como disparo de la medida. Y más aún, es posible configurar el número de pulsos del encoder que deben pasar para tomar una medida de presión.

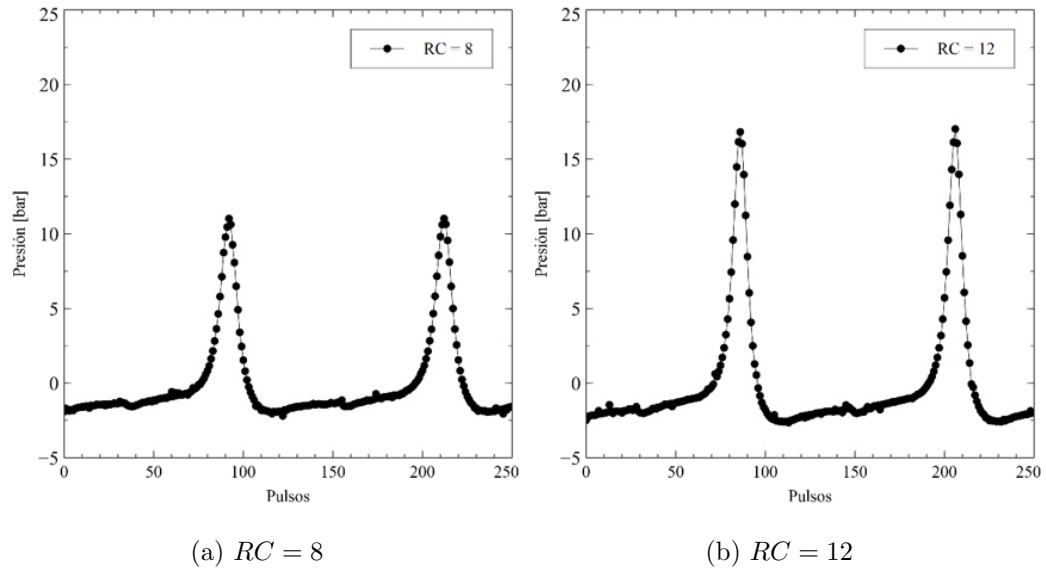


Figura 5.11: Señal de presión en cámara construida a partir de 60 puntos de medida por vuelta del cigüeñal.

Realizando ensayos en arrastre y variando el número de medidas por vuelta del cigüeñal, se concluyó que durante el funcionamiento en arrastre, 60 pulsos por cada vuelta son suficientes para generar la gráfica de la presión en cámara. En la figura 5.11 se muestra uno de los ensayos realizados.

Para asegurar que todas las medidas comienzan a registrarse en el mismo punto, se realizó un tratamiento de datos en el cual se toma el punto muerto inferior como referencia e inicio de medida. De esta forma es posible comparar gráficas de diferentes ensayos de forma sencilla.

Desde la interfaz de usuario, es posible modificar el número de medidas de presión por vuelta del cigüeñal. El límite de medidas por vuelta en arrastre, lo marca la resolución del encoder incremental (3600 pulsos por vuelta). De esta forma queda validada la adquisición de la señal de la presión en cámara y el código desarrollado para tal efecto.

## 5.7 CONTROLADOR DIFUSO

### 5.7.1 ESTRATEGIA DE PROGRAMACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO.

El controlador difuso se desarrolló para el control de la temperatura del fluido de trabajo del motor. El sistema completo está descrito en el capítulo 4. Para controlar la temperatura de admisión es necesario controlar dos resistencias colocadas en el conducto de admisión. La etapa de potencia que transmite la energía a estas resistencias ha de ser controlada con una salida 4-20 mA del sistema de control. Para tal efecto, se programó un controlador difuso en el entorno LabVIEW. Este sistema está dentro de la programación en tiempo real aunque es posible programarlo en FPGA.

La razón por la cual se decidió desarrollar el controlador en lógica difusa y no utilizar un controlador PID convencional fue que los controladores en lógica difusa permiten un mayor ahorro energético debido a la reducción del tiempo de pico y una disminución del error en estado permanente [43].

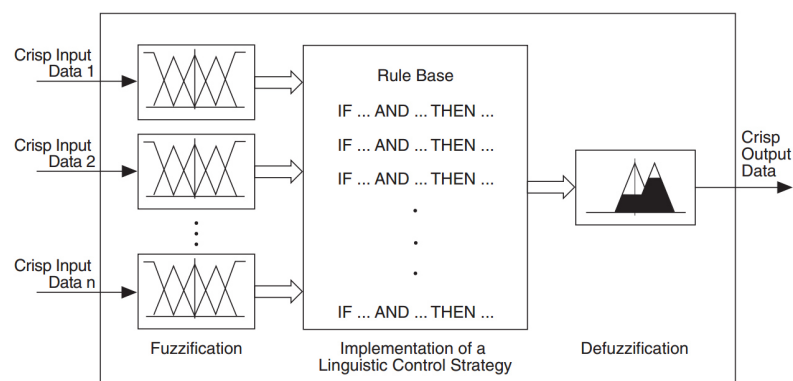


Figura 5.12: Estructura de un controlador difuso.

En la Figura 5.12 se presenta un diagrama con las partes del controlador difuso; entradas y salidas, fuzificación, funciones de membresía (reglas) y defuzificación [44].

El fuzificador transforma la medición del valor de una magnitud física en términos subjetivos mediante un proceso de verbalización. De esta forma, el valor de entrada puede asignarse como perteneciente a un conjunto difuso [45]. Las funciones de membresía son un conjunto de normas que definen en qué grado el valor de entrada pertenece a un conjunto difuso [46]. A partir del número de normas que se hayan activado es necesario obtener una única acción de control. Es aquí donde entra el defuzificador, el cual es el encargado de realizar los cálculos necesarios para dar lugar a una salida del sistema [45].

En el entorno de LabVIEW para desarrollar una aplicación sencilla de lógica difusa es necesario crear un archivo .fs donde se definan las variables del sistema, el tipo de controlador y las reglas o funciones de membresía. En las siguientes imágenes se presentan la definición de las variables y funciones de membresía, además del simulador del sistema.

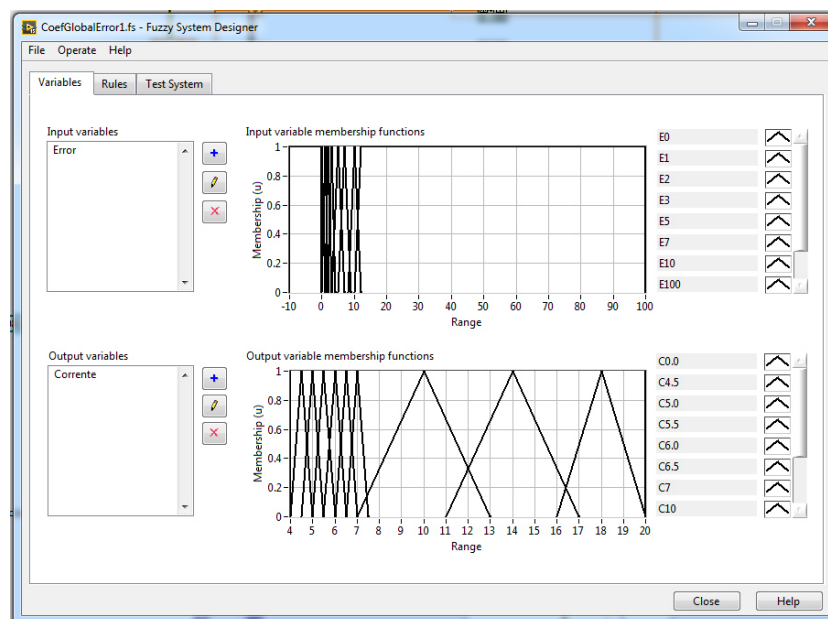


Figura 5.13: Definición de variables y funciones de membresía.

En la Figura 5.13, se distinguen dos variables; una de entrada: Error y una de salida: Corriente. Esto responde a que el tipo de controlador implementado es del tipo SISO (Single Input, Single Output). El programa calcula el error cometido teniendo como datos la temperatura de consigna y la temperatura medida a la que los gases entran al motor. Una vez calculado el error, se introduce el dato en el controlador difuso, pasando por las etapas explicadas al inicio de la sección (fuzificación, aplicación de reglas, defuzificación) para dar lugar a una única salida; un valor de corriente que se aplica a la entrada de control de la etapa de potencia de las resistencias de calentamiento.

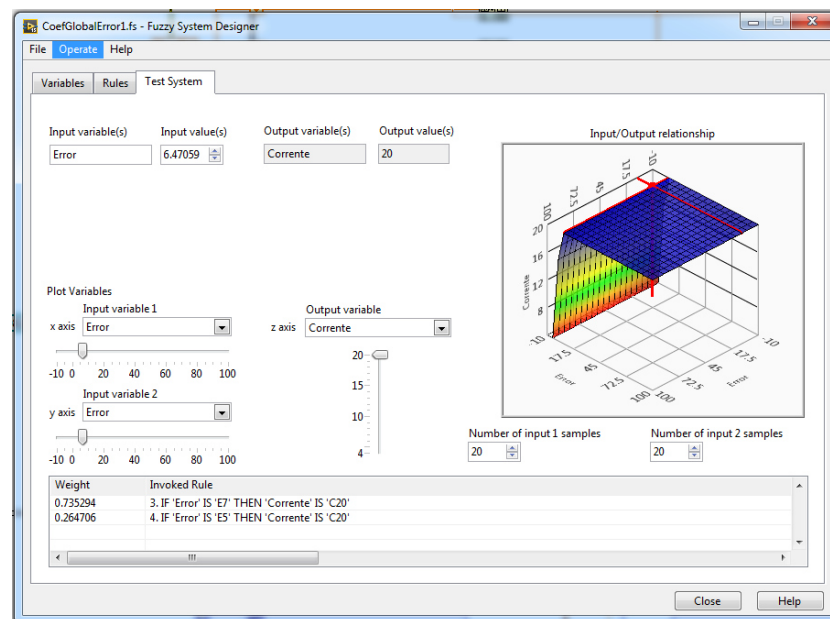


Figura 5.14: Simulador del sistema desarrollado.

## 5.7.2 VALIDACIÓN DEL CONTROL DEL CALENTAMIENTO DEL FLUJO DE TRABAJO DEL MOTOR.

Se llevaron a cabo dos estrategias de programación para realizar el control del calentamiento del flujo de trabajo. La primera fue desarrollar un controlador PI ajustando las constantes proporcional e integral según el método semiempírico de

Ziegler- Nichols [47]. El resultado fue un buen ajuste integral con muy bajo error en régimen permanente. El problema detectado fue el alto tiempo de estabilización, llegando en ocasiones a los 20 minutos.

La segunda, fue desarrollar un controlador basado en lógica difusa utilizando un arreglo SISO (*Single Input Single Output*). En este caso, se calcula una función de error con la temperatura de consigna y la temperatura medida y el controlador devuelve un valor en amperaje según la potencia que se le ha de aplicar a la carga.

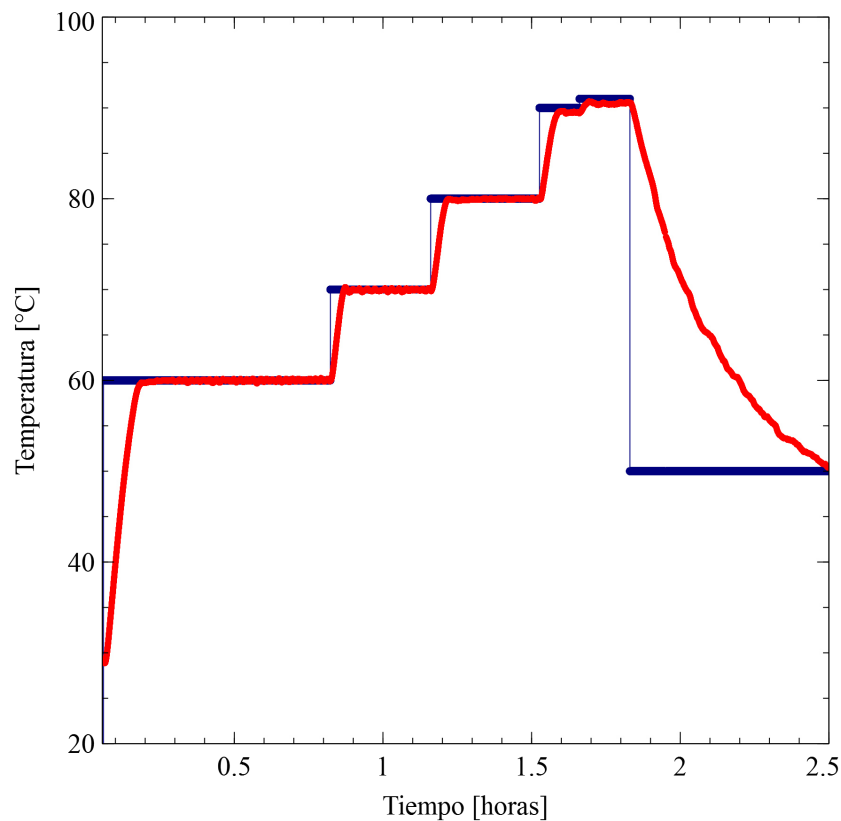


Figura 5.15: Prueba de sensibilidad del sistema de calentamiento.

En la Figura 5.15 se presenta un test de sensibilidad que se realizó para ver los límites del sistema y para probar el controlador difuso a diferentes temperaturas. Para realizar el ensayo se programó un arranque del motor y se calentó el aire de admisión desde los 24 °C hasta los 85 °C de forma escalonada para ver la respuesta

del sistema en cada uno de los puntos seleccionados. Las temperaturas elegidas fueron 35 , 50, 70, 80, 90 y 92 °C.

Después de los estudios de sensibilidad, el mayor error medido en estado permanente fue de  $\pm 0.21$  °C, por lo que se puede asegurar un buen control de la temperatura en un rango de temperatura ambiente hasta 90 °C.

El límite de temperatura impuesto por la instalación es de 92 °C. Si se sobrepasa este límite, la temperatura el material aislante de los conductos de admisión comienza a deteriorarse, quedando en el peor de los casos inservible.

El tiempo de enfriamiento de los conductos de admisión sobrepasa los 30 min, teniendo gran influencia la temperatura ambiente y la ventilación del laboratorio.

## 5.8 CONTROLADOR DE LA RELACIÓN DE COMPRESIÓN

En el capítulo 2 se hizo una descripción completa de la culata del motor y de la metodología empleada para conocer con exactitud el punto de referencia de la posición de la misma. Se desarrolló un código capaz de cambiar la posición de la culata para variar la relación de compresión.

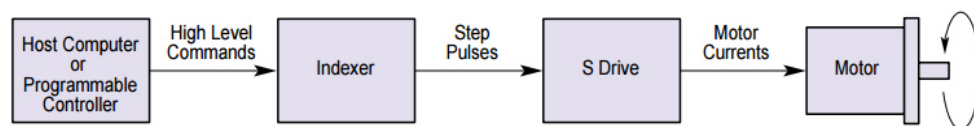


Figura 5.16: Control del servomotor.

### 5.8.1 CONTROL DEL SERVOMOTOR

Como se muestra en la Figura 5.16, para controlar el servomotor es necesario un drive que descodifique los datos transferidos desde el ordenador a pulsos eléctricos que el servomotor pueda interpretar.

El sistema completo se diseñó como un proceso independiente dentro de la instalación que debe cumplir los siguientes requisitos.

- En el momento de poner en marcha el sistema, el drive llevará la culata del motor a la posición de HOME ( $RC = 4.46$ ).
- Durante la operación del sistema, el usuario podrá indicar en la interfaz gráfica a qué relación de compresión desea que trabaje el motor y el programa se encargará automáticamente de traducir esta petición a número de vueltas para posicionar la culata.
- El error de posición máximo admisible es de 1 %.

### 5.8.2 COMUNICACIÓN RS-232C DEL DRIVE SX

Es posible comunicarse con el drive y controlar el motor a través de un software de la marca Parker llamado PANATERM. Este programa codifica los comandos de activación del motor en tramas de datos o palabras que envía por el puerto serie del ordenador hasta el drive.

Para programar el control del drive, se realizó una aplicación que fue integrada en la interfaz general de la instalación del motor CFR, desarrollada en LabVIEW. Los comandos de comunicación y control del drive y del servomotor, se incluyen en el Apéndice C: Comandos de comunicación con el servomotor.

### 5.8.3 VALIDACIÓN DEL POSICIONAMIENTO DE LA CULATA

Una vez realizada la instalación mecánica y desarrollado el programa de control del servomotor, se procedió a medir el error de posición del sistema.

En las Figura 5.17 se presenta el cambio de posición de la culata cuando el movimiento se realiza siempre en el mismo sentido de giro.

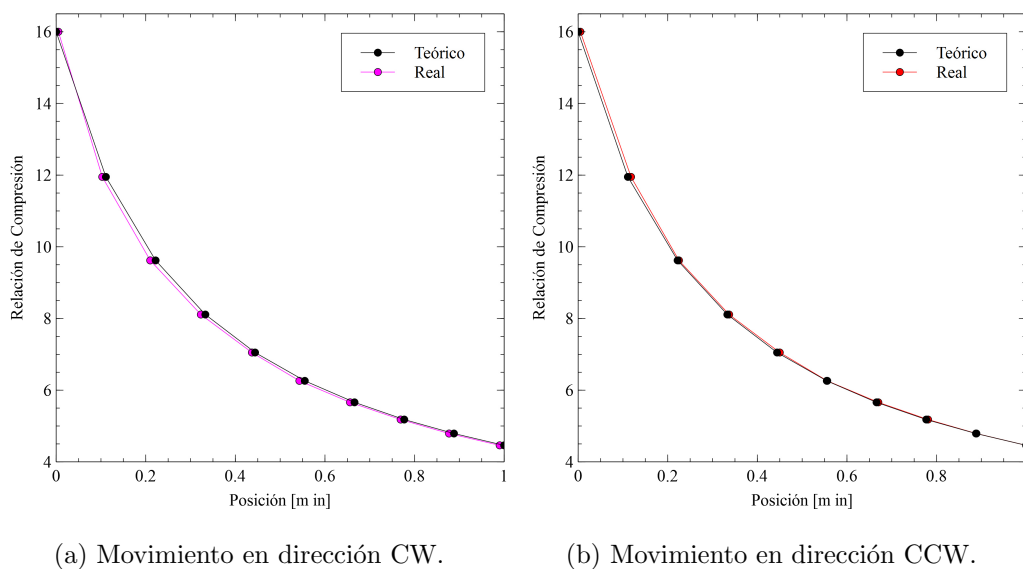


Figura 5.17: Error de posición en movimientos sucesivos en la misma dirección.

Como se puede apreciar, la posición teórica que indica el manual de usuario de *Waukesha* no varía con la medida obtenida por el micrómetro instalado en la culata del motor CFR. Se realizaron ocho pruebas para las dos direcciones (CW, CCW) en todas el error relativo no superó el 1%.

Una vez comprobada la robustez de la programación se realizaron pruebas de error en movimiento combinado, es decir, cambiando la dirección de giro del servomotor en cada movimiento. Con esto se pretendió asemejar el uso del sistema a las condiciones habituales de operación. Para medir el error de posición se dividió

la carrera útil de la culata en ocho posiciones conocidas y se mandó posicionar el motor de forma alterna en cada una de ellas, lo que dio lugar a 16 posiciones.

Esta prueba se realizó en cuatro ocasiones. En la Figura 5.18 se muestra el peor de los casos registrado, donde el error relativo máximo fue del 7.65 %.

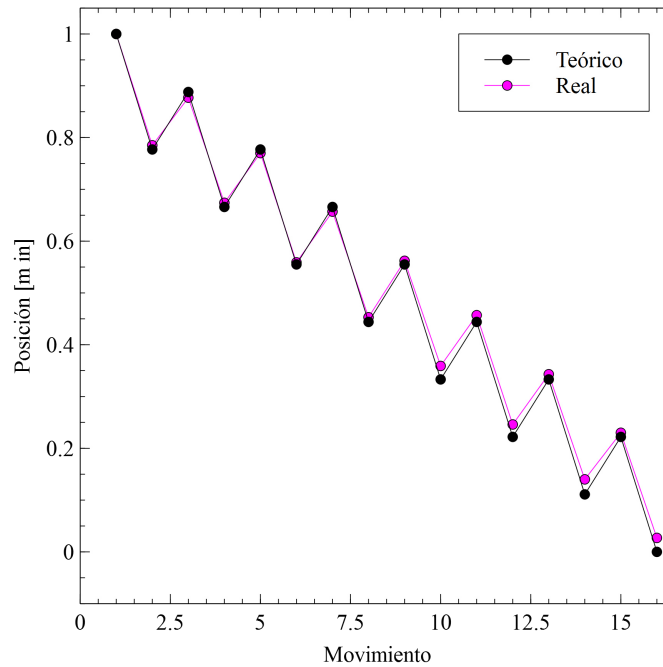


Figura 5.18: Error en movimientos combinados sin tomar en cuenta el juego mecánico de los engranajes.

Este resultado no cumple con los requisitos del sistema en el cual, el error máximo admisible en la posición de la culata debe ser menor al 1 %. Analizando el sistema de engranajes se concluyó que este tiene un juego de dos vueltas al cambiar el sentido de giro. Teniendo en cuenta este detalle, se modificó la programación para sumar dos vueltas al servomotor si este cambia de giro.

Se realizó de nuevo el ensayo del error combinado obteniendo los resultados presentados en la Figura 5.19. En este caso para ninguno de los movimientos se superó el 1 % de error, siendo la media del error relativo registrado igual a 0.89 %.

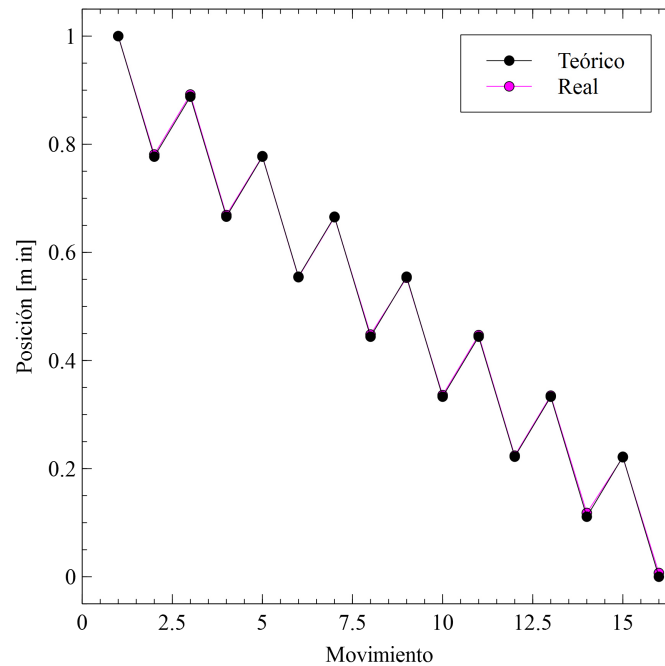


Figura 5.19: Error en movimientos combinados teniendo en cuenta el juego mecánico de los engranajes.

Los estudios de sensibilidad del sistema de variación de la posición aseguran con un 95.4 % de certeza que el error en el posicionamiento de la culata es de  $\pm 0.006$  pulgadas. Si se quisiera mejorar este sistema, se aconseja realizar un control en lazo cerrado, es decir, un sensor que retroalimente la entrada del sistema de control.

## 5.9 CONTROL DE LA INYECCIÓN

### 5.9.1 ETAPA DE POTENCIA.

Como se mencionó anteriormente, el inyector utilizado en la instalación es activado electromecánicamente, es decir, una bobina es la encargada de accionar el mecanismo del inyector para permitir el paso del combustible.

El control de la apertura del inyector, por lo tanto, necesita una etapa de potencia que reciba el pulso de nivel lógico (0 - 5 VDC) enviado por el sistema de control y, de forma instantánea (ns) conmute un circuito de alta que energice a la bobina del inyector.

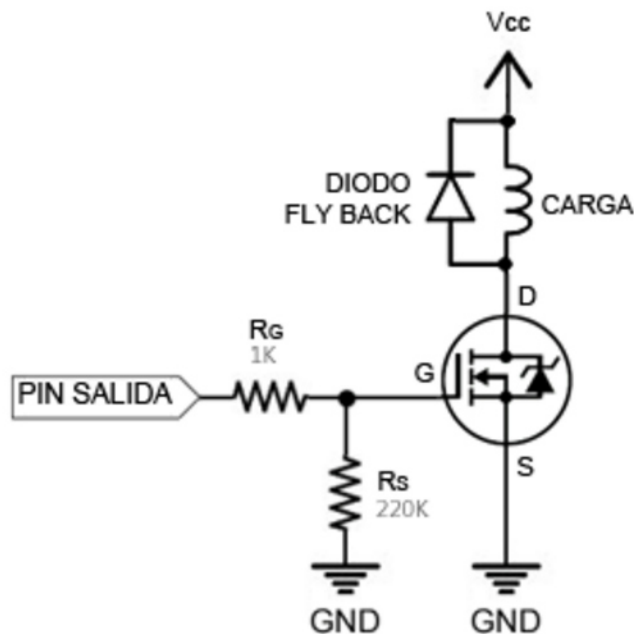


Figura 5.20: Circuito etapa de potencia para la apertura del inyector.

El circuito presentado en la Figura 5.20 presenta el hardware implementado para la activación del inyector. Tiene como elemento principal un transistor MOS-

FET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor), el cual permite cerrar un circuito de potencia (12VDC 3A) cuando se aplica una señal lógica en puerta [48].

Un diodo *fly back* está conectado en paralelo con la carga (inyector). Este diodo proporciona un recorrido de mínima resistencia, que permite disipar las corrientes inducidas producidas por el campo magnético de la carga inductiva cuando esta es desconectada de la corriente, y que podrían dañar al transistor [49].

### 5.9.2 VALIDACIÓN DEL PULSO DE INYECCIÓN

La interfaz de usuario permite modificar el ancho del pulso de la inyección y configurar el adelanto o atraso con respecto al punto muerto superior del pistón. Además, es posible definir cada cuántos ciclos del motor se quiere realizar la inyección. Este parámetro es importante porque influye en la temperatura del motor y la cantidad de calor que tendrá que remover el sistema de refrigeración.

El primer paso para la validación del sistema de inyección fue registrar con un equipo de medida externo, el pulso de nivel lógico que envía el sistema de control. En la Figura se muestra un ejemplo de una medida realizada con un osciloscopio digital.

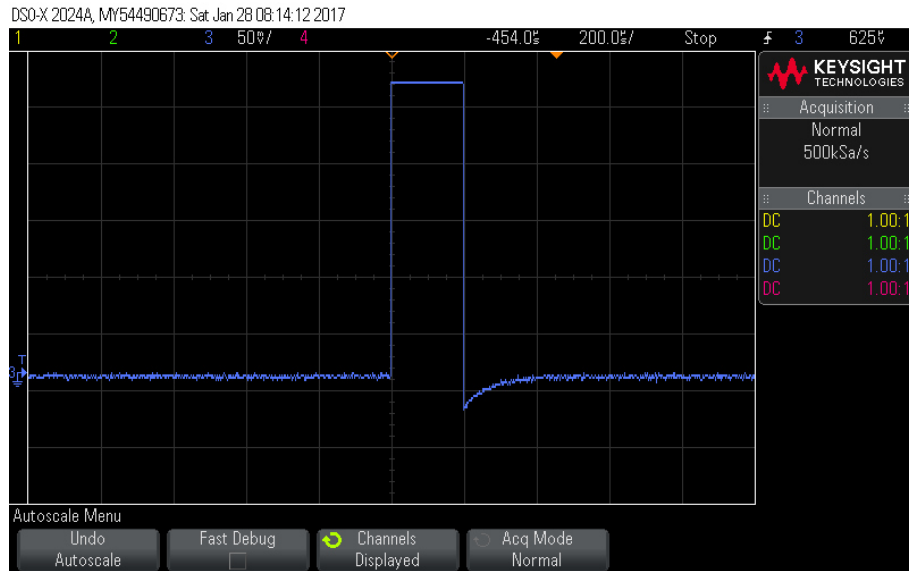


Figura 5.21: Pulso de 200  $\mu\text{s}$  generado por el sistema de control.

En la Figura 5.21 se muestra una de las imágenes tomadas con el osciloscopio digital, donde se representa el pulso generado por el sistema de control de 200  $\mu\text{s}$ . Esta misma operación se realizó con pulsos de 100  $\mu\text{s}$ , 200  $\mu\text{s}$ , 500  $\mu\text{s}$ , 1000  $\mu\text{s}$  y 2000  $\mu\text{s}$  y en todas se comprobó la correcta generación del pulso.

El siguiente paso en la validación del pulso de inyección fue comprobar, después de la etapa de potencia, si el pulso que le llega al inyector se emite de forma instantánea (del orden de los ns de diferencia).

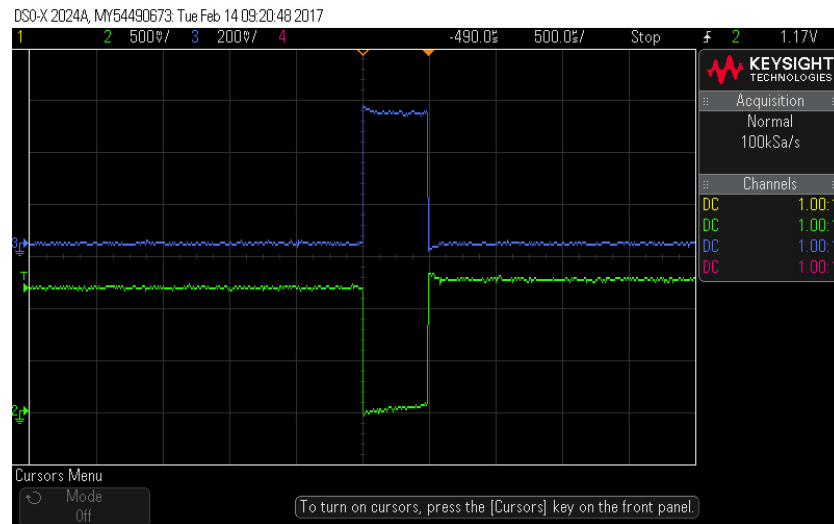


Figura 5.22: Pulso de  $500 \mu\text{s}$  medido en el sistema de control (azul) y pulso medido en los terminales del inyector (verde).

En la Figura 5.22 se presentan el pulso generado por el sistema de control y el pulso que le llega al inyector. Este último es negativo porque el inyector se conecta en modo sink, es decir, se le aplica la potencia derivando uno de los dos terminales a tierra. Con el procesamiento de los datos representados en la figura anterior, se puede afirmar que el pulso de inyección queda validado, ya que el retraso de conmutación del circuito de potencia es del orden de ns.

### 5.9.3 SINCRONIZACIÓN DEL PULSO DE INYECCIÓN.

El software de control, además de permitir variar el ancho de pulso que se le envía al inyector, debe permitir adelantar o atrasar el momento de inyección con respecto al PMS. Y más aún, debe ser posible para el usuario controlar cada cuántos ciclos del motor se inyecta combustible y si se quieren realizar inyecciones múltiples antes de la apertura de la válvula de admisión.

El programa con la información del sensor de uno por vuelta y el encoder incremental, es capaz de detectar el PMS del pistón. Con esta información, es posible traducir el ángulo de adelanto/atraso de la inyección con respecto al PMS y además, decidir si se inyecta en ese ciclo.

La validación del adelanto/atraso de la inyección se llevó a cabo tomando como referencia la señal del encoder incremental y la detección del PMS. Por otra parte, se validó el número de ciclos por inyección como se presenta en la Figura 5.23.

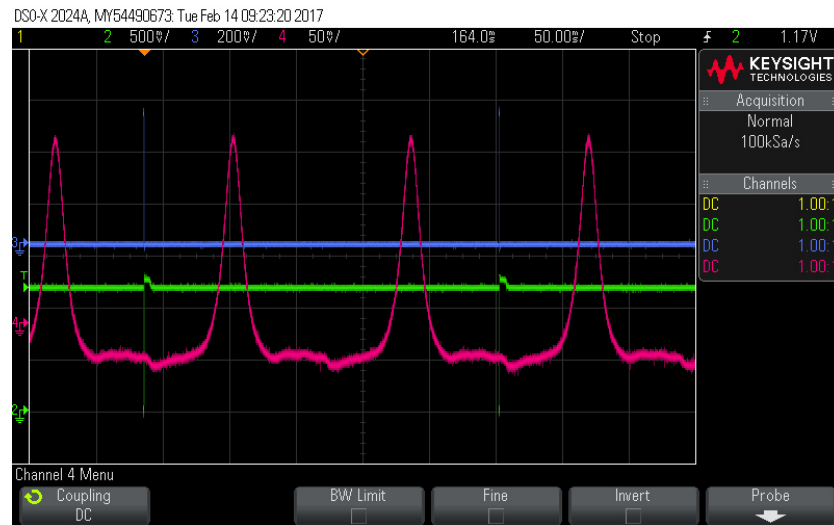


Figura 5.23: Señal de presión en cámara con el motor en arrastre (rojo), pulso de inyección del sistema de control (azul) y pulso en el inyector (verde). Configuración de dos ciclos por inyección.

## 5.10 CONTROL DE LA IGNICIÓN

El pulso de ignición dura  $3\text{ ms}$ , tiempo de carga de la bobina. La chispa es generada después del flanco de bajada de este pulso. Es importante tener en cuenta estos dos factores a la hora de calcular el momento de ignición.

Al contrario que el pulso de la inyección, la ignición se realiza en la carrera de compresión. Y por seguridad, se activa en todos los ciclos del motor, por si hubiera parte de combustible sin quemar.

El disparo de la ignición está marcado por el encoder incremental y la señal del sensor de uno por vuelta. El sistema detecta si está en carrera de compresión y genera el pulso de ignición.

Si el sistema no detecta la señal de la presión en cámara no realiza ninguna acción. Esto último es de vital importancia pues, asegura que no se realicen inyecciones o se genere chispa con el motor parado. De igual forma, protege la instalación ante un fallo de medida durante los ensayos con combustión.

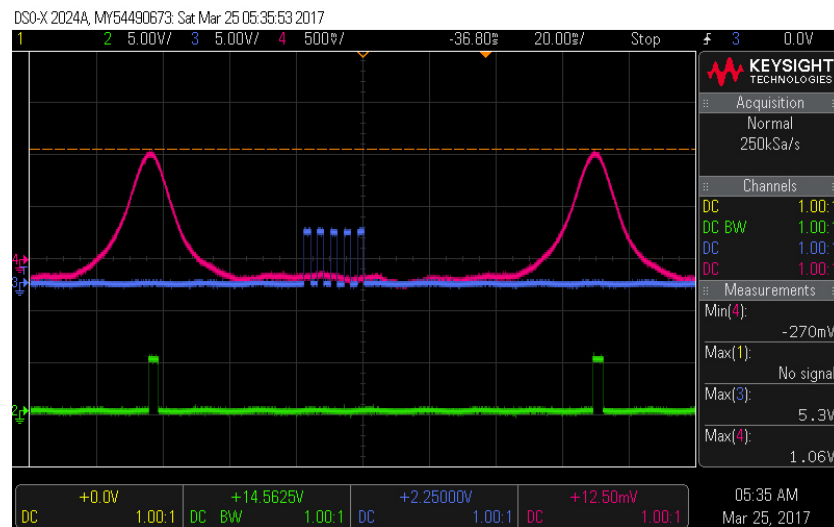


Figura 5.24: Señal de presión en cámara con el motor en arrastre (rojo), pulsos de inyección del sistema de control (azul) y pulso de ignición (verde).

En la Figura 5.24, se muestran los pulsos de inyección múltiple y el pulso de ignición como validación experimental del código desarrollado.

## 5.11 SISTEMA DE EMERGENCIA

El sistema de emergencia incluido en el software debe activarse cuando se detecten los siguientes errores:

- Alguno de los sensores de presión está trabajando fuera de su rango de temperatura.
- La temperatura del aceite está fuera de rango.
- La temperatura en el conducto de admisión es demasiado alta.
- La temperatura del refrigerante del motor es demasiado alta.
- El motor está girando en sentido contrario.
- La velocidad del motor de combustión es inadecuada.
- La presión del aceite es baja.
- Fallo eléctrico.
- Se activa un pulsador de emergencia.

El software avisa al usuario de los errores que se detectan. Quedando a consideración de éste el detener por completo la instalación. Únicamente en caso de emergencia, riesgo para las personas o para la instalación, el software actuará de manera automática. A continuación se exponen esos casos:

- El calentamiento de los gases de admisión no puede activarse si el motor está parado. Si durante el funcionamiento normal el motor se detiene con el sistema de calentamiento encendido éste se desconectará automáticamente.
- Si se detecta giro en sentido contrario del motor, éste se detendrá por completo.

- Si se detecta presión baja de aceite se detendrá el motor.
- Si se acciona un pulsador de emergencia el motor se detendrá por completo y el software desactivará el calentamiento si éste estuviera en funcionamiento.

## 5.12 INTERFAZ DE USUARIO

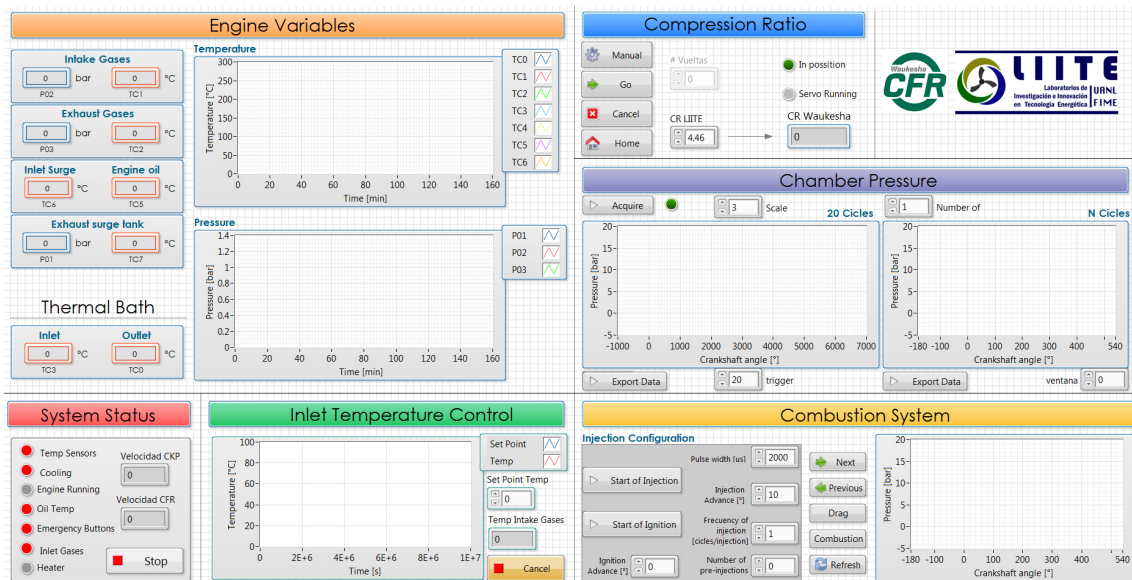


Figura 5.25: Interfaz de usuario.

En la Figura 5.25 se presenta la única interfaz del sistema de control. El usuario desde la misma puede seguir en tiempo real la evolución de las variables medidas, seleccionando las señales que desea ver en los plots de temperaturas y presiones. Además desde la misma interfaz, es posible activar los sistemas de control del calentamiento de los gases de admisión, la variación de la relación de compresión, la adquisición de la presión en cámara, así como la configuración de los parámetros de inyección.

## 5.12.1 INTERFAZ DE LAS VARIABLES EN TIEMPO REAL

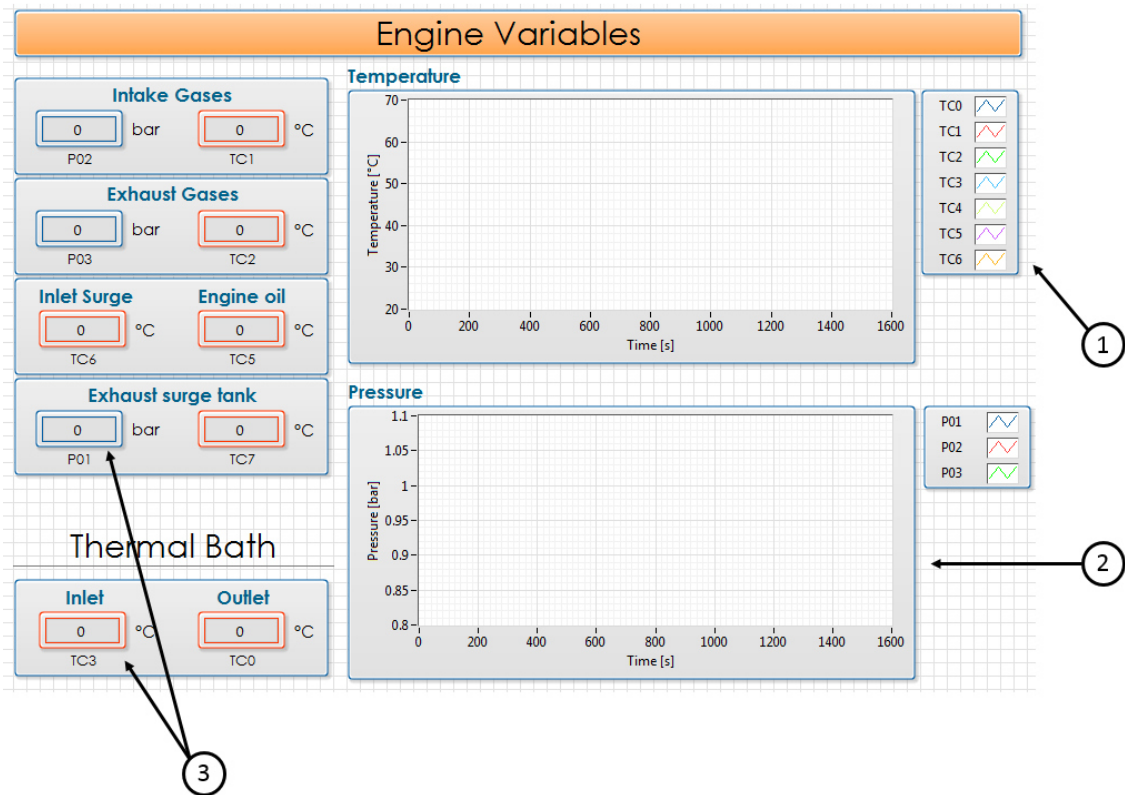


Figura 5.26: Gráficas e indicadores de las variables medidas en tiempo real. 1- Menú de señales. 2- Gráficas. 3- Indicadores de presiones (azul) y temperaturas (naranja).

En la figura anterior se presenta la sección de la interfaz donde se presentan las presiones y temperaturas medidas en tiempo real. Los indicadores (3) están organizados según el punto de medida. De color naranja para las temperaturas y azul para las presiones. En éstos se puede ver el valor en tiempo real de la variable.

En el menú de señales (1) se presenta la leyenda de lo que se grafica. El usuario puede seleccionar las variables que desee ver pulsando encima de ellas el botón derecho del mouse.

### 5.12.2 INTERFAZ DEL CONTROL DE LA RELACIÓN DE COMPRESIÓN

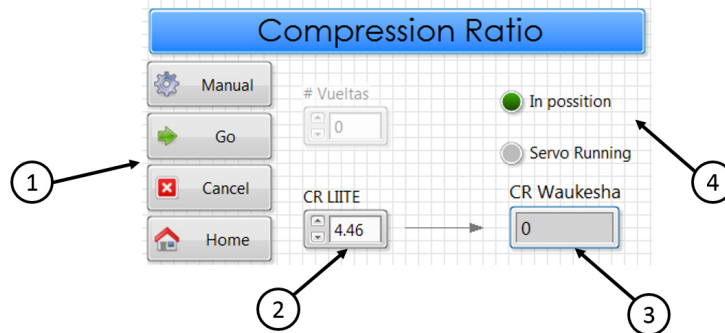


Figura 5.27: Interfaz de usuario para el control de la relación de compresión. 1- Pulsadores para controlar el sistema. 2- Relación de compresión introducida por el usuario. 3- Relación de compresión más cercana conocida. 4- Indicadores de movimiento del servo.

El usuario podrá introducir en el control *CR LIITE* (1) un valor entre 4.46 y 16, límites de la relación de compresión del motor. Si el valor introducido no estuviese dentro de los límites antes mencionados, el programa corregirá el valor cambiándolo por el valor posible más cercano.

Una vez que el usuario introduce una relación de compresión válida, el programa busca en la tabla de calibración del motor (proporcionada por el fabricante) si éste valor se encuentra definido, si no, lo ajusta al más cercano (2) y lo representa en el indicador *CR Waukesha*.

Para comenzar el movimiento de la culata del motor hasta la posición de la relación de compresión indicada, es necesario pulsar *Go*. El usuario puede en todo momento detener el movimiento pulsando *Cancel* o regresar a la posición de origen pulsando *Home* (RC = 4.46).

Es posible controlar el giro del motor de forma manual, pulsando Manual e indicando el número de vueltas que se desee realizar.

### 5.12.3 INTERFAZ DE LA MEDIDA DE PRESIÓN EN CÁMARA

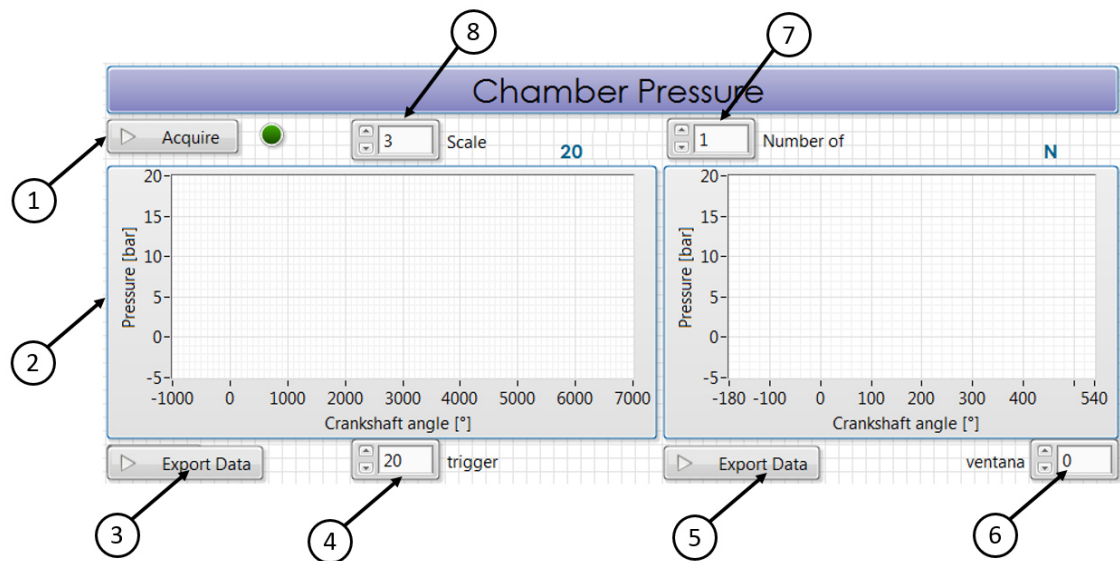


Figura 5.28: Interfaz de usuario para la medida de la presión en cámara. 1- Pulsador de adquirir para iniciar una medida. 2- Gráfica con 20 ciclos del motor. 3-4- Pulsador para guardar datos. 5- Amplitud del filtro de media móvil. 6- Gráfica de n ciclos. 7- Escala del amplificador del sensor de presión.

Durante el funcionamiento del motor, si se desea registrar la medida de presión en cámara, es necesario pulsar *Acquire* (1). Una vez tomadas las medidas de presión en la gráfica *20 cycles* (2) se presentarán 20 ciclos del motor, mientras que en la gráfica *N cycles*, se presentarán el número de ciclos indicados en el control *Number of Cycles* (7). Esto, por si se desea ver en detalle uno o varios ciclos.

En el control de escala (8), es necesario introducir la escala con la que se configuró el amplificador de señal del sensor de presión en cámara. Por su parte el control de trigger (4) indica cada cuántos pulsos del encoder incremental se va a

tomar una medida de la presión en cámara. Es decir, si se configura trigger igual a 1, se tomarán 3600 medidas de presión por giro del cigüeñal, si se configura trigger igual a 20 serán 180 medidas de presión.

#### 5.12.4 INTERFAZ DEL ESTADO DEL SISTEMA

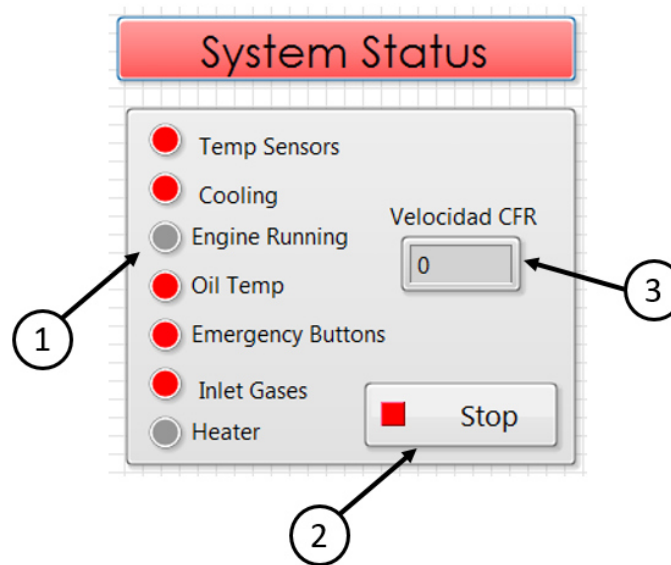


Figura 5.29: Interfaz del estado del sistema de emergencia. 1- Indicadores de estado. 2- Velocidad del motor. 3- Pulsador de STOP para detener la ejecución del programa.

El sistema de emergencia se recoge en una sección de la interfaz, donde si se detecta uno de los errores descritos en el apartado anterior, un indicador luminoso de color rojo (1), parpadea. Si no existe error, el indicador será verde fijo. En esta sección además se encuentra el pulsador de *STOP* con el que se termina la ejecución del programa.

### 5.12.5 INTERFAZ DEL SISTEMA DE CONTROL DEL CALENTAMIENTO

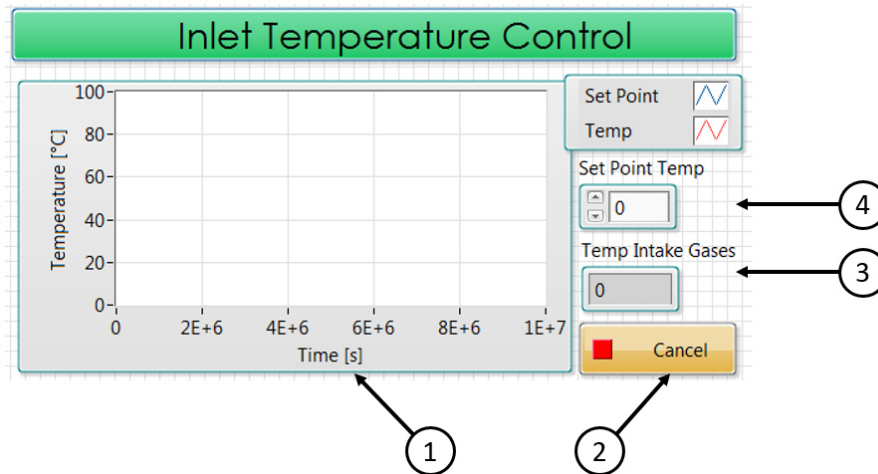


Figura 5.30: Interfaz del control del calentamiento de los gases de escape. 1- Gráfica de la evolución de la temperatura a la entrada de la admisión del motor. 2- Pulsador que detiene el calentamiento. 3- Temperatura real (medida). 4- Temperatura de ensayo (consigna).

*Set Point Temp* (4) es un control donde el usuario fija la temperatura a la cual desea que el fluido de trabajo ingrese en el motor. *Temp Intake Gases* (3) es la temperatura medida a la entrada del motor. Cuando estos dos valores son diferentes, el controlador difuso que gobierna las resistencias de calentamiento entrega la potencia necesaria a la carga para controlar la temperatura. Estos dos valores son visibles en la gráfica (1) donde se puede seguir su evolución temporal.

Es posible detener el calentamiento pulsando *Cancel* (2). De la misma forma, si se detiene la ejecución del programa, el calentamiento cesará de forma automática.

## 5.12.6 INTERFAZ DEL SISTEMA DE CONTROL DE LA INYECCIÓN.

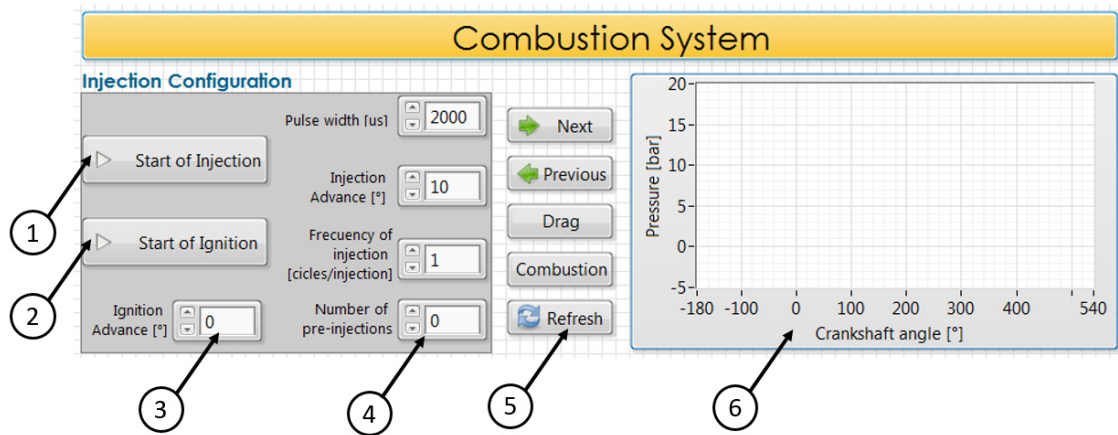


Figura 5.31: Interfaz del control del sistema de inyección. 1- Pulsador para comenzar la inyección. 2- Pulsador para comenzar la ignición. 3- Control de adelanto de la chispa. 4- Controles para configurar la inyección. 5- Controles de visualización de gráficas. 6- Plot.

Desde la sección de *Injection Configuration*, es posible configurar los parámetros de inyección. El usuario puede decidir si variar el ancho de pulso (limitado entre 500 y 4000  $\mu\text{s}$ ), modificar el adelanto/atraso de la inyección (limitado entre  $-90$  y  $90^\circ$ ) y decidir la frecuencia de inyección, es decir, el número de ciclos del motor por inyección (4).

En la gráfica (6) es posible comparar las curvas en arrastre del motor con las curvas de combustión utilizando los controles de la paleta (5). La ignición y la inyección solo comenzarán si se activan los pulsadores de *Start of Injection* (1) y *Start of Ignition* (2).

## CAPÍTULO 6

# RESULTADOS

---

---

<b>5.1. Introducción . . . . .</b>	<b>80</b>
<b>5.2. Descripción general del sistema: selección del hardware y de la estrategia de programación . . . . .</b>	<b>80</b>
5.2.1. Estrategia de programación . . . . .	80
5.2.2. Selección del hardware . . . . .	83
5.2.3. Estructura del código en el entorno de programación . . .	85
<b>5.3. Adquisición de variables en tiempo real . . . . .</b>	<b>87</b>
<b>5.4. Comunicación con el FPGA del sistema de control . . .</b>	<b>88</b>
<b>5.5. Detección de la posición del pistón y del cigüeñal . . . .</b>	<b>91</b>
5.5.1. Encoder incremental . . . . .	91
5.5.2. Sensor de uno por vuelta . . . . .	93
<b>5.6. Sincronización de la medida de la presión en cámara . .</b>	<b>94</b>
<b>5.7. Controlador difuso . . . . .</b>	<b>96</b>
5.7.1. Estrategia de programación del controlador difuso. . . . .	96
5.7.2. Validación del control del calentamiento del flujo de tra- bajo del motor. . . . .	98
<b>5.8. Controlador de la relación de compresión . . . . .</b>	<b>100</b>

---

5.8.1. Control del servomotor . . . . .	101
5.8.2. Comunicación RS-232C del drive SX . . . . .	101
5.8.3. Validación del posicionamiento de la culata . . . . .	102
<b>5.9. Control de la inyección . . . . .</b>	<b>105</b>
5.9.1. Etapa de potencia. . . . .	105
5.9.2. Validación del pulso de inyección . . . . .	106
5.9.3. Sincronización del pulso de inyección. . . . .	108
<b>5.10. Control de la ignición . . . . .</b>	<b>109</b>
<b>5.11. Sistema de emergencia . . . . .</b>	<b>111</b>
<b>5.12. Interfaz de usuario . . . . .</b>	<b>112</b>
5.12.1. Interfaz de las variables en tiempo real . . . . .	113
5.12.2. Interfaz del control de la relación de compresión . . . . .	114
5.12.3. Interfaz de la medida de presión en cámara . . . . .	115
5.12.4. Interfaz del estado del sistema . . . . .	116
5.12.5. Interfaz del sistema de control del calentamiento . . . . .	117
5.12.6. Interfaz del sistema de control de la inyección. . . . .	118

---

## 6.1 RESULTADOS

### 6.1.1 RESULTADOS EN LA CREACIÓN DE INFRAESTRUCTURA



(a) Puertas y cristalera de seguridad.

(b) Trabajos de reparación del techo.

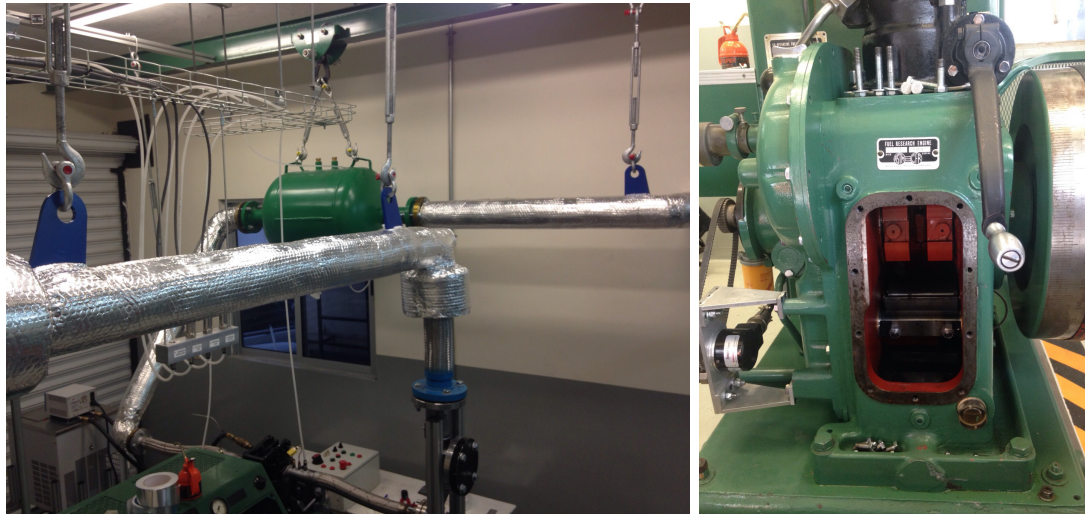
Figura 6.1: Modificación de la infraestructura del laboratorio.

- Durante la realización de este trabajo de investigación, se llevó a cabo la adecuación de un laboratorio para el estudio de la combustión, siendo la herramienta principal un motor de combustión interna alternativo de compresión variable.
- Al tratarse de un equipo pesado en el que existe combustión se tuvieron en cuenta aspectos tan importantes como la seguridad activa y pasiva de las instalaciones, la habitabilidad de las áreas de trabajo y de operación, la instalación de protecciones eléctricas y contra incendios para los equipos y los usuarios.
- Un laboratorio que alberga un motor de combustión debe cumplir con ciertas características de suma importancia para que se de una operación correcta y segura del motor.
- Es necesario por tanto, que el laboratorio cuente con un piso de seguridad hecho de concreto que pueda soportar el peso de la máquina y sus equipos auxiliares,

con un espesor tal, que se evite la formación de grietas y roturas y resista a las vibraciones provocadas por el motor. Aunque la máquina tiene su propia bancada de concreto donde se asienta el motor eléctrico y el de combustión, no se desestimó la construcción de un piso con las características mencionadas anteriormente.

- En la primera fase del proyecto, también se realizaron adecuaciones en el techo, reparándolo e impermeabilizándolo para evitar la formación de goteras y el desprendimiento del recubrimiento interno.
- Además de las remodelaciones constructivas, se llevaron a cabo trabajos de renovación de las instalaciones eléctricas. Todo el tendido eléctrico del laboratorio fue cableado de nuevo sustituyendo los sistemas de protección y cuadros de baja tensión por equipos y materiales nuevos. Esta tarea fue de suma importancia puesto que el Motor CFR gira gracias a un motor eléctrico que tiene una corriente de pico en el arranque de 261 A.
- Atendiendo a las necesidades de los equipos auxiliares del motor y de los sistemas de medida y de control, se instalaron tomas de corriente en puntos específicos de la instalación, de 230 VAC trifásico y monofásico y 120 VAC monofásico, según la necesidad de cada caso.
- En una de las paredes se preparó la salida de gases del motor al exterior del edificio. Se abrió un hueco en la pared para que pasara el último tramo del conducto de escape hacia el exterior.
- Entre el laboratorio del Motor CFR y la sala de control, donde se encuentra la estación de usuario, se instaló una puerta de acceso y una cristalera que permite ver en todo momento la instalación completa. Todos los cristales se blindaron con metacrilato de 5/8" de espesor como medida de seguridad.

### 6.1.2 RESULTADOS EN LA INSTALACIÓN MECÁNICA DEL MOTOR TÉRMICO CFR



(a) Detalle de la estructura superior.

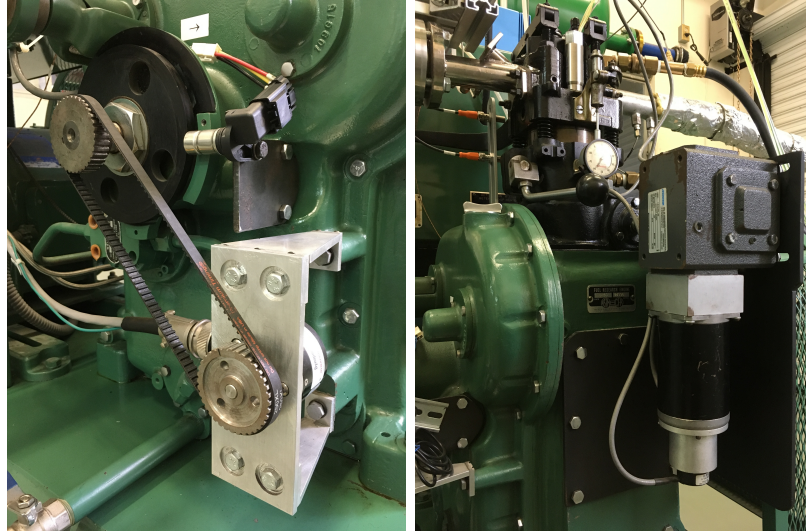
(b) Cigüeñal y contrapesos.

Figura 6.2: Instalación mecánica del Motor CFR.

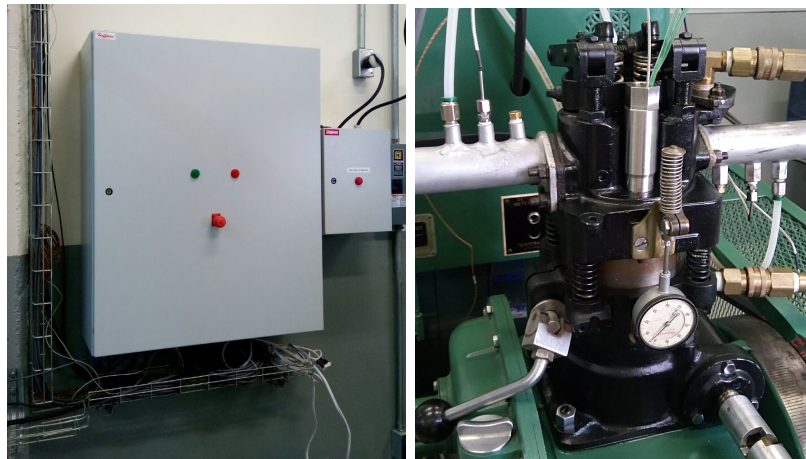
- Se llevó a cabo de forma satisfactoria la puesta en marcha de los sistemas auxiliares del motor que permiten el correcto funcionamiento de éste.
- Los remansos de admisión y de escape se instalaron suspendidos de dos vigas estructurales de la sala. Estas vigas se aprovecharon para instalar una estructura de perfiles de aluminio de la que cuelgan tensores que soportan los conductos de admisión y de escape.
- Se preparó un sistema de canaletas suspendidas de la estructura de aluminio nombrada en el punto anterior, para la organización y traslado de los cables de los sensores del motor al armario del sistema de adquisición de datos.
- Los puntos nombrados anteriormente describen las estructuras aéreas que permiten que tanto elementos pesados como son los conductos de admisión y escape, como otros elementos ligeros, queden en un nivel superior, dejando así libre el espacio de trabajo y de paso de personas a la instalación.

- Como parte de la estructura que sustenta el conducto de admisión. Se fabricó una columna que además, soporta el depósito de combustible a presión.
- Se fabricaron mangueras flexibles para la unión de los conductos de admisión y escape con la culata del motor. Éste al variar la relación de compresión con el desplazamiento de la culata necesita una adaptación flexible que permita el movimiento.
- Se calibró la válvula de aceite para mantener la presión de la bomba en el rango dado por el manual del fabricante y se dispusieron los sistemas de medida tanto analógicos como digitales para el monitoreo de esa variable.
- Un baño térmico fue instalado para atemperar la culata del motor antes del arranque y durante el funcionamiento del mismo en arrastre.
- Se comprobó el correcto funcionamiento del motor eléctrico asíncrono encargado de mantener el régimen de giro constante a 900 rpm. Para gobernar el motor se hizo uso de un arrancador trifásico que contiene los pulsadores de START/STOP.
- Para calentar los gases de admisión se colocaron dos resistencias en el tubo de admisión.
- Se instaló de forma satisfactoria el sistema de inyección de combustible con presurización por helio.
- Se diseñó y fabricó convenientemente el portainyector y el conjunto del inyector-common-rail, así como el depósito a presión de combustible. Se instalaron las líneas de gas y de combustible de alta presión teniendo en cuenta las especificaciones de seguridad.

### 6.1.3 RESULTADOS EN LA IMPLEMENTACIÓN DE LOS SISTEMAS DE MEDIDA Y DE CONTROL



(a) Instalación del encoder incremental. (b) Servomotor y transmisión.



(c) Cuadros eléctricos de control. (d) Adaptación del sensor de presión en cámara.

Figura 6.3: Instalación de los sistemas de medida y control.

- Se instalaron termopares tipo K para la medida de temperaturas y se conectaron al sistema general de adquisición de datos. Cada uno de los sensores de temperatura fue probado y calibrado antes de su instalación.
- Se instalaron sensores de presión piezoresistivos para el control de las presiones de admisión, escape y aceite. Conectando neumáticamente las tomas de los transductores a los puntos de medida mediante mangueras y realizando las conexiones eléctricas oportunas entre la fuente de alimentación, los sensores y el sistema de adquisición de datos.
- Para una mejor colocación de los sensores de presión en el laboratorio, se diseñó y fabricó un distribuidor de presiones que permite además monitorear la temperatura de funcionamiento de los mismos (ver Apéndice A: Diseño Mecánico).
- Se realizó el diseño mecánico del soporte y los engranajes encargados de soportar y transmitir el giro del motor al encoder incremental (ver Apéndice A: Diseño Mecánico).
- El encoder incremental fue instalado de forma indirecta en el eje del cigüeñal y conectado al sistema de adquisición de datos.
- Además, se instaló un sensor de uno por vuelta como referencia física del giro del motor. Este sensor tuvo que ser adaptado y para su colocación se diseñó un soporte (ver Apéndice A: Diseño Mecánico).
- El sensor de presión piezoeléctrico se instaló en la culata del motor para medir la presión en la cámara de combustión. Para ello, tuvo que fabricarse un casquillo de protección que adaptara el sensor a la entrada disponible en la cabeza del motor. Además se diseñó y fabricó una herramienta para instalar el sensor en el casquillo (ver Apéndice A: Diseño Mecánico).

Se realizaron las debidas conexiones entre el transductor piezoeléctrico, el amplificador de señal y el sistema de adquisición de datos (ver Apéndice B: Esquemas Eléctricos de la Instalación).

- Para la instalación del servomotor que controla la relación de compresión, se instaló un soporte acoplado al motor de combustión. Además, fue necesario diseñar una brida y un cople para conectar el servomotor a una transmisión reductora para aumentar el par de éste y así, poder mover la flecha del sistema de engranajes que desplaza la culata del Motor CFR (ver anexo diseño mecánico).
- El servomotor se controla mediante un drive incluido en el armario de control. Este drive, lleva conectados dos sensores inductivos de final de carrera que marcan los límites del movimiento de la culata como medida de seguridad. Para instalarlos, fue necesario diseñar un soporte (ver Apéndice A: Diseño Mecánico).
- Las resistencias de calentamiento del gas de admisión están conectadas eléctricamente mediante cable de uso rudo a una etapa de potencia con un dispositivo SCR, con el cual, es posible controlar la potencia que se le entrega a las resistencias. La etapa de potencia se encuentra en un armario eléctrico independiente del armario del sistema de control.
- El inyector instalado en el motor, es conectado a una etapa de potencia que fue diseñada y fabricada ex profeso. Esta etapa de potencia es capaz de recibir el pulso de inyección enviado por el sistema de control y conmutar la potencia necesaria para la activación de la bobina del inyector de forma instantánea (con ns de diferencia).
- Todas las conexiones eléctricas se recogen en un armario general de control donde están incluidos los sistemas de medida, control y seguridad.

Todo lo anteriormente explicado fue probado y validado convenientemente, asegurando que la solución propuesta es adecuada para cada caso.

### 6.1.4 RESULTADOS Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL CÓDIGO DE CONTROL PARA MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA ALTERNATIVOS.

#### 6.1.4.1 RESULTADOS EN LA MEDIDA DE PRESIÓN EN CÁMARA DEL MOTOR EN ARRASTRE.

Es posible medir la presión en cámara con el motor en arrastre a una frecuencia de  $54\text{ kHz}$  ( $3600\text{ pulsos/vuelta}$ ).

En las siguientes figuras, se muestran las evoluciones temporales de la presión en cámara del motor, al variar la relación de compresión desde 4.46 hasta 16 para diferentes temperaturas  $27, 60, 70, 80$  y  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

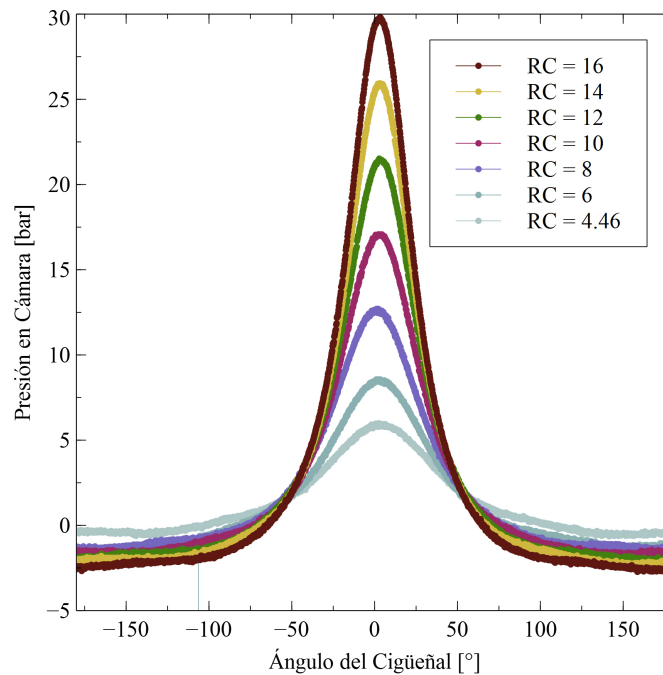
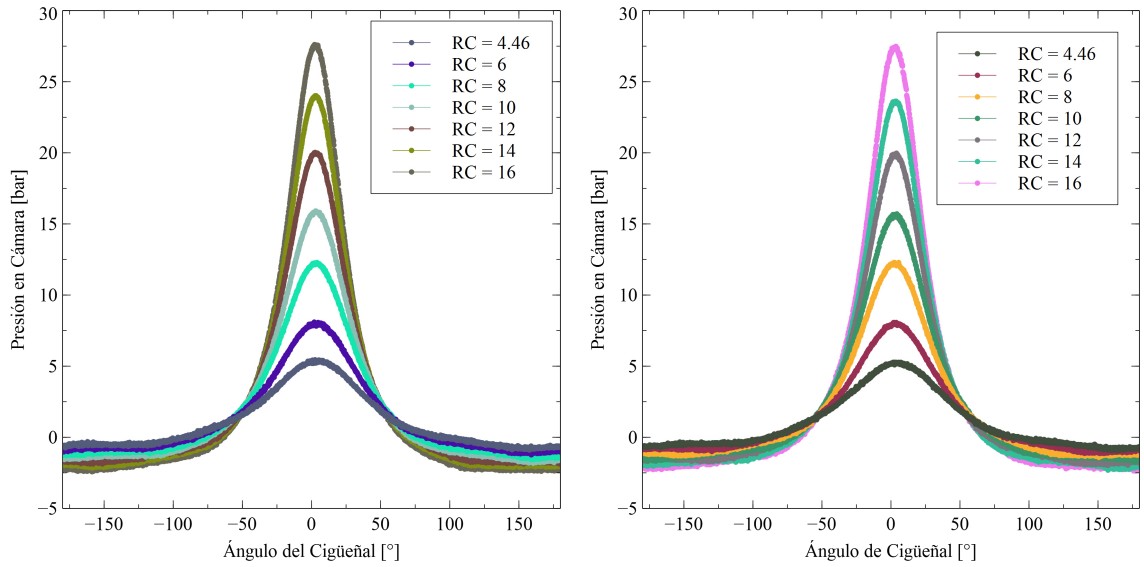
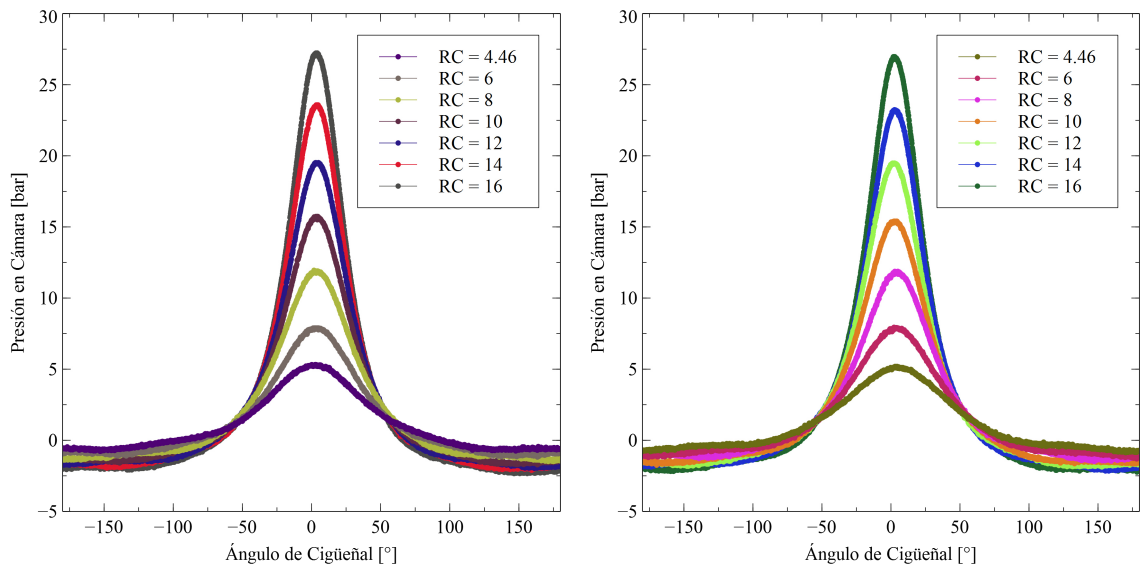


Figura 6.4: Evolución temporal de la presión en cámara del motor para una temperatura de entrada igual a  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$  y diferentes relaciones de compresión.



(a) Temperatura del flujo de trabajo igual a 60 °C. (b) Temperatura del flujo de trabajo igual a 70 °C.



(c) Temperatura del flujo de trabajo igual a 80 °C. (d) Temperatura del flujo de trabajo igual a 90 °C.

Figura 6.5: Evolución temporal de la presión en cámara del motor para diferentes temperaturas de entrada y diferentes relaciones de compresión.

Tabla 6.1: Presiones máximas en la cámara de combustión medidas para una relación de compresión constante de 16.

<b>Presión Máxima en la Cámara de Combustión para distintas temperaturas de entrada</b>	
Temperatura del flujo de trabajo [°C]	Presión Máxima [bar]
27	29.7974
60	27.6123
70	27.4829
80	27.2266
90	26.9702

De los datos obtenidos en las figuras anteriores y en la Tabla 6.1, se deducen dos resultados esperados. La presión máxima en el interior del cilindro disminuye con el aumento de la temperatura del fluido de trabajo debido a la disminución de la densidad del aire. Este resultado es consistente con la bibliografía consultada [50, 22, 33]. Y la presión en el cilindro aumenta conforme se incrementa la relación de compresión, debido a la disminución del espacio disponible en el cilindro.

#### 6.1.4.2 RESULTADOS EN LA MEDIDA DE PRESIÓN EN CÁMARA DEL MOTOR CON COMBUSTIÓN.

##### **Diseño de experimentos**

Para realizar los ensayos de validación de la instalación experimental, se diseñó una matriz de experimentos con 12 ensayos en total. Con el siguiente arreglo de variables.

- Tiempo de energización del inyector: constante, según dosado.
- Frecuencia de inyección: constante e igual a 1 (se inyecta en todos los ciclos).
- Número de inyecciones por ciclo: constante e igual a 3.
- Atraso de la inyección: constante e igual a 10 ° DPMS.
- Adelanto de la ignición: constante, según el manual del motor.
- Dosado A/F: constante e igual a 22.
- Relación de compresión: variable, 4.46, 6, 8.
- Temperatura: variable, 27, 60, 70, 80 °C.

El adelanto de la chispa tuvo que ser ajustado, ya que en el manual del motor no se proporciona este dato para todas las relaciones de compresión. En cuanto al atraso de la inyección, se determinaron 10 °, que corresponden con el momento de la apertura de la válvula de admisión. De esta forma, al realizarse inyecciones múltiples (3), la última se hace en el ángulo indicado.

En la siguiente Tabla 6.2 se muestra la matriz de experimentos diseñada.

Tabla 6.2: Matriz de experimentos para los ensayos de validación.

Ensayo	Relación de Compresión			Temperatura [°C]			
	4.46	6	8	27	60	70	80
1	X			X			
2	X				X		
3	X					X	
4	X						X
5		X		X			
6		X			X		
7		X				X	
8		X					X
9			X	X			
10			X		X		
11			X			X	
12			X				X

## Resultados

A continuación, se muestran los resultados obtenidos durante la experimentación con gasolina en el Motor CFR. Esta información, representada en las Figuras 6.6, 6.7 y 6.8, sirven como validación experimental de la instalación y como validación del sistema de control y del código desarrollado durante este trabajo de investigación. En las mismas, se muestran los pulsos de energización del inyector (verde), el disparo de la chispa (negro), curva del motor en arrastre (azul) y curva del motor con combustión (rojo).

Las curvas del motor representadas, son el promedio de 20 ciclos del mismo operando bajo las mismas condiciones en cada ensayo. Esto debido, a que una ca-

racterística de los MEP es la dispersión cíclica, cuyas causas y efectos se explicarán en este apartado [33].

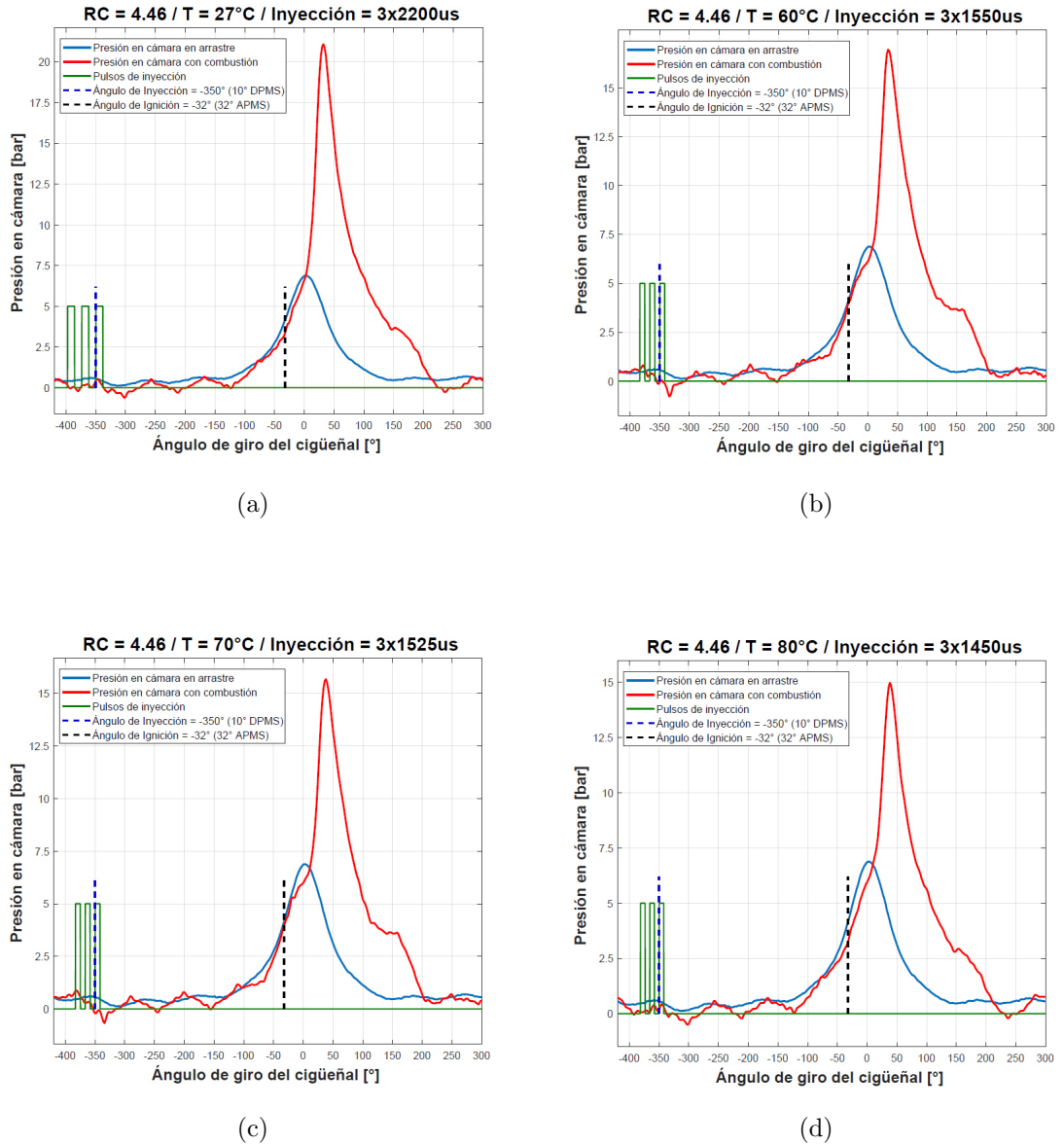


Figura 6.6: Comportamiento de la presión en cámara en función del ángulo de giro del cigüeñal para una  $RC = 4.46$  en condiciones de arrastre y combustión. Temperatura del flujo: (a) 27 °C (b) 60 °C (c) 70 °C (d) 80 °C.

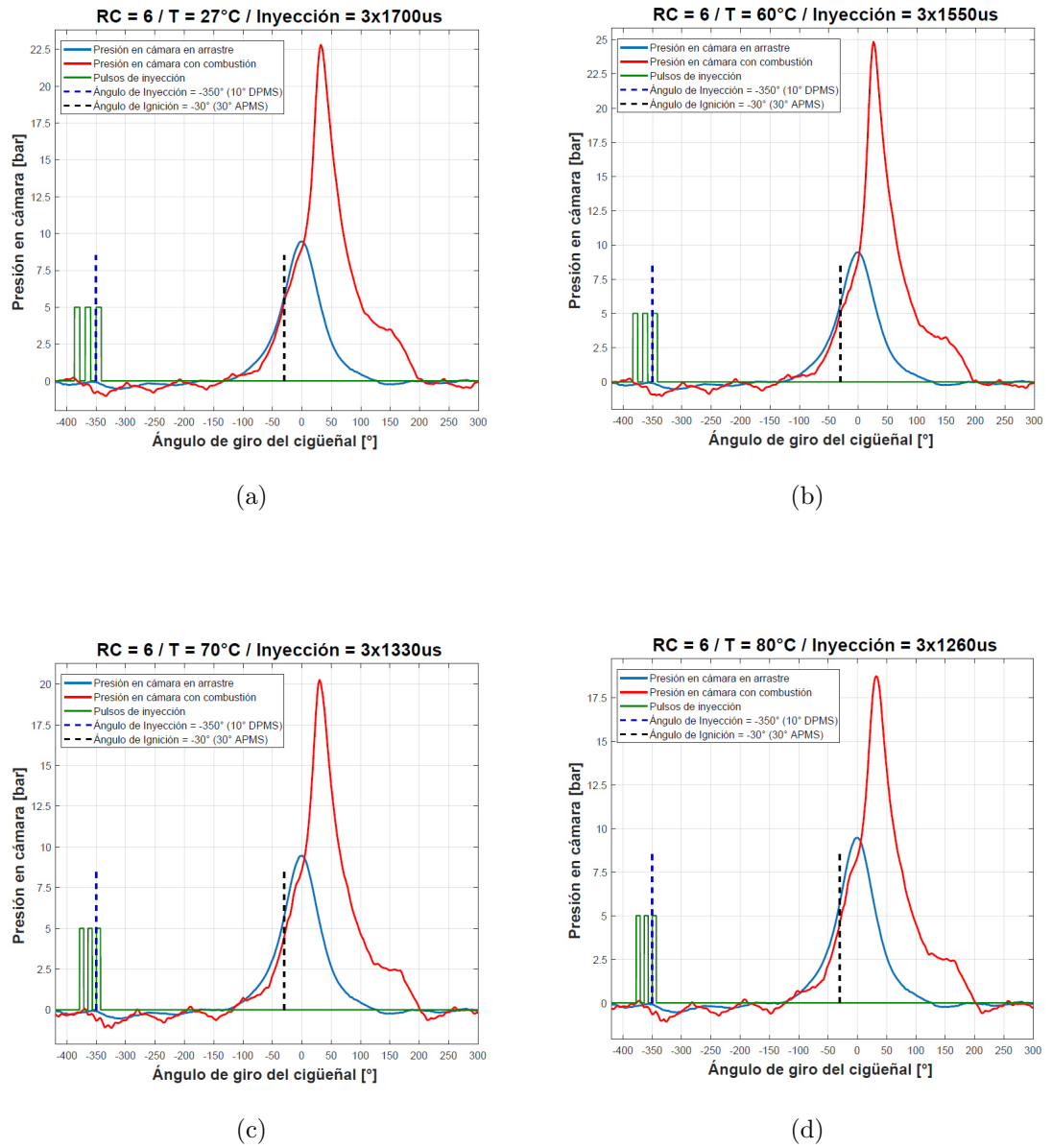


Figura 6.7: Comportamiento de la presión en cámara en función del ángulo de giro del cigüeñal para una  $RC = 6$  en condiciones de arrastre y combustión. Temperatura del flujo: (a) 27 °C (b) 60 °C (c) 70 °C (d) 80 °C.

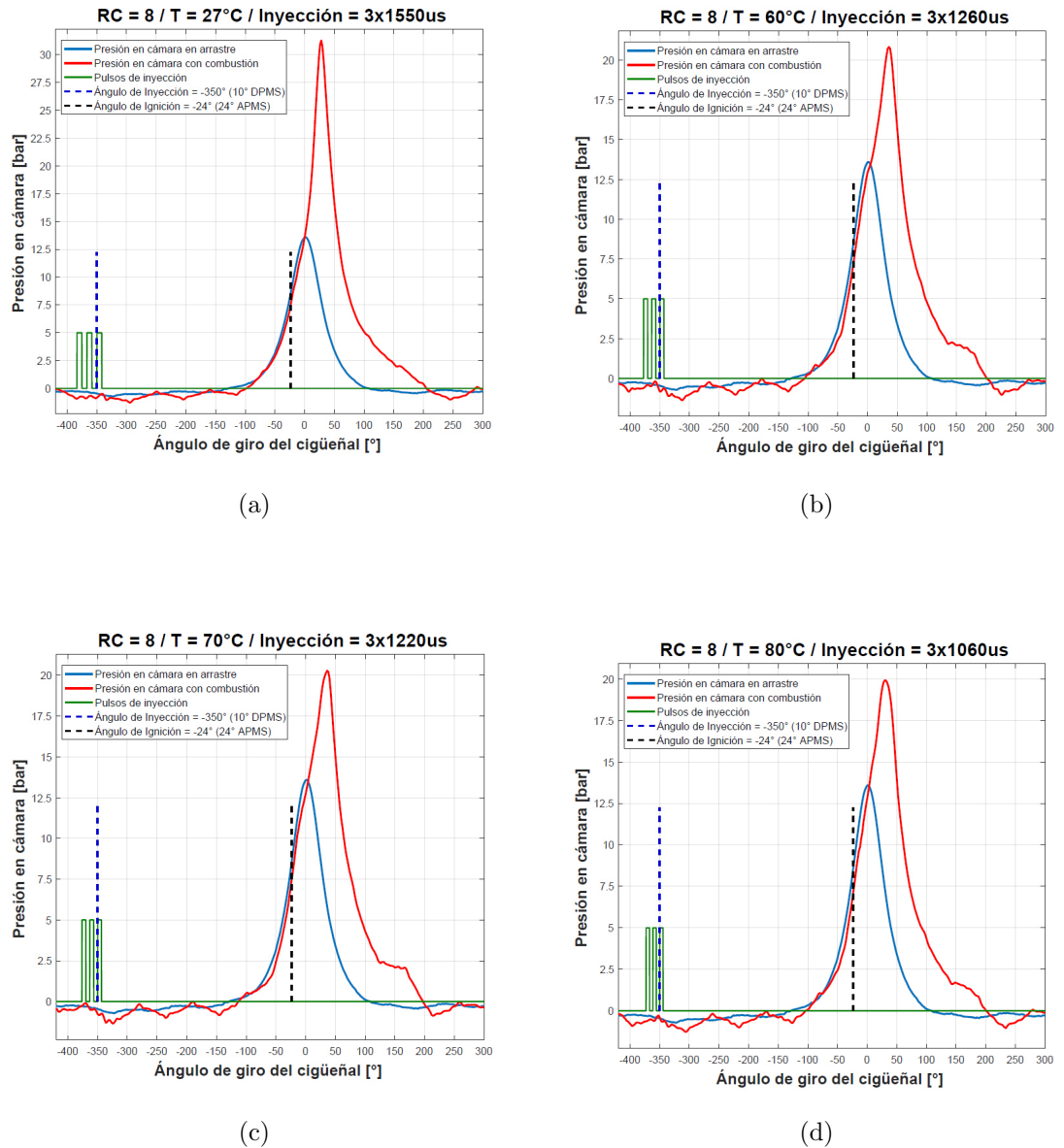


Figura 6.8: Comportamiento de la presión en cámara en función del ángulo de giro del cigüeñal para una  $RC = 8$  en condiciones de arrastre y combustión. Temperatura del flujo: (a) 27 °C (b) 60 °C (c) 70 °C (d) 80 °C.

Las gráficas mostradas en las figuras anteriores son consistentes con la bibliografía consultada para este trabajo de investigación [9] [33]. En ellas se puede observar la correcta sincronización de los pulsos de inyección e ignición, así como la correcta adquisición de la señal de presión en cámara.

Las gráficas anteriores se pueden agrupar según la relación de compresión, para ver el efecto de la temperatura en el proceso de combustión a través del comportamiento de la señal de presión en el cilindro. A continuación, en las Figuras 6.9, 6.10 y 6.11 se muestran tres gráficas comparativas donde se representa el comportamiento de la presión en cámara en función del ángulo de giro del cigüeñal a diferentes temperaturas para una misma relación de compresión y una curva en arrastre como referencia de la presión en el cilindro sin combustión.

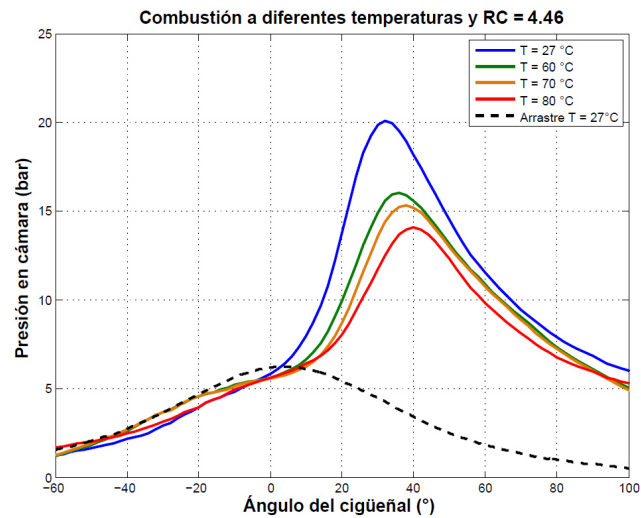


Figura 6.9: Comportamiento de la presión en cámara en función del ángulo de giro del cigüeñal a diferentes temperaturas para una  $RC = 4.46$ .

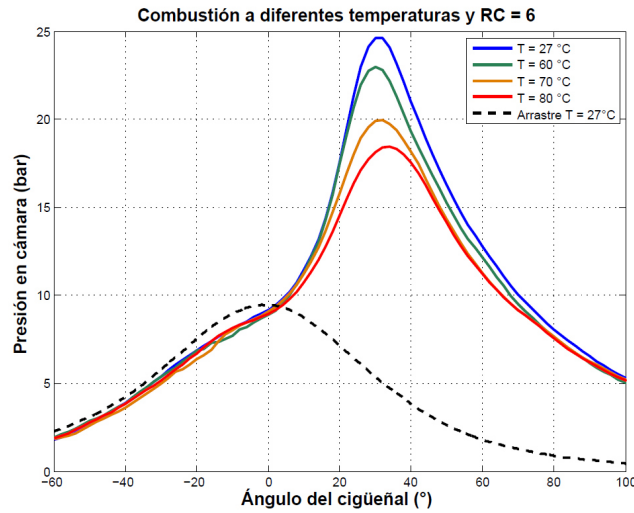


Figura 6.10: Comportamiento de la presión en cámara en función del ángulo de giro del cigüeñal a diferentes temperaturas para una RC = 6.

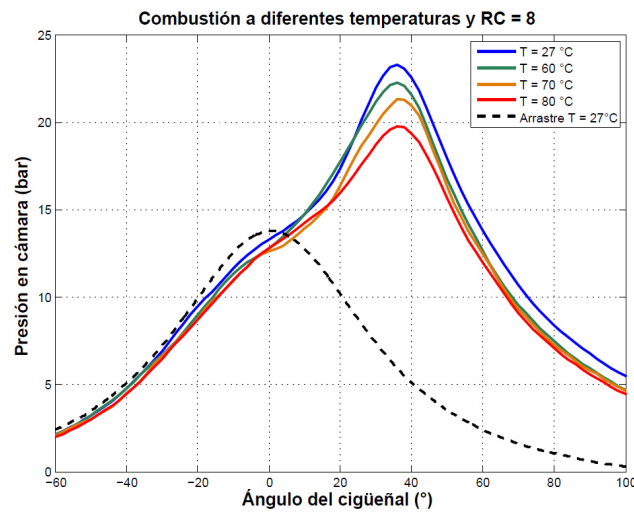


Figura 6.11: Comportamiento de la presión en cámara en función del ángulo de giro del cigüeñal a diferentes temperaturas para una RC = 8.

Las curvas representadas en las Figuras 6.9, 6.10 y 6.11, son consistentes con la literatura revisada para este trabajo de investigación [33, 22]. En ellas, se puede com-

probar cómo ante un aumento de la temperatura el pico de presión de la combustión disminuye debido a la disminución de masa de aire disponible en el cilindro.

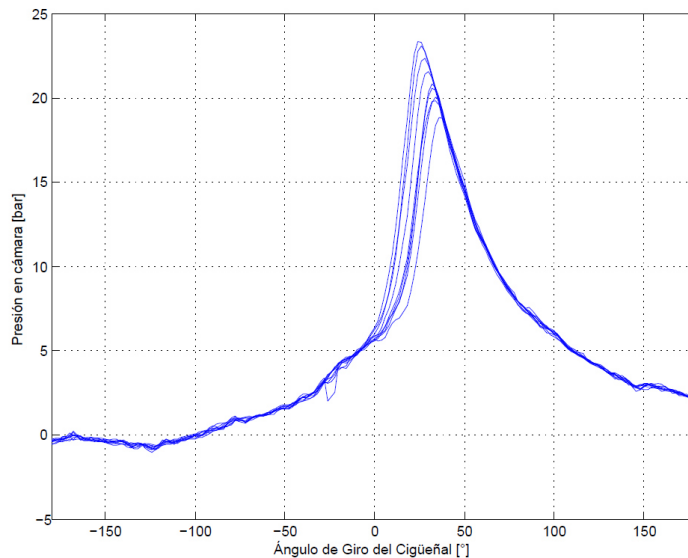


Figura 6.12: Dispersión cíclica para una  $RC = 4.46$  y temperatura ambiente del flujo de trabajo.

Como se comentó en este apartado, fue posible obtener las curvas de la dispersión cíclica (figura 6.12). Según la literatura revisada, es un efecto provocado por la baja velocidad de combustión laminar, que se ve afectado de forma directa en motores que trabajan con dosado pobre [33], como es el caso de esta investigación. Esta característica de los MEP, tiene tres efectos negativos que conviene tener en cuenta para los estudios futuros: provoca irregularidades en el régimen de giro, en el par motor y en las emisiones contaminantes.

Además de los resultados ya mostrados, durante la caracterización y ajuste del adelanto de la ignición, se encontraron condiciones de operación desfavorables para el motor. Una de ellas, fue la autoignición para las relaciones de compresión mayores (a partir de 10), provocando picos de presión en el cilindro de gran magnitud y un golpeteo en el motor audible por el investigador. Como ya se comentó en el apartado de antecedentes, esto es debido a que hay un aumento de la temperatura y de la

presión de la mezcla antes del tiempo correcto que desencadena en una combustión severa.

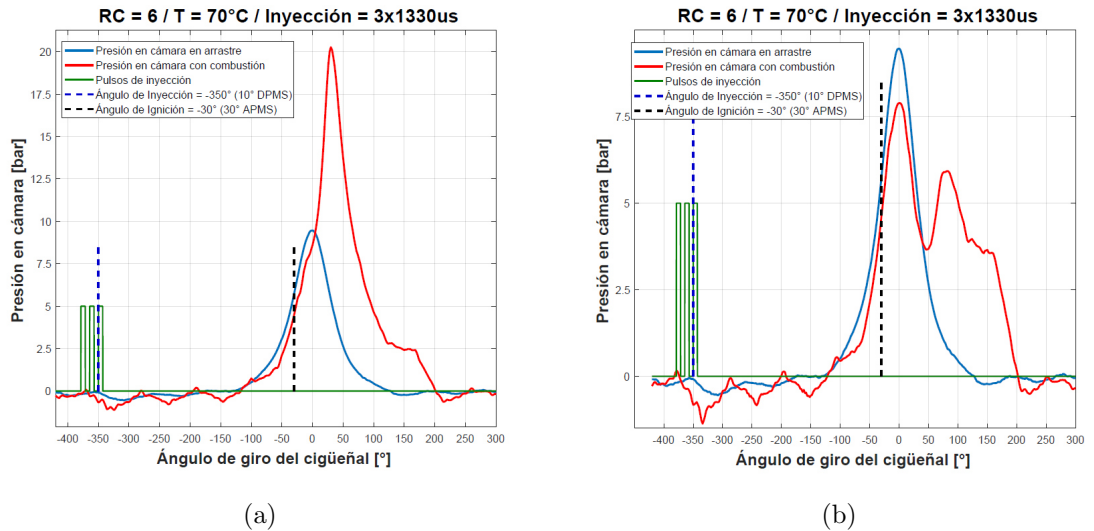


Figura 6.13: Comportamiento de la presión en cámara en función del ángulo de giro del cigüeñal para una  $RC = 6$  y temperatura igual a  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Adelanto de la ignición (a)  $30^{\circ}$  APMS, (b)  $3^{\circ}$  APMS.

Otra de las condiciones desfavorables para la operación del motor es el atraso excesivo de la chispa (figura 6.13), lo que provoca combustiones retrasadas que pueden ocurrir en el sistema de escape.

De los datos obtenidos durante los ensayos es posible extraer otros resultados que se alejan de los objetivos de este trabajo y quedan como propuesta para realizarse en el futuro. En el Capítulo 7: Conclusiones globales, se describen los trabajos futuros.

## CAPÍTULO 7

# CONCLUSIONES GLOBALES

---

## 7.1 CONCLUSIONES



(a) Motor CFR en 2010.



(b) Motor CFR en 2017.

Durante el desarrollo de este trabajo de tesis se ha conseguido, de forma exitosa, la puesta en marcha de una instalación única en México, para el estudio de la combustión. Esta instalación tiene equipamiento de última generación y sistemas de control preparados para realizar investigaciones de vanguardia.

Durante la puesta en marcha de la instalación se pusieron en funcionamiento los sistemas auxiliares del motor, y se diseñaron soportes y elementos de sujeción

para los sensores y accesorios de la instalación. La adaptación más interesante, fue el diseño del sistema de inyección, por el cual, se sustituyó el sistema de carburadores original por un sistema de precarga con inyector gasolina.

A parte de los logros en cuanto a infraestructura y equipamiento, la mayor aportación de este trabajo es el desarrollo de un código capaz de controlar la operación de motores de combustión monocilíndricos, que se puede utilizar en otras instalaciones similares.

El código no sólo registra las variables de funcionamiento y termodinámicas del motor, si no que puede controlar diferentes procesos de los sistemas auxiliares tales como, el calentamiento del flujo de trabajo o la variación de la relación de compresión e incluso, modificar los parámetros de inyección de combustible dejando al investigador total libertad para realizar ensayos con combustibles fósiles, biocombustibles y mezclas de ambos.

Todos los sistemas de medida y de control fueron calibrados por los fabricantes y validados experimentalmente, asegurando que, aunque es imposible no cometer errores de medida en un ensayo experimental, se conoce la magnitud del error cometido.

Los ensayos realizados con combustión descritos en el Capítulo 6: Resultados, sirvieron como validación del código desarrollado. De igual forma, estos ensayos sirvieron para la validación experimental de la instalación y de todos los sistemas de medida y de control.

## 7.2 TRABAJOS FUTUROS

Fruto de la experiencia adquirida durante los ensayos con combustión, se proponen los siguientes trabajos.

- Instalación del sistema de enfriamiento.
- Instalación del medidor de flujo de aire.
- Instalación del cuerpo de aceleración.
- Control en lazo cerrado del sistema de variación de la relación de compresión.
- Caracterización hidráulica del inyector con el tasímetro.
- Instalación de la culata con accesos ópticos.
- Estudios de autoignición con biocombustibles.

## APÉNDICE A

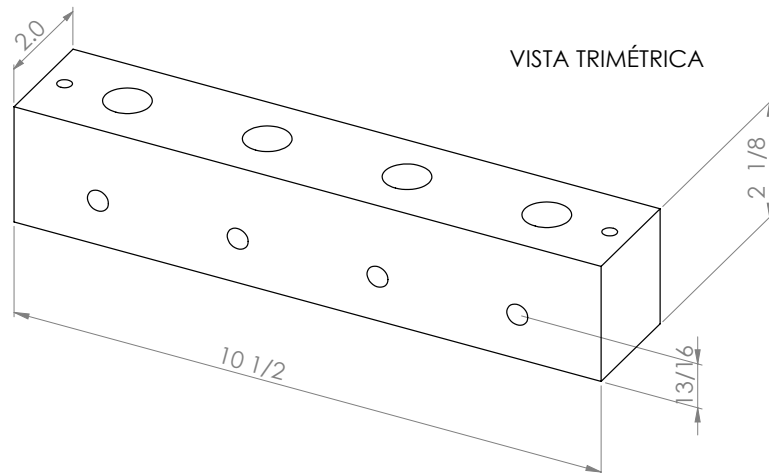
# DISEÑO MECÁNICO

---

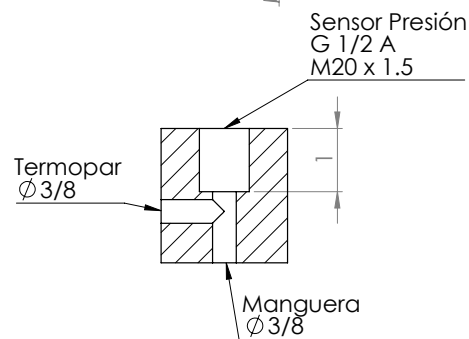
### A.1 DISEÑO DEL DISTRIBUIDOR DE PRESIÓN

El distribuidor de presión hace la función de soporte para los sensores de presión absoluta y para el sensor de presión de aceite. El objetivo es agrupar los sensores para que sean localizados fácilmente.

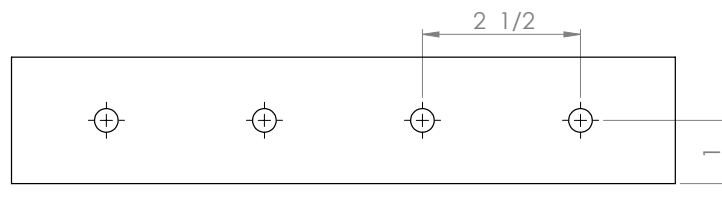
Se diseñó en aluminio, ya que es un material ligero y el soporte queda colgado de las canaletas portacables. Para cada uno de los sensores se mecanizaron tres salidas del distribuidor; la primera, en la parte superior, para conectar el sensor de presión, la segunda, en la cara lateral, para instalar los termopares de seguridad que miden la temperatura de funcionamiento de los sensores, y la última, en la parte inferior donde van colocadas las mangueras que conectan con el punto de medida.




SECCIÓN LATERAL



VISTA INFERIOR



SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE	FIRMA	FECHA			TÍTULO: <b>Esquema Soporte SensoresP</b>	
DIBUJ.					MATERIAL:	
VERIF.					N.º DE DIBUJO	
APROB.					PESO:	ESCALA:1:2
			UANL	FIME	HOJA 1 DE 1	

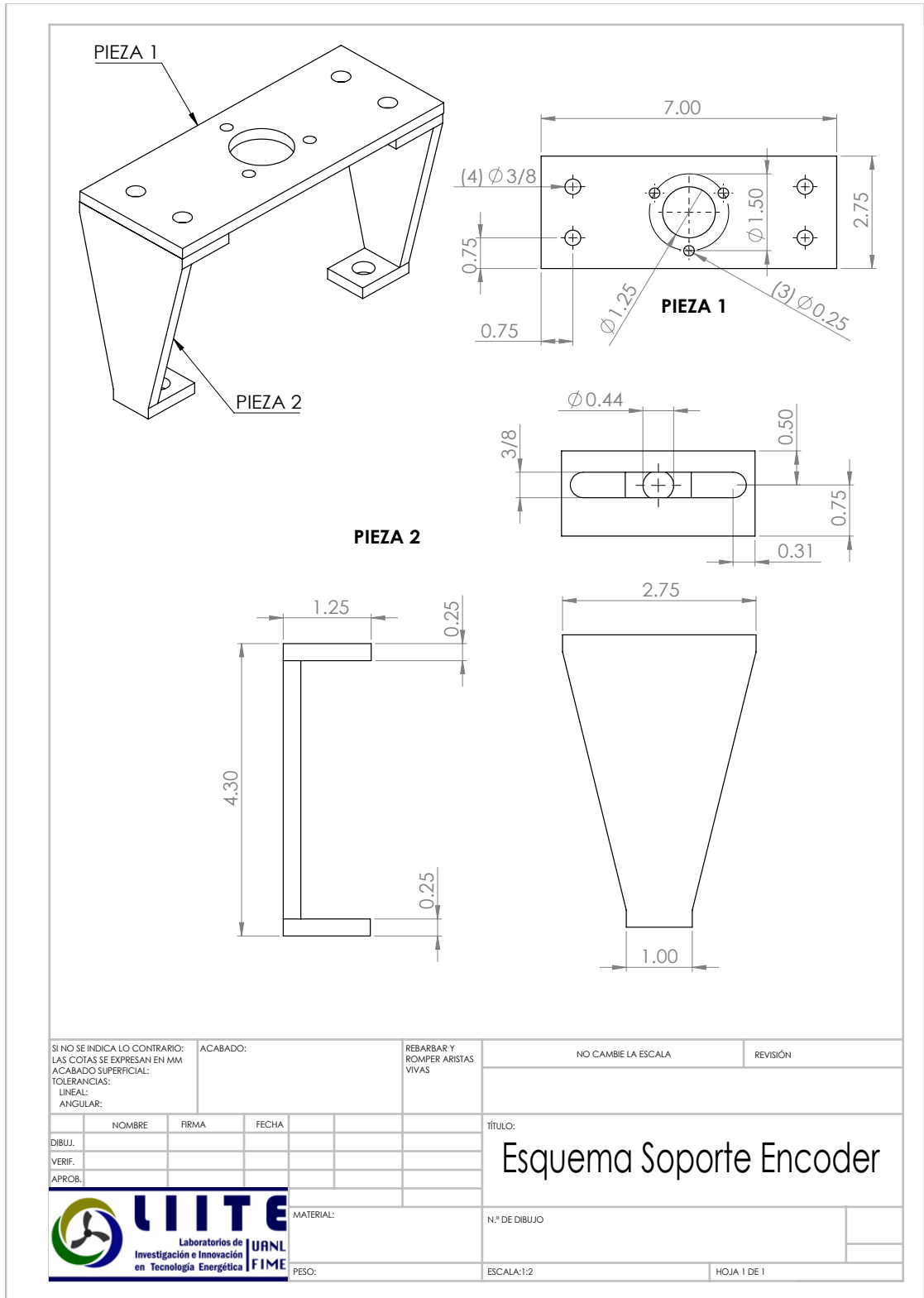
## A.2 DIBUJO DEL SOPORTE DEL ENCODER INCREMENTAL

El encoder incremental debe ir instalado de tal forma que gire junto con la flecha del cigüeñal. La limitante del sensor escogido es que no es posible montarlo de forma directa en el eje del cigüeñal puesto que la vibración y el error en la alineación de los ejes provocaría la ruptura del mismo. Por lo tanto, es necesario transmitir el giro por medio de una correa y dos poleas hasta el encoder (tabla A.1) .

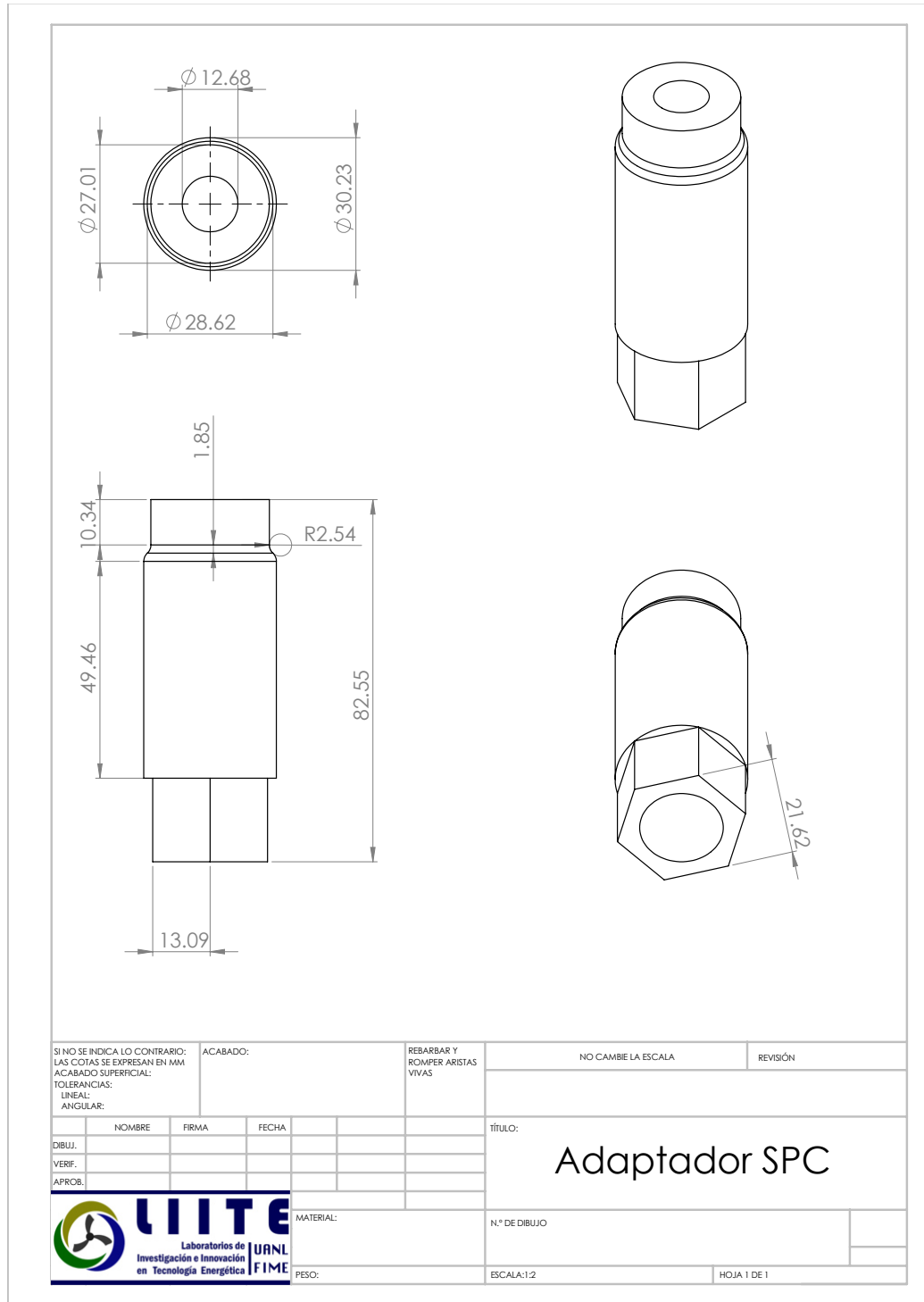
Tabla A.1: Transmisión del giro del cigüeñal

<b>Elemento</b>	<b>Descripción</b>
Polea eje cigüeñal	Martin 36XL037
Polea eje encoder	Martin 36XL037 (modificada)
Correa	Timing 250XL

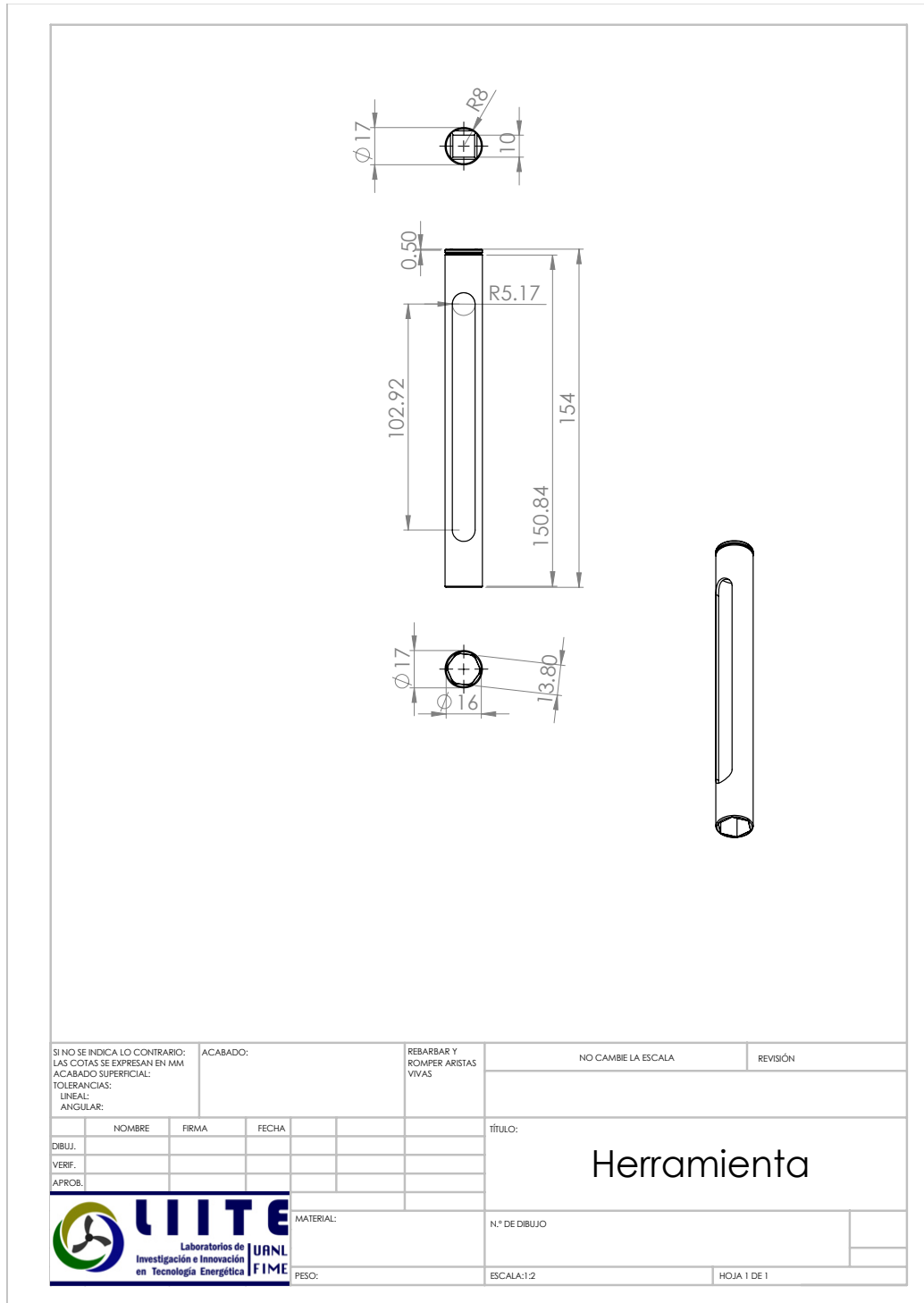
La solución propuesta utiliza dos tornillos de unión del cárter del motor como puntos de sujeción. De esta forma, no se modifica el motor ni se varía su geometría. El soporte está fabricado en aluminio, y no tiene soldadura en ningún punto, las placas se unen con tornillos para evitar la deformación debida al calor.



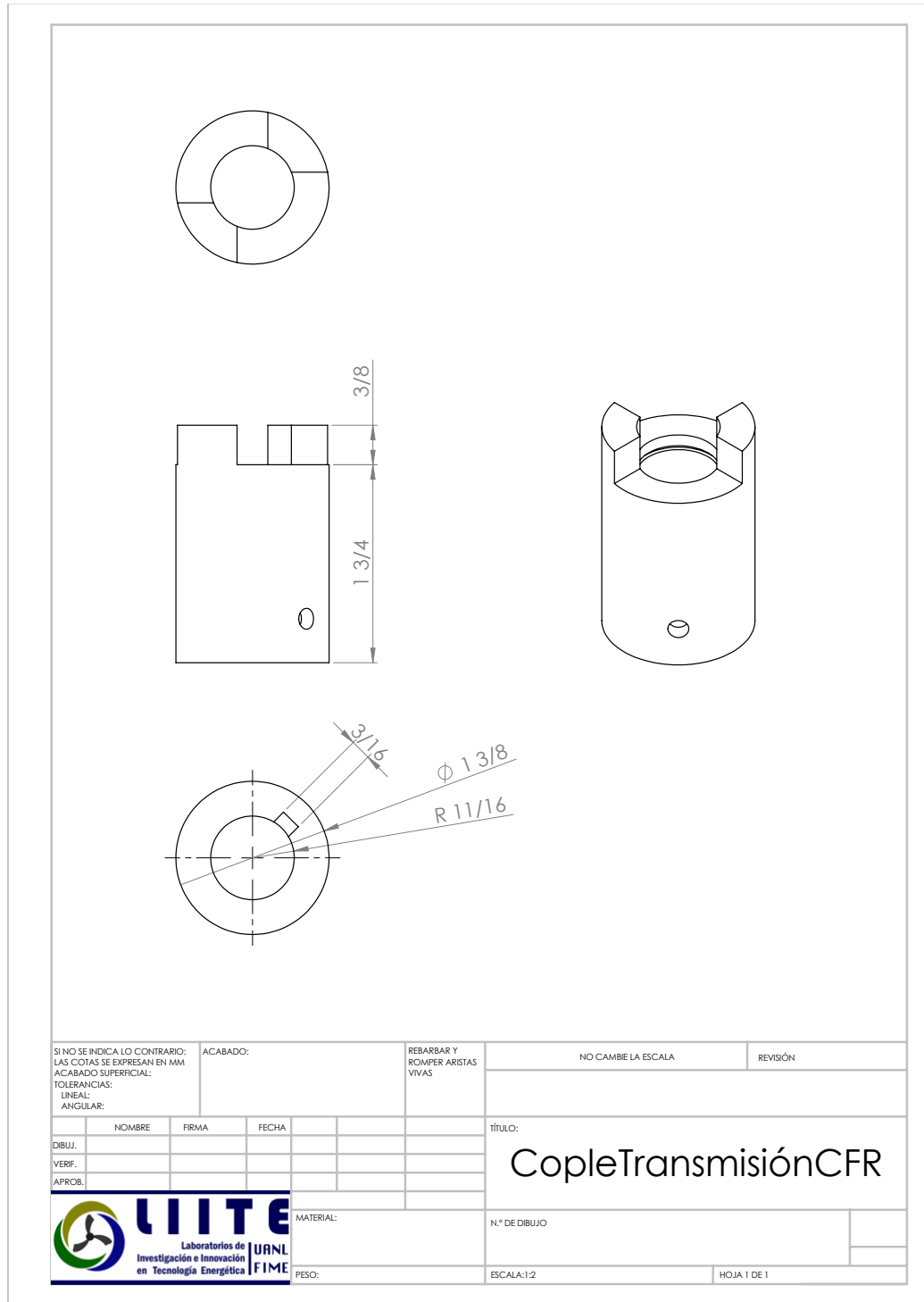
### A.3 ADAPTADOR DEL SENSOR DE MEDIDA DE LA PRESIÓN EN CÁMARA

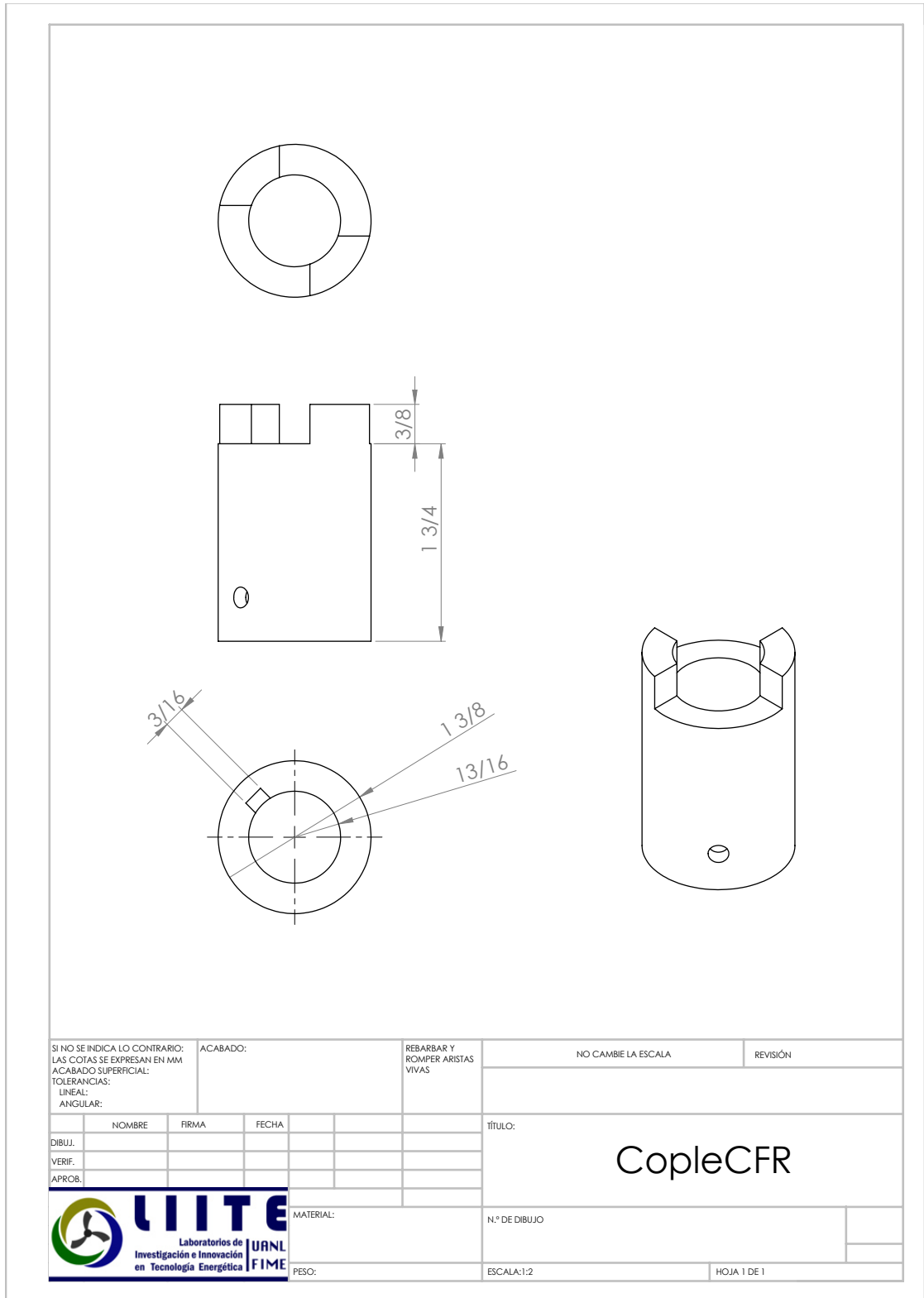


## A.4 HERRAMIENTA PARA RETIRAR EL SENSOR DE PRESIÓN EN CÁMARA

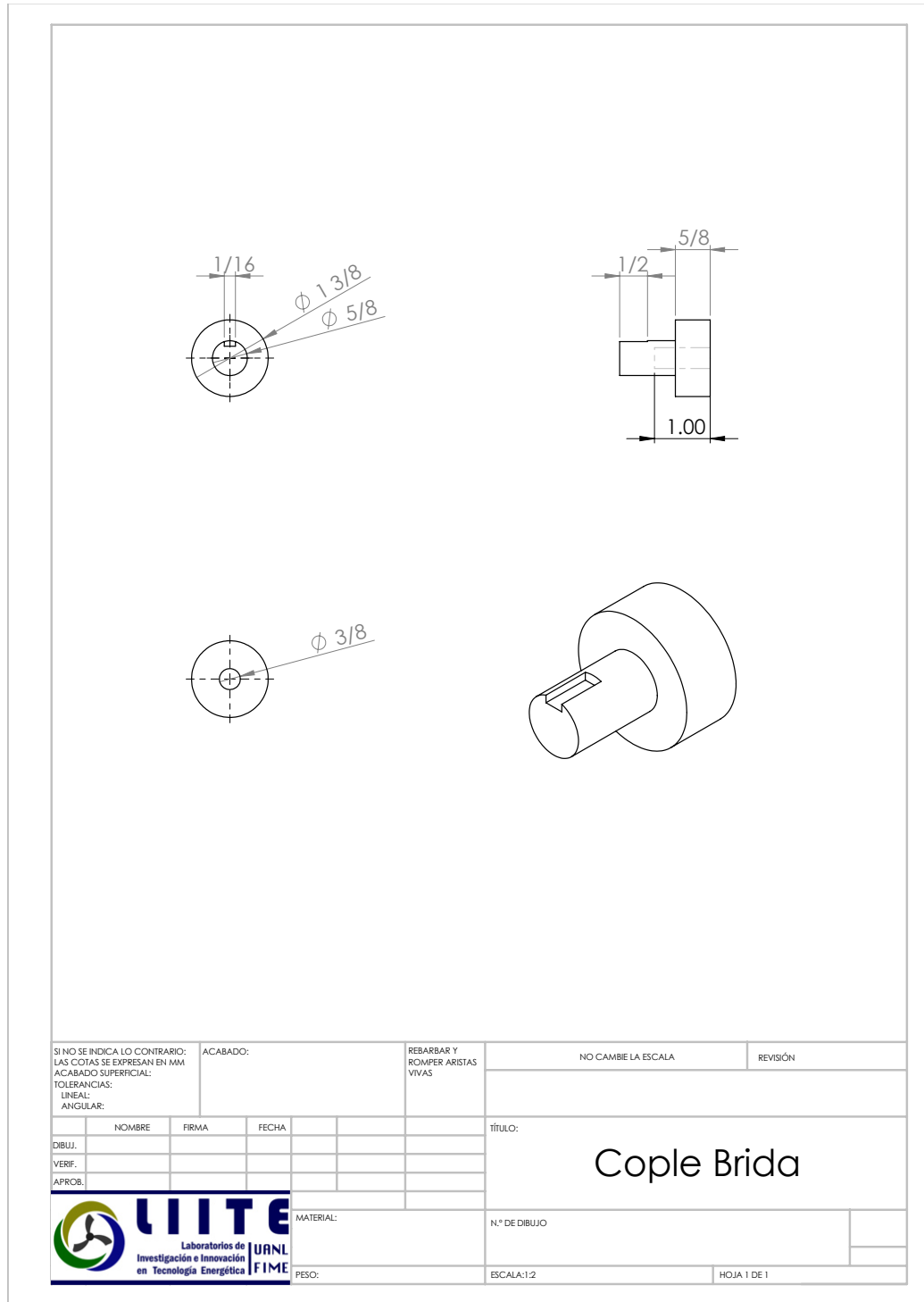


## A.5 COPLE TIPO MORDAZA PARA UNIR LA FLECHA DE LA RELACIÓN DE COMPRESIÓN A LA TRANSMISIÓN

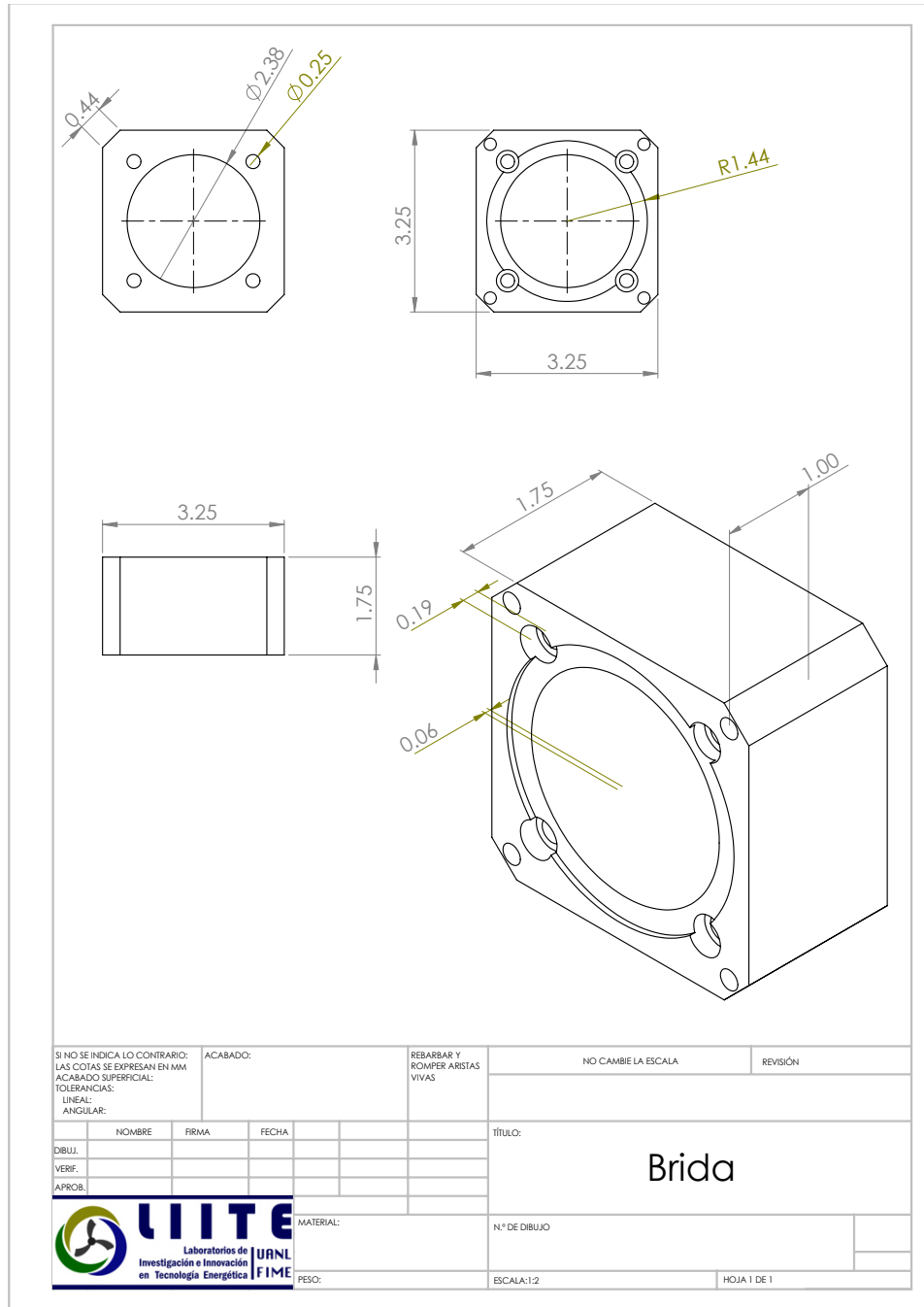




## A.6 COPLE DIRECTO PARA TRANSMITIR EL GIRO DEL SERVOMOTOR A LA TRANSMISIÓN

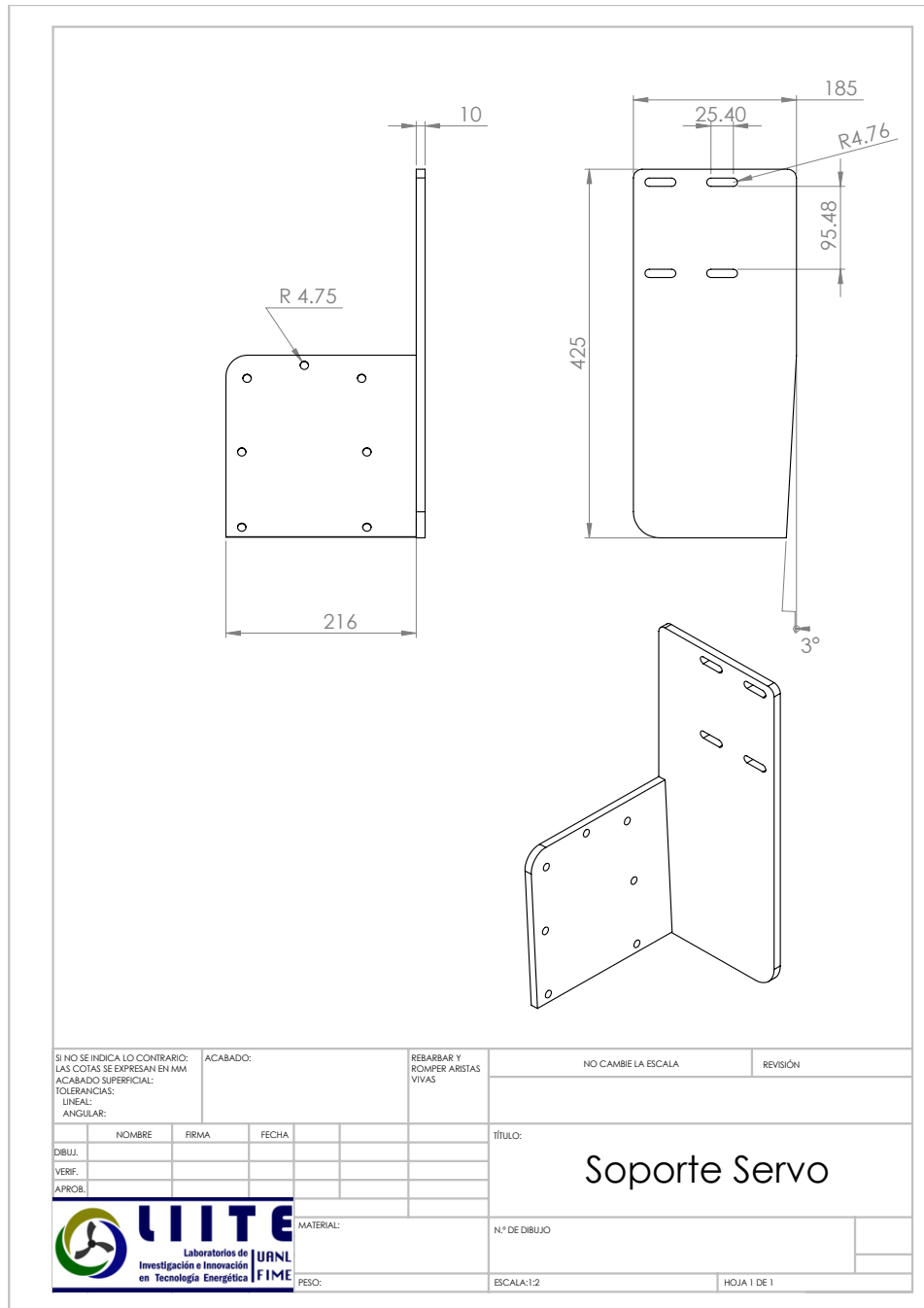


## A.7 BRIDA DE UNIÓN ENTRE EL SERVOMOTOR Y LA TRANSMISIÓN

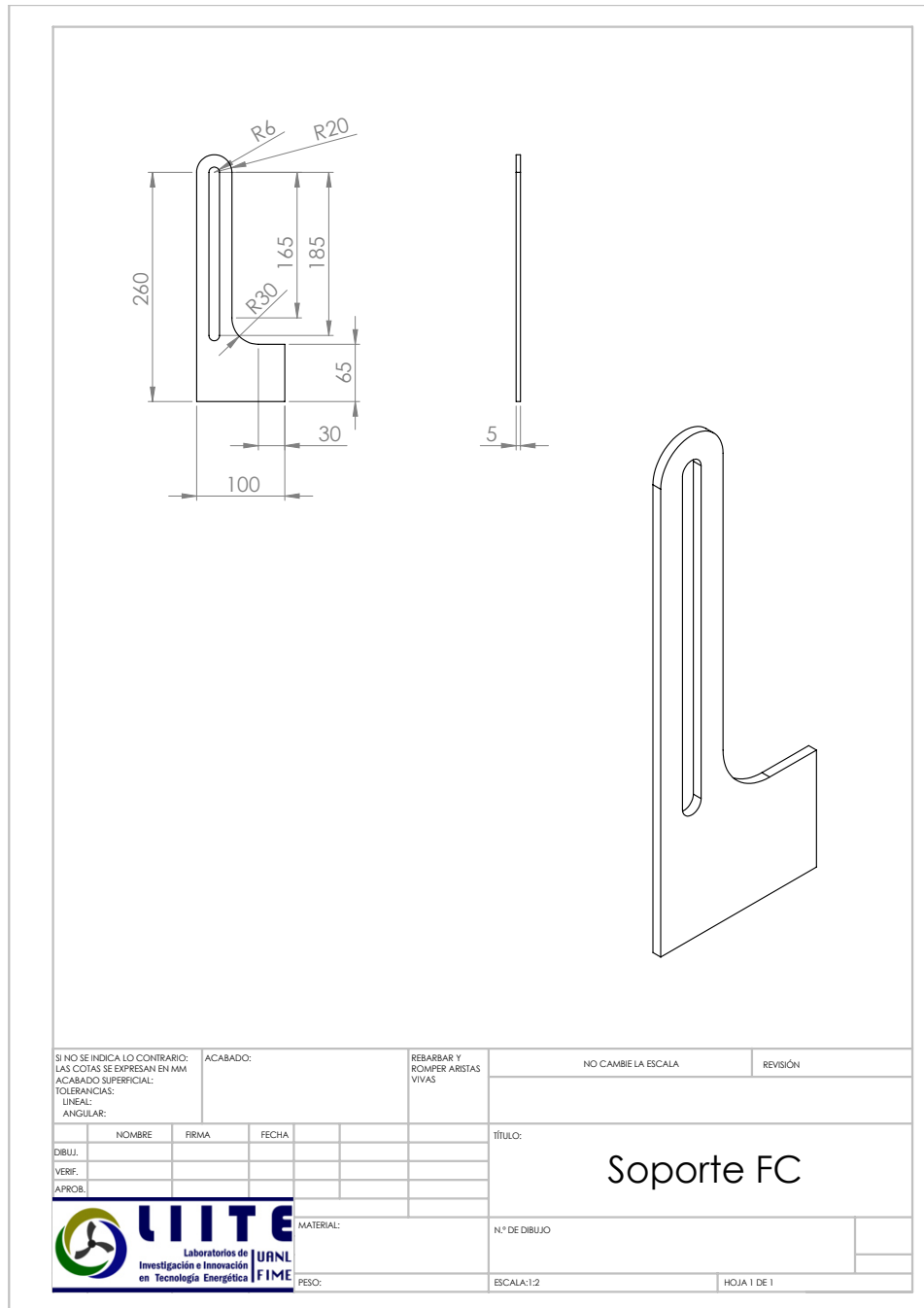


## A.8 SOPORTE DEL BLOQUE

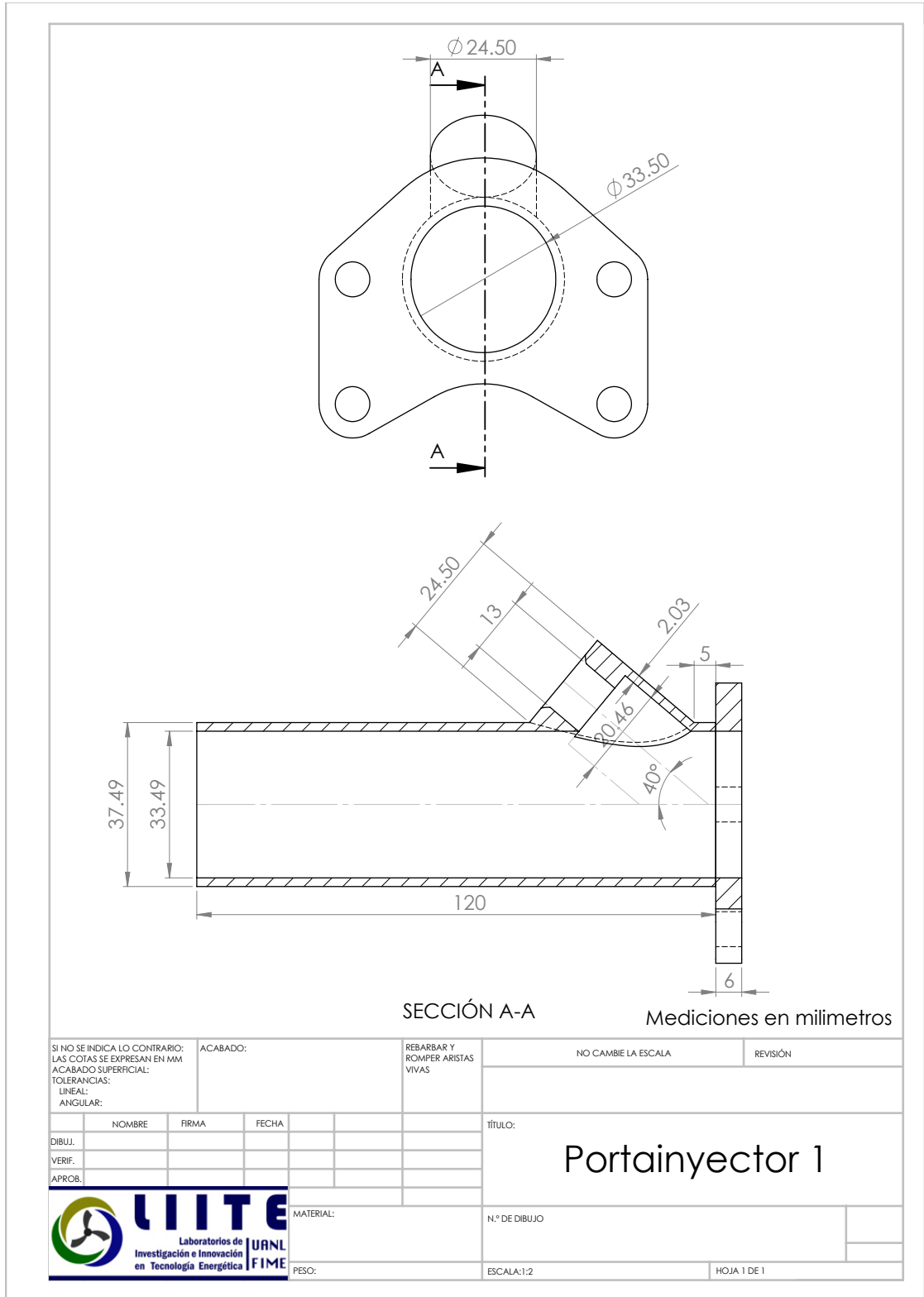
### TRANSMISIÓN-SERVOMOTOR DEL SISTEMA DE VARIACIÓN DE LA RELACIÓN DE COMPRESIÓN

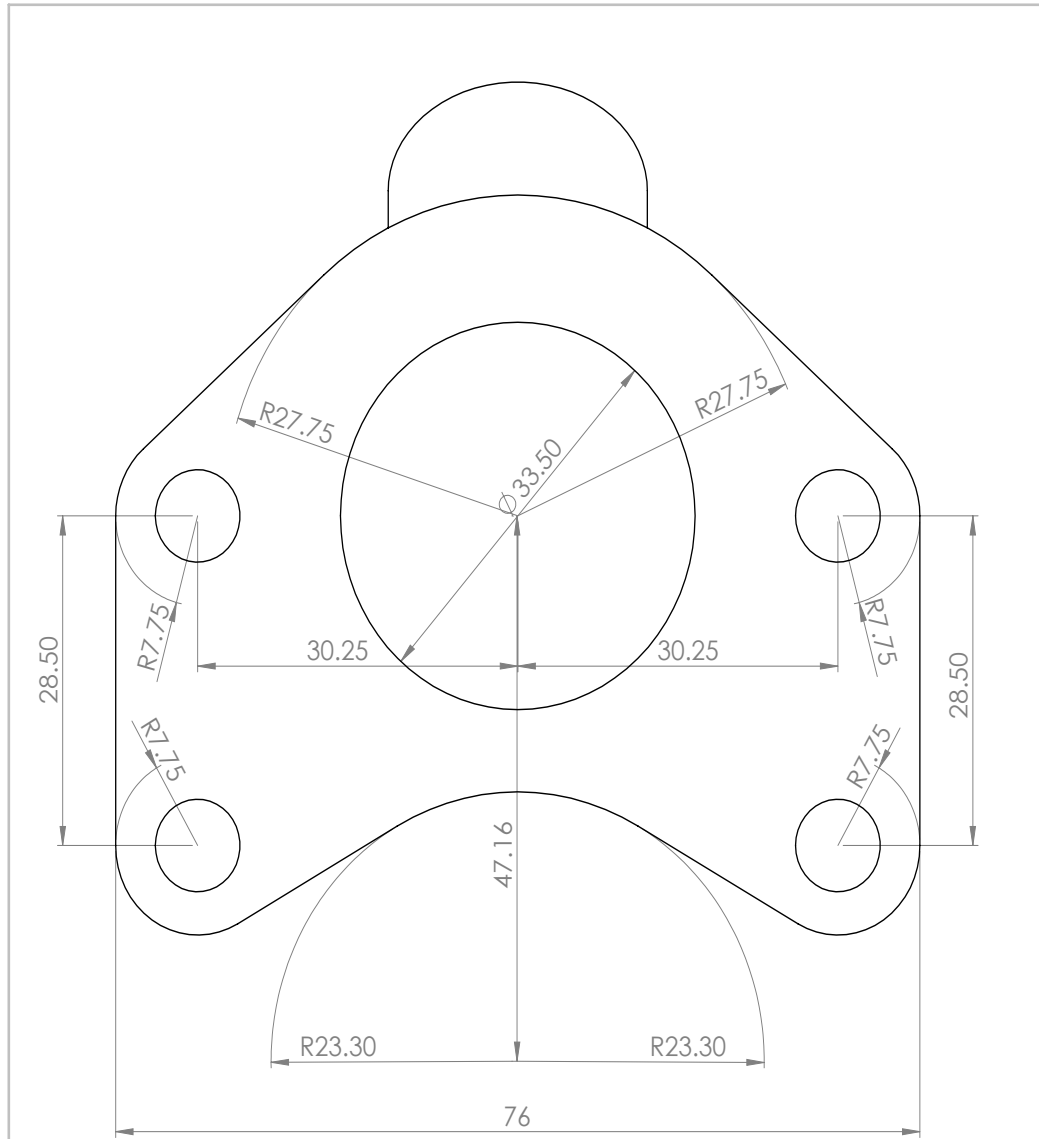


## A.9 SOPORTE DE LOS SENSORES DE FINAL DE CARRERA DEL SISTEMA DE VARIACIÓN DE LA RELACIÓN DE COMPRESIÓN




# A.10 PORTAINYECTOR Y PRECÁMARA DE INYECCIÓN





Mediciones en milímetros

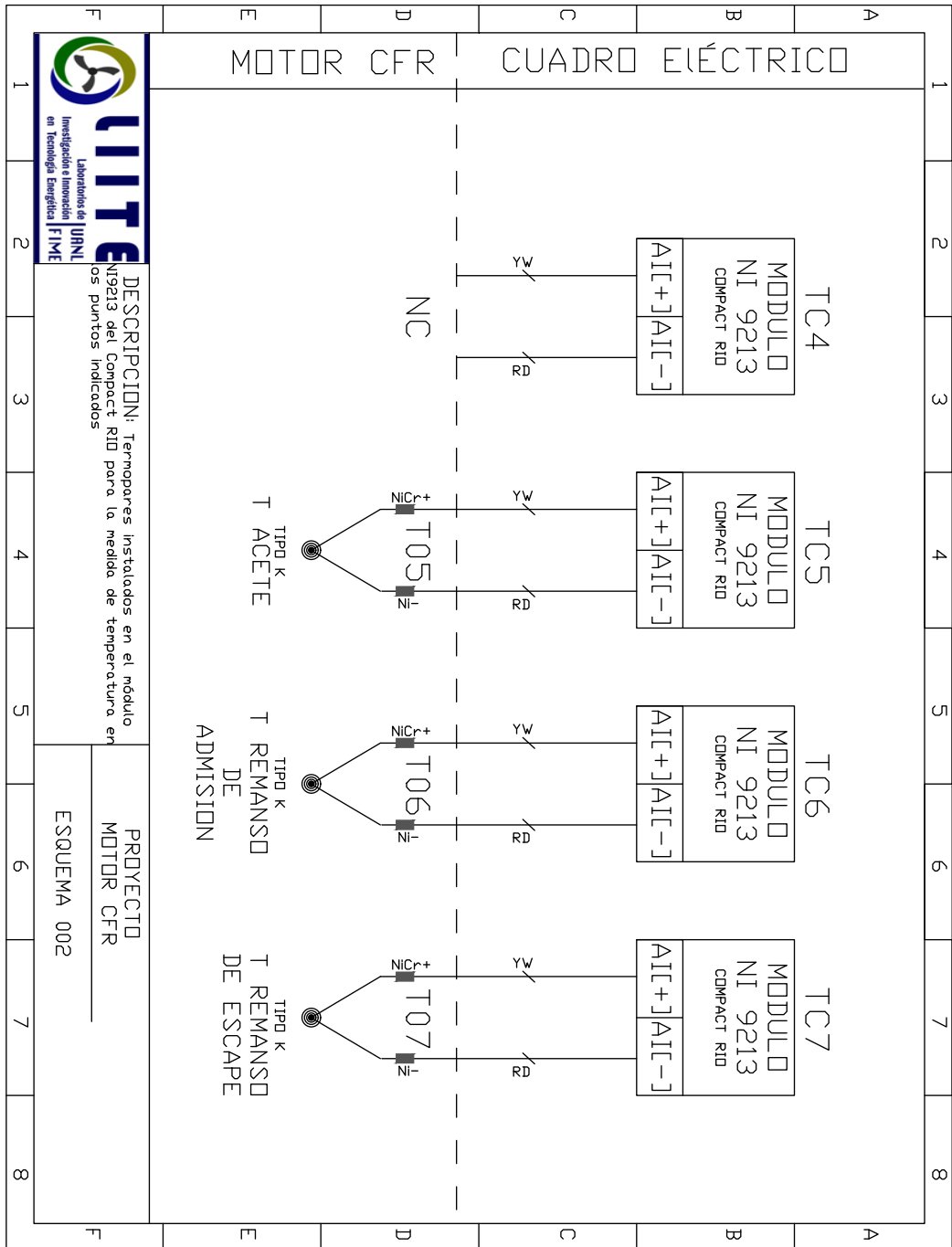
SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: TOLERANCIAS: LINEAL: ANGULAR:			ACABADO:	REBARBAR Y ROMPER ARISTAS VIVAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISIÓN
NOMBRE	FIRMA	FECHA			TÍTULO:  <b>Portainyector 2</b>	
DIBUJ.						
VERIF.						
APROB.						
			MATERIAL:	N.º DE DIBUJO		
			PESO:	ESCALA:1:2	HOJA 1 DE 1	

APÉNDICE B

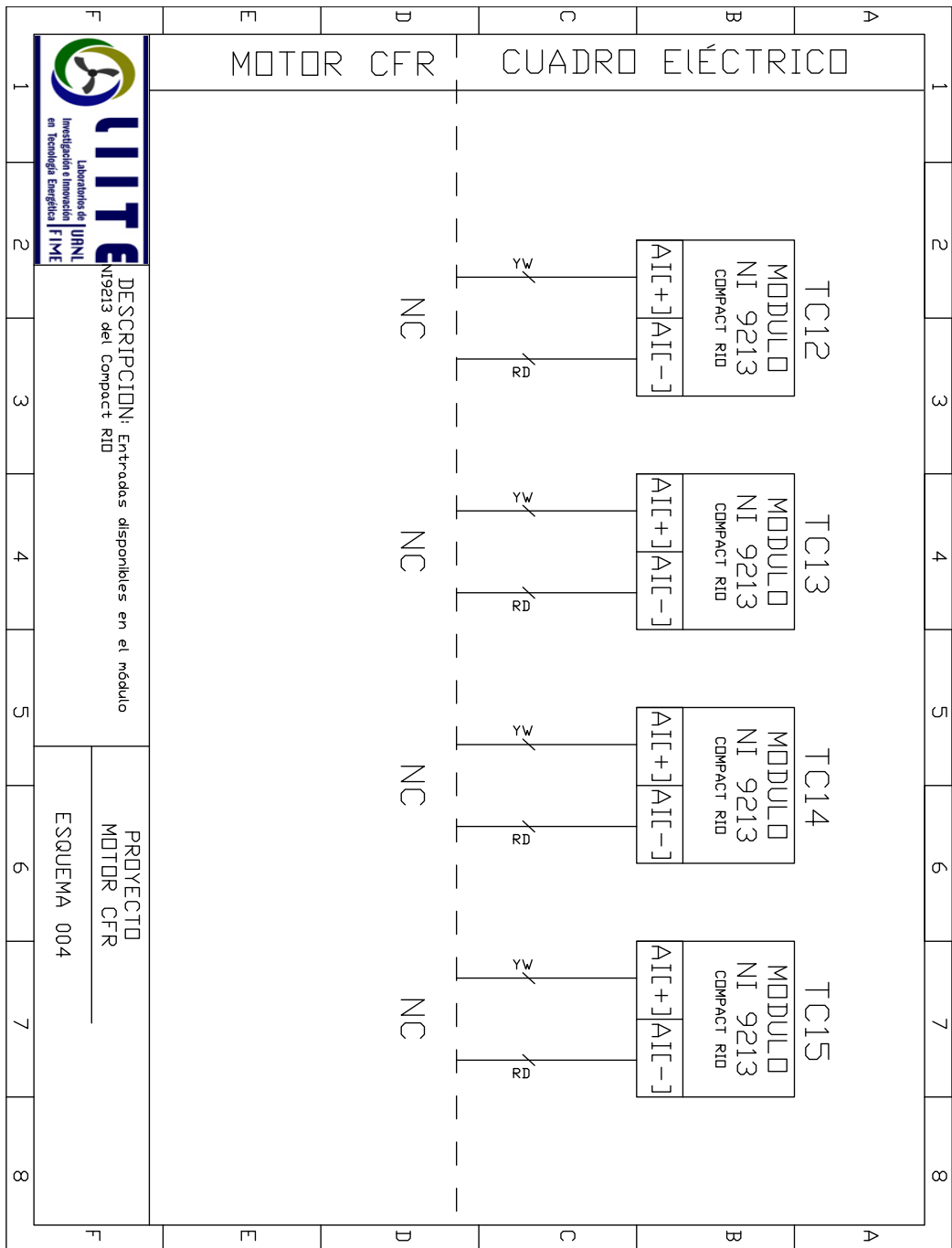
ESQUEMAS ELÉCTRICOS DE LA  
INSTALACIÓN

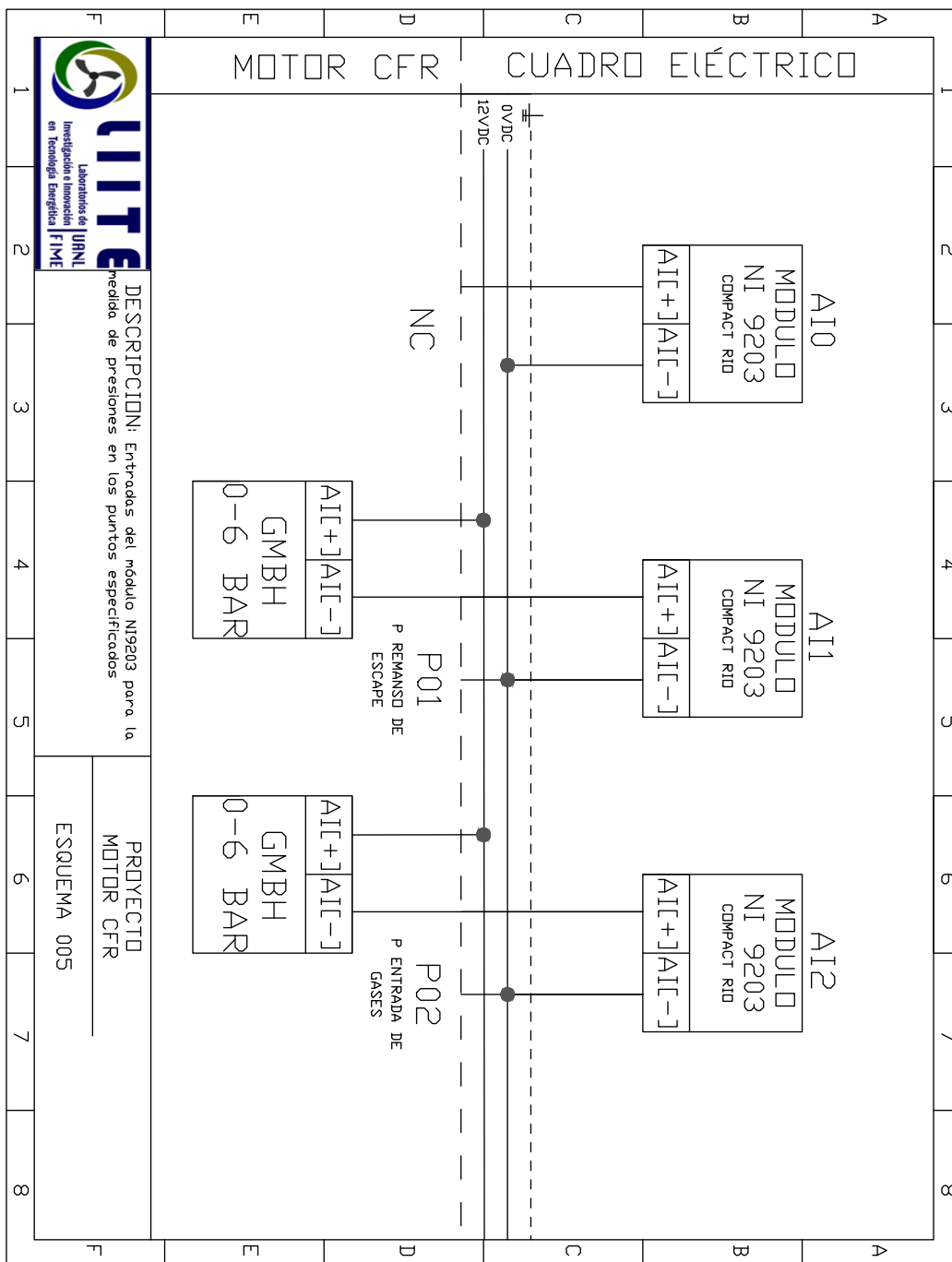
---

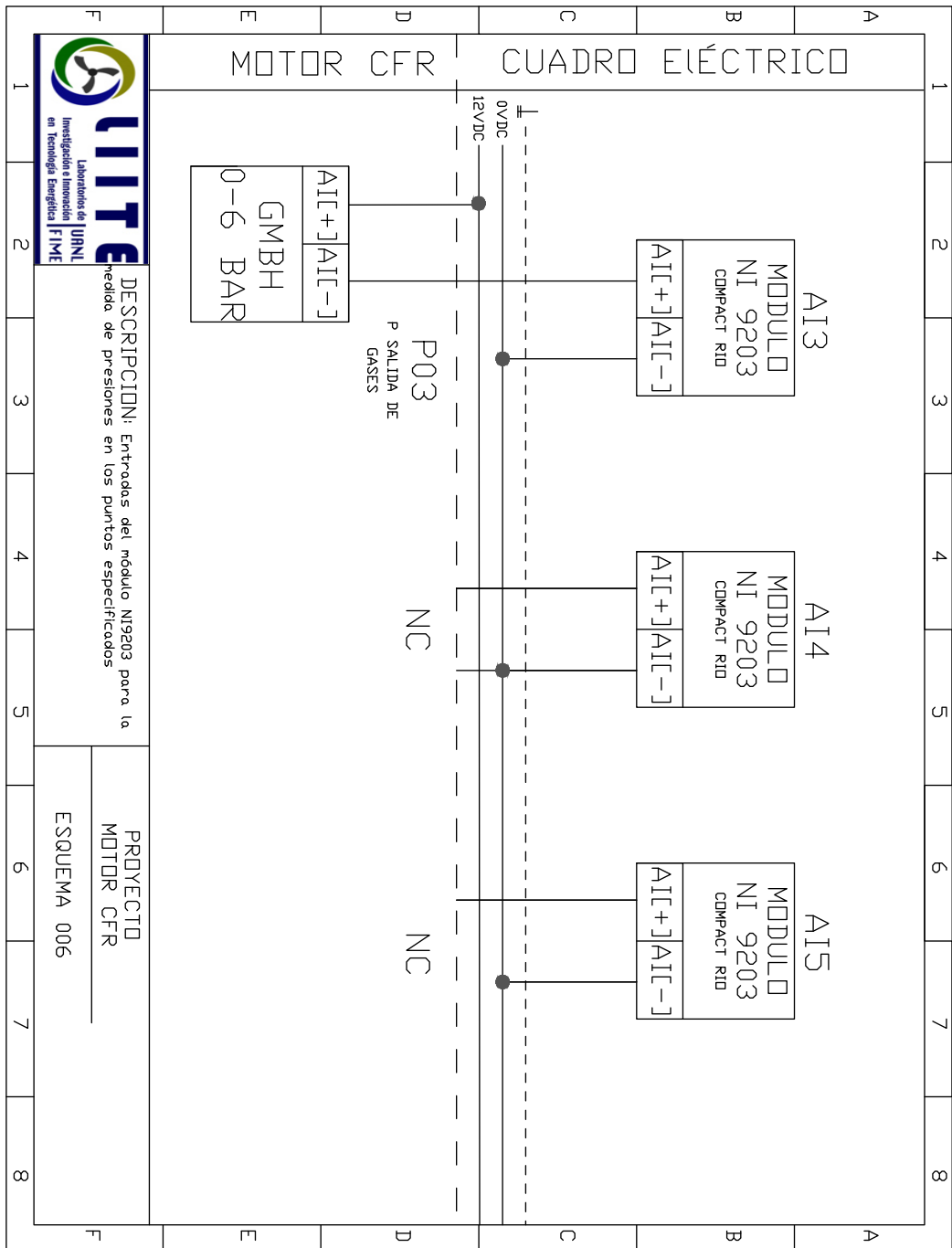


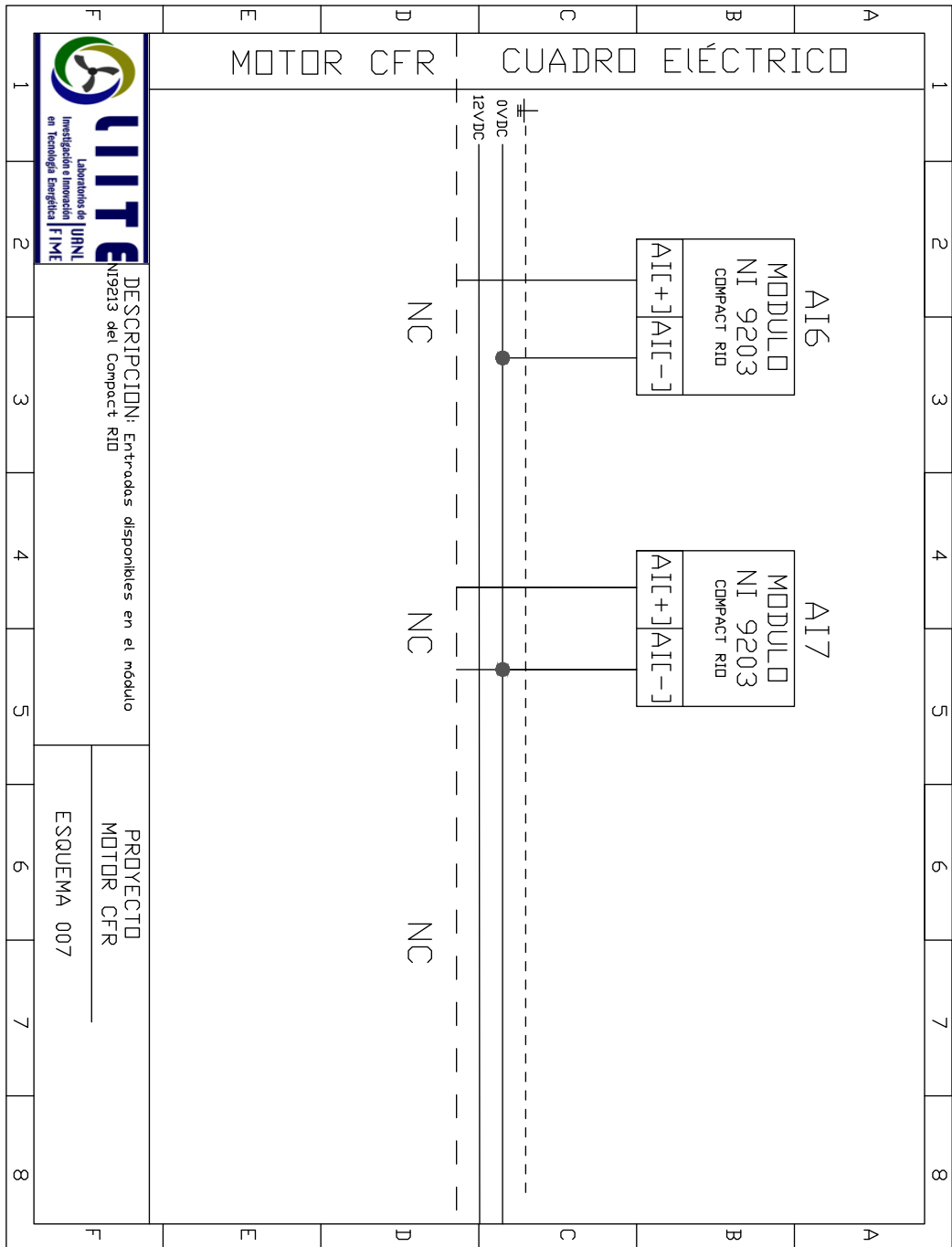




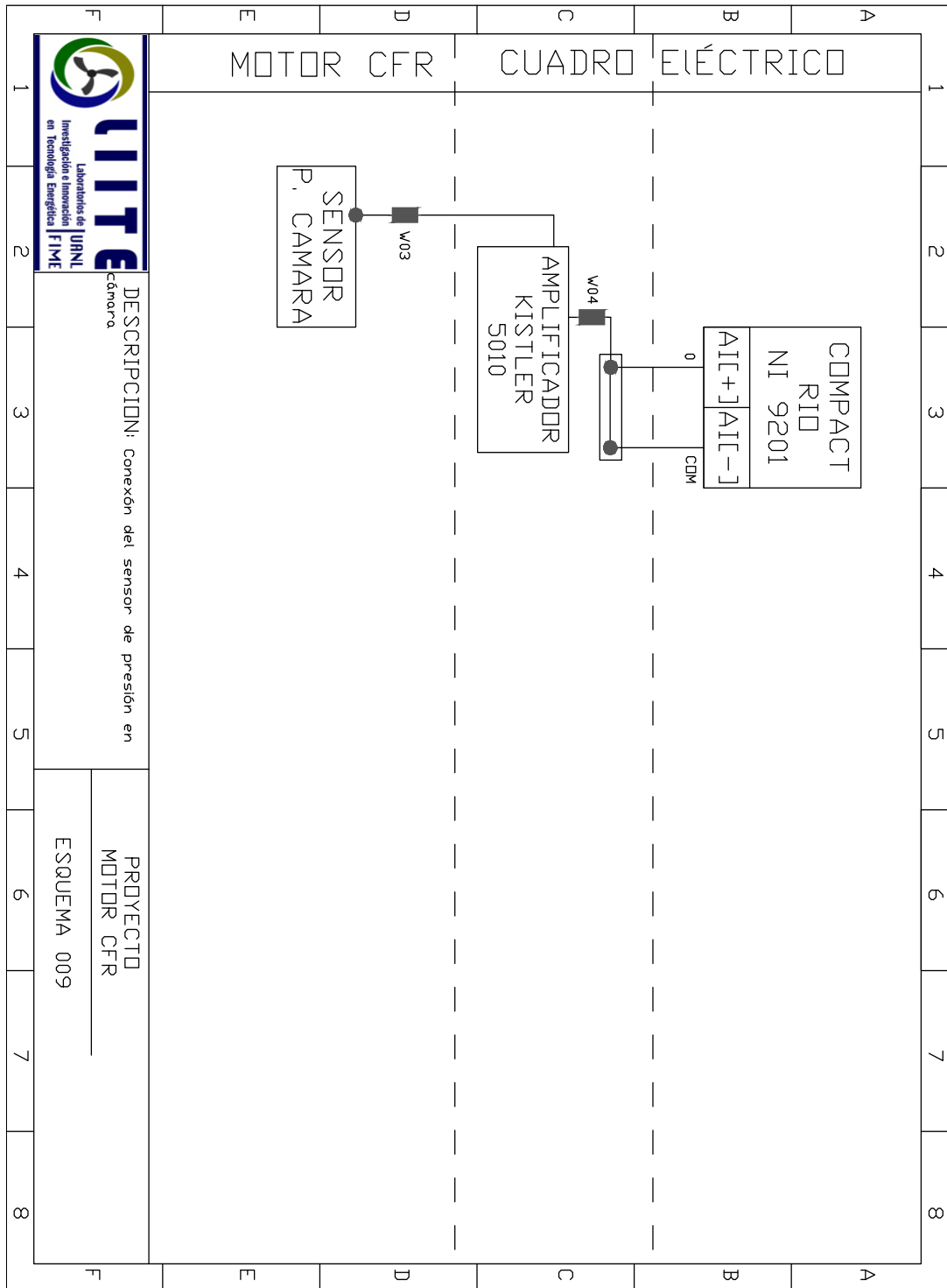


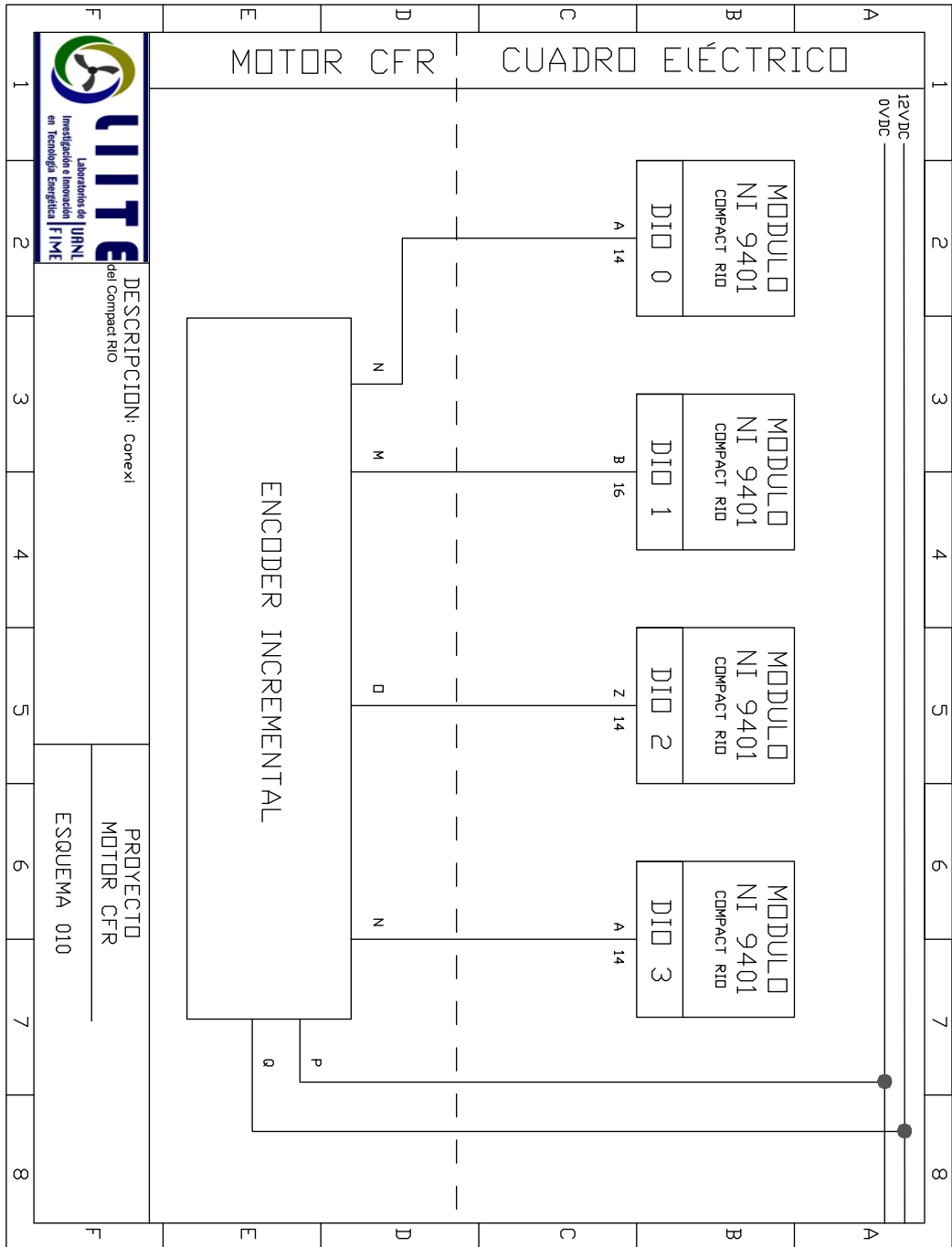


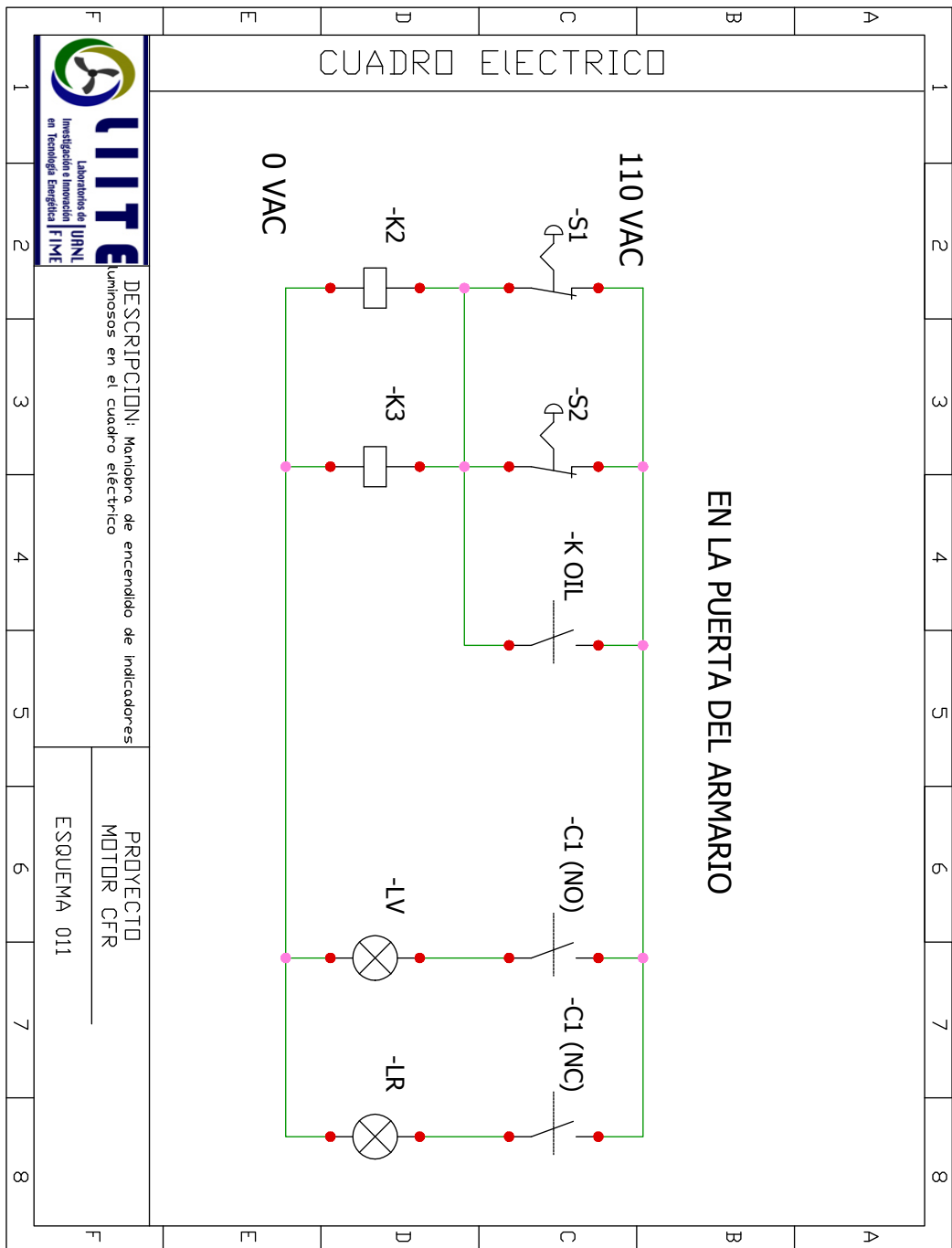


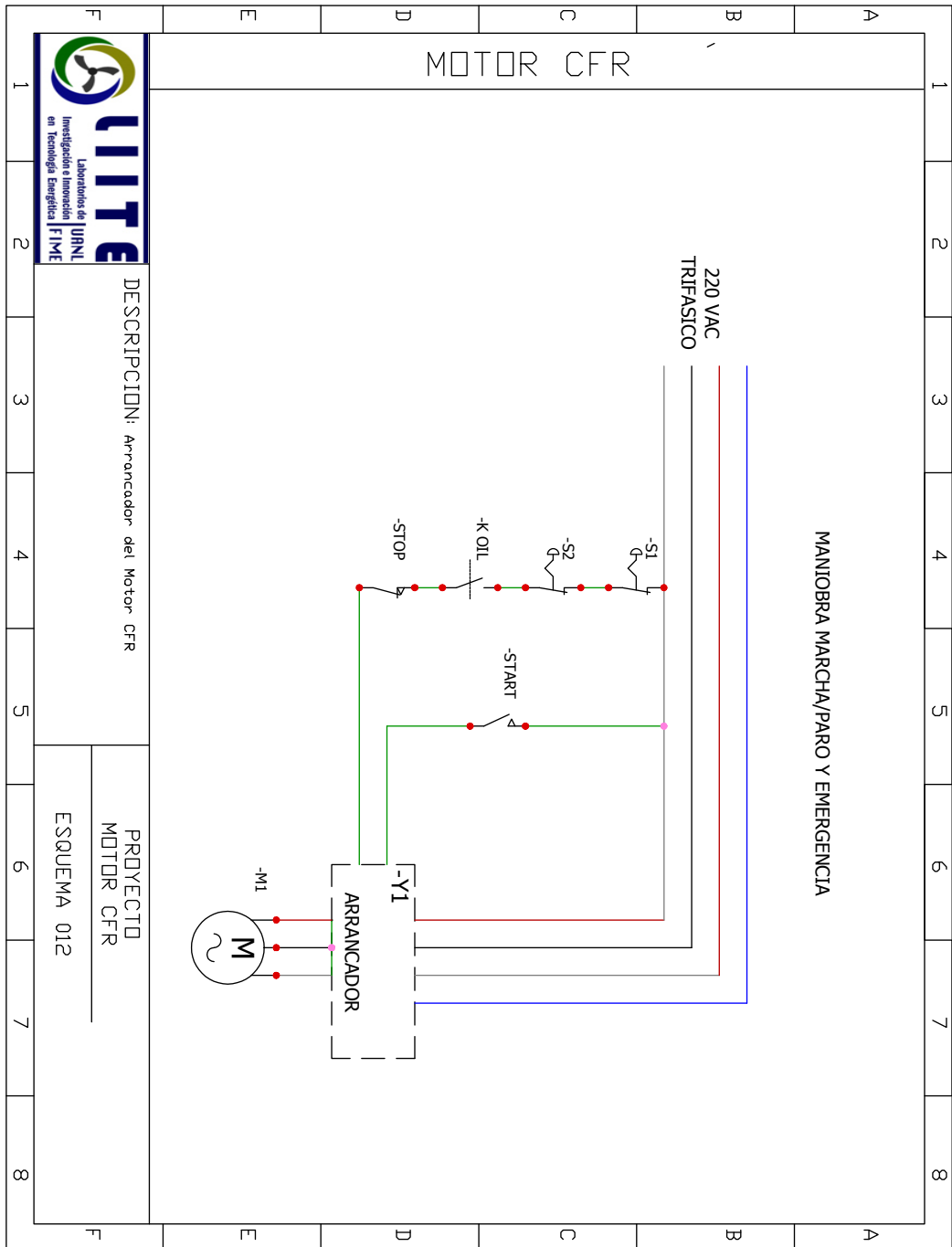




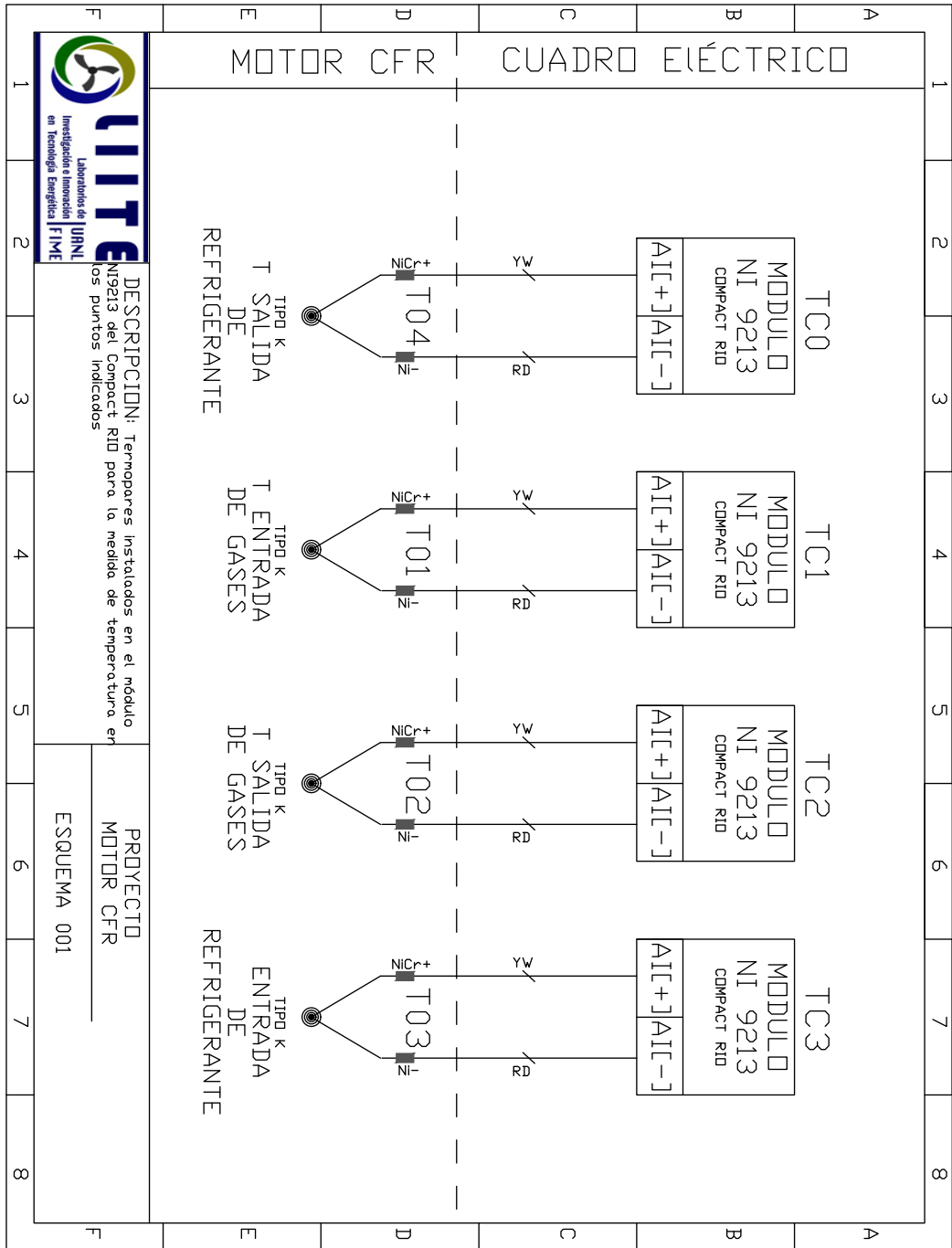












## APÉNDICE C

# COMANDOS DE COMUNICACIÓN CON EL DRIVE

---

**LD = Limit Disable.**

Se usa LD0 o LD3 para dar diferente instrucción. El 0 activa los límites CW y CCW. Es decir, el movimiento solo se llevará a cabo si las entradas de los límites no están conectadas a tierra. El 3 inhabilita los límites.

**1INA 1INB 1INC**

Estos comandos son reportes del estado de CW, CCW y HOME en ese orden. El drive mandará un 1 para indicar que están activos o un 0 para indicar inactividad.

**GH = Go Home.**

Este comando indica la servomotor que se ha establecido un punto llamado HOME al que tendrá que regresar y conforme se acerque su velocidad ira disminuyendo.

**GHF = Go Home Final Velocity.**

Este comando marca la velocidad de giro para ir a la posición de HOME una vez detectado.

**GHV = Go Home Velocity.**

Velocidad a la que se desplazará al inicio de ir a HOME.

**GHA = Go Home Acceleration.**

Este comando indica la aceleración a la que deberá llegar el servomotor en su recorrido a HOME.

**GHDA = Go Home Deceleration.**

Comando para indicar la desaceleración de ir a HOME.

**OSA = Define Active State of Limit Switch/Sensor.**

Este comando define el tipo de sensor que se tiene, puede ser normalmente abierto o cerrado (0 es cerrado y 1 abierto).

**OSB = Backup to Home Switch**

Este comando indica al motor si al iniciar tiene que regresar a HOME o no (0 indica que debe regresar a HOME cuando lo inicias, 1 indica que ya está en HOME al iniciar).

**OSC = Define Active State of Home Switch.**

Indica que estado es la entrada del switch baja o alta (0 es baja y 1 es alta).

**OSD = Enable Incremental Encoder Z-Channel.**

El codificador utiliza Z-Channel (en combinación con un interruptor de carga activado conectado al límite de HOME) para determinar HOME (0 inactivo, 1 activo).

**OSG = Final Homing Direction.**

En este comando se marca la dirección hacia donde se buscara HOME (0 es a favor CW, 1 es en contra CCW).

APÉNDICE D

RELACIÓN DE COMPRESIÓN

---

Tabla D.1: Relación de compresión según la lectura del micrómetro.

M*	0	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
[in]	Relación de Compresión									
0.00	16.00	15.95	15.90	15.85	15.80	15.75	15.71	15.66	15.61	15.56
0.01	15.52	15.47	15.42	15.38	15.33	15.29	15.24	15.20	15.15	15.11
0.02	15.06	15.02	14.98	14.93	14.89	14.85	14.80	14.76	14.72	14.68
0.03	14.64	14.60	14.55	14.51	14.47	14.43	14.39	14.35	14.31	14.27
0.04	14.24	14.20	14.16	14.12	14.08	14.04	14.01	13.97	13.93	13.89
0.05	13.86	13.82	13.78	13.75	13.71	13.68	13.64	13.61	13.57	13.53
0.06	13.50	13.47	13.43	13.40	13.36	13.33	13.30	13.26	13.23	13.20
0.07	13.16	13.13	13.10	13.06	13.03	13.00	12.97	12.94	12.90	12.87
0.08	12.84	12.81	12.78	12.75	12.72	12.69	12.66	12.63	12.60	12.57
0.09	12.54	12.51	12.48	12.45	12.42	12.39	12.36	12.34	12.31	12.28
0.10	12.25	12.22	12.19	12.17	12.14	12.11	12.08	12.06	12.03	12.00
0.11	11.98	11.95	11.92	11.90	11.87	11.84	11.82	11.79	11.77	11.74
0.12	11.71	11.69	11.66	11.64	11.61	11.59	11.56	11.54	11.51	11.49
0.13	11.47	11.44	11.42	11.39	11.37	11.34	11.32	11.30	11.27	11.25
0.14	11.23	11.20	11.18	11.16	11.14	11.11	11.09	11.07	11.04	11.02
0.15	11.00	10.98	10.96	10.93	10.91	10.89	10.87	10.85	10.83	10.80
0.16	10.78	10.76	10.74	10.72	10.70	10.68	10.66	10.64	10.62	10.59
0.17	10.57	10.55	10.53	10.51	10.49	10.47	10.45	10.43	10.41	10.39
0.18	10.38	10.36	10.34	10.32	10.30	10.28	10.26	10.24	10.22	10.20
0.19	10.18	10.16	10.15	10.13	10.11	10.09	10.07	10.05	10.04	10.02

Tabla D.2: Relación de compresión según la lectura del micrómetro. Continuación I.

M*	0	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
[in]	Relación de Compresión									
0.20	10.00	9.98	9.96	9.95	9.93	9.91	9.89	9.88	9.86	9.84
0.21	9.82	9.81	9.79	9.77	9.75	9.74	9.72	9.70	9.69	9.67
0.22	9.65	9.64	9.62	9.60	9.59	9.57	9.56	9.54	9.52	9.51
0.23	9.49	9.47	9.70	9.44	9.43	9.41	9.40	9.38	9.36	9.35
0.24	9.33	9.32	9.30	9.29	9.27	9.26	9.24	9.23	9.21	9.20
0.25	9.18	9.19	9.15	9.14	9.12	9.11	9.09	9.08	9.06	9.05
0.26	9.04	9.02	9.01	8.99	8.98	8.96	8.95	8.94	8.92	8.91
0.27	8.89	8.88	8.87	8.85	8.84	8.83	8.81	8.80	8.79	8.77
0.28	8.76	8.75	8.73	8.72	8.71	8.69	8.68	8.67	8.65	8.64
0.29	8.63	8.61	8.60	8.59	8.58	8.56	8.55	8.54	8.53	8.51
0.30	8.50	8.49	8.48	8.46	8.45	8.44	8.43	8.41	8.40	8.39
0.31	8.38	8.36	8.35	8.34	8.33	8.32	8.31	8.29	8.28	8.27
0.32	8.26	8.25	8.23	8.22	8.21	8.20	8.19	8.18	8.17	8.15
0.33	8.14	8.13	8.12	8.11	8.10	8.09	8.08	8.06	8.05	8.04
0.34	8.03	8.02	8.01	8.00	7.99	7.98	7.97	7.96	7.94	7.93
0.35	7.92	7.91	7.90	7.89	7.88	7.87	7.86	7.85	7.84	7.83
0.36	7.82	7.81	7.80	7.79	7.78	7.77	7.76	7.75	7.74	7.73
0.37	7.72	7.71	7.70	7.69	7.68	7.67	7.66	7.65	7.64	7.63
0.38	7.62	7.61	7.60	7.59	7.58	7.57	7.56	7.55	7.54	7.53
0.39	7.52	7.51	7.50	7.49	7.48	7.47	7.47	7.46	7.45	7.44

Tabla D.3: Relación de compresión según la lectura del micrómetro. Continuación II.

M*	0	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
[in]	Relación de Compresión									
0.40	7.43	7.42	7.41	7.40	7.39	7.38	7.37	7.36	7.36	7.35
0.41	7.34	7.33	7.32	7.31	7.30	7.29	7.28	7.28	7.27	7.26
0.42	7.25	7.24	7.23	7.22	7.22	7.21	7.20	7.19	7.18	7.17
0.43	7.16	7.16	7.15	7.14	7.13	7.12	7.11	7.11	7.10	7.09
0.44	7.08	7.07	7.06	7.06	7.05	7.04	7.03	7.02	7.02	7.01
0.45	7.00	6.99	6.98	6.98	6.97	6.96	6.95	6.94	6.94	6.93
0.46	6.92	6.91	6.91	6.90	6.89	6.88	6.87	6.87	6.86	6.85
0.47	6.84	6.84	6.83	6.82	6.81	6.81	6.80	6.79	6.78	6.78
0.48	6.77	6.76	6.75	6.75	6.74	6.73	6.73	6.72	6.71	6.70
0.49	6.70	6.69	6.68	6.67	6.67	6.66	6.65	6.65	6.64	6.63
0.50	6.62	6.62	6.61	6.60	6.60	6.59	6.58	6.58	6.57	6.56
0.51	6.56	6.55	6.54	6.54	6.53	6.52	6.51	6.51	6.50	6.49
0.52	6.49	6.48	6.47	6.47	6.46	6.45	6.45	6.44	6.43	6.43
0.53	6.42	6.42	6.41	6.40	6.40	6.39	6.38	6.38	6.37	6.36
0.54	6.36	6.35	6.34	6.34	6.33	6.33	6.32	6.31	6.31	6.30
0.55	6.26	6.26	6.28	6.28	6.27	6.26	6.26	6.25	6.24	6.24
0.56	6.23	6.23	6.22	6.21	6.21	6.20	6.20	6.19	6.18	6.18
0.57	6.17	6.17	6.16	6.15	6.15	6.14	6.14	6.13	6.13	6.12
0.58	6.11	6.11	6.10	6.10	6.09	6.08	6.08	6.07	6.07	6.06
0.59	6.06	6.05	6.04	6.04	6.03	6.03	6.02	6.02	6.01	6.01

Tabla D.4: Relación de compresión según la lectura del micrómetro. Continuación III.

M*	0	0.001	0.002	0.003	0.004	0.005	0.006	0.007	0.008	0.009
[in]	Relación de Compresión									
0.60	6.00	5.99	5.99	5.98	5.98	5.97	5.97	5.96	5.96	5.95
0.61	5.95	5.94	5.93	5.93	5.92	5.92	5.91	5.91	5.90	5.90
0.62	5.89	5.89	5.88	5.88	5.87	5.86	5.86	5.85	5.85	5.84
0.63	5.84	5.83	5.83	5.82	5.82	5.81	5.81	5.80	5.80	5.79
0.64	5.79	5.78	5.78	5.77	5.77	5.76	5.76	5.75	5.75	5.74
0.65	5.74	5.73	5.73	5.72	5.72	5.71	5.71	5.70	5.70	5.69
0.66	5.69	5.68	5.68	5.67	5.67	5.66	5.66	5.65	5.65	5.64
0.67	5.64	5.63	5.63	5.62	5.62	5.62	5.61	5.61	5.60	5.60
0.68	5.59	5.59	5.58	5.58	5.57	5.57	5.56	5.56	5.55	5.55
0.69	5.55	5.54	5.54	5.53	5.53	5.52	5.52	5.51	5.51	5.50
0.70	5.50	5.50	5.49	5.49	5.48	5.48	5.47	5.47	5.46	5.46
0.71	5.46	5.45	5.45	5.43	5.44	5.43	5.43	5.42	5.42	5.42
0.72	5.41	5.41	5.40	5.40	5.39	5.39	5.39	5.38	5.38	5.37
0.73	5.37	5.36	5.36	5.36	5.35	5.35	5.34	5.34	5.34	5.33
0.74	5.33	5.32	5.32	5.31	5.31	5.31	5.30	5.30	5.29	5.29
0.75	5.29	5.28	5.28	5.27	5.27	5.27	5.26	5.26	5.25	5.25
0.76	5.25	5.24	5.24	5.23	5.23	5.23	5.22	5.22	5.21	5.21
0.77	5.21	5.20	5.20	5.19	5.19	5.19	5.18	5.18	5.17	5.17
0.78	5.17	5.16	5.16	5.16	5.15	5.15	5.14	5.14	5.14	5.13
0.79	5.13	5.12	5.12	5.12	5.11	5.11	5.11	5.10	5.10	5.09



## APÉNDICE E

# PROTOCOLO DE ARRANQUE

---

1. Encendido eléctrico: Activar las pastillas en el cuadro general de baja tensión (CGBT) etiquetado con los nombres "Motor CFR", Resistencias "Baños Térmicos".
2. Comprobar el nivel de aceite en motor y nivel de refrigerante.
3. Puesta en marcha del sistema de refrigeración: Encendido del baño térmico el motor. Fijar la temperatura del mismo a 70 °C. Encendido del baño térmico del sensor de presión en cámara. Fijar temperatura a 25 °C.
4. Encendido del amplificador de señal del sensor de presión en cámara.
5. Encendido de la cadena de medida que registra los pulsos de ignición e inyección y la presión en cámara.
6. Encendido del cuadro eléctrico del sistema de control. Asegurarse de que el indicador luminoso de color verde quede encendido. Si no se enciende, puede ser debido a la falla de energía eléctrica. Si se enciende el indicador rojo puede ser debido a que hay un pulsador de emergencia activo.
7. Puesta en marcha del programa de control e interfaz de usuario. En el ordenador del sistema de control, ejecutar el siguiente directorio:

C:/ users/ WS03.LABCFR-PC/Dasktop/K/082416\_MAIN.lvproj

8. Una vez abierto el proyecto de LabVIEW, ejecutar la interfaz gráfica, llamada MAIN.
9. Verificar que en el momento de la ejecución, del programa el servomotor que varia la relación, de compresión se vaya a su posición de HOME y se comiencen a visualizar las señales en la interfaz.
10. Esperar a que el servomotor este en HOME y la temperatura del baño térmico sea 70 °C.
11. Lubricación manual de los balancines de las válvulas.
12. Arranque del motor. Para ello, es necesario activar la pastilla situada en el interior de la sala donde se encuentra el motor y pulsar START.
13. Verificar que en el momento después del arranque, la presión del aceite alcanza los 28 PSI. Si esto no ocurriera, detener el motor inmediatamente pulsando STOP.
14. Verificar que la señal de presión en cámara aparece en la cadena de medida.
15. Comprobación de los pulsos de inyección e ignición con los sistemas desenergizados. En la cadena de medida, deben visualizarse los pulsos tal y como se hayan configurado en la interfaz gráfica.
16. Presurización del sistema de inyección a 3 bar.
17. Energización del sistema de inyección e ignición.
18. Cierre de las puertas blindadas.
19. Comienzo del ensayo.

## APÉNDICE F

# PROTOCOLO DE PARO

---

1. Desactivar los pulsos de inyección e ignición en la interfaz gráfica.
2. Parar calentamiento del flujo de trabajo al motor desde la interfaz gráfica.
3. Desconexión manual de los sistemas de inyección e ignición.
4. Apagado de la cadena de medida y del amplificador del sensor de presión en cámara.
5. Cuando la temperatura de entrada al motor sea igual o inferior a los 45 °C, es seguro parar el motor pulsando STOP en el arrancador.
6. Desactivar la pastilla del interior de la sala del Motor CFR.
7. Parar la ejecución del programa de control y cortar la alimentación del cuadro general de control.
8. Despresurizar el sistema de inyección.
9. Apagado del sistema de refrigeración de la culata del motor.
10. Si la temperatura del sistema de refrigeración del sensor de presión en cámara es igual o menor a 45 °C es seguro desconectarlo.
11. Bajar pastillas del CGBT etiquetadas como "Motor CFR", Resistencias "Baños Térmicos"

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] Zhi Wang, Hui Liu, Tao Song, Yunliang Qi, Xin He, Shijin Shuai, and Jian-Xin Wang. Relationship between super-knock and pre-ignition. *International Journal of Engine Research*, 16(2):166–180, 2015.
- [2] Laboratorio de ciencia de los combustibles. grupo de energías térmica y renovable. [http://www.fime.uanl.mx/mc\\_termica\\_ren/infraestructura.html](http://www.fime.uanl.mx/mc_termica_ren/infraestructura.html), 2013. Último acceso: 2017-02-07.
- [3] Laboratorio de fenómenos de transporte. grupo de energías térmica y renovable. [http://www.fime.uanl.mx/mc\\_termica\\_ren/fenomeno\\_de\\_transporte.html](http://www.fime.uanl.mx/mc_termica_ren/fenomeno_de_transporte.html), 2013. Último acceso: 2017-02-07.
- [4] Flexibilización de mercados de gasolinas y diésel. <https://www.gob.mx/aperturagasolinas>, 2017. Último acceso: 2017-04-04.
- [5] Waukesha Engine Division Dresser Industries INC. *An International Historic Mechanical Engineering Landmark. The Waukesha CFR Fuel Research Engine*. Waukesha Wisconsin, 1980.
- [6] Octane engine page. john runyard. <http://www.runyard.org/jr/CFR/octanehistory2.html>, 2016. Último acceso: 2017-02-07.
- [7] Cfr engine page. john runyard. <http://www.runyard.org/jr/CFR/octane1.html>, 2016. Último acceso: 2017-02-07.
- [8] Konrad Reif. Gasoline engine management.

- [9] R Bosch. *Bosch Automotive Electrics and Automotive Electronics: Systems and Components, Networking and Hybrid Drive*. Springer Vieweg, Plochingen, 2014.
- [10] S Szwaja, KR Bhandary, and JD Naber. Comparisons of hydrogen and gasoline combustion knock in a spark ignition engine. *International Journal of Hydrogen Energy*, 32(18):5076–5087, 2007.
- [11] Gequn Shu, Jiaying Pan, and Haiqiao Wei. Analysis of onset and severity of knock in si engine based on in-cylinder pressure oscillations. *Applied Thermal Engineering*, 51(1):1297–1306, 2013.
- [12] HR Ricardo. The influence of various fuels on the performance of internal combustion engines. *Automobile Engineer*, 11:51, 1921.
- [13] John M Campbell, Wheeler G Lovell, and TA Boyd. Detonation characteristics of some of the fuels suggested as standards of antiknock quality. Technical report, SAE Technical Paper, 1930.
- [14] Lester Clyde Lichty. *Combustion engine processes*. McGraw-Hill, 1967.
- [15] GE Power & Water. *Waukesha CFR Combination Research & Motor Method Octane Rating Unit*. General Electric Company, 2015.
- [16] Waukesha cfr. model: F1/f2. <http://www.waukeshacfr.com/f1-f2/>, 2016. Último acceso: 2017-02-07.
- [17] Waukesha cfr. model: F5. <http://www.waukeshacfr.com/f-5/>, 2016. Último acceso: 2017-02-07.
- [18] Waukesha Motor Company. *Waukesha CFR F5 Centane Rating Engine*. Johnson Drive Pewaukee, 2015.
- [19] ASTM-CFR. Astm manual for rating motor fuels by motor and research methods, 1964.
- [20] Charles Fayette Taylor. *The Internal-combustion Engine in Theory and Practice: Thermodynamics, fluid flow, performance*, volume 1. MIT press, 1985.

- [21] Thomas Scientific. Operators manual programmable/digital controller models, 2008.
- [22] John B Heywood et al. *Internal combustion engine fundamentals*, volume 930. Mcgraw-hill New York, 1988.
- [23] José Acedo Sánchez. *Instrumentación y control avanzado de procesos*. Ediciones Díaz de Santos, 2013.
- [24] IFM electronic. *Manual técnico para sensor de presión modelo PN4224*. 2015.
- [25] Dynapar brand. *Industrial Duty Series HC25*. 2015.
- [26] Miguel Ángel Pérez García. *Instrumentación electrónica*. Ediciones Paraninfo, SA, 2014.
- [27] Ramón Pallás Areny. *Sensores y acondicionadores de señal*. Marcombo, 2004.
- [28] Kistler. *Water-Cooled ThermoCOMP® Pressure Sensors. Instruction Manual*. 2016.
- [29] Kistler. *Dual Mode Amplifier Types 5010B. Instruction Manual*. 2016.
- [30] Parker. *S, SX & SXF Series. Packaged Microstepping Systems*. 2016.
- [31] Parker. *SX/SXF Indexer/Driver User Guide*. 2016.
- [32] Robert Bosch GmbH, Konrad Reif, and Karl-Heinz Dietsche. *Automotive handbook*. 2014.
- [33] Francisco Payri, José María Desantes, et al. Motores de combustión interna alternativos. *Reverté*, 2011.
- [34] Srinivas Padala, Sanghoon Kook, and Evatt R Hawkes. Effect of ethanol port-fuel-injector position on dual-fuel combustion in an automotive-size diesel engine. *Energy & Fuels*, 28(1):340–348, 2013.

- [35] Injector-rehab. flow rates of injectors. [http://injector-rehab.com/shop/Flow\\_Rates.html](http://injector-rehab.com/shop/Flow_Rates.html), 2016. Último acceso: 2017-02-14.
- [36] Enrico Corti, Giulio Cazzoli, Matteo Rinaldi, and Luca Solieri. Fast prototyping of a racing diesel engine control system. Technical report, SAE Technical Paper, 2008.
- [37] Ronald W Larsen. *LabVIEW for Engineers*. Pearson Higher Ed, 2011.
- [38] José Rafael Lajara Vizcaíno and José Pelegrí Sebastián. *LabView: entorno gráfico de programación*. Marcombo, 2011.
- [39] National instruments. crio-9074. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/203964>, 2016. Último acceso: 2017-02-07.
- [40] National instruments. fpgas a fondo. <http://www.ni.com/white-paper/6983/es/>, 2016. Último acceso: 2017-02-07.
- [41] Adur Ayerza Zubiria. Configuración de una red de sensores inalámbricos para adquisición de datos en tiempo real. acondicionamiento y procesado de señales mediante fpgas. 2016.
- [42] Norman S Nise and Jorge Humberto Romo. *Sistemas de control para ingeniería*. Cecsca, 2002.
- [43] Giulia Ulpiani, Matteo Borgognoni, Alessandra Romagnoli, and Costanzo Di Perna. Comparing the performance of on/off, pid and fuzzy controllers applied to the heating system of an energy-efficient building. *Energy and Buildings*, 116:1–17, 2016.
- [44] National Instruments. *LabVIEW PID and Fuzzy Logic Toolkit User Manual*. National Instruments, 209.
- [45] Gustavo Adolfo Meneses Benavides. *Control difuso de temperatura para carga resistiva con microcontrolador de 8 bits*. PhD thesis, Especialización en Ciencias Electrónicas e Informática, 2005.

- [46] Timothy J Ross. *Fuzzy logic with engineering applications*. John Wiley & Sons, 2009.
- [47] John G Ziegler and Nathaniel B Nichols. Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME*, 64(11), 1942.
- [48] Andrea G Martínez López, Edgar Solís Ávila, Jaime Martínez Castillo, and JC Tinoco. tecnología cmos: avances y perspectivas cmos. *QUID: Investigación, Ciencia y Tecnología*, (24):43–58, 2015.
- [49] Controlar grandes cargas con arduino y transistor mosfet. mosfet con cargas inductivas. <https://www.luisllamas.es/arduino-transistor-mosfet/>, 2016. Último acceso: 2017-03-02.
- [50] Yunus A Boles Cengel, A Michael, Víctor Campos Olguín, María Teresa Colli Serrano, et al. *Termodinámica*. 2003.