

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**VALPARAÍSO - CHILE**



**“INVESTIGACIÓN DE LA APLICACIÓN DE  
UN MEDIO POROSO A UN MOTOR DE  
COMBUSTIÓN INTERNA”**

**LORETO NICOL ZAMORA SILVA**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERA CIVIL MECÁNICA**

**PROFESOR GUÍA : DR ING. MARIO TOLEDO TORRES.**  
**PROFESOR CORREFERENTE : MG. ING. ROBERTO LEIVA ILLANES.**

**FEBRERO - 2015**

**UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**VALPARAÍSO - CHILE**



**“INVESTIGACIÓN DE LA APLICACIÓN DE  
UN MEDIO POROSO A UN MOTOR DE  
COMBUSTIÓN INTERNA”**

**LORETO NICOL ZAMORA SILVA**

**MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE:  
INGENIERA CIVIL MECÁNICA**

**PROFESOR GUÍA : DR ING. MARIO TOLEDO TORRES.**  
**PROFESOR CORREFERENTE : MG. ING. ROBERTO LEIVA ILLANES.**

**FEBRERO - 2015**

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, que a pesar de las dificultades, me dieron el apoyo necesario para seguir estudiando y finalizar el ciclo.

A mi compañero de vida y mejor amigo, por su entrega y cariño en aquellos momentos.

Al Departamento de Mecánica Automotriz de la sede José Miguel Carrera de la UTFSM y a todo el equipo del Laboratorio de Motores, por sus conocimientos y la disposición de ayudarme, Francisco Ramos, don Guido Díaz, entre otros. En especial, a mis compañeros de tesis en la parte experimental, Joaco y Tomi.

Y en Casa Central, agradezco mucho al profesor Daniel Galleguillos del Laboratorio de Termofluidos, por brindarme su tiempo y enseñarme tantas cosas.

**A mi hija Amelia Luna,  
quien me dio las fuerzas  
necesarias para terminar este  
proceso y regalarme un  
camino lleno de amor.**

## RESUMEN

Este trabajo de investigación intenta ser una contribución al desarrollo científico de la tecnología de medios porosos (MP) aplicada a motores de combustión interna (MCI). Esta nueva aplicación ha sido considerada como una idea prometedora para acercarse a una mejora del proceso de combustión y poder lograr un sistema de emisión de  $\text{NO}_x$  y material particulado casi cero, gracias a las propiedades de transporte de calor y resistencia térmica entre otras características que poseen los MP, para mejorar los procesos de vaporización de combustible, formación de la mezcla, proceso de combustión y recirculación de energía.

Se somete un motor encendido por compresión deinyección directaalimentado con diesel, a ensayos en un freno dinamométrico del tipo hidráulico estableciendo una línea base de las curvas características del motor (Potencia, torque y consumo específico de combustible) y las emisiones de gases de escape ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{HC}$ ,  $\text{NO}_x$  e índice de ennegrecimiento), para luego introducir un material altamente poroso hecho de espuma cerámica en la cámara de combustión, específicamente en la cavidad superior del pistón, sin considerar otras modificaciones al motor. En la fase experimental del trabajo se logra conocer en la práctica las dificultades asociadas a la correcta selección del material poroso, su geometría, propiedades mecánicas y térmicas. Se concluye que entre los aspectos más importante a tener en cuenta para el funcionamiento de un motor con una modificación de este tipo están (i) la fijación del medio poroso a la cavidad del pistón y (ii) el precalentamiento de la cámara de combustión, específicamente del MP, para lograr el encendido del motor.

Por otro lado, el estudio contempla una fase de simulaciones de la cinética de la combustión, donde se utiliza el software PREMIX modificado con el mecanismo de reacción GRI - MECH 3.0 para gas metano, con el objetivo de conocer el potencial de la aplicación de un medio poroso en un reactor a altas presiones. Una vez validado el modelo matemático para el rango de relaciones de equivalencia ( $0.9 < \Phi < 5$ ), y presiones del reactor entre 1 y 5 atm, se comprueba cualitativamente que con el incremento de la presión, existe una mejora en el proceso de transferencia de calor para el rango de mezclas ricas ( $1.2 < \Phi < 2$ ), con un óptimo en  $\Phi = 2$  y 5 atm, donde la transferencia mejora en un orden del 72%; y con un efecto desfavorable en la generación de gas de síntesis ( $\text{H}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ) en procesos de oxidación parcial de mezclas ricas.



## ABSTRACT

This research is intended as a contribution to the scientific development of the technology of porous media (MP) applied to internal combustion engines (MCI). This new application has been considered as a promising idea to approach improved combustion process and to achieve a system of NO<sub>x</sub> and particles near zero, thanks to the heat transport properties and heat resistance and other characteristics possessed by MP, to improve fuel vaporization processes, mixture formation, combustion process and recirculation energy.

An compression ignition direct injection engine fueled by diesel, is tested on a hydraulic dynamometer establishing a base of the characteristic curves of the engine (power, rpm and specific fuel consumption) and emissions of exhaust line (CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub> and opacity), and then insert a highly porous ceramic foam material in the combustion chamber, specifically in the top of the piston cavity, without considering other engine modifications. In the experimental phase of this work it is achieved in the practice know the difficulties associated to the correct selection of the porous material, its geometry, and mechanical and thermal properties. It is concluded that the most important thing to keep in mind for the operation of an engine with such modification are (i) setting the porous medium to the piston cavity and (ii) preheating the combustion chamber, specifically the MP, to achieve the ignition.

Furthermore, the study includes a phase of numerical simulations of combustion kinetics, using the PREMIX modified program with reaction mechanism GRI-MECH3.0 for methane gas, in order to know the potential of application a porous medium in a reactor at high pressures. Once validated the mathematical model for the range of equivalence ratios ( $0.9 < \Phi < 5$ ) and reactor pressures between 1 and 5atm, qualitatively found that with increasing pressure, there is an improvement in the heat transfer process for the range of rich mixtures ( $1.2 < \Phi < 2$ ), with an optimum at  $\Phi = 2$  and 5atm, where the transfer enhancement in the order of 72%; and a effect of lowering the generation of synthesis gas (H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO) in partial oxidation processes of rich mixtures.

## GLOSARIO

$P$	Potencia.
$T_i$	Torque de ensayo de corrida $i$ .
PMI	Punto muerto inferior.
PMS	Punto muerto superior.
$Q_{comb}$	Consumo volumétrico de combustible.
$B_e$	Consumo específico.
$r_c$	Relación de compresión.
$V_{cc}$	Volumen de la cámara de combustión.
$V_d$	Volumen desplazado en el cilindro desde el PMS y PMI.
$u$	Velocidad del frente de combustión.
$v$	Velocidad de filtración.
$\Phi$	Relación de equivalencia.
$d$	Diámetro de partículas de $Al_2O_3$ .
$\varepsilon$	Porosidad.
$\rho$	Densidad.
$T$	Temperatura.
$c$	Calor específico.
$\lambda$	Conductividad térmica.
$x$	Coordenada axial quemador.
$D_{ax}$	Coefficiente de dispersión axial.
$Dif$	Difusividad másica.
$V_k$	Velocidad de difusión de la especie $k$ .
$W_k$	Peso molecular de las especies $k$ .
$Y_k$	Fracción de masa de la especie $k$ .
$h_k$	Entalpía específica de la especie $k$ .
$\dot{\omega}_k$	Velocidad específica de reacción de la especie $k$ .
$F$	Factor de intercambio radiativo.
$h_v$	Coefficiente volumétrico de intercambio de calor entre la fase sólida y gaseosa.
$\beta$	Coefficiente volumétrico de intercambio de calor con los alrededores.
$\dot{M}$	Flujo másico.

<i>A</i>	Factor de frecuencia.
<i>EA</i>	Energía de activación.
<i>R</i>	Constante universal de los gases.
<i>X</i>	Fracción molar gases.
<i>M</i>	Masa molecular del combustible.
<i>D</i>	Diámetro volumen de control cilíndrico.
<i>L</i>	Largo del reactor poroso.
<i>V<sub>a,e</sub></i>	Volumen de aire estequiométrico.
<i>V<sub>a</sub></i>	Volumen de aire real.
<i>FLRT</i>	Flujo másico por unidad de área.

### **Subíndices**

<i>s</i>	Sólido
<i>g</i>	Gas
<i>0</i>	Inicial
<i>p</i>	Partícula
<i>ef</i>	Efectivo.
<i>a, e</i>	Aire estequiométrico.
<i>comb</i>	Combustible.
<i>ad</i>	Adiabática.

# INDICE

AGRADECIMIENTOS .....	I
DEDICATORIA.....	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT .....	IV
GLOSARIO .....	V
INDICE .....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS .....	XI
CAPÍTULO 1.INTRODUCCIÓN.....	12
1.1.    OBJETIVOS GENERALES.....	12
1.1.1.    Objetivos específicos.....	13
CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA DE MEDIOS POROSOS APLICADOS A MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA (MCI).....	14
2.1.    INTRODUCCIÓN AL ESTADO DEL ARTE .....	14
2.2.    COMBUSTIÓN HOMOGÉNEA.....	16
2.3.    TECNOLOGÍA DE MEDIOS POROSOS .....	17
2.3.1.    Definición de un medio altamente poroso.....	17
2.3.2.    Materiales y estructuras disponibles para ser aplicados en MCI.....	18
2.3.3.    Área superficial específica.....	20
2.3.4.    Capacidad calorífica .....	21
2.3.5.    Propiedades de transporte de calor .....	21
2.3.6.    Propiedades térmicas.....	22
2.3.7.    Propiedades eléctricas.....	23
2.3.8.    Propiedades Mecánicas .....	23
2.3.9.    Otros parámetros a considerar.....	24
2.3.10.    Condiciones de arranque en frío.....	24
2.4.    COMBUSTIÓN DE MEDIOS POROSOS APLICADA A QUEMADORES.....	25
2.5.    APLICACIONES DE UN MEDIO POROSO EN LOS PROCESOS DE UN MOTOR .....	27
2.5.1.    Inyección y distribución del combustible en el volumen del MP .....	28
2.5.2.    Vaporización del combustible.....	28
2.5.3.    Formación de la mezcla y homogenización .....	28

2.5.4.	<i>Ignición térmica 3D en MP</i> .....	29
2.5.5.	<i>Liberación de calor en el volumen MP</i> .....	29
2.5.6.	<i>Recirculación de energía en el ciclo del motor</i> .....	29
2.6.	PANORAMA GENERAL DE LAS APLICACIONES DE LA TECNOLOGÍA DE MP .....	30
2.7.	APLICACIÓN DE MEDIOS POROSOS PARA LA FORMACIÓN DE LA MEZCLA Y LA COMBUSTIÓN EN MCI.....	32
2.7.1.	<i>Concepto de Motor-MP: MCI con un reactor poroso para la formación de la mezcla y combustión homogénea</i> .....	32
2.7.2.	<i>Concepto de un sistema de combustión de dos etapas para motores diesel de inyección directa</i> .....	36
2.8.	AVANCES EXPERIMENTALES DE LA TECNOLOGÍA DE MP APLICADO A MCI.....	41
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL .....		48
3.1.	SELECCIÓN DEL MOTOR .....	49
3.2.	SELECCIÓN Y UBICACIÓN DEL MEDIO POROSO .....	51
3.3.	CARACTERIZACIÓN DEL COMBUSTIBLE .....	53
3.4.	PARÁMETROS A MEDIR Y CALCULAR EN EL MOTOR SELECCIONADO .....	54
3.5.	BANCO DE PRUEBAS UTILIZADO .....	55
3.5.1.	<i>Freno dinamométrico</i> .....	58
3.5.2.	<i>Sistema de control y Adquisición de datos</i> .....	58
3.5.3.	<i>Instrumentalización para la medición de parámetros</i> .....	58
3.6.	PROCEDIMIENTO PARA LOS ENSAYOS .....	62
3.6.1.	<i>Mediciones a realizar</i> .....	62
3.6.2.	<i>Operatoria previa al ensayo</i> .....	63
3.6.3.	<i>Puesta en marcha y calentamiento del motor</i> .....	63
3.6.4.	<i>Procedimiento de medición</i> .....	64
3.6.5.	<i>Termino del ensayo y detención del motor</i> .....	65
3.6.6.	<i>Operatoria después de la detención del motor</i> .....	65
3.7.	RESULTADOS ESPERADOS .....	65
CAPÍTULO 4. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DISCUSIONES .....		68
4.1.	INSTALACIÓN DEL MOTOR EN EL BANCO DE ENSAYO .....	68
4.2.	ETAPA I: ENSAYOS CON MOTOR SIN MP (LÍNEA BASE) .....	69
4.2.1.	<i>Curvas características: Potencia Efectiva, Torque, Consumo Específico</i> .....	69
4.2.2.	<i>Emisiones</i> .....	70
4.3.	ETAPA II: ADAPTACIÓN DEL MEDIO POROSO AL MOTOR .....	74
4.3.1.	<i>Primera configuración</i> .....	75

4.3.2.	<i>Segunda configuración</i> .....	76
4.3.3.	<i>Tercera configuración</i> .....	78
4.4.	ALCANCES Y RECOMENDACIONES .....	79
CAPÍTULO 5. SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA COMBUSTIÓN EN MPI.....		82
5.1.	METODOLOGÍA TEÓRICA .....	82
5.2.	CARACTERÍSTICAS DE LA COMBUSTIÓN EN UN QUEMADOR MPI .....	83
5.3.	MODELO MATEMÁTICO DE LA COMBUSTIÓN EN MEDIOS POROSOS INERTES.....	84
5.3.1.	<i>Suposiciones y esquema fisico</i> .....	84
5.4.	PROGRAMA PREMIX MODIFICADO.....	86
5.5.	MECANISMO DE REACCIÓN .....	88
5.6.	PROCEDIMIENTO NUMÉRICO .....	88
5.7.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA .....	90
5.7.1.	<i>Validación del modelo matemático</i> .....	90
5.7.2.	<i>Efecto de la presión en la combustión en reactores porosos</i> .....	92
CONCLUSIONES .....		100
REFERENCIAS.....		102
ANEXO A: CONTACTO INVESTIGADORES .....		104
ANEXO B: ORDEN DE COMPRA MEDIOS POROSOS .....		105
ANEXO C: FRENO DINAMOMÉTRICO SAENZ.....		106
ANEXO D: POTENCIA, PAR DE GIRO, CONSUMO ESPECÍFICO, SEGÚN FICHA DEL FABRICANTE DEL MOTOR HATZ 1D81 .....		107
ANEXO E: RESULTADOS LÍNEA BASE MOTOR HATZ .....		109
ANEXO F: TABLA DE FRACCIONES MOLARES .....		116
ANEXO G: RESULTADOS DE LA MODELACIÓN NUMÉRICA.....		117

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2.1	DEFINICIÓN DEL MODO DE COMBUSTIÓN EN UN MCI [1].....	14
FIGURA 2.2.	TIPOS DE IGNICIÓN DE UN MCI [2].....	16
FIGURA 2.3.	DISTRIBUCIÓN DEL VOLUMEN DE UN MEDIO ALTAMENTE POROSO [1].....	18
FIGURA 2.4.	(A) EJEMPLOS DE DIFERENTES ESTRUCTURAS POROSAS; (B) ESTRUCTURA DE ESPUMA DE SiC [3] .....	19
FIGURA 2.5.	MUESTRAS DE ESTRUCTURAS DE FILTROS DE ESPUMA DE CERÁMICA, DE EMPRESA LANIK, REPÚBLICA CHECA.....	20
FIGURA 2.6.	ÁREA SUPERFICIAL ESPECÍFICA EN FUNCIÓN DE LA DENSIDAD DE PORO [2] .....	21
FIGURA 2.7.	PRUEBA TÉRMICA DE UN REACTOR POROSO PARA APLICACIONES EN MOTORES [2] .....	22
FIGURA 2.8.	CALENTAMIENTO ELÉCTRICO DE FORMA DIRECTA A TRAVÉS DE ELECTRODOS, DE UN REACTOR SiC [2].....	23

FIGURA 2.9. COMPARACIÓN DE UNA LLAMA LIBRE Y COMBUSTIÓN EN MP PARA FLUJO ESTACIONARIO [9] .....	25
FIGURA 2.10. PROCESOS DE MCI APOYADOS POR LA TECNOLOGÍA DE MEDIO POROSO [ELABORACIÓN PROPIA] .....	27
FIGURA 2.11 (A) ESQUEMA DE LA DISTRIBUCIÓN DEL COMBUSTIBLE EN EL VOLUMEN MP;(B) EFECTO DEL CHOQUE DE CHORRO SOBRE LA SUPERFICIE MP [1] .....	28
FIGURA 2.12. ACUMULACIÓN DE CALOR Y RECIRCULACIÓN EN EL MP [1].....	29
FIGURA 2.13. (A) CONCEPTO DE MOTOR INTELIGENTE BASADO EN MDI; (B) CONCEPTO DE MOTOR-MP [8] .....	32
FIGURA 2.14. DISTINTAS POSICIONES DEL REACTOR MP [2] .....	33
FIGURA 2.15. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR-MP CON CÁMARA CERRADA.....	34
FIGURA 2.16. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR-MP CON CÁMARA ABIERTA .....	35
FIGURA 2.17. BALANCE DE ENERGÍA DE UN REACTOR POROSO EN UN MOTOR-MP CON CÁMARA ABIERTA: E1=ENERGÍA DEL TRABAJO DE COMPRESIÓN; E2=ENERGÍA DEL COMBUSTIBLE; E3=PÉRDIDAS DE ENERGÍA; E4=ENERGÍA DESDE EL MP AL AIRE; E5= ENERGÍA DE LOS GASES DE ESCAPE. [2] .....	36
FIGURA 2.18. SISTEMA DE COMBUSTIÓN DE DOS ETAPAS CON UN ANILLO POROSO EN LA CAVIDAD SUPERIOR DEL PISTÓN [2] .....	37
FIGURA 2.19. COMBUSTIÓN DE DOS ETAPAS A CARGA PARCIAL [2] .....	38
FIGURA 2.20. COMBUSTIÓN DE DOS ETAPAS A PLENA CARGA [2].....	39
FIGURA 2.21. FOTOS EXPERIMENTO DE UN MOTOR MP (AUTOR: M. WECLAS) [9].....	42
FIGURA 2.22 (A) ESQUEMA DE LA CONFIGURACIÓN DEL EXPERIMENTO (B) FOTOGRAFÍA DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL MATERIAL CERÁMICO EN LA CABEZA DEL PISTÓN [13].....	43
FIGURA 2.23. EFECTOS DEL MEDIO POROSO SOBRE EL CONSUMO ESPECIFICO DE COMBUSTIBLE [13] ....	44
FIGURA 2.24. EFECTOS DEL MEDIO POROSO EN LA EFICIENCIA TÉRMICA [13] .....	44
FIGURA 2.25. EFECTOS DEL MEDIO POROSO SOBRE LOS HC NO QUEMADOS [13].....	45
FIGURA 2.26. EFECTOS DEL MEDIO POROSO EN LAS EMISIONES DE CO [13].....	45
FIGURA 2.27. INFLUENCIA DEL MEDIO POROSO EN LAS EMISIONES DE NOX [13].....	46
FIGURA 2.28. INFLUENCIA DEL MEDIO POROSOS EN LA EMISIÓN DE HOLLÍN [13] .....	47
FIGURA 3.1. ESQUEMA DEL MONTAJE PARA LOS ENSAYOS. [ELABORACIÓN PROPIA] .....	49
FIGURA 3.2. (A) CONFIGURACIÓN ESCOGIDA (EN ROJO); (B) ESQUEMA DE LA UBICACIÓN DEL MEDIO POROSO EN EL CILINDRO. [ELABORACIÓN PROPIA] .....	51
FIGURA 3.3. MP ADQUIRIDOS: (A) ESPUMA DE SiC; (B) ESPUMA DE ZRO2.....	52
FIGURA 3.4. LAYOUT DEL LABORATORIO DE ENSAYOS (VISTA SUPERIOR) .....	57
FIGURA 3.5. BANCO DE PRUEBAS DEL LABORATORIO DE MOTORES DEL TALLER DE MECÁNICA AUTOMOTRIZ, JMC.....	57
FIGURA 3.6. SENSORES PARA EL ADQUISIDOR DE DATOS.....	59
FIGURA 3.7. PROBETA DE COMBUSTIBLE.....	60
FIGURA 4.1. CURVAS CARACTERÍSTICAS MOTOR HATZ.....	69
FIGURA 4.2. EMISIONES DE LOS GASES DE ESCAPE DÍA 1 .....	71
FIGURA 4.3. EMISIONES DE LOS GASES DE ESCAPE DÍA 2 .....	71
FIGURA 4.4. EMISIONES DE LOS GASES DE ESCAPE DÍA 3 .....	72
FIGURA 4.5. ÍNDICE DE ENNEGRECIMIENTO O N° DE BOSCH EN LOS 3 DÍAS DE ENSAYO.....	72
FIGURA 4.6. TEMPERATURA DE GE Y ACEITE .....	73
FIGURA 4.7. VISTA SUPERIOR DE LA CAVIDAD DEL PISTÓN. ....	74
FIGURA 4.8. ADAPTACIÓN DEL MP DE SiC PARA SU INSTALACIÓN (IZQUIERDA); ADHESIÓN DEL MP DE SiC AL PISTÓN DEL MOTOR (DERECHA). ....	75
FIGURA 4.9. ADHESIÓN DEL MEDIO POROSO DE ZIRCONIA AL PISTÓN DEL MOTOR. ....	76
FIGURA 4.10. RESULTADOS DE LA SEGUNDA CONFIGURACIÓN .....	77
FIGURA 4.11. GEOMETRÍA EN FORMA DE ANILLO (DERECHA); ANILLO DE ZIRCONIA EN EL PISTÓN (IZQUIERDA).....	78
FIGURA 4.12. RESULTADOS DE LA TERCERA CONFIGURACIÓN. ....	79
FIGURA 5.1 FRENTE DE COMBUSTIÓN EN SISTEMAS DE FLUJO PERMANENTES CON MPI.....	84
FIGURA 5.2 REPRESENTACIÓN FÍSICO DEL MODELO MATEMÁTICO .....	85
FIGURA 5.3. DIAGRAMA DEL PROGRAMA PREMIX MODIFICADO. ....	86

FIGURA 5.4. $T_s$ , $T_g$ Y U CON EL REACTOR A PRESIÓN ATMOSFÉRICA. ....	91
FIGURA 5.5 TEMPERATURA DE COMBUSTIÓN PARA DISTINTAS PRESIONES .....	93
FIGURA 5.6. TEMPERATURAS MÁXIMAS DEL GAS EN FUNCIÓN DE LA RELACIÓN DE EQUIVALENCIA PARA PRESIONES ENTRE 1 Y 5 ATM. ....	94
FIGURA 5.7. DIFERENCIA ENTRE $T_s$ Y $T_g$ EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN DEL REACTOR, PARA RELACIONES DE EQUIVALENCIA ENTRE 0,9 Y 5. ....	95
FIGURA 5.8. VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE LA LLAMA EN FUNCIÓN DE $\Phi$ . ....	96
FIGURA 5.9. GENERACIÓN DE $H_2$ EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN PARA DISTINTOS $\Phi$ . ....	97
FIGURA 5.10. EMISIONES DE $CO_2$ EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN PARA DISTINTOS $\Phi$ . ....	97
FIGURA 5.11. EMISIONES DE CO EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN PARA DISTINTOS $\Phi$ . ....	98
FIGURA 5.12. EMISIONES DE $CH_4$ EN FUNCIÓN DE LA PRESIÓN PARA DISTINTOS $\Phi$ . ....	99
FIGURA C.1. (A) ESQUEMA DEL PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL FRENO; (B) ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL FRENO .....	106
FIGURA D.1. POTENCIA AJUSTADA A DISTINTAS NORMAS [FICHA TÉCNICA DEL FABRICANTE].....	107
FIGURA D.2. TORQUE SEGÚN DIN ISO 1585 E ISO 3046-1 [FICHA TÉCNICA DEL FABRICANTE].....	108
FIGURA D.3. CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE SEGÚN DIN ISO 1585 E ISO 3046-1 .....	108
FIGURA E.1. CONSUMO DE COMBUSTIBLE PARA LOS ENSAYOS 1, 2 Y 3.....	110
FIGURA E.2. CURVAS CARACTERÍSTICAS MOTOR HATZ, ENSAYO 1 .....	113
FIGURA G.1. $T_s$ , $T_g$ Y U PARA PRESIÓN DEL REACTOR DE 1.2 ATM. ....	119
FIGURA G.2. $T_s$ , $T_g$ Y U PARA PRESIÓN DEL REACTOR DE 2 ATM. ....	119
FIGURA G.3. $T_s$ , $T_g$ Y U PARA PRESIÓN DEL REACTOR DE 3 ATM. ....	120
FIGURA G.4. $T_s$ , $T_g$ Y U PARA PRESIÓN DEL REACTOR DE 4 ATM. ....	120
FIGURA G.5. $T_s$ , $T_g$ Y U PARA PRESIÓN DEL REACTOR DE 5 ATM. ....	121

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 2.1 PROPIEDADES TÉRMICAS DE ALGUNOS MATERIALES CERÁMICOS POROSOS [2]. ....	22
TABLA 2.2. APLICACIONES Y PATENTES MÁS IMPORTANTES CONCERNIENTES A MP EN MOTORES [2] ..	31
TABLA 3.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL MOTOR HATZ SUPRA 1D81S. ....	50
TABLA 3.2. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS MEDIOS POROSOS ADQUIRIDOS. ....	52
TABLA 3.3. DATOS TÉCNICOS DEL ADHESIVO PARA EL MP .....	53
TABLA 3.4. ESPECIFICACIONES DIESEL GRADO B-1. ....	53
TABLA 5.1. VALORES UTILIZADOS PARA EL CÁLCULO DE LA VELOCIDAD DE FILTRACIÓN .....	89
TABLA E.1. DATOS DE LOS ENSAYOS. ....	109
TABLA E.2. CONDICIONES AMBIENTALES Y REGISTRO TERMOCUPLAS.....	109
TABLA E.3. CONSUMO DE COMBUSTIBLE ( $Q_{COMB}$ ).....	110
TABLA E.4. ENSAYO DE CORRIDA 1 .....	111
TABLA E.5. ENSAYO DE CORRIDA 2 .....	111
TABLA E.6. ENSAYO DE CORRIDA 3 .....	112
TABLA E.7. CONSUMO ESPECÍFICO DEL MOTOR HATZ. ....	112
TABLA E.8. EFICIENCIA GLOBAL PARA CADA ENSAYO .....	114
TABLA E.9. EMISIONES DE CO, $CO_2$ Y HC PARA CADA DÍA ENSAYADO (1, 2 Y 3).....	115
TABLA E.10. EMISIONES DE $O_2$ , NO E ÍNDICE DE ENNEGRECIMIENTO PARA CADA DÍA ENSAYADO (1, 2 Y 3).....	115
TABLA F.1. FRACCIONES MOLARES Y VELOCIDAD DE FILTRACIÓN PARA DISTINTOS $\Phi$ . ....	116
TABLA G.1. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS .....	117
TABLA G.2. RESULTADOS DE LAS SIMULACIONES NUMÉRICAS (CONTINUACIÓN) .....	118

## **CAPÍTULO 1. Introducción**

En el marco del Proyecto USM 32.12.12, se estudia la Tecnología de Medios Porosos (MP) aplicados a Motores de Combustión Interna (MCI). En él, se considera adaptar a un MCI un reactor de MP y realizar los ensayos dinamométricos que permitan verificar experimentalmente los efectos del MP en las curvas características y en las emisiones. Se plantea, que en presencia de un medio poroso en el interior de la cámara de combustión, se mejora la eficiencia térmica de un motor junto con la disminución de sus emisiones contaminantes, en especial óxidos nitrosos ( $\text{NO}_x$ ) y material particulado.

El estudio experimental se realiza en el Taller de Mecánica Automotriz, dispuesto en la Sede José Miguel Carrera de la Universidad Federico Santa María, Viña del Mar.

Por otro lado, la investigación posee una metodología teórica basada en simulaciones computacionales que nos permitan tener un acercamiento al comportamiento de las propiedades termodinámicas de la combustión en un medio poroso a altas presiones, utilizando el programa PREMIX modificado en el proceso de combustión de una mezcla combustible-aire en Medios Porosos Inertes (MPI).

### **1.1. Objetivos generales**

- Estudio del Estado del arte de la aplicación de Medios Porosos en Motores de Combustión Interna (MCI).
- Diseño e implementación de un Medio Poroso en un MCI
- Estudio experimental de la combustión en MCI con Medio Poroso.
- Comparación de resultados obtenidos versus esperados.
- Simulación numérica de la combustión de una mezcla combustible-aire en un reactor poroso a altas presiones.

### **1.1.1. Objetivos específicos**

- Estudiar el problema del proceso de combustión en un MCI para un aumento en la eficiencia térmica y/o disminución de emisiones.
- Estudiar la Tecnología de la Combustión de Medios Porosos aplicada a los Motores de Combustión Interna.
- Estudiar las estructuras y materiales apropiados para soportar la combustión de un MCI.

#### *Fase experimental:*

- Seleccionar y definir el motor y medio poroso a utilizar para la fase experimental.
- Reconocer los parámetros a medir, así como la instrumentalización necesaria para los ensayos en el laboratorio.
- Instalación y montaje del motor al freno dinamométrico dispuesto en el Taller.
- Obtener el comportamiento base del motor mediante las Curvas Características (Potencia, Torque y consumo específico) y nivel de emisiones del motor.
- Estudiar distintas configuraciones de disposición del medio poroso en el motor.
- Adaptar el medio poroso al interior del cilindro, modificando así el motor.
- Realizar los ensayos correspondientes con el motor modificado para su posterior comparación con línea base.

#### *Fase de simulaciones numéricas:*

- Simular el proceso de combustión de una mezcla de un combustible alternativo al diésel más aire en medios porosos inertes mediante el uso del programa PREMIX modificado, con sus respectivos mecanismos de reacción, propiedades termofísicas y de transporte del gas.
- Estudiar el efecto de trabajar a altas presiones en la temperatura de la fase sólida del medio poroso, en la temperatura del gas y en la velocidad de propagación del frente de combustión en la combustión en MPI.

## CAPÍTULO 2. Estado del Arte de la Tecnología de Medios Porosos aplicados a Motores de Combustión Interna (MCI)

### 2.1. Introducción al Estado del Arte

Hasta la actualidad, las normativas medioambientales son necesariamente cada vez más exigente respecto a las emisiones contaminantes tanto de la industria en general como de la automotriz. Esto ha hecho que los principales desafíos de los fabricantes de motores, en el desarrollo de los procesos en Motores de Combustión Interna, giran en torno a la combinación de dos objetivos: por un lado una alta eficiencia del ciclo, disminuyendo el consumo específico del combustible, y con esto provocar una disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub>, y por otro lado una disminución de las emisiones tóxicas al ambiente (en especial NO<sub>x</sub> y material particulado) [1].

Los procesos de combustión se caracterizan por la composición de la mezcla (razón aire-combustible) y la estructura de la mezcla (propiedades físicas y químicas de la mezcla), tipo de ignición (encendido por chispa, auto-encendido por compresión, auto-encendido por compuestos radicales activos y auto-encendido por medio poroso) y la distribución de la carga en el espacio (en la cámara de combustión) (Fig.2.1). Son estos parámetros los que definen la potencia del motor, las emisiones resultantes en el escape (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, hidrocarburos, hollín), la distribución de temperatura en la cámara de combustión, así como la tasa de liberación de energía (calor).

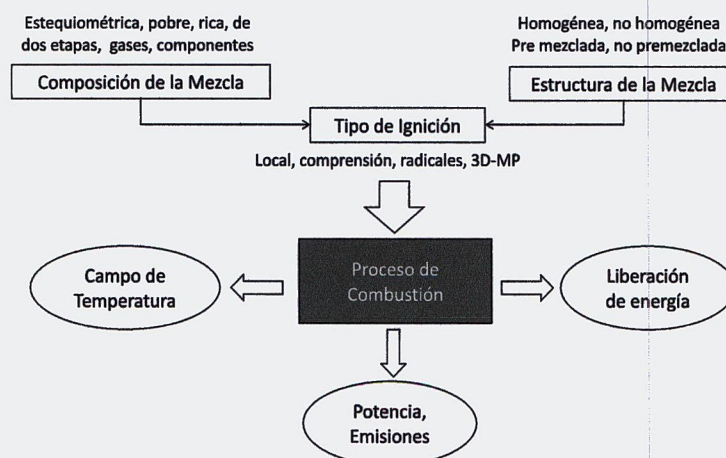


Figura 2.1 Definición del modo de combustión en un MCI [1].

Estos parámetros dependen principalmente de la formación de la mezcla y el proceso de combustión, los cuales en un sistema convencional de combustión son muy difíciles de controlar (bajo distintas condiciones operacionales). Por lo demás, estos proceso de combustión se caracteriza por ser no homogéneo, tanto en la distribución de la carga como la temperatura en la cámara de combustión, dando por resultado una combustión incompleta y una eficiencia global aproximada de 40 a 45% en motores diesel y 30% en motores a gasolina.

Para resolver la disyuntiva entre bajar las emisiones y el consumo de combustible (no perjudicando la potencia), investigaciones recientes [8] estudian la factibilidad de llevar a cabo Procesos de Combustión Homogénea en Motores de Combustión Interna. Ésta se define como el proceso de encendido en 3D de una carga homogénea seguida de una simultánea liberación de calor (sin llama) en todo el volumen de la cámara de combustión caracterizada por un campo de temperatura homogéneo.

Para lo anterior, se ha propuesto un nuevo concepto (Dr. Franz Durst y Dr. Mirosław Weclas): Motor-MP, el cual consiste en el uso de la combustión en medios porosos, dentro de la cámara de combustión, para controlar y mejorar los procesos individuales que se llevan a cabo dentro del cilindro: distribución del combustible en el espacio, vaporización, formación de la mezcla, ignición, combustión y recuperación de calor.

Por lo tanto, el objetivo de aplicar en los motores de combustión interna la tecnología de combustión de medios porosos, es mejorar significativamente los procesos individuales para obtener un proceso de combustión más limpio y eficiente.

## 2.2. Combustión Homogénea

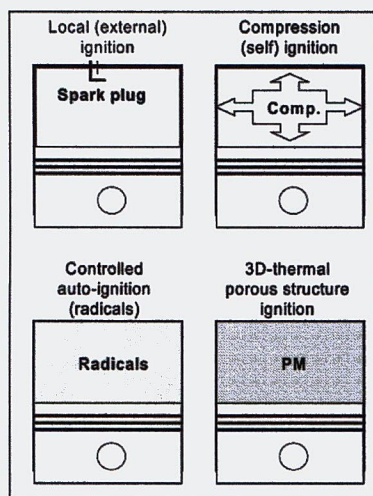
La clave para obtener una reducción de las emisiones de  $\text{NO}_x$  y material particulado, y a la vez una disminución del consumo de combustible es lograr una combustión homogénea. El desafío es que transcurra en todos los rangos operacionales de un motor, esto es, desde cargas pobres hasta cargas casi estequiométrica, así como su aplicación en una amplia gama de velocidades de giro del motor.

De acuerdo a la definición de combustión homogénea, existen tres parámetros de la formación de la mezcla y la combustión que pueden ser seleccionados para definir la capacidad de un sistema dado a que opere como un sistema de combustión homogénea:

- Grado de homogenización de la carga (con el objetivo de conseguir una carga gaseosa, premezclada y homogénea);
- Tipo de ignición (con el fin de realizar un encendido volumétrico);
- Liberación de energía (combustión) y su campo de temperatura.

Por otro lado, la temperatura de combustión, en especial para cargas casi estequiométricas, debe ser reducida y controlada, a valores menores que la temperatura adiabática de llama libre [12], la que se define como la temperatura de un proceso de combustión en la cual no

hay pérdidas de calor hacia el entorno, ni trabajo mecánico, y sin cambios en la energía cinética o potencial, con el objetivo de no llegar a las temperaturas a la cual se forma el  $\text{NO}_x$ .



**Figura 2.2. Tipos de Ignición de un MCI [2]**

Para satisfacer las condiciones especificadas antes, es necesario controlar el tiempo de encendido bajo condiciones variables de funcionamiento y controlar la velocidad de liberación de calor para distintas composiciones de la mezcla (relación aire-combustible). Por otro lado, para conseguir bajas emisiones de combustión, es necesario que el combustible líquido se haya vaporizado completamente antes que la ignición se produzca [1].

Existen cuatro tipos de ignición que se pueden realizar en un MCI (Fig. 2.2): Local (Encendido por chispa), encendido por compresión, auto ignición controlada (encendido

químico) e ignición térmica 3D en un MP. De éstos, los últimos tres sistemas tienen el potencial para una ignición volumétrica [8].

En el caso de la ignición por chispa, el encendido es local seguido por una propagación de la llama, resultando en un proceso de combustión no homogéneo. En cambio para el caso del auto-encendido por compresión, un encendido en varios puntos podría llevarse a cabo, de no ser por su carga no homogénea y su consiguiente distribución en el espacio.

### **2.3. Tecnología de Medios Porosos**

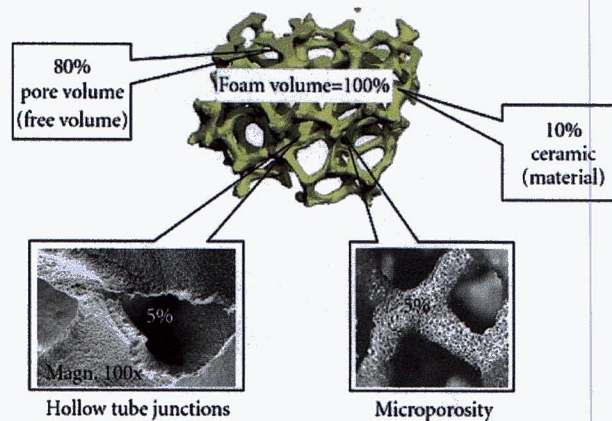
La tecnología de medio poroso para motores de combustión interna implica utilizar las características específicas de un medio altamente poroso (MP) para que ayuden a controlar la formación de la mezcla y los procesos de combustión en un motor de combustión interna. Las características empleadas de MP que son de interés para dicha aplicación, están directamente relacionadas con una eficaz transferencia de calor y una propagación de la llama muy rápida dentro de la estructura porosa.

En general, los parámetros más importantes de MP requeridos para la aplicación en MCI se pueden resumir en: alta capacidad de calor, gran área de superficie específica, excelentes propiedades de transporte de calor (radiación, conductividad), transparencia para el flujo del gas, pulverización y propagación de la llama, baja densidad de poros, buena resistencia térmica del material, resistencia mecánica y propiedades eléctricas, ésta última en pos de condiciones de arranque en frío.

#### **2.3.1. Definición de un medio altamente poroso**

Un medio poroso es un material compuesto de dos fases, una matriz sólida y en su interior un sistema de huecos o poros que pueden o no estar interconectados. Cuando los poros están conectados entre sí el medio poroso es de celdas abiertas, formando una red de huecos y canales que constituyen el volumen libre del medio poroso (Fig. 2.3). Estas estructuras porosas que adoptan nuevas y atractivas propiedades físico químicas respecto a las propiedades aisladas de sus fases, pertenecen a una nueva clase de familia llamada *materiales celulares*.

Para la aplicación en MCI, su estructura debe ser altamente porosa y de celdas abiertas, esto significa 80% o más de volumen libre (ver Fig. 2.3). De esta manera, podemos considerar que el medio poroso es transparente para el flujo de gas que pasa a través de él.



**Figura 2.3. Distribución del volumen de un medio altamente poroso [1]**

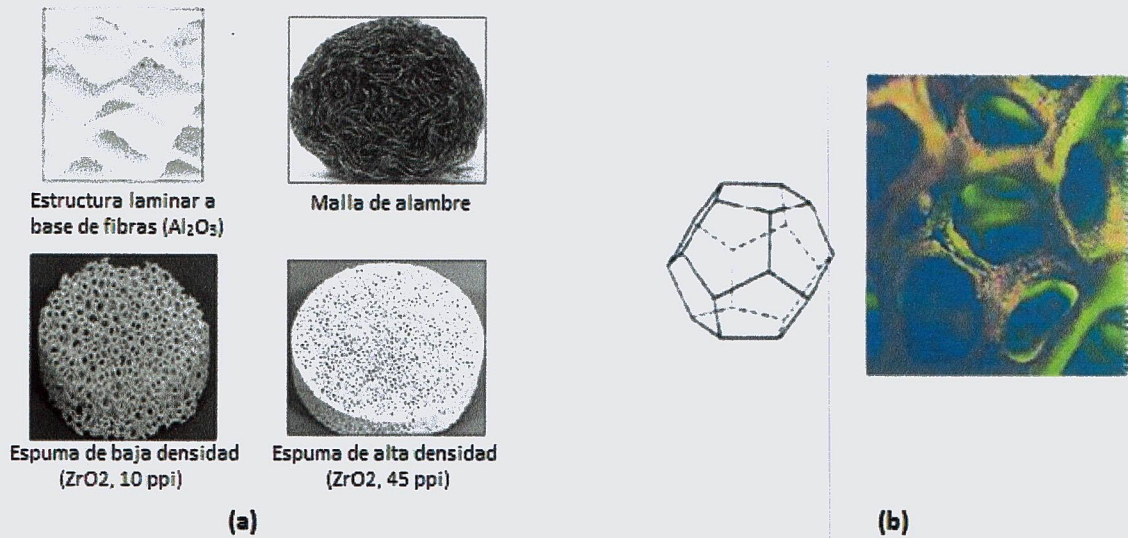
### 2.3.2. Materiales y estructuras disponibles para ser aplicados en MCI

Principalmente, hay dos grupos de materiales y estructuras porosas que se aplican en motores de combustión interna:

1. Estructuras porosas aplicadas a los sistemas de pretratamiento de reducción de emisiones del motor, (fuera del cilindro del motor (cámara de combustión)),
2. Estructuras porosas aplicadas a los procesos del motor, especialmente en el interior del cilindro para ayudar diferentes procesos individuales, así como un proceso de combustión completa.

Como se presentó anteriormente, este proyecto explora la factibilidad de utilizar la estructura porosa para soportar el o los procesos que se llevan a cabo dentro del cilindro del motor (vaporización, distribución en el espacio, mezclado, ignición, combustión y recuperación de calor en el MP). Cabe mencionar que el medio poroso puede ayudar en parte al proceso de combustión, o llevarse a cabo completamente dentro del volumen del MP.

Para el caso, es necesaria una serie de requerimientos de la estructura y materiales, así como sus propiedades. Diferentes estructuras porosas se han probado en el interior de la cámara de combustión (en la parte superior del pistón) para mejorar los procesos individuales del motor y para lograr una combustión homogénea. Ejemplos de materiales cerámicos, se presentan en la Fig. 2.4(a): mezclador estático de  $Al_2O_3$  (izq. sup.), espuma cerámica de zirconia (der. sup. e izq. inf.), malla de alambre de alta densidad (der. inf.).

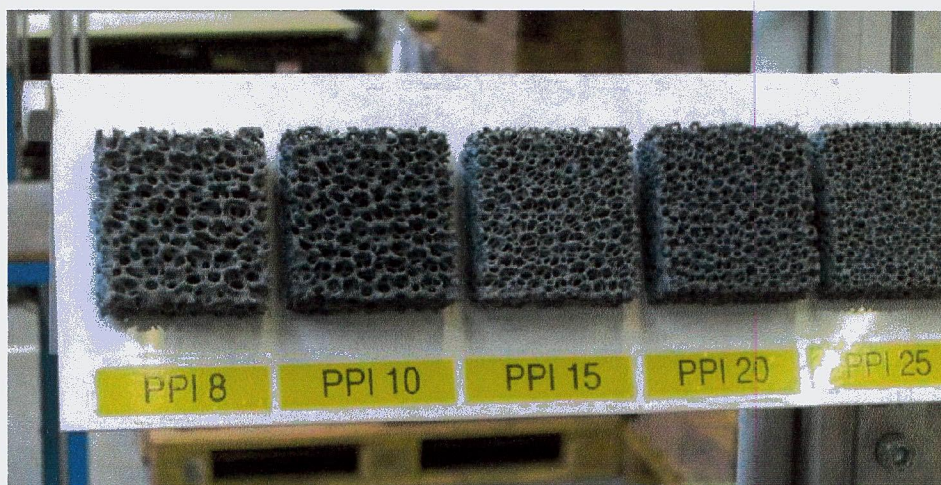


**Figura 2.4. (a) Ejemplos de diferentes estructuras porosas; (b) Estructura de espuma de SiC [3]**

Las espumas cerámicas, se definen por el sólido base del cual están hechas, el tamaño de sus poros y la distribución en volumen de su porosidad (o densidad relativa). Ésta última se refiere a la fracción en volumen que ocupa la fase sólida en la espuma. El tamaño de poro, a menudo se correlaciona con otro concepto: la densidad de poro “ppi” (*pores per inch*), la cual nos da una aproximación de la cantidad de poros por pulgada lineal. Esto significa que un MP, a mayor densidad de poro o ppi, menor tamaño de poro tiene.

Una espuma altamente porosa de celdas abiertas, llamada espuma reticulada, se puede idealizar como un dodecaedro pentagonal (Fig. 2.4 (b)). Los bordes del dodecaedro son los puntales de la espuma. El flujo de gas a través de la espuma es obligada a separarse y volver a los conectarse con los puntales, resultando en una excelente mezcla y fuerte interacción entre el gas y el material MP [1].

Por otro lado, el tamaño típico de poro de la estructura a considerar para aplicaciones dentro del cilindro debe ser del orden de 1-3 mm (o más). El tamaño típico que se ha reportado en la literatura para la aplicación en MCI es de 8 a 30 ppi [2] (Fig. 2.5).



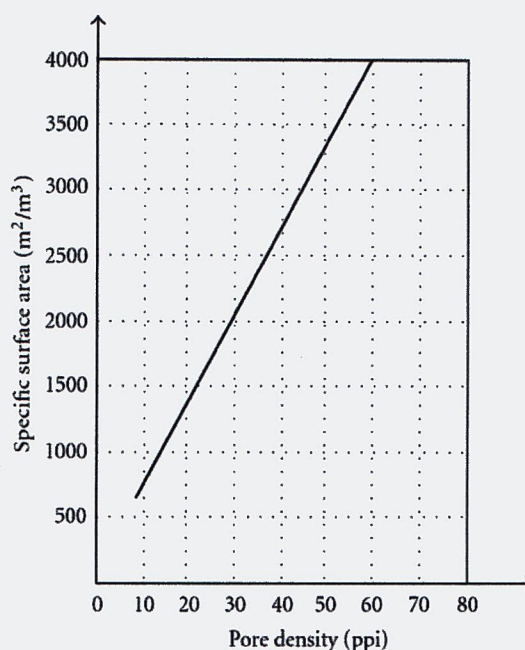
**Figura 2.5. Muestras de estructuras de filtros de espuma de cerámica, de empresa LANIK, República Checa.**

Se ha puesto de manifiesto a partir de la literatura [3], que la espuma de cerámica con gran porosidad es preferible para aplicaciones de motor ya que esto hace transparente los medios porosos para el flujo de gas, atomización y propagación de la llama. Esta transparencia permite bajas pérdidas de presión en el flujo del gas a través del volumen del MP. Y por otro lado, en comparación con espumas metálicas, los materiales celulares cerámicos tienen mayor resistencia al desgaste, resistencia a alta temperatura, y estabilidad química.

Ejemplos comunes de materiales cerámicos para su utilización en tecnologías de combustión en medios porosos son óxidos como alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y zirconia ( $\text{ZrO}_2$ ), y no óxidos como el carburo de silicio  $\text{SiC}$  [3]. Aun así, actualmentese continúa investigando sobre los materiales y estructuras disponibles para su uso bajo condiciones reales de motores [1].

### **2.3.3. Área superficial específica**

La matriz porosa se caracteriza por tener una gran área superficial por unidad de volumen, resultando una extensiva interface de energía entre la fase gaseosa y la fase sólida, y por ende permite un excelente intercambio de calor entre fases, y con ello, una extensión de la zona de reacción. Debido a lo anterior, se recomienda el uso del MP como un vaporizador e intercambiador de calor. Como se ilustra en la Figura 2.6, esta área de superficie interna depende de la densidad de poros, su geometría y la estructura básica que se utiliza para la fabricación del medio poroso. Por ejemplo, una espuma metálica hecha de Ni-Cr-Al el área superficial específica, según el diámetro medio de poro, para  $d_{\text{medio}}=0.9\text{mm}$  es  $1700\text{ m}^{-1}$ , para  $d_{\text{medio}}=1.4\text{mm}$  es  $1000\text{ m}^{-1}$ , y para  $d_{\text{medio}}=2.3\text{mm}$  es  $500\text{ m}^{-1}$ .



**Figura 2.6. Área superficial específica en función de la densidad de poro [2]**

#### **2.3.4. Capacidad calorífica**

La estructura porosa tiene la característica de tener un alto capacidad calorífica de la fase sólida comparada con la capacidad calorífica del gas atrapado en el volumen del MP[1]. Esta característica hace posible que parte de la energía liberada durante el proceso de combustión pueda ser “acumulada dentro” del medio poroso, resultando en una alta temperatura de la superficie de la fase sólida. Esto podría permitir un control de la temperatura de combustión en un amplio rango de composiciones de mezcla  $\lambda$  (razón de aire-combustible) y condiciones operacionales del motor [4]. La capacidad calorífica también influye en las condiciones de arranque en frío (ver Capítulo 2.3.10)

#### **2.3.5. Propiedades de transporte de calor**

Sus excelentes propiedades de transporte de calor de PM se caracterizan por la eficiente conductividad térmica y una muy eficaz radiación de calor de la fase sólida del MP. Incluso para una porosidad de 95%, la conductividad puede llegar a ser 300-500 veces mayor a la mezcla gaseosa sola, lo que resulta en velocidad de combustión 16 a 20 veces mayor [3]. La alta conductividad térmica del material cerámico poroso ayuda a una mejor distribución térmica en todas direcciones disminuyendo el *peak* de temperatura. Se produce además, un enfriamiento de la zona de reacción y por lo tanto, una reducción significativa de formación de  $\text{NO}_x$  (combustión a baja temperatura).

### 2.3.6. Propiedades térmicas

Una de las propiedades más importantes de los materiales MP para su uso en tecnología de combustión es su alta resistencia térmica (Fig. 2.7), así como su resistencia a los choques térmicos, y alta capacidad calorífica [5]. En la Tabla 2.1 se muestran las propiedades térmicas de los materiales MP potencialmente más utilizables [2].

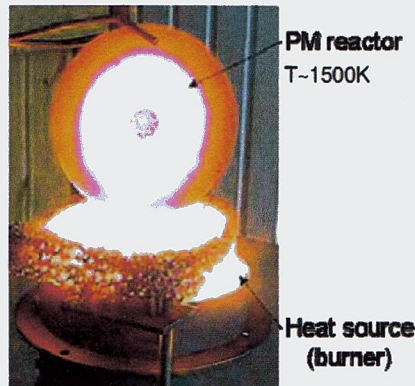


Figura 2.7. Prueba térmica de un reactor poroso para aplicaciones en motores [2]

Tabla 2.1 Propiedades térmicas de algunos materiales cerámicos porosos [2].

Material	Specification	Mean linear thermal coefficient		Heat conductivity $Wm^{-1}K^{-1}$	Melting point °C	Application temperature °C
		30 – 100°C $10^{-6}K^{-1}$	30 – 600°C $10^{-6}K^{-1}$			
PSZ	partly stabilized zirconoxide		9 – 13	1,2 - 3	2700	900 - 2400
ATI	aluminiumtitanat		5,0	1,5 - 3		900 - 1600
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	aluminiumoxide 80 %	5 – 7	6 – 8	10 - 16	2050	1400 - 1500
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	aluminiumoxide 86 %	5,5 - 7,5	6 – 8	14 - 24		1400 - 1500
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	aluminiumoxide 95 %	5 – 7	6 – 8	16 - 28		1400 - 1500
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	aluminiumoxide >99 %	5 – 7	7 – 8	19 - 30		1400 - 1700
SSN	sintered silicónitrid		2,5 - 3,5) <sup>4</sup>	15 - 45		1750
RBSN	reactionbound silicónitrid		2,1 - 3) <sup>4</sup>	4 - 15		1100
HPSN	hot forced Siliciumnitrid		3,0 - 3,4) <sup>4</sup>	15 - 40		1400
AlN	Aluminiumnitrid	2,5 – 4	4,5 – 5	100 - 180		1750
SSIC	pressureless sintered siliconcarbíd		4 - 4,8	40 - 120	2800 <sup>1)</sup>	1400 - 1750
SISIC	silicon infiltrated siliconcarbíd		4,3 - 4,8	110 - 160		1380
HPSIC	hot forced siliconcarbíd		3,9 - 4,8	80 - 145		1700
RSIC	recrystallized siliconcarbíd	4,2	4,8	20		1600
NSIC	nitridbound siliconcarbíd	4,2	4,8	14 – 15		1450
PS 1	Iron-chromium-aluminum-alloy			13	1500	1400

1) dissociation starts at temperatures over 2000° C

### 2.3.7. Propiedades eléctricas

Una estructura porosa puede ser directa o indirectamente calentada eléctricamente, resultando un campo de temperatura homogénea a través del MP [7], como muestra la Figura 2.8. Esta característica puede ser utilizada para condiciones de arranque en frío o para la vaporización del combustible líquido. Un efecto similar puede conseguirse por calentamiento eléctrico indirecto, debido a muy buenas propiedades de transferencia de calor de la estructura porosa. La distribución de la temperatura (en el tiempo) en las estructuras calentadas eléctricamente depende de las propiedades eléctricas del material, tamaño de poros y estructura, así como de los contactos eléctricos con la espuma. Las propiedades dieléctricas de una estructura porosa dependen principalmente de la porosidad y el tipo de material cerámico.

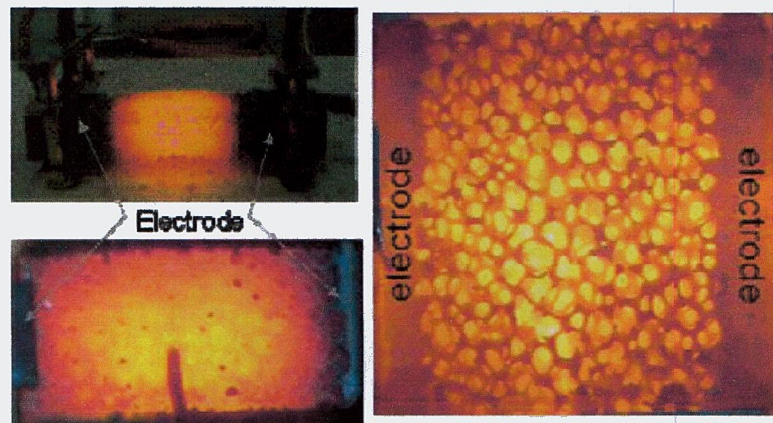


Figura 2.8. Calentamiento eléctrico de forma directa a través de electrodos, de un reactor SiC [2]

### 2.3.8. Propiedades Mecánicas

La estabilidad mecánica y resistencia mecánica para aplicaciones de combustión son muy importantes si el MP se somete a altas presiones y altas temperaturas. Las propiedades mecánicas corresponden principalmente a módulos de elasticidad (módulo de Young), coeficiente de Poisson, resistencia a la fractura, tracción y compresión (aplastamiento), y resistencia al shock térmico [6].

### **2.3.9. Otros parámetros a considerar**

Un aspecto crítico a tomar en cuenta es el montaje del MP en el motor, en especial para materiales cerámicos. Se debe considerar el uso de pegamentos resistentes a altas temperaturas. La geometría debe poder mecanizar, en lo posible para poder adaptar el medio poroso al motor, en especial en la cámara de combustión.

Por último, un aspecto del cual se tiene poca información es la estabilidad en el tiempo (vida útil) del material para aplicaciones en motores.

### **2.3.10. Condiciones de arranque en frío**

No es evidente que con el fin de que un reactor poroso opere adecuadamente como una cámara de combustión en el motor, el reactor debe estar ya caliente, que habrá suficiente energía acumulada en el medio poroso. Hay diferentes posibilidades para precalentar el reactor poroso en condiciones de arranque en frío [1]. Una de las maneras prometedoras es un sistema de calefacción eléctrica directa del reactor. Otra posibilidad es utilizar la energía de compresión para ser acumulada en el reactor poroso.

Después de aproximadamente 50 ciclos de compresión (para condiciones típicas del motor Diesel), los reactores poroso que tienen un volumen correspondiente a un volumen de la cámara de combustión de un motor diesel puede que alcancen una temperatura de ignición. Dependiendo de la realización del motor con combustión en un reactor porosa, también es posible arrancar el motor con una ignición y combustión convencional y el utilizar la energía de combustión para calentar el reactor frío.

## 2.4. Combustión de medios porosos aplicada a quemadores

Para comprender de mejor manera la tecnología de medios porosos aplicada a la combustión de flujo no permanente que se lleva a cabo en un motor, en esta sección se describe la combustión en quemadores de medios porosos, tecnología ampliamente investigada y desarrollada a través del tiempo para mejorar los procesos de combustión, pero que aun así no se ha logrado entender completamente.

Para comprender las ventajas de la combustión en medios porosos, se compara la combustión de una llama libre con la combustión en una espuma altamente porosa de SiC (Fig. 2.9), ambos para flujo permanente, esto es, sin cambios en las fronteras del volumen de control. Cabe aclarar que en un quemador la llama es permanente, a diferencia de los motores cuyo frente de combustión es por ciclo y no de forma estacionaria. Además la mezcla entra a la cámara de combustión premezclada, en cambio en un MCI de inyección directa el aire se mezcla con el combustible dentro de la cámara de combustión.

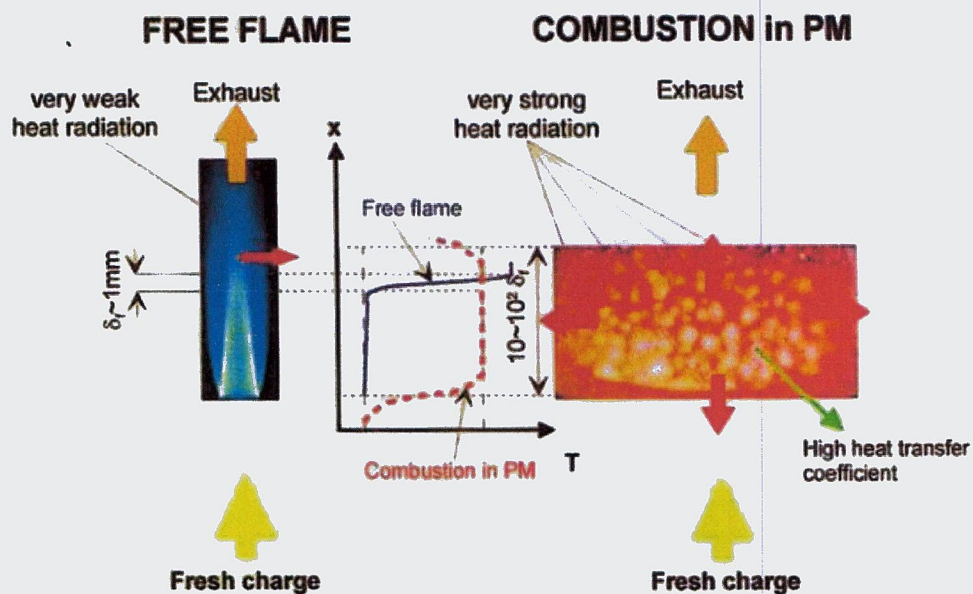


Figura 2.9. Comparación de una llama libre y combustión en MP para flujo estacionario [9]

Como se observa en la Figura 2.9, en el caso de llama libre (izquierda), la zona de reacción se limita a una delgada zona azul ( $\delta \sim 1\text{mm}$ ), la cual no se expande debido a que la transferencia de calor por radiación desde la zona de reacción es muy baja. En el caso de combustibles líquidos se forman zonas muy ricas en combustible (llama celeste), y zonas muy pobres (exceso de aire) para quemarse, resultando en un proceso de combustión poco eficiente. La

única posibilidad de incrementar el transporte de calor en una pre-mezcla es el aumento de la turbulencia en la región. Aun así, la experiencia dice que las mejoras no son suficientes para la reducción de las emisiones, en especial para MCI.

Una situación muy distinta se observa en el caso de la combustión en un medio poroso (lado derecho de la Figura 2.9). Aquí, la carga entrante al reactor aumenta su temperatura debido a las excelentes propiedades de transferencia de calor y capacidad calorífica del medio poroso. Esta zona se conoce como de precalentamiento, en donde el calor almacenado por el medio poroso, es entregado por radiación y conducción a la mezcla entrante, aumentando así su entalpía de combustión. Esto permite una expansión de la zona de reacción a través del volumen del reactor poroso. El proceso es sin llama con respecto a las fronteras del reactor, aparecen micro-llamas en todo el volumen libre del medio poroso.

Un aspecto muy importante de esta tecnología es la llamada estabilización de la llama, la cual se lleva a cabo según el criterio del número Pecklet [9], el cual está basado en las propiedades del material sólido y el gas. De acuerdo a este criterio, la combustión sólo puede ocurrir cuando el número Pecklet es mayor a 65, y su expresión es:

$$Pe = \frac{S_L d_p C_p \rho_g}{\lambda_g}$$

Donde  $S_L$  es la velocidad laminar de la llama,  $d_p$  es el diámetro equivalente de poro, y  $C_p$ ,  $\rho_g$  y  $\lambda_g$  son el calor específico, densidad y conductividad térmica de la mezcla gaseosa respectivamente. Esta relación indica que el frente de llama puede penetrar el medio poroso solo cuando la tasa de liberación de calor es más alta que la tasa de transporte de calor desde la mezcla gaseosa a la fase sólida de la estructura porosa.

Generalmente, las principales características de la combustión estacionaria, sin llama, de gases premezclados en un volumen de medio poroso son:

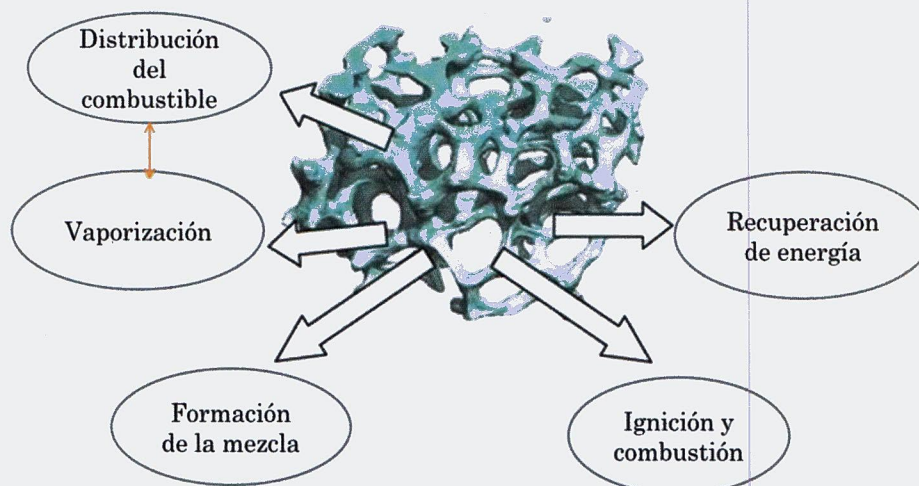
- Combustión a baja temperatura debido a la efectiva transferencia de calor a la fase sólida y debido a su alta capacidad calorífica (reducción de NOx),
- Distribución homogénea de la temperatura en la zona de reacción y , por lo tanto, condiciones controladas de combustión,
- Zona de reacción muy gruesa (en el volumen de los reactores porosos el espesor es cientos de veces mayor que el espesor del frente de llama libre),
- Combustión muy rápida, con una velocidad muchas veces mayor que para llama libre,

- Zona de reacción sin llama (en una escala macroscópica con respecto al reactor MP),
- Combustión completa y muy estable, y condiciones controladas de combustión,
- Niveles de emisiones muy bajas,
- Altos rangos de variación de la potencia térmica
- Alto rango dinámico de modulación de energía (modulación entre la potencia térmica mínima y máxima del orden de 20 y más),
- Amplia gama de relaciones de aire-combustible permite una combustión estable,
- Bajo nivel de ruido de la combustión debido a una combustión controlada,
- Condiciones de formación de la mezcla prácticamente independientes de la microestructura de atomización (en el caso de combustibles líquidos).

Es así como los resultados anteriores, sugieren que la tecnología de combustión en medios porosos es prometedora para el desarrollo futuro de todos los campos donde se requiera una eficiencia en los procesos de combustión y bajas emisiones.

## 2.5. Aplicaciones de un medio poroso en los procesos de un motor

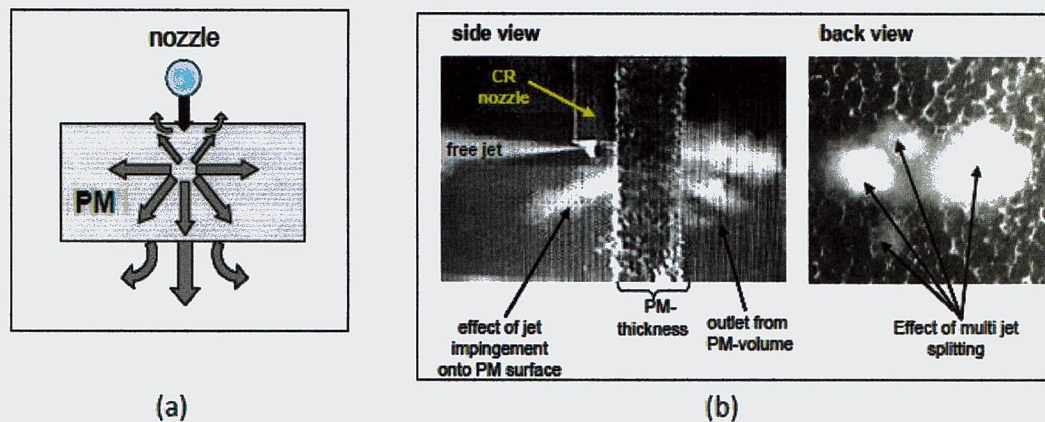
Las características mencionadas en el Capítulo 2.3, hacen que los medios porosos tengan un gran potencial para aplicarse en los distintos procesos de un motor de combustión interna. Estos procesos se muestran en la Figura 2.10 [8]:



**Figura 2.10. Procesos de MCI apoyados por la Tecnología de Medio Poroso [Elaboración propia]**

### 2.5.1. Inyección y distribución del combustible en el volumen del MP

Como en un motor convencional la mezcla entre el combustible líquido y el aire no es instantánea ni homogénea, las propiedades del medio poroso pueden permitir mejorar la distribución del combustible y homogenización de éste a través del volumen del MP. Como se ilustra en la Figura 2.11, el efecto de división por las paredes y conjunciones de la estructura porosa, genera una especie de multi-jet, permitiendo una rápida formación de la mezcla. Los parámetros de inyección se vuelven críticos para lograr una efectiva distribución a través del medio poroso, estos son: presión de inyección, ángulo del spray y posición del inyector respecto al MP.



**Figura 2.11 (a) Esquema de la distribución del combustible en el volumen MP;(b) Efecto del choque de chorro sobre la superficie MP [1]**

### 2.5.2. Vaporización del combustible

Este proceso se lleva a cabo dentro del medio poroso. Gracias a la gran capacidad calorífica del material MP, gran área superficial y excelentes propiedades de transferencia de calor en el volumen MP, la vaporización del combustible se lleva a cabo de forma rápida y completa. Se deben considerar dos condiciones del proceso distintas: vaporización en presencia y no de oxígeno, es decir, para mezclas pobres y ricas en combustible.

### 2.5.3. Formación de la mezcla y homogenización

Las características únicas de la estructura porosa ayudan a una efectiva mezcla del combustible con el aire y su posterior homogenización dentro del volumen del MP.

#### 2.5.4. Ignición térmica 3D en MP

La temperatura de ignición es por definición, la temperatura mínima, a presión atmosférica, a la que un combustible (sólido, líquido o gas) en contacto con el aire, arde espontáneamente sin necesidad de una fuente de calor exterior. A esta temperatura la energía de activación es superada dando lugar a la reacción de combustión, ya está determinada por las propiedades térmicas de la mezcla y su composición. Si la temperatura del medio poroso es al menos igual a la temperatura de ignición, entonces existe una nueva clase de ignición, caracterizada por un auto-encendido tridimensional en todo el volumen. Como se explicó en capítulos anteriores, este concepto se conoce como Ignición térmica 3D en MP.

#### 2.5.5. Liberación de calor en el volumen MP

Luego de la ignición prosigue una liberación de energía en forma de micro-llamas dentro del volumen del MP (combustión sin llama con respecto a la frontera del volumen del MP). De esta forma, la combustión ocurre simultáneamente en todo el volumen MP, permitiendo una temperatura de combustión homogénea. Si la carga combustible- aire logra homogeneidad dentro del volumen posibilita que la combustión también sea homogénea en todo el volumen del medio poroso, casi independiente de la mezcla entrante (relación aire-combustible, RAC) dando paso a un perfil de temperatura más uniforme [9-10].

#### 2.5.6. Recirculación de energía en el ciclo del motor

Con la recuperación de la energía residual de los GE, existe una recirculación de la energía de combustión (Fig. 2.12). Esto puede influir significativamente en las propiedades termodinámicas de la carga en el cilindro y puede modificar sus límites de inflamabilidad (ignición). Esta recirculación de energía se puede realizar bajo diferentes presiones y temperaturas durante el ciclo del motor. Además, la recuperación de calor se puede utilizar para controlar el nivel de temperatura de la combustión.

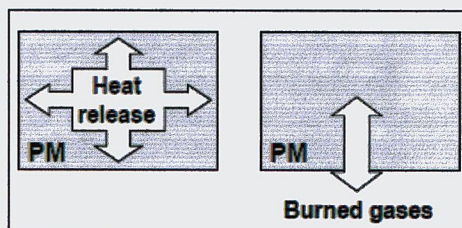


Figura 2.12. Acumulación de calor y recirculación en el MP [1].

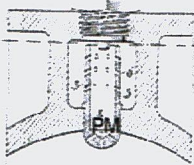
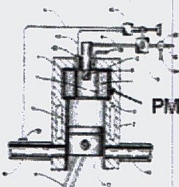
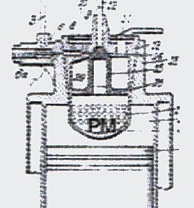
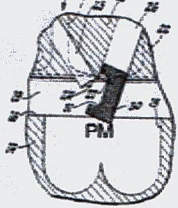
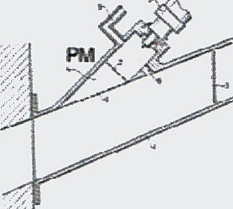
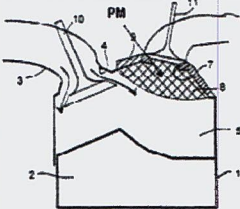
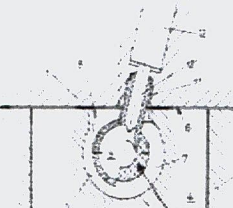
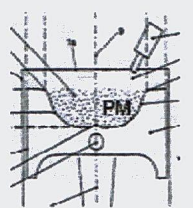
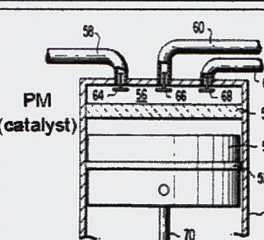
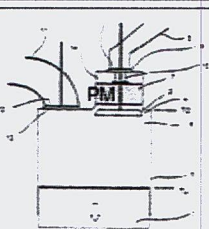
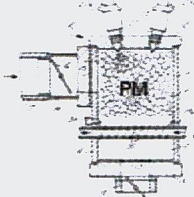
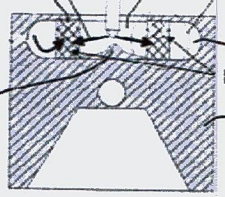
## **2.6. Panorama General de las aplicaciones de la Tecnología de MP**

Uno de los usos más antiguos de medios porosos en un motor es disponerlos en la entrada del múltiple de admisión para filtrar el aire que aspira el motor, principalmente de polvo en suspensión y reducir en lo posible el ruido en la admisión. Ejemplos son: filtro húmedo, filtro con baño de aceite y filtro de papel seco. Otra aplicación donde encontramos medios porosos es el canister o filtro de carbón activo, el cual absorbe los vapores de gasolina emanados por su alta volatilidad y relativa facilidad de evaporarse a temperatura ambiente.

Otra aplicación de la tecnología de medio poroso es su uso en el múltiple de escape del motor. Se refiere a sistemas de pos-tratamiento de los gases de escape, en especial convertidores catalíticos y filtros de partículas. Existen variados sistemas de tratamiento en los que se puede apreciar la aplicación de medios porosos inertes y no inertes, en donde los gases de escape atraviesan la estructura porosa para ser tratados y transformados en gases inocuos. Ejemplos de éstos son: catalizador con toma de aire intermedia, catalizador de tres vías, catalizador de oxidación Diesel, catalizador acumulador de  $\text{NO}_x$ , reductor catalítico selectivo (SCR), filtro de partículas Diesel de flujo cerrado (Wall-flow), filtro de partículas de flujo parcial (p-DPF), y filtro de partículas con recubrimiento catalítico.

Por otro lado, existen una serie de conceptos en la literatura que describen la aplicación de la tecnología de MP (ver Tabla 2.2) con el objetivo de recuperar el calor del proceso de combustión, y con esto mejorar la eficiencia térmica del motor [11], pero no para influenciardirectamente la formación de la mezcla o el proceso de combustión como se pretende con esta investigación.

**Tabla 2.2. Aplicaciones y patentes más importantes concernientes a MP en motores [2].**

	<p>H.F. Leissner: "Internal-Combustion Engine" US Patent No. 1,260,408 (1918)</p>		<p>J.C. Firey: "Porous burner Diesel engine" US Patent No. 4, 381,745 (1983)</p>
	<p>Device for mixture formation of heavy oil for internal combustion engine) German Patent No. 481754 (1929)</p>		<p>R.M. Siewert: "Catalytic late direct injection spark ignition engine" US Patent No.4,480,613 (1984)</p>
	<p>Method and device for fuel preparation for a spark ignition engine Patent DE 2 306 362 (1973)</p>		<p>F. Durst, M. Weclas: "Method and device for converting heat into work" German Patent No.197 53 407 (1997)</p>
	<p>W. Müller:Piston engine) Patent DT 24 16 804 (1974)</p>		<p>E. Pott: "Verbrennungsmotor" DE 198 57 071 A1 (1998)</p>
	<p>W.C. Pfeffler: "Catalytic engine" US Patent No. 3,923,011 (1975)</p>		<p>M. Weclas: "Method of mixture formation for application to internal combustion engine" DE 198 13 891 (1998)</p>
	<p>G. Bernecker: "Carburetor" US Patent No. 4,103,658 (1978)</p>		<p>M. Weclas: "Method for combustion of fuel and combustion chamber" German Patent Application No. 101 35 062.7 (2001)</p>

## 2.7. Aplicación de medios porosos para la formación de la mezcla y la combustión en MCI.

Existen dos nuevos conceptos que utilizan la tecnología de medio poroso para permitir la combustión homogénea en condiciones de funcionamiento del motor variable:

1. Sistema de preparación de mezcla que puede cambiar su modo de combustión de acuerdo a las condiciones operativas reales del motor para mantener las condiciones de combustión homogénea, llamado **Sistema de combustión inteligente (multi-modo)** [8] (Ver Figura 2.13(a)).
2. Sistema que puede operar independientemente de las condiciones de funcionamiento del motor que permiten las condiciones para una combustión homogénea desde muy baja a plena carga, llamado **Sistema de combustión en Motor-MP (mono-modo)** propuesto por F. Durst y M. Weclas [10] (Ver Figura 2.13(b)).

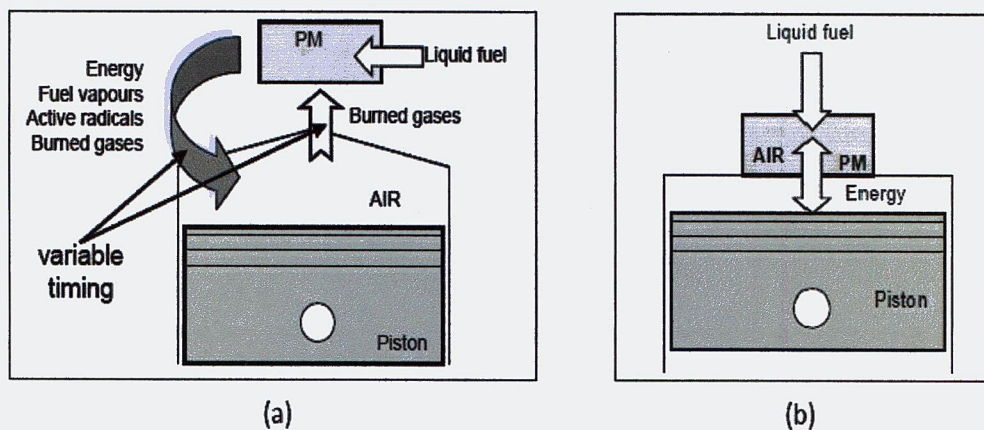


Figura 2.13. (a) Concepto de Motor Inteligente basado en MDI; (b) Concepto de Motor-MP [8].

De estos dos nuevos conceptos, el que más se podría asemejar a las condiciones y del caso a desarrollar, es el concepto de Motor-MP. Los siguientes capítulos, 2.7.1 y 2.7.2, explican dos aplicaciones de medios porosos en la cámara de combustión, similares a las configuraciones a investigar en este proyecto.

### 2.7.1. Concepto de Motor-MP: MCI con un reactor poroso para la formación de la mezcla y combustión homogénea

El motor-MP se define como un motor de combustión interna en donde se lleva a cabo un proceso de combustión completa y homogénea dentro del volumen de un medio poroso, evitando la formación de las principales emisiones contaminantes y aumentando la densidad

de potencia. Para hacer esto posible, los siguientes procesos individuales de PM-motor se deben realizar dentro del volumen MP: recuperación de calor interno, inyección de combustible, vaporización del combustible, mezcla del combustible con el aire, homogenización de la carga, auto-ignición térmica-3D y una combustión homogénea. En el PMS (punto muerto superior), el volumen es igual al volumen del MP, creando la cámara de combustión del motor. Así, fuera del volumen MP, en el cilindro, no hay combustión.

Respecto a la definición anterior, el motor-MP puede ser clasificado, con respecto al momento de recuperación de calor en el motor como: motor con contacto periódico entre el MP y el gas (cámara abierta), y motor con contacto permanente entre el MP y el gas (cámara cerrada). En ambos casos, durante la carrera de escape una parte de la entalpía de los gases quemados en el cilindro se transfiere al medio poroso, éste lo acumula en forma de calor, para luego en un nuevo ciclo, transferirlo al aire frío de admisión que pasa a través del medio poroso, provocando así un aumento en la entalpía del aire.

Otro criterio de clasificación es según la posición de la cámara de combustión-MP:

- Reactor MP en la cabeza del pistón, el MP se mueve con el pistón (Fig. 2.14, izquierda).
- Reactor MP en la culata, donde permanece sin movimiento (Fig. 2.14, centro).
- Reactor MP en el cilindro, el movimiento es relativo al pistón (Fig. 2.14, derecha).

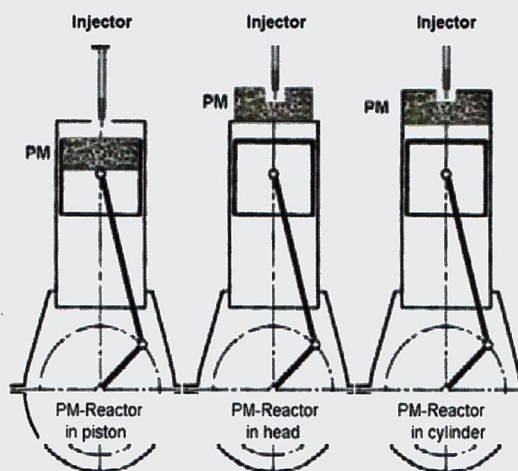
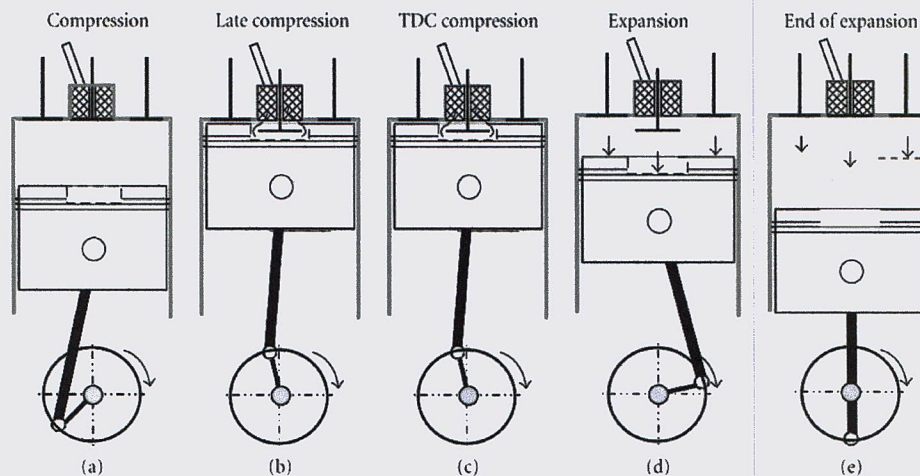


Figura 2.14. Distintas posiciones del reactor MP [2]

### 2.7.1.1. Motor-MP con cámara MP cerrada

En este sistema el medio poroso está ubicado en la culata del motor rodeando la tobera del inyector creando una cámara que mantiene un contacto periódico con el cilindro (Figura 2.15) mediante la acción de una válvula que controla el tiempo en que ésta permanece cerrada durante las carreras de escape, admisión y compresión, disponiendo de un largo período para que el combustible sea inyectado y vaporizado dentro de la cámara del medio poroso.

Al final de la expansión, la válvula de la cámara-MP se cierra y el combustible se inyecta en su volumen (2.15e). Esta cámara es de baja presión, y la inyección de combustible y su posterior evaporación se llevan a cabo durante la carrera de expansión, admisión y compresión (2.15a). Antes de que el pistón llegue al PMS en la carrera de compresión (2.15b), la válvula de la cámara-MP se abre, y el aire comprimido del cilindro fluye hacia el volumen ya caliente del MP, el cual contiene los vapores de combustible. Se produce una mezcla rápida de la carga gaseosa (2.15c), dando paso al auto-encendido, simultánea en todo el volumen MP (2.15d).



**Figura 2.15. Principio de funcionamiento del motor-MP con cámara cerrada**

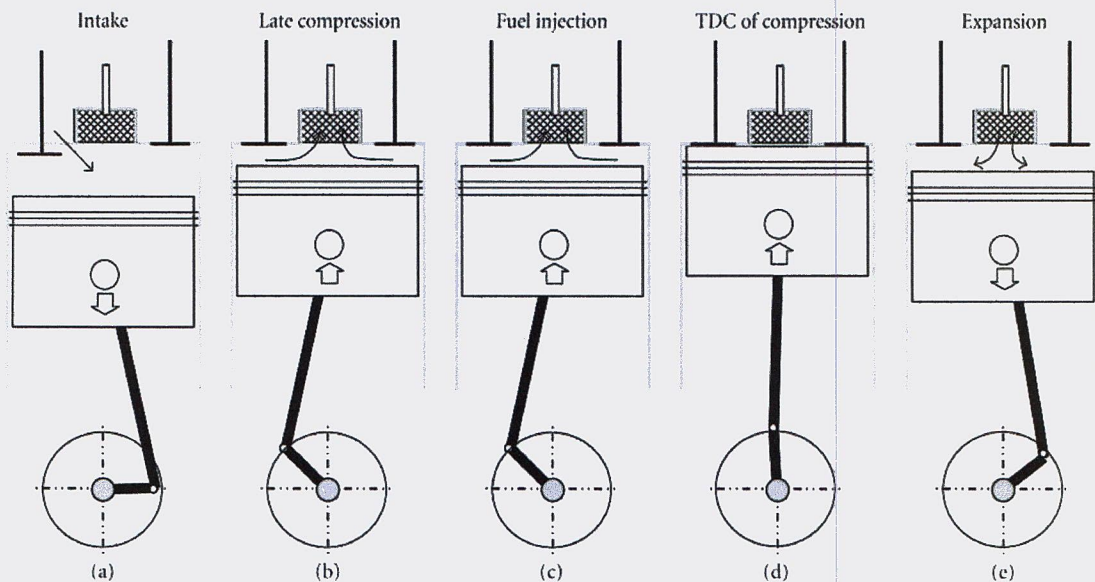
En este caso, se cumplen las tres condiciones para que ocurra una combustión homogénea:

- Homogeneización de la mezcla en el volumen del MP.
- Auto-encendido tridimensional en el volumen del MP.
- Combustión volumétrica con un campo homogéneo de temperatura en el interior del MP.

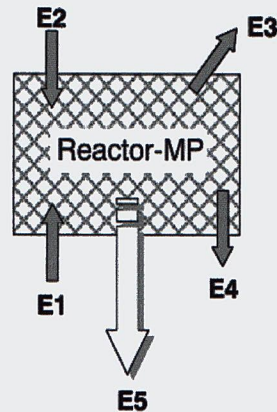
Cabe mencionar que el medio poroso actúa como un condensador de calor, controlando así el nivel de temperatura de la combustión.

### 2.7.1.2. Motor-MP con cámara MP abierta

Este sistema se caracteriza por mantener un contacto permanente entre el cilindro y el MP, el cual se ejemplifica asumiendo que la cámara de combustión MP también va ubicada en la culata del motor, como se muestra en la Figura 2.16. Durante la carrera de admisión existe una débil influencia del medio poroso sobre las condiciones termodinámicas del aire dentro del cilindro (Figura 2.16a). Luego al inicio de la carrera de compresión, solo una pequeña cantidad de aire está en contacto con el MP caliente. Este proceso de intercambio de calor (compresión no adiabática) aumenta a medida que continúa la compresión (Figura 2.16b), encerrando el aire en el volumen interior del MP hasta llegar al PMS. Antes de llegar al PMS, el combustible se inyecta dentro del volumen poroso (Figura 2.16c), y debido al calor acumulado del proceso de liberación de calor del ciclo anterior, resulta una rápida vaporización y mezcla con el aire dentro de la estructura del MP. Seguido de esto, la mezcla se auto-enciende volumétricamente (2.16e), caracterizándose por una distribución homogénea de la temperatura en la zona de reacción. Aquí, el balance energético en el reactor poroso define las condiciones termodinámicas del ciclo del motor (Fig. 2.17). Continúa la carrera de expansión transformando la energía química en trabajo mecánico. Nuevamente se dan todas las condiciones para una combustión homogénea.



**Figura 2.16. Principio de funcionamiento del motor-MP con cámara abierta**

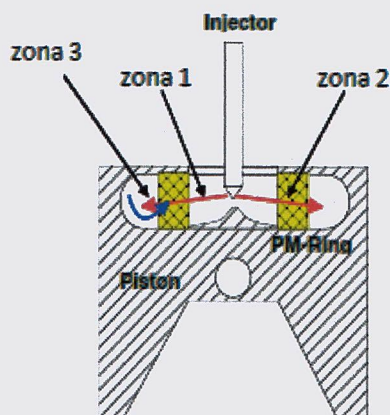


**Figura 2.17. Balance de energía de un reactor poroso en un motor-MP con cámara abierta: E1=energía del trabajo de compresión; E2=energía del combustible; E3=pérdidas de energía; E4=energía desde el MP al aire; E5= energía de los gases de escape. [2]**

### **2.7.2. Concepto de un sistema de combustión de dos etapas para motores diesel de inyección directa.**

Otra aplicación de la tecnología de medios porosos en MCI para la formación de la mezcla y la combustión en motores es el concepto desarrollado por M. Weclas en 2001, llamado “Sistema de combustión de dos etapas”, aplicado a un motordiesel de inyección directa, en donde un anillo poroso dispuesto en la cavidad superior del pistón divide la cámara de combustión en tres zonas y el proceso de combustión en dos fases de acuerdo al movimiento del pistón (Figura 2.18):

- Zona 1: volumen formado por el diámetro interno del anillo poroso.
- Zona 2: volumen del anillo poroso.
- Zona 3: volumen libre entre la parte exterior del anillo poroso y la cavidad superior del pistón.
  
- Fase I: En la carrera de compresión, entre el comienzo de la inyección de combustible y el PMS
- Fase II: Luego de llegar al PMS, en la carrera de expansión.
- Para el análisis de la operación de un motor utilizando el sistema de combustión de dos etapas se consideran dos rangos de funcionamiento: funcionamiento a carga parcial y funcionamiento a plena carga [2].



**Figura 2.18. Sistema de combustión de dos etapas con un anillo poroso en la cavidad superior del pistón [2]**

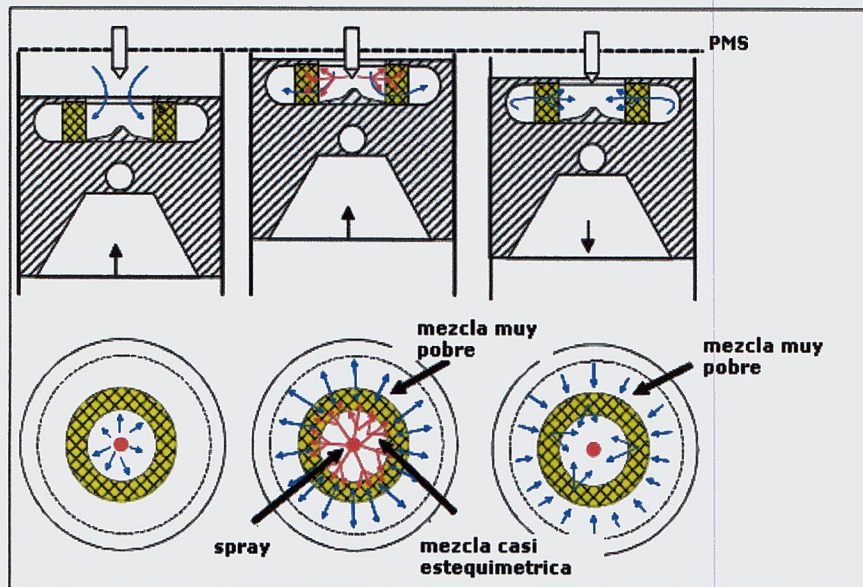
### **2.7.2.1. Condición de operación a carga parcial**

Bajo condiciones de operación de carga parcial, el combustible es inyectado en la cámara de combustión con un impulso relativamente bajo (pequeñas cantidades de combustible inyectadas a baja presión: gasolina 14-20[bar], diesel 145-395[bar]), como se muestra en la Figura 2.19. Debido a la geometría de la cámara de combustión, del medio poroso y las condiciones de inyección seleccionadas, el combustible al ser inyectado penetra en toda la zona 1 hasta llegar al anillo poroso (zona 2) para ser distribuido dentro de todo su volumen. Dependiendo de la forma y espesor de la estructura porosa y de los parámetros de inyección, la zona 3 se llena con aire o con mezcla muy pobre. Todo esto ocurre durante el movimiento ascendente del pistón hacia el PMS, en la carrera de compresión (Fase I).

Las condiciones de formación de la mezcla en el material poroso son favorables para la correcta vaporización del combustible tras una intensa mezcla con el aire (condiciones de pre-encendido y encendido). El proceso de ignición de la mezcla es *al menos en parte* estimulada por el calor que absorbe el anillo. La mezcla es espacialmente encendida y se quema (en su mayoría) en las zonas 1 y 2.

Parte de la energía liberada es acumulada en el medio poroso, reduciendo las temperaturas locales. Durante la segunda etapa de la combustión, durante el movimiento descendente del pistón (fase de expansión temprana), un fuerte flujo de gas fluye desde la zona 3 hacia la zona 1, atravesando el medio poroso. Mientras el flujo pasa a través del medio poroso, la mezcla se calienta, y se produce una gran turbulencia del flujo. Siendo la mezcla de alta

concentración en oxígeno, mejora significativamente la segunda etapa de combustión en la zona 1. Así, las condiciones de combustión en la zona 1 permiten que las emisiones de óxidos nitrosos sean bajas y generan excelentes condiciones para la oxidación de CO, HC y Hollín [2].



**Figura 2.19. Combustión de dos etapas a carga parcial [2]**

### 2.7.2.2. Condiciones de operación a plena carga

En condiciones de plena carga, el combustible es inyectado dentro de la cámara de combustión con un alto impulso (grandes cantidades de combustible inyectadas a alta presión), como se muestra en la Figura 2.20. Bajo estas condiciones, y gracias a una apropiada geometría de la cámara de combustión y del material poroso utilizado, el combustible inyectado penetra toda la zona 1 atravesando el anillo poroso (zona 2), hasta llegar a la zona 3. Dependiendo de la forma y grosor del anillo poroso, además de los parámetros de inyección, la zona 3 se llena con mezcla relativamente rica, todo esto mientras el pistón asciende hacia el PMS en la carrera de compresión. Las condiciones para la formación de la mezcla en el medio poroso son muy ventajosas para una eficiente vaporización del combustible bajo una intensa mezcla con el aire (condiciones de pre-encendido y encendido).

El combustible que atraviesa al medio poroso se distribuye espacialmente por el volumen del anillo, para luego, al menos parcialmente, evaporarse y mezclarse con el aire. El resultado es una mezcla rica casi homogénea presente en la zona 3 y en el volumen del medio poroso. Se espera que no quede ninguna película de combustible en las paredes del cilindro (zona 3), lo que conlleva a una reducción de formación de hollín. El proceso de ignición de la mezcla es *al menos en parte* estimulada por el calor que absorbe el anillo. Durante la segunda etapa de la combustión, al descender el pistón (fase de expansión temprana), un fuerte flujo de gas (la mayoría quemado) fluye desde la zona 3 hacia la zona 1, atravesando el medio poroso. Durante este flujo a través del material poroso la mezcla es fuertemente turbulenta. Paralelo, una segunda etapa de combustión se produce en la zona 1: aquí la mezcla tiene una concentración relativamente alta de oxígeno, mejorando la calidad de dicha combustión. Nuevamente las condiciones de combustión en la zona 1 permiten que las emisiones de  $\text{NO}_x$  sean bajas y excelentes condiciones para la oxidación de CO, HC y Hollín [2].

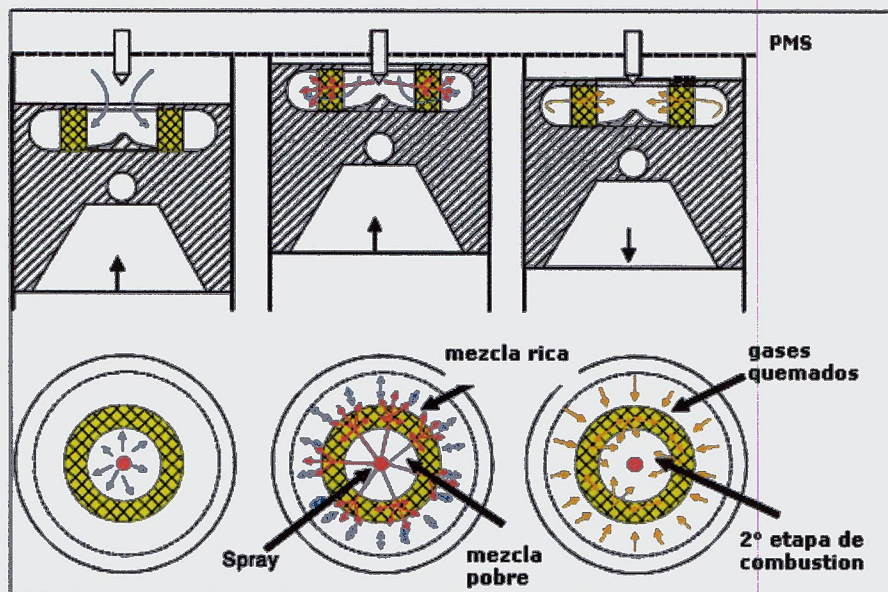


Figura 2.20. Combustión de dos etapas a plena carga [2]

En resumen podemos decir que las principales características que posee el sistema de combustión de dos etapas son:

1. El sistema funciona bajo dos condiciones caracterizadas por el funcionamiento a carga parcial y a plena carga, es decir, una pequeña cantidad de combustible inyectado a baja presión y una gran cantidad de combustible inyectado a alta presión.
2. El medio poroso divide la cámara de combustión en tres zonas, influyendo significativamente en la distribución del combustible, su vaporización, mezcla con el aire y la generación de gran turbulencia durante el flujo del gas a través del anillo poroso.
3. Durante el proceso de combustión, el material poroso influye significativamente en la temperatura de la zona ya que acumula parte de la energía liberada y mejora el autoencendido desde las paredes calientes del anillo.
4. Generalmente el sistema opera de tal manera que las condiciones de mezcla, tales como mezcla rica (en un volumen libre) y mezcla pobre (en un volumen libre) y también cualquier composición de mezcla en el medio poroso, son alcanzables. La combustión de este tipo de mezclas permiten obtener bajas emisiones de  $\text{NO}_x$  y hollín.
5. En general, independiente de las condiciones operacionales, la combustión se lleva a cabo en dos etapas: etapa temprana: desde el final de la compresión hasta el PMS (movimiento ascendente del pistón); y etapa tardía: a partir del PMS hasta el final del proceso de combustión (movimiento descendente del pistón).

La transición entre las dos etapas de la combustión está ligada a un fuerte flujo de gas a través del anillo poroso generando gran turbulencia y mejorando de manera determinante el mezclado de los gases. En ambas etapas de la combustión el anillo poroso controla (en parte) los procesos de encendido y combustión.

## **2.8. Avances experimentales de la tecnología de MP aplicado a MCI**

En relación a un proceso de combustión limpia y de alta eficiencia, la aplicación de la Tecnología de Medios Porosos para motores de combustión interna, a pesar de que existen en la literatura resultados experimentales [4, 9, 12 – 14], aún faltan experiencias que verifiquen el real funcionamiento de los materiales porosos dentro de la cámara de combustión. Esta aplicabilidad depende fuertemente de la disponibilidad de adecuados materiales de alta temperatura y las correspondientes estructuras porosas que tienen que ser desarrolladas. Aun así, esta técnica presenta gran potencial para mejorar la eficiencia del motor y una reducción significativa de las emisiones de combustión. A continuación se presentan los resultados de dos trabajos realizados por investigadores de distintos países, que demuestran esta teoría.

➤ **AUTORES: Miroslaw Weclas y Franz Durst, Alemania [9]**

El año 2000, estos investigadores presentaron el primer trabajo que aplica empíricamente medios porosos para mejorar el proceso de combustión de un motor de combustión interna, sin grandes modificaciones de un motor de inyección directa mono cilíndrico de 15 HP de potencia, enfriado por aire. El montaje del MP es en la culata, entre la válvula de admisión y escape (ver Fig. 2.21), y el proceso termodinámico se lleva a cabo como un motor MP con la cámara-MP abierta (Capítulo 2.7.1.2). Esto, disminuye levemente la razón de compresión a 16,8. Además, el sistema de inyección es reemplazado por un sistema common-rail, considerando la adaptación de los accesorios necesarios (bomba de alta presión, control automático de inyector con un sistema de enfriamiento) para su desarrollo, y por otro lado, se reemplaza el pistón por uno plano (“flat piston” en Fig. 2.21).

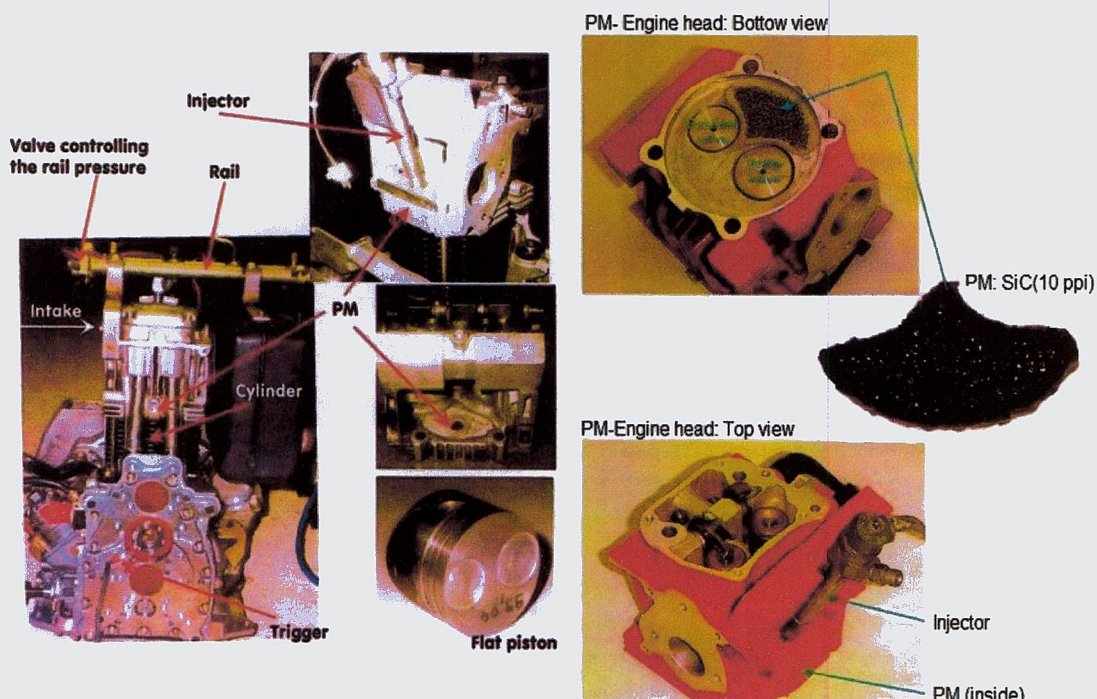


Figura 2.21. Fotos experimento de un motor MP (Autor: M. Weclas) [9]

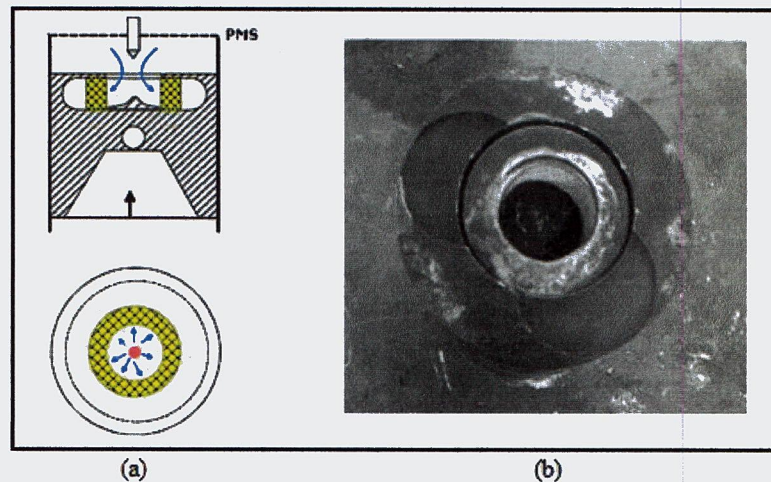
**Resultados:**

	NO <sub>x</sub> [mg/kWh]	CO [mg/kWh]
Motor convencional	1000 - 3000 ( $\lambda=4 - 7$ )	5000 - 6000
Motor - MP	110 - 340 ( $\lambda=1 - 3,3$ )	< 1000

- ✓ Reducción de emisiones: NO<sub>x</sub> debido a que la combustión se lleva a cabo a menor temperatura y de forma homogénea; al igual que las emisiones de CO y HC a causa de una completa vaporización y combustión. También hay una reducción de material particulado (no cuantificado en el estudio).
- ✓ Menor ruido de combustión debido a la reducción del peak de presión (no cuantificado en el estudio).

➤ **AUTORES:** *ChidambaramKannan y PackirisamyTamilporai, Departamento de Ingeniería Automotriz, Universidad de Sri Venkateswara, India.[13]*

En esta investigación se selecciona un material poroso (18% de porosidad), el cual comprende una geometría en forma de anillo ubicado en la parte superior de la cavidad del pistón (Fig. 2.22) para lograr un proceso de combustión homogénea. Se utiliza un motor diésel de 4,4 kW de potencia, mono cilíndrico, 4 tiempos, con sistema de inyección directa, R.P.M. constante (1500 rpm), aspiración natural, y refrigerado por aire, el cual es sometido a un freno dinámico eléctrico para poder determinar el par de torsión y la velocidad mediante un sensor de velocidad electromagnético acoplado al dinamómetro. Todas las pruebas, sin y con MP, se realizaron bajo condiciones de estado estacionario. Sin embargo, la máxima carga del motor MP se limita a un 50% debido a una limitación impuesta por la resistencia del material cerámico.



**Figura 2.22 (a) Esquema de la configuración del experimento (b) Fotografía de la implementación del material cerámico en la cabeza del pistón [13]**

### **Resultados:**

- ✓ **Consumo específico de combustible v/s carga (Fig. 2.23):** el MP causa una reducción significativa del volumen de la cámara de combustión, y debido a que el motor es de aspiración natural, la eficiencia volumétrica disminuye en un 2-3% comparada con la del motor convencional. Esto puede causar un aumento del consumo específico de combustible. Sin embargo, el aumento del consumo de combustible también puede ser provocado por el intercambio de gases y el proceso de combustión. Si la cantidad de aire acumulada en el volumen de la cámara de combustión se pudiera mantener mediante

algún método (rendimiento volumétrico constante), se esperaría que la diferencia entre el motor convencional y el motor MP sea insignificante.

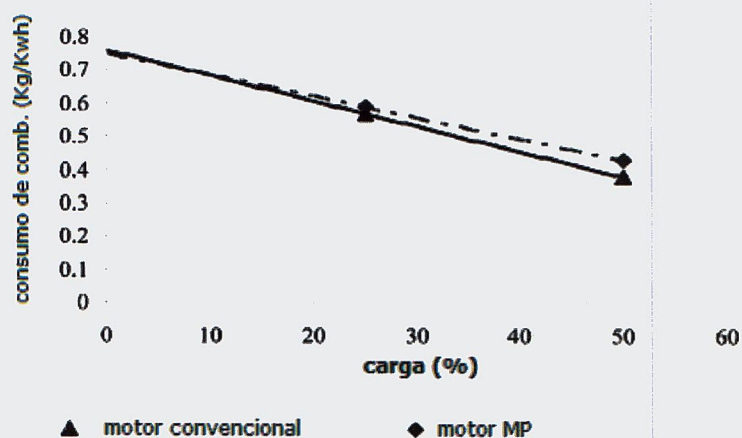


Figura 2.23. Efectos del medio poroso sobre el consumo específico de combustible [13]

- ✓ **Eficiencia térmica al freno v/s carga (Fig. 2.24):** en cargas ligeras, el motor con medio poroso produce una eficiencia térmica al freno casi igual al del motor convencional. A medida que se aumenta la carga, el motor con medio poroso arroja una eficiencia térmica al freno inferior a la del motor convencional como resultado del mayor consumo específico de combustible.

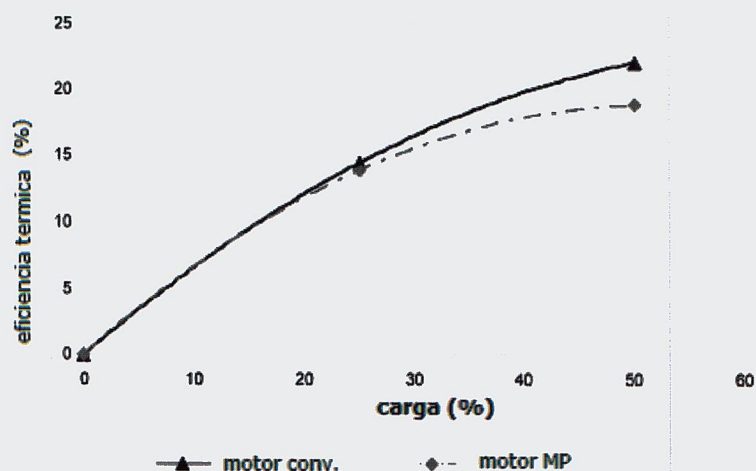


Figura 2.24. Efectos del medio poroso en la eficiencia térmica [13]

- ✓ **Hidrocarburos no quemados (Fig. 2.25):** el motor con MP muestra una mejora en las emisiones de hidrocarburos no quemados. Esto es causado por la vaporización extremadamente rápida y completa del combustible inyectado en el interior del MP, además debido a una combustión completa.

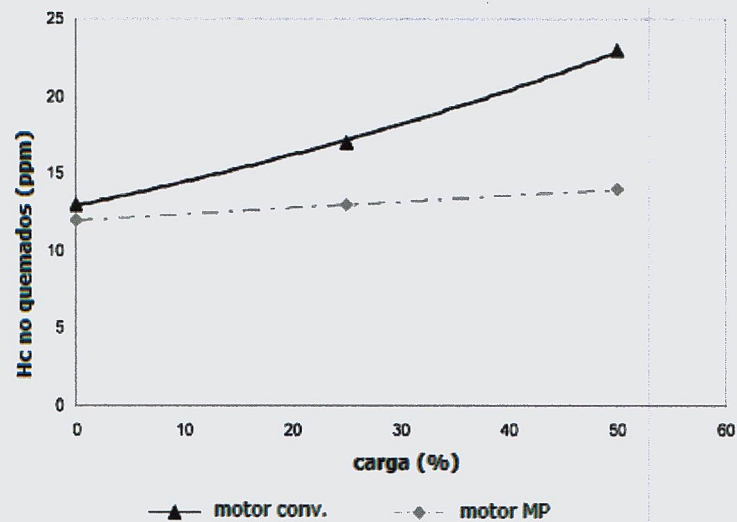


Figura 2.25. Efectos del medio poroso sobre los Hc no quemados [13].

- ✓ **Emisiones de CO (Fig. 2.26):** Se observa que el motor con MP produce menos emisiones de CO, debido a las condiciones de temperaturas homogéneas en el interior del cilindro durante todo el proceso de combustión.

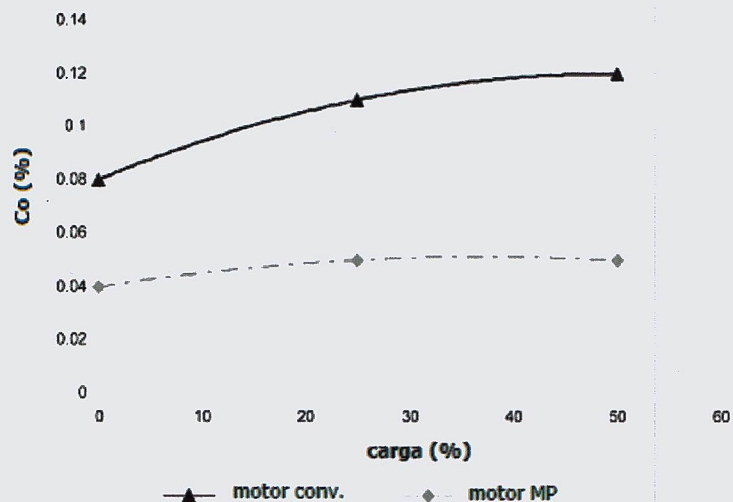
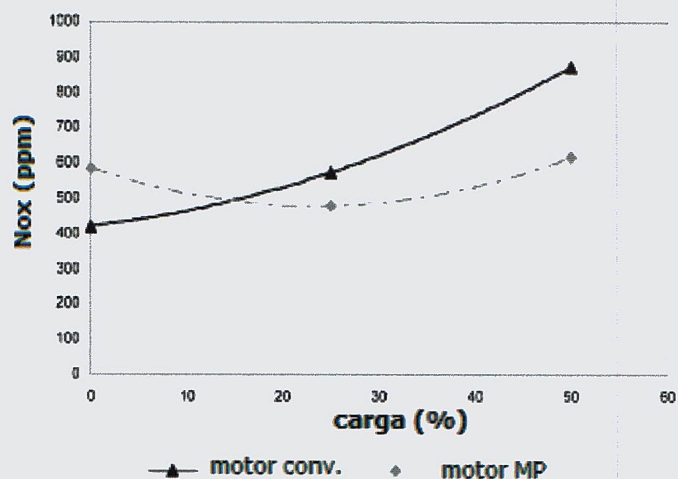


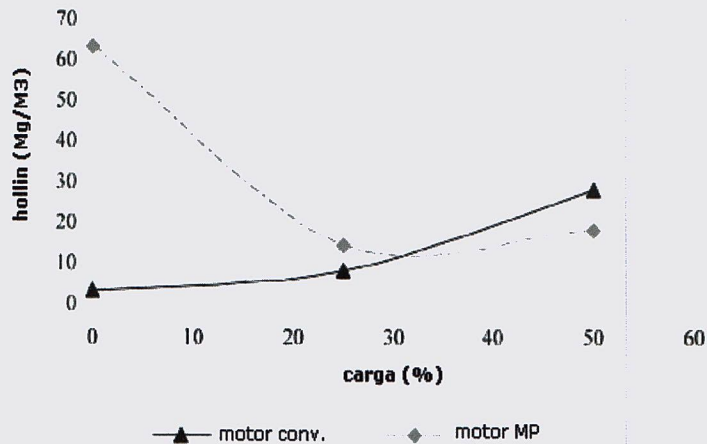
Figura 2.26. Efectos del medio poroso en las emisiones de CO [13].

- ✓ **Emisiones de NO<sub>x</sub>(Fig. 2.27):** el adecuado diseño del motor con medio poroso permite una temperatura de combustión controlada, resultando en un bajo nivel de emisiones de NO<sub>x</sub>. Esto se logró principalmente debido a la presencia de la fase sólida del medio poroso durante la combustión, impidiendo que el calor de combustión se transfiera completamente a los gases de escape, evitando los máximos de temperatura. En el bajo rango de carga, las emisiones de NO<sub>x</sub> fueron superiores en el motor MP que en el motor convencional, debido quizás a que a bajo régimen el medio poroso no absorbe suficiente calor de la combustión. En contraste, para altas cargas se observa bajas emisiones de NO<sub>x</sub> en el motor MP. Esto debido al hecho de que el medio poroso puede absorber calor desde la zona de reacción y que más tarde puede ser utilizado para la vaporación completa del combustible líquido inyectado.



**Figura 2.27. Influencia del medio poroso en las emisiones de Nox [13]**

- ✓ **Emisiones de hollín (Fig. 2.28):** en el motor con medio poroso se puede apreciar que a menor rango de carga parcial, la emisión de hollín es mayor en comparación con el motor convencional, esto como resultado de la ineficaz evaporación del combustible líquido inyectado. En el mismo rango, las emisiones de CO e hidrocarburos (HC) se mostraron más bajas. A medida que se aumenta la carga, la emisión de hollín disminuye, a pesar del hecho de que las emisiones de HC y de CO se elevaron, ya que el calor absorbido por el medio poroso se utiliza para la efectiva evaporación del combustible líquido y su porosidad facilita que la mezcla aire – combustible sea más homogénea, resultando en una mezcla más homogénea, emanando así menor cantidad de hollín.



**Figura 2.28. Influencia del medio porosos en la emisión de hollín [13]**

A modo de conclusión de los dos trabajos mencionados anteriormente, los valores de emisiones obtenidos a partir de las mediciones realizadas en el motor con medio poroso bajo investigación se resumen a continuación:

- Se observa que el motor MP obtuvo bajas emisiones de óxido nítrico en comparación con el motor convencional debido a las bajas temperaturas de combustión debido a la absorción de calor de la zona de reacción gracias a las características inherentes del material cerámico poroso como su gran capacidad calorífica.
- Las emisiones de CO y HC resultaron más bajas que en el motor convencional, producido por la completa y limpia vaporización del combustible líquido inyectado.
- Disminución de las emisiones de material particulado. En el caso del experimento de Weclas, no hay un registro cuantitativo de estas emisiones, pero en la investigación de Kannan, para alto régimen de carga del motor MP, las emisiones de hollín disminuyen en un 30% app.

### **CAPÍTULO 3. Metodología experimental**

La metodología experimental de esta investigación considera adecuar un motor de combustión interna con un reactor de medios porosos (MP) inserto en el interior de la cámara de combustión de éste, con el fin de apoyar los procesos individuales llevados a cabo dentro de la cámara.

Según lo descrito en elCapítulo2.7, la combustión en el medio poroso se puede lograr mediante la colocación precisa del material en cualquiera de los siguientes lugares: culata, parte superior del cilindro o cavidad del pistón. Con el ánimo de innovar en las aplicaciones descritas en la literatura, se coloca el medio poroso en la cavidad superior del pistón (MP estacionario). Aquí, el movimiento del medio poroso es relativo al movimiento del pistón, y se dice que el MP es no estacionario. Como se explicó en elCapítulo 2.7.1, lo ideal es que el medio poroso ocupe todo el espacio libre de la cámara de combustión, pues de esta forma se logra la ignición 3D-MP con la consiguiente combustión homogénea en todo el volumen. Es de esperar que al ocupar un porcentaje de espacio libre de la cámara de combustión disminuya el volumen de ésta y con esto, la relación de compresión aumente.

Para determinar la incidencia del medio poroso en el comportamiento termodinámico y mecánico del motor, se contempla la medición de los parámetros de operación del motor utilizado, tales como potencia efectiva, torque, consumo específico y emisiones de gases de escape(CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, HC, NO<sub>x</sub> e índice de ennegrecimiento).Se desarrollan las curvas características del motor y gráficos de emisiones.Para los ensayos, el motor se conecta a un freno dinamométrico en un banco de pruebas, y se hace funcionar a plena carga, esto es, 100% de aceleración, primero con el motor sin modificar (Etapa I) para obtener la línea base del motor con los parámetros antes mencionados y luego con el motor modificado con el medio poroso (Etapa II).

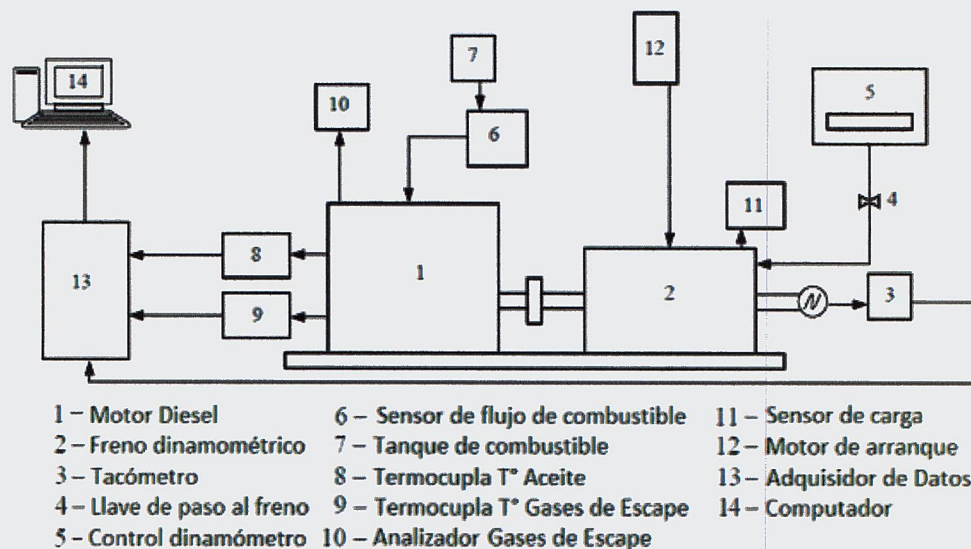


Figura 3.1. Esquema del montaje para los ensayos. [Elaboración propia]

### 3.1. Selección del Motor

Uno de los primeros criterios considerados para la selección del motor es que éste fuese mono cilíndrico, ya que se simplifica el trabajo y tiempo para su modificación e inserción del medio poroso, además de disminuir los factores de incidencia al colocar una estructura porosa dentro de la cámara de combustión. Otro requisito es que el ciclo de funcionamiento sea de cuatro tiempos y de r.p.m. variable para poder estudiarlo bajo distintas condiciones de velocidad de giro del cigüeñal. También es necesario que el MCI seleccionado tenga una potencia adecuada para que el freno dinámico disponible en el laboratorio pueda efectivamente frenar el motor en su rango de operación, y que el operador tenga control del freno y por consecuencia del motor.

Por otro lado, los experimentos que se han registrado son para motores de bajas potencias, con el fin de verificar el comportamiento del medio poroso dentro de la cámara de combustión. Siguiendo con la misma línea, en Chile, fácilmente se pueden encontrar motores hasta 10 HP, pero para dar mayor seguridad a que funcione con el freno disponible se buscó un motor de mayor potencia.

Dentro de la gama de motores mono cilíndricos existentes en el mercado, no se encontraron de potencias mayores a 25 HP. Por economía de recursos, se cotizaron motores chinos, pero al no ser un producto muy confiable se eligió la reconocida empresa Hatz, de Alemania. El

motor adquirido esencendido por compresión, mono cilíndrico, de 4 tiempos, inyección directa, enfriado por aire, rpm variabley arranque manual con manivela(Tabla3.1). Cabe señalar que es un motor similar al utilizado en los experimentos de M. Weclas y F. Durst (Capítulo 2.8).

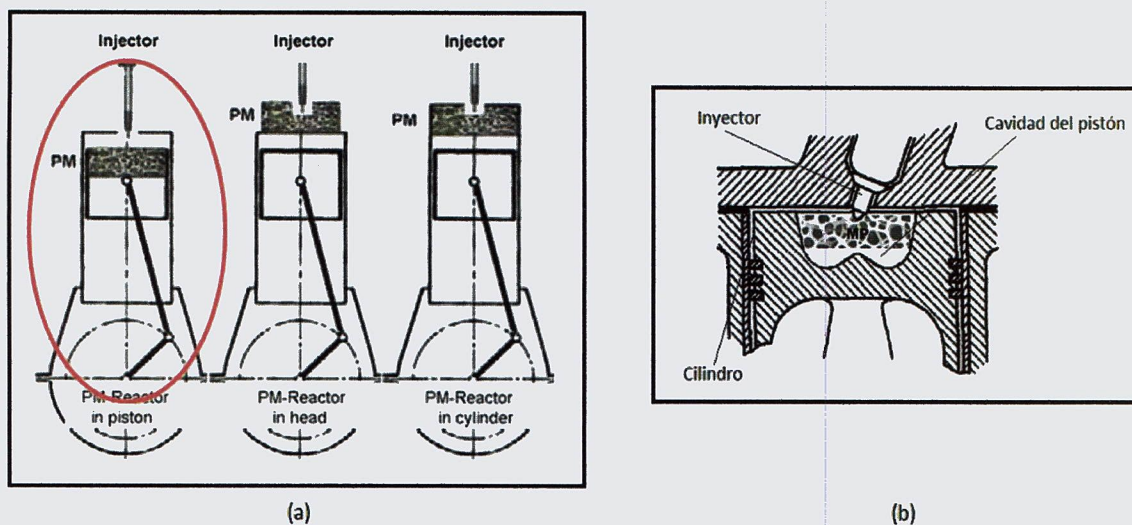
**Tabla 3.1. Especificaciones técnicas del motor HATZ SUPRA 1D81S.**

Número de cilindros	1	
Marca y modelo	Hatz 1D81 S	
Potencia máx. neta al freno según DIN 70020	11 [kW]	
Diámetro x Carrera del cilindro	100 x 15 [mm]	
Cilindrada	0,667 [L]	
Velocidad media del pistón a 3000 r.p.m.	8,5 [m/s]	
Razón de compresión	20,5 [-]	
Comienzo de la inyección	20,0±1[°] antes de PMS	
Presión de inyección	235±8 [bar]	
Consumo de aceite a plena carga	Aprox. 1% del consumo de combustible	
Regulación de revoluciones	Revol. mín. en vacío	Aprox. 800 r.p.m.
	Grado de irregularidad	Aprox. 5% a 3000 r.p.m.

Fuente: Empresa Hatz.

### 3.2. Selección y ubicación del Medio Poroso

El material cerámico poroso se coloca en la parte superior de la cavidad del pistón (ver Figura 3.2 (a)). La vista esquemática del pistón con la aplicación de medio poroso se muestra en la figura 3.2 (b)).



**Figura 3.2. (a) Configuración escogida (en rojo); (b) Esquema de la ubicación del medio poroso en el cilindro. [Elaboración propia]**

Por recomendación de investigadores expertos en medios porosos, en especial, estructuras cerámicas (Anexo A), los medios porosos que se necesitan para esta investigación, se encuentran en el comercio como filtros de espuma cerámica (*ceramicfoamfilter*), utilizados por lo general en hornos de fundición de metales.

Los criterios de selección para el material se basan en sus características físicas, mecánicas y térmicas que mejor encajan para la experimentación en motores, sometido a condiciones de alta presión y temperatura, propias de una explosión dentro del volumen cerrado que es la cámara de combustión. Finalmente, la empresa proveedora es Lanik, de República Checa.

Cabe señalar que los filtros se fabrican en forma cilíndrica o cuadrada, según se requiera. Y debido a la fragilidad de los filtros, el mecanizado resulta imposible con una forma exacta que incluya la concavidad de la cavidad del pistón. Por otro lado, mandar a hacer un pedido especial con la forma exacta implicaba gastos no presupuestados.

Para los ensayos, se eligen filtros de carburo de silicio (67%) y zirconia (96%) en 3 tamaños de poros cada uno: 10, 20 y 30 ppi y distinto grosor. En total 8 filtros de espuma cerámica

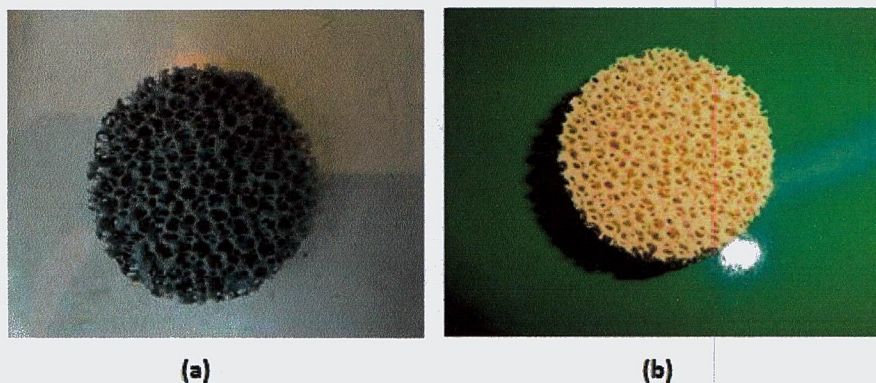
(detalle de orden de compra en anexo B). La composición química y propiedades de estos medios porosos se muestran en la Tabla 3.2.

Además, en el envío se incluye un pegamento para materiales cerámicos, recomendado por el proveedor, para utilizar en la adhesión del medio poroso al pistón. En la Tabla 3.3, se muestran los datos técnicos del pegamento, junto con las indicaciones para su uso.

**Tabla 3.2. Especificaciones técnicas de los medios porosos adquiridos.**

	Unidad	Tipo	
		VUKOPOR S 007 Fig.3.3 (a)	VUKOPOR HT 007 Fig.3.3 (b)
Composición química	%	67%SiC 15% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 18% SiO <sub>2</sub>	96% ZrO <sub>2</sub> 2,7% MgO 1,5% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Cond. térmica – fase sólida	W/m.K	4,9	3
Densidad fase sólida	g/cm <sup>3</sup>	2,35	4,65
Densidad filtro (MP)	g/cm <sup>3</sup>	0,43	0,74
Porosidad	%	82	84
Temp. Máx. de aplicación	°C	1490	1700
Expansión térmica ( $\alpha$ )	K <sup>-1</sup>	6,0*10 <sup>-6</sup>	6,0*10 <sup>-6</sup>
Expansión térmica	%	0,7 % (@1200 °C)	0,6 % (@1200 °C)

Fuente: Empresa Lanik proveedora de los filtros de cerámica, República Checa.



**Figura 3.3. MP adquiridos: (a) Espuma de SiC; (b) Espuma de ZrO<sub>2</sub>.**

**Tabla 3.3. Datos técnicos del adhesivo para el MP**

Nombre	TL HECAL 001
Forma	Pastoso
Color	Marrón
Materiales básicos	Cerámica, aditivos especiales, aglutinantes
Portador líquido	Agua
Densidad del concentrado	1,5 [g/cm <sup>3</sup> ] (a 20°C)
Solubilidad en agua	Carga insoluble
Máxima temperatura de aplicación	930 °C

Fuente: Empresa Lanik proveedora de los filtros de cerámica, República Checa.

**Indicaciones para el uso del pegamento:** Aplicar el pegamento directamente. Se puede agregar agua, pero la cantidad dependerá de la fluidez que se necesite lograr con el pegamento. En el caso de agregar agua, se debe secar en un horno a 130°C, para remover el exceso de agua. De no mezclarse con agua, el secado es a temperatura ambiente.

### 3.3. Caracterización del combustible

El combustible que se utiliza en los ensayos es petróleo pesado 2, más conocido como diesel. La ficha técnica del combustible utilizado, Diesel grado B-1, se muestra en la Tabla 3.4:

**Tabla 3.4. Especificaciones Diesel Grado B-1.**

Las especificaciones nacionales de calidad del Petróleo Diesel, con excepción de la Región Metropolitana, están dadas por el D.S.N°60 publicado en el Diario Oficial el 17 de marzo 2012 y sus posteriores modificaciones (\*).

Requisitos	Unidad	Diesel Grado B-1		Método de Ensayo
		Máximo	Mínimo	
<b>Punto de Inflamación</b>	°C		52	D93, D3828
<b>Punto de Esgurrimiento</b>	°C	-1 (i)		D97, D5950, D5949, D6892
<b>Punto de Obstrucción de Filtro en Frío</b>	°C	Informar		D6371
<b>Agua y Sedimento</b>	%V/V	0.05		D2709
<b>Residuo carbonoso, 10% residuo</b> <i>Según Ramsbottom</i> <i>Micrométodo</i>	%M/M %M/M	0,21 (ii) 0.2		D524 D4530
<b>Cenizas</b>	%M/M	0.01		D482
<b>Destilación</b>  90%	°C(°F)	350	282	D86, D7345

<b>Viscosidad Cinemática a 40°C</b>	cSt	4.1	1.9	D445
<b>Azufre</b>	PPM	15		D5453,D2622, D7039,D4294
<b>Corrosión Lámina de Cobre</b>	N°	1		D130
<b>Número de Cetano</b>	N°		50 (iii)	D976, D613
<b>Densidad a 15°C</b>	Kg/lit	0.85	0.82 (iv)	D4052, D1298
<b>Aromáticos</b>	%M/M	35		D5186
<b>Aromáticos Policíclicos</b>	%M/M	8		D5186
<b>Lubricidad (60°C)</b>	µm	460		D6079
<b>Biodiesel</b>	Informar	(v)		

Fuente: <http://ww2.copec.cl>

(i) Para Regiones XI de Aysen del General Carlos Ibañez del Campo y XII de Magallanes y Antártica Chilena, entre el 15 de abril y el 15 de setiembre de cada año, el valor máximo debe ser -9°C.

(ii) En caso de arbitraje debe usarse el método Ramsbottom.

(iii) Como método práctico puede usarse el Índice de Cetano Calculado(D976) o el número de cetano derivado (D7170), pero en caso de desacuerdo o arbitraje el método de referencia es el del Número de Cetano (D613)

(iv) En las Regiones XI de Aysén del General Carlos Ibañez del Campo y XII de Magallanes y Antártica Chilena, el valor mínimo de la densidad es 0,815 kg/lit

(v) La empresa respectiva deberá indicar el método de ensayo utilizado. Nota: No se debe agregar colorante al Petróleo Diesel

(\*) D.S. N°48 del 24 de abril de 2013 y que rige a partir del 1° de setiembre del 2013 reduciendo azufre a 15 ppm y Aromáticos Policíclicos a 8 ppm para el Diesel Grado B; D.S. N°76 define y separa el Diesel Grado B en Diesel Grado B-1 y Diesel Grado B-2, señalando las especificaciones que debe cumplir este último.

### 3.4. Parámetros a medir y calcular en el motor seleccionado

Durante el funcionamiento del motor, se registran las siguientes variables de operación:

- Potencia Efectiva [kW]
- Momento generado por el motor [Nm]
- Consumo volumétrico de combustible [cm<sup>3</sup>]
- Temperatura del lubricante [°C]
- Temperatura de gases de escape [°C]
- Porcentaje volumétrico de Monóxido de Carbono (CO) en gases de escape
- Porcentaje volumétrico de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>) en gases de escape
- Porcentaje volumétrico de Oxígeno (O<sub>2</sub>) en gases de escape
- Porcentaje volumétrico de Hidrocarburos (HC) en gases de escape
- Porcentaje volumétrico de Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>) en gases de escape
- Índice de ennegrecimiento de los gases de escape
- Condiciones ambientales dentro de la sala de ensayos (temperatura ambiental, humedad relativa y presión atmosférica).

Con la potencia efectiva,  $P_{ef}$ , y el consumo volumétrico,  $Q_{comb}$ , se puede calcular el consumo específico,  $B_e$ :

$$B_e = \frac{Q_{comb} \cdot \rho_{comb}}{P_{ef}} \left[ \frac{g}{kWh} \right] \quad (3.1)$$

Y con este valor la eficiencia global,

$$\eta_{global} = \frac{P_{ef}}{P_{comb}} = \frac{P_{ef}}{\dot{M}_{comb} \cdot PCI_{comb}} = \frac{83,72}{B_e} [-] \quad (3.2)$$

para un poder calorífico del combustible,  $PCI_{comb}$ , de 43000 [kJ/kg].

### 3.5. Banco de pruebas utilizado

Para realizar ensayos en el motor, es necesario contar con una sala de laboratorio que contenga las instalaciones adecuadas, las cuales deben contemplar una serie de elementos tanto para mantener la integridad del motor mientras es objeto de observación como para controlar y monitorear las condiciones de operación del mismo durante el ensayo.

Para ensayar el motor es necesario instalarlo en un banco de pruebas o de ensayos (Figura 3.4 y 3.5). Este consta básicamente de los siguientes elementos:

1. Una **cimentación** que absorbe las vibraciones que se producen debido al funcionamiento del motor.
2. La **Bancada**, cuya misión es soportar el motor.
3. Las **Torretas**, son 3 soportes para montar y fijar el motor en la bancada, así como regular la altura y alinear el motor con el freno.
4. El **Freno dinamométrico hidráulico** que absorbe la potencia desarrollada por el motor, ofreciendo una resistencia al giro de éste, y está provisto de un dispositivo para medir el par motor (celda de carga).
5. La **Transmisión** que permite la conexión freno-motor con una cierta elasticidad y capacidad de absorber desalineaciones.
6. El **Sistema de alimentación de combustible** al motor con instrumentos de medición de consumo (probeta).

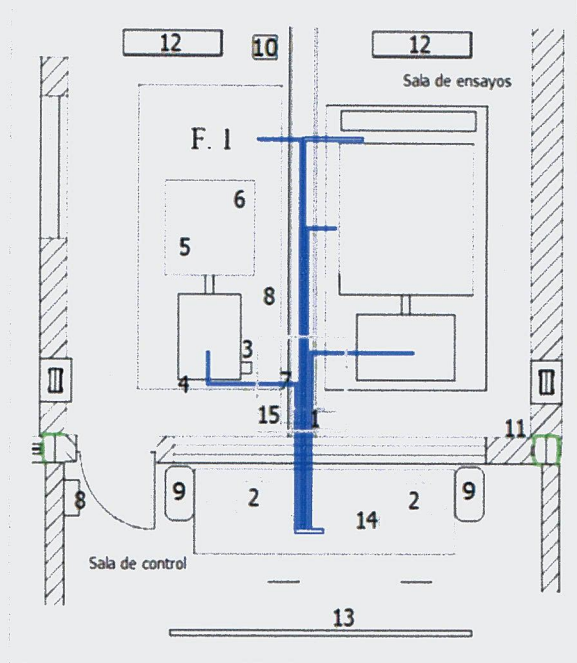
7. **El Sistema de refrigeración del motor.** Al ser un motor refrigerado por aire se utiliza el sistema de ventilación (ventiladores) dirigido hacia las aletas del motor.
8. **Red de agua.** El calor producido por la energía mecánica entregada por el motor es evacuado a través del sistema de refrigeración del freno mediante un abastecimiento continuo de agua, la cual a su vez cumple la función de frenado del motor.
9. **Sistema de evacuación de los gases de escape.** Los gases de escape son enviados tras pasar por un silenciador a la atmósfera. Además el aire contaminado circulante de la sala es forzado por los ventiladores a salir por la campana dispuesta en el techo debido al efecto chimenea.
10. **El Sistema de ventilación de la sala,** se efectúa mediante ventiladores de impulsión ubicados frente al motor, accionados desde la sala de control.

Además, existe un vidrio de doble cristal que divide la sala de ensayos (donde se dispone el banco de pruebas) de la sala de control donde están dispuestos el sistema de adquisición de datos (computador), elementos de puesta en marcha y de gobierno del motor y freno, así como los instrumentos de control y registro.

### *Disposición de equipos (Layout)*

#### Simbología (Fig. 3.4 y 3.5)

F.1. Freno dinamométrico Saenz	8 - Tablero eléctrico.
1 - Adquisidor de datos.	9 - Válvulas de paso de combustible.
2 - Computadores.	10- Tanque de combustible.
3 - Celda de carga.	11- Probeta.
4 - Sensor de RPM.	12 - Ventiladores.
5 - Sensor de temperatura de gases de escape (GE).	13 - Pizarra.
6 - Sensor de temperatura de aceite.	14 - Mando del motor.
7 - Red de agua.	15 - Campana de salida de tubos de GE.



**Figura 3.4. Layout del Laboratorio de Ensayos (Vista Superior)**



**Figura 3.5. Banco de pruebas del Laboratorio de Motores del Taller de Mecánica Automotriz, JMC.**

### **3.5.1. Freno dinamométrico**

En el laboratorio de ensayos de motores se dispone del Banco dinamométrico argentino marca Saenz, modelo DS2, para proporcionar la carga del freno al motor. Este instrumento presenta un sensor de carga para medir el torque generado y un tacómetro para las rpm de funcionamiento del motor. El principio de funcionamiento del freno y las especificaciones técnicas se encuentran en el ANEXO C.

### **3.5.2. Sistema de control y Adquisición de datos**

El adquirente de datos es un módulo electrónico, marca SAENZ, al cual se conectan los distintos sensores provenientes del motor y freno (celda de carga, sensor de rpm, temperatura de aceite del motor y temperatura de los gases de escape), registra la medición digital y transforma las señales en parámetros que irán como datos a un computador dispuesto en la sala de control. Este sistema utiliza como enlazador de comunicación la fibra óptica de datos tipo industrial, evitando con esto el ingreso de ruidos que falsean la medición.

Estos datos son interpretados y almacenados en un software llamado SMACMOD. Además, el adquirente de datos recibe directamente de una central barométrica las condiciones atmosféricas de la sala de ensayo (presión atmosférica, temperatura ambiente y humedad relativa). El programa Smacmod da la opción de trabajar bajo distintas normas para el factor de corrección aplicable para obtener los valores de potencia y torque corregidos. Para este trabajo se utiliza la norma DIN70020.

### **3.5.3. Instrumentalización para la medición de parámetros**

#### ***Sensor de celda de carga (Fig. 3.6)***

Marca: Saenz

Principio de Medición: StrainGages

Rango: 0 a 23799 [kgf]

Resolución: 0,01 [Nm]

#### ***Sensor de RPM (Fig. 3.6)***

Marca: Saenz

Principio de Medición: Inductivo

Rango: 0 a 12000 [rpm]

Resolución: 1 [rpm]

### *Central barométrica (Fig. 3.6)*

Marca: Saenz

Equipo compuesto por:

- **Sensor de presión relativa**  
Rango: 15 a 115 [KPa] o 112,51 a 862,57 [mmHg]  
Resolución: 0,01 [mmHg]
- **Sensor de temperatura ambiental**  
Rango: 55 [°C] a 150 [°C]  
Resolución: 0,01 [°C]
- **Sensor de humedad relativa**  
Rango: el 0[%] hasta un 100[%]  
Resolución: 0,01 [%]

### *Sensor de temperatura (para temperatura de gases de escape y aceite) (Fig. 3.6)*

Tipo: Termocupla tipo k

Principio de Medición: termo voltaje [mV]

Rango: -45 a 1250 [°C]

Resolución: 1 [°C]



**Figura 3.6. Sensores para el adquisidor de datos**

### *Consumo de combustible*

El consumo de combustible se midió con la ayuda de una probeta tipo pera (Fig. 3.7) y un cronómetro para determinar el flujo volumétrico de combustible en el tiempo de prueba. Se dispone de un tanque de combustible diesel en altura para alimentar por gravedad al motor. Cabe mencionar que se cotiza y compra un sensor de combustible digital para medir directamente en el circuito el caudal volumétrico de combustible, pero para las pruebas no se dispone físicamente.

- **Probeta**

Volumen probeta superior: 50 [cm<sup>3</sup>]

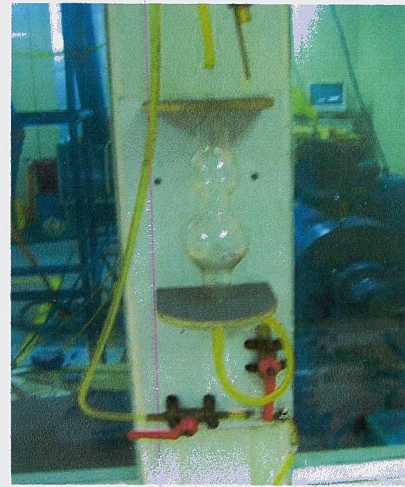
Volumen probeta inferior: 100 [cm<sup>3</sup>].

- **Cronómetro**

Marca: Samsung

Rango: 0 a 86400 [segundo]

Resolución: 0,01 [segundo]



**Figura 3.7. Probeta de combustible**

### *Analizador de Gases de Escape*

Marca: Bosch

Modelo: BEA 250-EU

Principio de Medición: Luz infrarroja no dispersiva

Gases: CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>

Rango:           CO: 0 a 10 [%vol]  
                      CO<sub>2</sub>: 0.00 a 18.00 [%vol]  
                      HC: 0 a 9999 [ppm-vol]  
                      O<sub>2</sub>: 0 a 22 [%vol]  
                      NO<sub>x</sub>: 0 a 5000 [ppm-vol]

Resolución:   CO: 0,001 [%vol]  
                      CO<sub>2</sub>: 0,001 [%vol]  
                      HC: 1 [ppm]  
                      O<sub>2</sub>: 0,001 [%vol]  
                      NO<sub>x</sub>: 1 [ppm]

### *Opacímetro*

Marca: Bosch

Modelo: EFAW 65A

Principio de Medición: Volumen de gas por medio de aspiración

- Equipo para la determinación del índice de ennegrecimiento de las emisiones de material particulado:

Marca y modelo: Bosch ETD 020.50.

Rango: 0 a 10 [-]

Resolución: 0,1 [-]

### *Presión dentro de la cámara de combustión*

Por otro lado, se evalúa la posibilidad de instalar un sensor de presión para medir la presión dentro de la cámara de combustión. Para esto, el Laboratorio de Termofluidos de la UTFSM, Casa Central, posee un transductor de presión piezoeléctrico, marca AVL, modelo 12QP-50-cl, junto con un amplificador de carga modelo 567B3, y un calibrador de carga modelo 536A, ambos de la empresa KLISTER. La instalación del sensor requiere perforar la culata del motor, la dimensión de dicha perforación resulta mayor que el espacio disponible en la culata. Por lo tanto, en el motor seleccionado no es posible instalar este sensor de presión. Además, la cotización de un sensor piezoeléctrico arroja un valor mayor a 1 millón de pesos, valor fuera del presupuesto de este proyecto, por lo que se descarta la medición de presión dentro de la cámara de combustión.

### **3.6. Procedimiento para los ensayos**

Para realizar una prueba de ensayos a un MCI, se establece un protocolo tanto en la fase previa al ensayo, durante el ensayo y luego de realizadas las mediciones. De esta manera se puede asegurar la repetitividad de las pruebas para minimizar factores externos a los deseados, permitiendo que las mediciones entregadas por los distintos dispositivos sean precisas sin poner en riesgo la integridad del motor a medir, ni tampoco la de los equipos, así como también del espacio físico en el cual se desarrolla la experiencia.

Se establece que para cada etapa (I y II) se realicen 3 pruebas a 100% de carga con éxito, es decir, sin detenimientos del motor hasta el final del ensayo. El procedimiento antes de realizar las pruebas en el motor, contempla la instalación del motor e instrumentos de medición:

1. Definir el(los) tipo(s) de ensayo(s) a realizar y parámetros a medir.
2. Instalar el motor, esto es, montar sobre las torretas y apernar.
3. Conectar el motor al freno por medio de una junta homocinética.
4. Conectar instrumentos y equipos de medición.
5. Encender computador y verificar que efectivamente llega la señal a través de la fibra óptica desde el adquisidor de datos.
6. Iniciar programa Smacmoden modo de configuración, para dar precisión y calibración a todos los sensores (celda de carga, sensor rpm y termocuplas) que estén involucrados a la medición durante el ensayo del motor, siguiendo las instrucciones del manual del programa.

#### **3.6.1. Mediciones a realizar**

En cada ensayo del motor se realizan dos tipos de pruebas: corrida o barrido y punto a punto. Con el ensayo de barrido el programa Smacmod registra las curvas de potencia efectiva y torque generado por el freno en función de las r.p.m.; luego, con el ensayo punto a punto se registra manualmente el consumo volumétrico de combustible (probeta), emisiones de gases de escape, opacidad, temperaturas y condiciones ambientales.

El rango de régimen de giro para las corridas es desde un mínimo de 1400 r.p.m. (por debajo del cual el funcionamiento del motor resulta irregular) hasta un máximo de 3000 r.p.m. (por

encima del cual quedaría perjudicada la duración de los órganos mecánicos). De igual forma, el ensayo punto a punto se lleva a cabo en 6 velocidades de giro del cigüeñal, las cuales son:

- 1) Motor a las 1400 r.p.m.
- 2) Motor a las 1700 r.p.m.
- 3) Motor a las 2000 r.p.m.
- 4) Motor a las 2300 r.p.m.
- 5) Motor a las 2600 r.p.m.
- 6) Motor a las 2900 r.p.m.

### **3.6.2. Operatoria previa al ensayo**

1. Conectar instrumentos y equipos de medición.
2. Verificar nivel de aceite y elementos de seguridad del motor.
3. Verificar el tipo de combustible que se utilizara durante el ensayo.
4. Verificar las conexiones y asegurar de que no presenten fugas.
5. Verificar vías de escape y ubicación de los extintores, en caso de accidente.
6. Repasar los procedimientos de emergencia y planes de contingencia.
7. Encender computador y verificar la señal de la fibra óptica.
8. Iniciar programa Smacmod y conectar el puerto de la PC para la conexión por software de los datos (ícono PUERTO CONECTADO).

### **3.6.3. Puesta en marcha y calentamiento del motor**

1. Encender ventilación forzada.
2. Abrir la llave de paso de agua del freno.
3. Abrir la válvula de paso de combustible desde el tanque al motor.
4. Abrir válvula de paso del sistema de medición de combustible para llenar la probeta.
5. Dar partida al motor (manualmente con manivela).
6. Controlar parámetros de seguridad como la temperatura de aceite y régimen de giro.
7. Llevar el motor a temperatura normal de funcionamiento aplicando una pequeña carga.
8. Observar funcionamiento del motor, ruido que produce éste, además de verificar que no existan fugas.
9. Iniciar la adquisición de datos en el programa haciendo clic en TEST del menú principal.
10. Llevar el motor a las condiciones de medición.

### 3.6.4. Procedimiento de medición

#### *Ensayo de barrido*

1. Llevar el motor a plena carga, esto es 100% de aceleración.
2. Aplicar carga con el freno y estabilizar el motor a un régimen inferior a las rpm mínimas del ensayo ( $< 1400$  [rpm]).
3. Con el motor a plena carga, soltar el freno lentamente y comenzar medición (ícono START del programa) al alcanzar el régimen mínimo de medición.
4. Seguir disminuyendo gradualmente la carga del freno hasta pasar las 3000 [rpm] y presionar el ícono STOP del programa.

#### *Ensayo punto a punto*

1. Llevar el motor al punto de medición (r.p.m.)
2. Una vez estabilizado el régimen de giro, imprimir el registro de emisiones visualizado en la pantalla del analizador de gases.
3. Cerrar válvula de paso de combustible desde el tanque al motor, generando el consumo de combustible de la probeta, y cronometrar el tiempo que demora el motor en consumir el volumen determinado (50 cc).
4. Paralelo, otro operador registra las condiciones ambientales, temperatura de aceite y temperatura de gases de escape.
5. Tomada la medición de la probeta, abrir la llave de paso desde el tanque para que la probeta se llene nuevamente de combustible.
6. Tomar muestra de material particulado con el opacímetro directamente del tubo de escape.
7. El paso a la medición siguiente será dado por la persona que toma la muestra de material particulado.

**NOTA:** Se debe verificar constantemente el funcionamiento de los instrumentos de medición y de las variables medidas (probeta de combustible, analizador de gases, temperatura de gases de escape y de aceite, régimen de giro). Además, se debe anotar las observaciones que pudiesen darse durante el ensayo.

### **3.6.5. Termino del ensayo y detención del motor.**

1. Verificar parámetros de seguridad del motor (temperatura de aceite y régimen de giro del motor).
2. Llevar el motor a ralenti y esperar hasta que se estabilice la temperatura.
3. Detener el motor.
4. Cortar el suministro de agua y combustible.

### **3.6.6. Operatoria después de la detención del motor.**

1. Desconectar todos los instrumentos que lo requieran.
2. Apagar ventilador y equipos electrónicos.
3. Limpiarla zona de trabajo.

### ***Precauciones a considerar mientras se está realizando un ensayo***

- Baja en la temperatura de aceite del motor.
- Ruidos extraños en el motor.
- Fuerte olor a quemado.
- Incendios o explosiones en el laboratorio o en otra área.
- Derrame de combustible, aceite.
- Aumento rápido sobre los  $90 [^{\circ}C]$  en la culata del motor.
- Corte en el suministro de agua en la red.
- Movimiento telúrico.

## **3.7. Resultados esperados**

Con el medio poroso instalado dentro de la cámara de combustión, ocupando casi la totalidad de la cavidad superior del pistón, el volumen de la cámara de combustión disminuye por la fase sólida del MP. El nuevo volumen de la cámara de combustión,  $V'_{cc}$ , con un volumen desplazado  $V_d$  igual con y sin MP, y una razón de compresión,  $r_c$ , dada por el fabricante, se calcula como sigue,

$$V'_{cc} = (1 - \varepsilon) \cdot V_{cc}$$

$$r'_c = \frac{V'_{cc} + V_d}{V'_{cc}} = 1 + \frac{V_d}{(1 - \varepsilon) \cdot V_{cc}}$$

$$r'_c = 1 + \frac{r_c - 1}{(1 - \varepsilon)}$$

Así, si se instala el medio poroso de SiC (porosidad 82%), la razón de compresión ( $r_c$ ) aumenta de 20,5 (motor convencional sin MP) a 24,8; y con el medio poroso de zirconia (84% de porosidad)  $r_c$  es 24,2. Lo anterior implica que durante la compresión del aire, éste adquiere más temperatura que en el motor sin MP.

En la investigación de Kannan [13] (Capítulo 2.8), al igual que en este trabajo, el motor MP sufre una reducción del volumen efectivo de la cámara de combustión, y siendo el motor de aspiración natural, el rendimiento volumétrico disminuye. Es posible que esto cause un mayor consumo específico y por ende menor eficiencia térmica, que el motor convencional. Los valores registrados en dicho experimento fueron un aumento del orden de 25% en el consumo específico y una caída a 77% app. en la eficiencia térmica respecto al motor sin MP. Si la cantidad de aire atrapado en el interior del cilindro del motor se mantuviera por algún medio externo (sobrealimentación), se anticipa que el medio poroso de mejores resultados en términos de eficiencia térmica del freno y consumo específico de combustible. Por lo tanto, sin realizar ninguna modificación al motor Hatz, se estima que la eficiencia térmica disminuiría en un 23% aproximadamente, según la referencia [13].

Durante la compresión el MP el aire de admisión es forzado a entrar en el volumen libre del MP. El flujo se mueve a través de los poros del MP, y al tener una alta porosidad (casi 90%), existe una baja resistencia a fluir de forma turbulenta dentro de él. Lo mismo ocurre con la penetración del spray y la consiguiente propagación de la llama.

De la forma en que se dispondrá el MP en proximidad con el inyector, la pulverización, ignición, propagación de la llama y mezcla con el aire se espera que transcurra dentro del volumen del MP.

El MP absorbe el calor residual (entalpía residual) proveniente del ciclo anterior, y se lo transfiere al aire de admisión, causando el aumento de su entalpía durante la compresión. Muy cerca del PMS se inyecta el combustible y gracias al movimiento del gas y las altas temperaturas dentro del MP, el combustible se vaporiza y se distribuye por la superficie porosa. Nuevamente, la turbulencia dentro del MP ayuda a la mezcla con el aire, produciendo

que sea casi homogénea para la ignición. Se espera que gracias a las características físicas y térmicas inherentes del material cerámico, como su capacidad calorífica y conductividad térmica, se lleve a cabo una vaporación rápida y completa del combustible líquido. Esto se respalda con la investigación de Kannan, vislumbrándose en una disminución de las emisiones de CO y HC no quemado en un orden del 50% y 40%, respectivamente, en el experimento de Weclas el CO disminuyó en un 80% app.

Además se espera que las temperaturas de combustión sean menores a la línea base, observándose en la temperatura de los gases de escape y en las emisiones de NO<sub>x</sub>. Este último parámetro, según el experimento de Kannan, tiene un valor del orden de 28% menos que el motor convencional, y en el trabajo de M. Weclas es 66% menos ( $\lambda=3,3$ ) aproximadamente. No hay que olvidar que el experimento de M. Weclas contiene un sistema common rail para la inyección de combustible (presión máxima de 135 MPa v/s 23,5 MPa en el motor convencional). La carrera de expansión y expulsión de gases no debería presentar grandes cambios respecto al motor sin MP.

Sobre las curvas de potencia y torque del motor a distintas velocidades del cigüeñal, no se tienen referencias numéricas, pero se puede inferir que si se logra una combustión más completa en la cámara de combustión, se traduciría en un aumento en el trabajo útil y por ende en el torque resultante y siendo la potencia efectiva proporcional a éste, también aumentaría.

Respecto al comportamiento del motor durante su funcionamiento una vez que se ha intervenido el interior del cilindro para modificar el proceso de combustión y teniendo como referencia los trabajos experimentales Weclas y Durst [9], se espera que, “*el motor pueda trabajar con mezclas pobres bajo un variado rango de operaciones*”, es decir que el combustible sea quemado total y homogéneamente aumentando su densidad de potencia bajo distintas velocidades de operación con un rango de composición de la mezcla desde muy pobres hasta una mezcla estequiométrica. Como consecuencia de esto, se espera que desaparezcan las emisiones de material particulado y un bajo ruido de combustión ya que el “peak” de presión disminuye.

## **CAPÍTULO 4. Resultados experimentales y discusiones**

### **4.1. Instalación del motor en el banco de ensayo**

Las adaptaciones realizadas en el motor Hatzcontemplan en primer lugar la instalación del mismo en una bancada dentro de la sala de ensayos para ser montado al freno dinamométrico SAENZ, partiendo por la fabricación de un plato metálico con las perforaciones adecuadas para poder acoplar el volante de inercia del motor con la homocinética del freno; y la fabricación de dos soportes de hierro dispuestos desde la bancada al piso del laboratorio para reducir las vibraciones típicas de un motor mono cilíndrico en funcionamiento.

Para la evacuación de gases de escape del motor es necesario soldar un conjunto de tuberías desde la salida de los gases del motor hacia la campana de evacuación instalada en el laboratorio.

Con el fin de poder tomar lecturas tanto de la temperatura de los gases de escape como la temperatura del aceite (y no de agua ya que es refrigerado por aire), se perfora el tubo de escape cerca de la salida de los gases del motor y el tapón de llenado de aceite del cárter, y se instala en las perforaciones termocuplas tipo "K".

Para medir el consumo de combustible del motor, se interviene el sistema de alimentación de combustible dejando inhabilitado el tanque que trae por defecto y conectando a la entrada de la bomba de inyección y al circuito de retorno el tanque dispuesto en el laboratorio. En este circuito está conectada la probeta graduada para así determinar cuánto volumen de combustible es consumido en un tiempo dado.

Para poder detener el motor desde la sala de control y en caso de emergencia se instala una piola que controla la palanca que interrumpe el suministro de combustible desde la bomba de combustible del motor hacia el inyector.

## 4.2. Etapa I: Ensayos con motor sin MP (línea base)

Las tablas y gráficos de potencia, torque y consumo específico, de los tres días, así como las emisiones de CO, CO<sub>2</sub>, HC, O<sub>2</sub>, NO y material particulado, se detallan en el Anexo E.

### 4.2.1. Curvas características: Potencia Efectiva, Torque, Consumo Específico.

Las curvas características de un motor de combustión interna expresan gráficamente la potencia, el par motor y el consumo específico del motor en función de la velocidad de giro del cigüeñal. Como ya se ha dicho, el campo de utilización del motor es entre 1400 y 3000 rpm.

Se realizan los ensayos (corrida y punto a punto) en tres días distintos. En cada día se efectúan 10 corridas seguidas seleccionando las 5 más representativas; el valor de la Potencia y Torque del día es el promedio de las 5 mejores corridas. En cambio el ensayo punto a punto, habiendo éxito en la estabilización para cada régimen, se realiza una sola vez por día. Debido a las fluctuaciones entre los 3 días de ensayos, comparando con las curvas del fabricante (Anexo D), se elige el ensayo 3 para describir las curvas características del motor Hatz 1D81S.

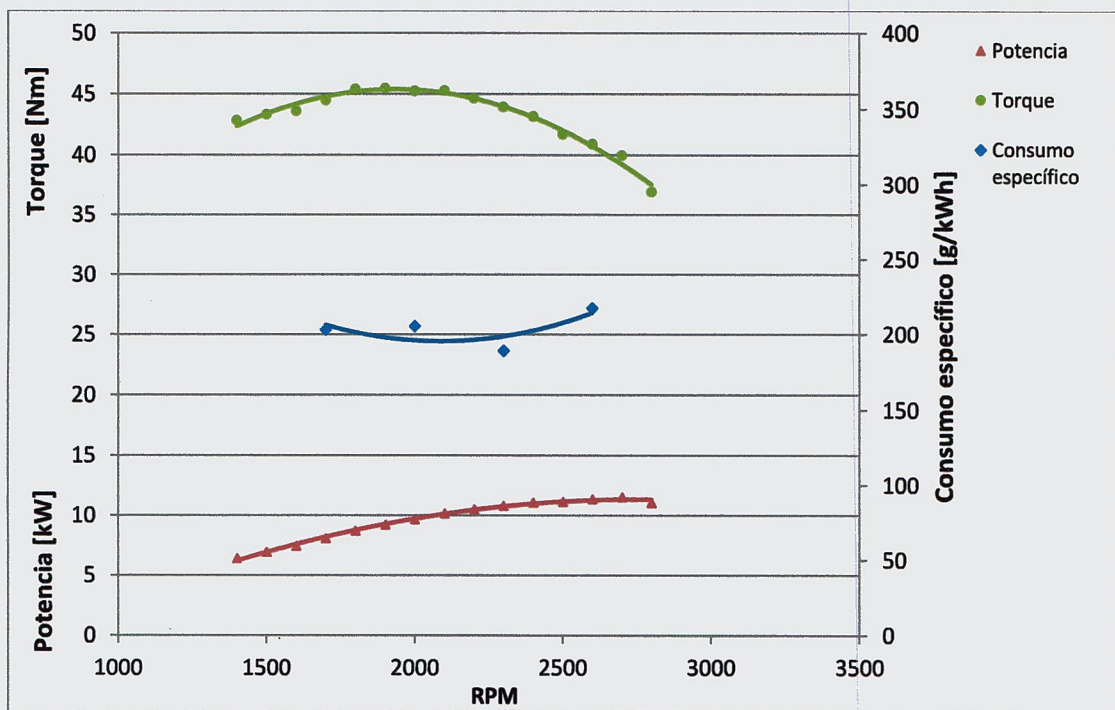


Figura 4.1. Curvas características Motor Hatz.

### *Análisis de las curvas características (Fig. 4.1)*

- Como es de esperar, la potencia (línea roja) aumenta con el aumento de las rpm, en un rango de 6 a 11 kW aproximadamente, con un máximo de 11,5 KW 2700 rpm.
- El torque (línea verde) aumenta hasta un máximo valor de 45,5 [Nm] a 1900 rpm para luego ir descendiendo a medida que aumenta las rpm.
- Se analiza el consumo específico de combustible (Be) (línea azul), el cual se define como la cantidad de combustible, en unidad de masa, consumida por unidad de potencia generada. El gráfico nos muestra que existe un mínimo de 189,2 [g/kWh] de consumo específico a 2300 rpm.
- El rendimiento global, es inversamente proporcional al consumo específico, y de acuerdo a las fórmulas descritas en el Capítulo 3.4, su valor máximo es de 44% a 2300 rpm.

#### **4.2.2. Emisiones**

Las emisiones son gases producidos por el proceso de combustión en un motor Diésel donde el combustible no es totalmente quemado. El humo Diésel contiene cientos de compuestos químicos emitidos en fase gaseosa o como material particulado. Los principales productos gaseosos son dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), oxígeno ( $\text{O}_2$ ), nitrógeno ( $\text{N}_2$ ) y vapor de agua ( $\text{H}_2\text{O}$ ). También están presentes el monóxido de carbono (CO), los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), los hidrocarburos (HC) y sus derivados. El benceno, el tolueno, el benzopireno y otros hidrocarburos poli cíclicos aromáticos también están presentes en la parte gaseosa.

En los siguientes gráficos (Fig. 4.2- 4.5) se presentan las emisiones de los gases: CO,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ , NO, HC y material particulado, cuyo parámetro es el Índice de ennegrecimiento o  $\text{N}^\circ$  de Bosch, por cada día ensayado. Los gráficos no se promedian, pues sus valores difieren entre los días. En el Anexo E se encuentran las tablas con las que se confeccionaron los gráficos.

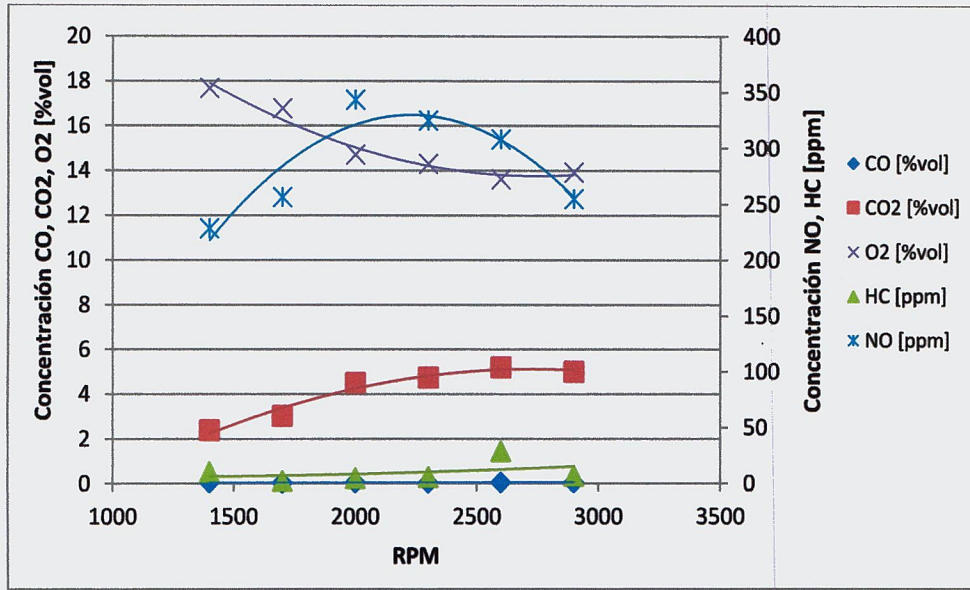


Figura 4.2. Emisiones de los gases de escape DÍA 1

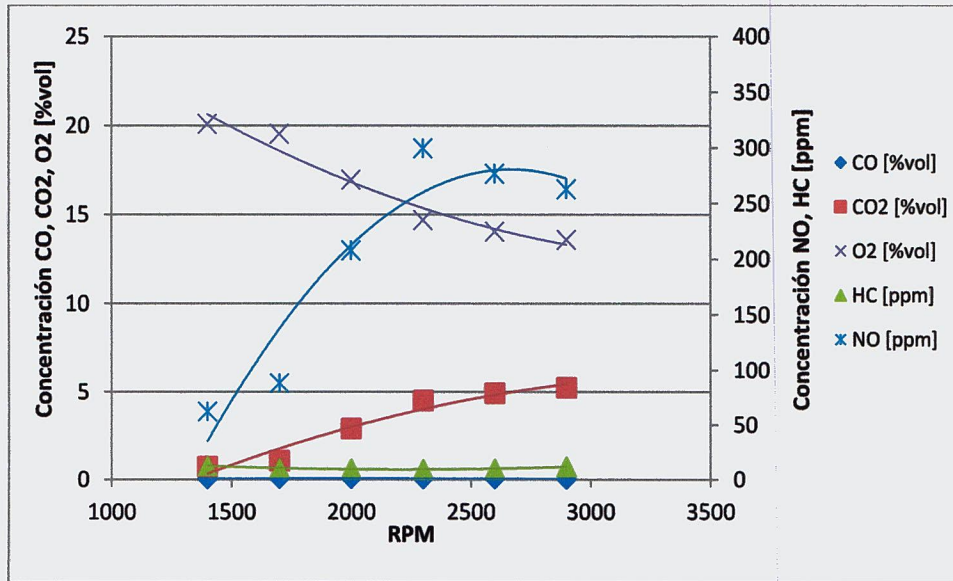


Figura 4.3. Emisiones de los gases de escape DÍA 2

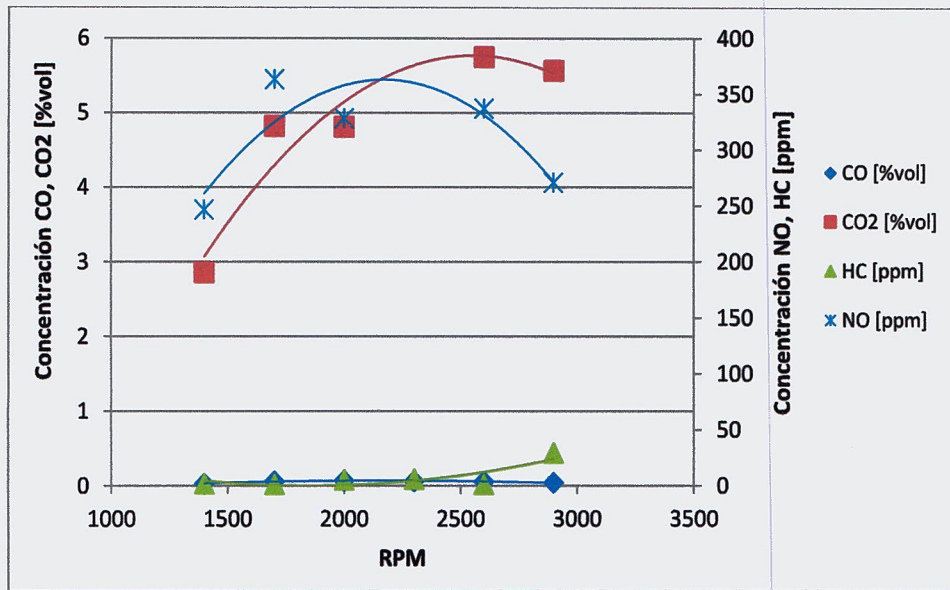


Figura 4.4. Emisiones de los gases de escape DÍA 3

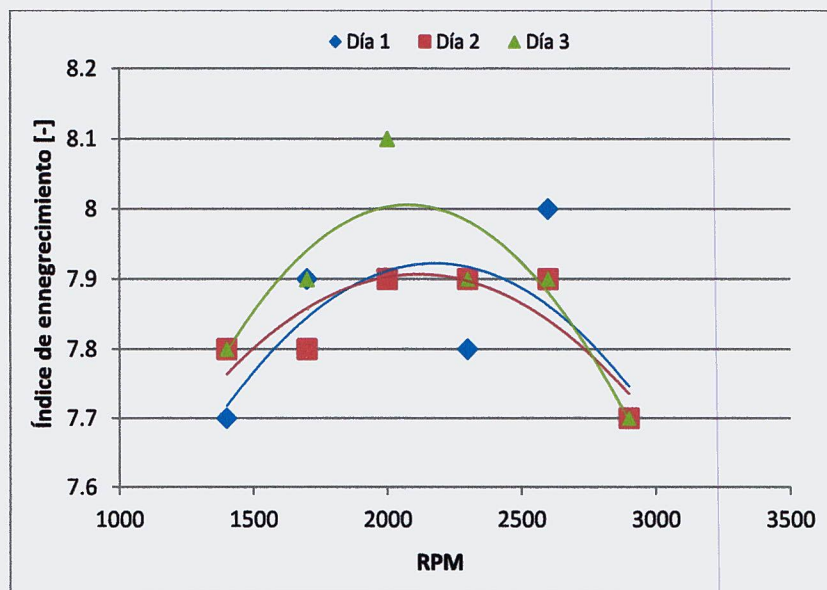


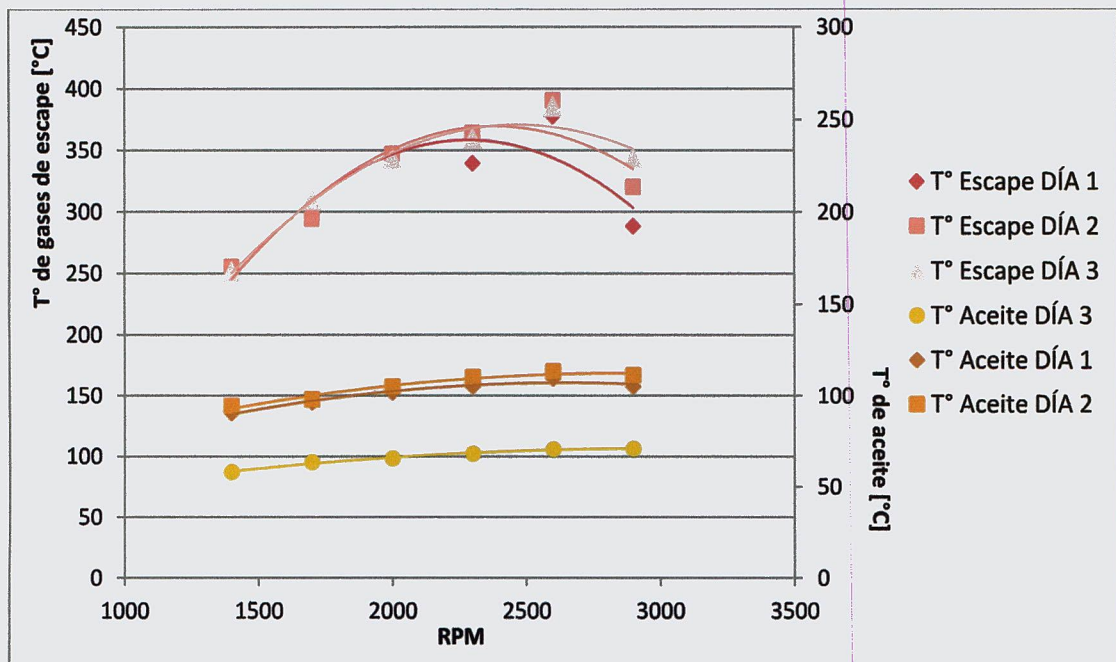
Figura 4.5. Índice de ennegrecimiento o N° de Bosch en los 3 días de ensayo.

#### Análisis por tipo de gas y opacidad

- **CO:** En el gráfico no se aprecia, pero observando la tabla del Anexo E, los tres días fluctúan en cuanto a las emisiones CO, y tampoco hay una tendencia común para poder inferior en el comportamiento de CO en función de las rpm.
- **CO<sub>2</sub>:** A pesar de diferir entre los tres días para bajas RPM, se observa un aumento de CO<sub>2</sub> a medida que aumenta la velocidad del motor hasta 2600 rpm, velocidad a la cual el consumo específico es alto.

- **HC:** Esta emisión nos indica el combustible no quemado. En el gráfico no se aprecia, pero observando la tabla del Anexo E, la tendencia es a un aumento paulatino a medida que aumentan las rpm.
- **NO:** Difieren en los tres días, aunque la tendencia es al aumento hasta un máximo de 325 ppm a 2300 rpm, para luego ir disminuyendo a medida que aumentan las rpm.
- **O<sub>2</sub>:** Aunque en distintas cantidades, la tendencia es una paulatina disminución O<sub>2</sub> a medida que aumentan las rpm.
- **Índice de ennegrecimiento:** Nos indica el material particulado presente. Se observa que a bajas rpm es menor, luego aumenta con la velocidad hasta un máximo entre 7,9 y 8 [-] a 2000-2300 rpm, y a 2900 rpm el material particulado desciende a su mínimo valor 7,7.

En la Figura 4.6 se resumen los parámetros de control para cada ensayo: temperatura de aceite del motor y temperatura de los gases de escape.



**Figura 4.6. Temperatura de GE y Aceite**

### *Análisis general*

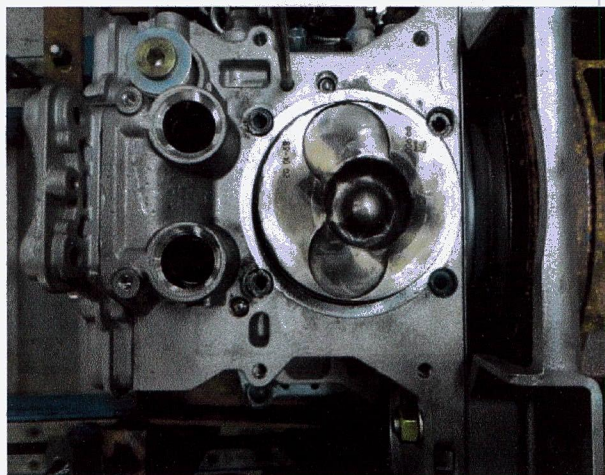
- El comportamiento de la curva de consumo específico ( $B_e$ ) de los tres días difiere en su comportamiento, el día 3 es el más representativo al coincidir con las curvas del fabricante. A medida que la velocidad aumenta el  $B_e$  disminuye hasta llegar a un punto mínimo y luego comienza a aumentar con las rpm.

- El comportamiento de  $B_e$  se condice con la curva de  $CO_2$  pues a medida que aumenta el flujo de combustible, mayor generación de  $CO_2$ .
- Las emisiones de NO, hollín son más contaminantes a 2300 rpm, esto se condice con los resultados de las altas temperaturas de gases de escape y aceite del motor correspondiente a las altas emisiones de NO.
- En cuanto al análisis de emisiones a 2900 rpm se mejoran las emisiones contaminantes: menor NO, CO y material particulado.
- El mínimo consumo específico es de 189,2 [g/kWh] a 2300 rpm.
- El mayor rendimiento global del motor Hatz 1D81 es de 44% a 2300 rpm.
- Se hace necesario más pruebas (días) para poder hacer un análisis estadístico, para descartar los errores inherentes a las mediciones.

### 4.3. Etapa II: Adaptación del medio poroso al motor

Una vez realizadas las mediciones con el motor sin modificar para establecer la línea base, se desarrollan 3 configuraciones distintas para poder llevar a cabo las pruebas con el MP inserto en la cavidad del pistón (cámara de combustión), ya que se presentan dificultades para poner en marcha el motor con el medio poroso dentro de él.

Para el montaje del medio poroso dentro del cilindro del motor, se consideran los MP de carburo de silicio ( $SiC$ ) y zirconia ( $ZrO_2$ ) de 17 mm de alto, ya que este tamaño comprende una geometría cilíndrica parecida al orificio del pistón (Figura 4.7).



**Figura 4.7. Vista superior de la cavidad del pistón.**

#### 4.3.1. Primera configuración

Primeramente se modifica la geometría del material poroso de SiC de tal forma que llene casi completamente la cavidad del pistón. Ya que la estructura porosa no considera el volumen que ocupa el aspersor de combustible en la cavidad del émbolo, se procede a trabajar el material en el punto donde hace contacto con el aspersor mediante el uso de un esmeril eléctrico, como se muestra en la Figura 4.8, permitiendo el ensamble perfecto entre el medio poroso y la cavidad del pistón, convirtiéndose así, el medio poroso en la cámara de combustión propiamente tal.

Una vez que la geometría del material poroso queda determinada y luego de desarmar el motor para poder extraer el pistón, el siguiente paso consiste en la fijación del medio poroso dentro de la cavidad del pistón mediante la aplicación del pegamento proporcionado por el proveedor de los filtros, resistente a alta temperatura para materiales cerámicos (Figura 4.8). Cabe señalar que se desconoce su efectividad bajo altas presiones, pues su aplicación en la industria es a presión atmosférica.

Se aplica el pegamento, de consistencia pastoso, en frío y se deja secar a temperatura y humedad ambiente sin desbancar el motor, durante 1 mes aproximadamente (cierre Universidad por vacaciones).

Antes de proceder a armar el motor se comprueba la adhesión del medio poroso a la superficie del pistón, aplicando presión manualmente, cerciorando que el pegamento no fija las superficies pues éste no se había deshidratado completamente.



**Figura 4.8. Adaptación del MP de SiC para su instalación (izquierda); Adhesión del MP de SiCal pistón del motor (derecha).**

## **Resultados**

No se logra la adherencia deseada puesto que el pistón se deja secar en condiciones de humedad muy alta como para evitar que se deshidrate correctamente, por lo que no se efectúa el procedimiento para los ensayos.

### **4.3.2. Segunda configuración**

En un segundo intento se opta por cambiar el material del medio poroso, utilizando esta vez el filtro de zirconia ( $ZrO_2$ ), ya que posee una mayor resistencia a altas temperaturas respecto al filtro de SiC ( $1700^\circ C$  para  $ZrO_2$  versus  $1490^\circ C$  para SiC). Nuevamente se modifica su geometría utilizando un esmeril eléctrico de precisión, con el fin de encajar en la cavidad del pistón, pero esta vez disminuyendo el alto en los costados del filtro para evitar el contacto con las válvulas de admisión y escape.

Para fijar este nuevo material en el émbolo, a pesar de no agregar agua al pegamento (ver indicaciones de uso en el Capítulo 3.2), el proceso de secado del pegamento se realiza en un horno facilitado por el Departamento de Química de la Universidad, sede JMC, a una temperatura de  $100^\circ C$  por un período de 2 horas, siguiendo el procedimiento que nos indicó la empresa que provee dicho pegamento. El enfriamiento del conjunto es a temperatura ambiente por 2 horas más. Observando que el pegamento efectivamente se seca quedando en estado sólido adhiriendo el MP al pistón, como se muestra en la Figura 4.9, se procede al armado del motor.



**Figura 4.9. Adhesión del medio poroso de zirconia al pistón del motor.**

## Resultados

Una vez armado el motor, con la ayuda de una pistola de calor de alta temperatura se precalienta la culata con el objetivo de precalentar el medio poroso, enviando aire caliente a la cámara de combustión por la entrada del aire de admisión.

Se procede a dar arranque al motor sin tener éxito luego de reiterados y fallidos intentos, por lo que el MCI se desarma nuevamente para detectar posibles anomalías o fugas en el armado, encontrando el material poroso fisurado en su centro, causado por un desgaste excesivo del material por golpeteo del inyector o el chorro de combustible. Adicionalmente el adhesivo se encuentra firmemente adherido al material cerámico, pero despegado de las paredes de la superficie de aluminio del pistón.

También se puede apreciar una gran cantidad de combustible mal quemado (Figura 4.10), lo que hace sospechar que el medio poroso al ocupar todo el volumen de la cámara de combustión, desfavorece el proceso de vaporización y distribución del combustible inyectado y por ende la posterior formación de la mezcla gaseosa con el aire. Otra posible razón del hollín visible puede ser al reducido espacio libre dentro de la cavidad del pistón disponible para la cantidad de masa de aire requerida para que la calidad de la mezcla sea la necesaria para conseguir el autoencendido, resultando en una mezcla excesivamente rica para lograr la combustión. Pero esta última razón no se condice con lo establecido en la literatura acerca de que la alta porosidad hace al medio poroso casi transparente para el flujo de gas (Capítulo 2.3.1).



Figura 4.10. Resultados de la segunda configuración

### 4.3.3. Tercera configuración

En un tercer y último intento se utiliza nuevamente un material hecho de zirconia, pero cambiando la configuración geométrica perforando un orificio en el centro del MP, quedando éste en forma de anillo (Figura 4.11). Con esta nueva propuesta se deja libre la zona de aspersión del combustible inyectado.

Para fijar el medio poroso en el émbolo se realiza un procedimiento similar al anterior, con la diferencia de que esta vez se deja por 3 horas en el horno a 100°C, y el enfriamiento del pegamento y del conjunto pistón-MP se lleva a cabo dentro de un recipiente de vidrio sellado herméticamente, el cual contiene dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) en el fondo para absorber la humedad remanente. Una vez que el adhesivo se enfría por completo, se monta el pistón en la biela para armar nuevamente el MCI y se precalienta la culata (medio poroso) con la pistola de calor.



**Figura 4.11. Geometría en forma de anillo (derecha); Anillo de zirconia en el pistón (izquierda)**

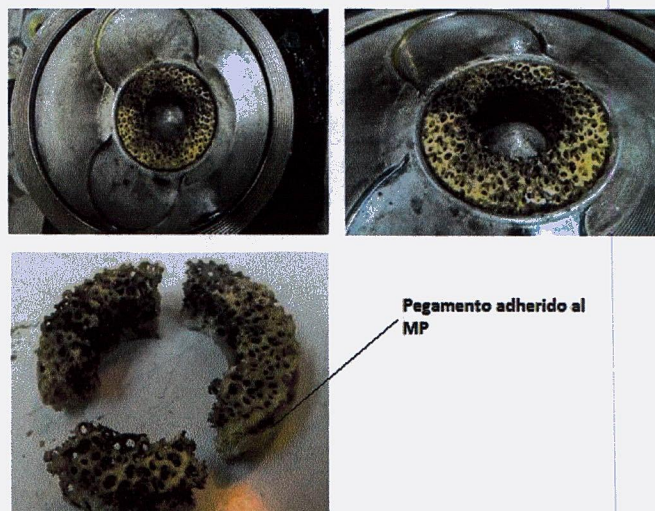
### *Resultados*

Tras varios intentos fallidos de dar arranque al motor, se observa que éste no está bien sellado (presenta una fuga de gases por la culata) debido a la fatiga de la empaquetadura de la culata, por lo que se procede a abrir una vez más el motor para cambiarla.

Al desmontar la culata se observa que el medio poroso presenta nuevamente combustible no quemado (Fig. 4.12), pero menos acuoso que en los resultados de la segunda configuración y al igual que la vez anterior, el adhesivo se desprende de las paredes del pistón, mas no del medio poroso.

Se sospecha que una de las posibles razones de que no encienda el motor es la falta de presión de inyección del combustible para penetrar todo el volumen del medio poroso, pues según se observa las huellas de combustible llegan, no en profundidad, a la periferia del

anillo poroso. Por otro lado, la no vaporización del combustible y la consiguiente mezcla con el aire, hacen que exista una mala combustión.



**Figura 4.12. Resultados de la tercera configuración.**

#### **4.4. Alcances y recomendaciones**

A continuación se detallan las limitaciones vistas en este trabajo, así como las sugerencias para futuros interesados en explorar el potencial de la tecnología de medios porosos en un motor de combustión interna.

##### ***Limitaciones técnicas***

- No se encontraron empresas proveedores tanto de filtros como de pegamento que garantizaran el funcionamiento de estos elementos bajo condiciones dentro del motor, pues estos productos se comercializan para aplicaciones bajo condiciones de presiones atmosféricas; por lo que uno de los desafíos era comprobar su utilidad.
- Durante la puesta en marcha del motor con MP, y pese a seguir las instrucciones recomendadas por el fabricante, se comprueba que el pegamento mantiene su adherencia a la estructura cerámica, pero no a las paredes de aluminio de la cavidad del pistón. Esto puede ser debido a que las paredes del pistón se dilatan durante la carrera de compresión-expansión, y la diferencia entre los coeficientes de dilatación térmica del aluminio con la espuma cerámica, (Al:  $2,5 \cdot 10^{-5}$  [K<sup>-1</sup>]; MP:  $6,0 \cdot 10^{-6}$  [K<sup>-1</sup>]), más la velocidad que lleva el pistón, hacen que se desprenda la cerámica del pistón.

- Parece ser que la interacción entre el inyector el medio poroso no parece ser la mejor, pues el combustible no logra penetrar la totalidad del medio poroso (observable en las fotografías) ni vaporizarse en el corto tiempo disponible. Aunque si el motor no encendió completamente no podemos asegurar su comportamiento con el MP.
- Una posible causa del no encendido del motor, son las condiciones de arranque en frío, donde el medio poroso no se encuentra a una temperatura adecuada para ayudar al proceso de vaporización del combustible líquido.
- Para la aplicación, la resistencia térmica del medio poroso es uno de los parámetros más importantes que define su aplicabilidad de un material dado para la combustión en un motor.
- La capacidad calorífica o la conductividad térmica no son parámetros conocidos para los filtros adquiridos. Esto imposibilita tenerlo de referencia para asegurar una acumulación de calor de la fase sólida del MP y la rápida vaporización del combustible.

### *Sugerencias*

- ✓ Se sugiere añadir el diagrama indicado (P-V) para un mejor análisis de los resultados. Para esto se debe medir la presión dentro de la cámara de combustión y la posición del pistón.
- ✓ Poder medir temperatura dentro de la cámara de combustión, para tener un mejor acercamiento al proceso de combustión en sí.
- ✓ En vez de calcular el volumen de la cámara de combustión, se sugiere medir empíricamente su volumen utilizando algún líquido (agua o aceite).
- ✓ Precalear el medio poroso antes de la puesta en marcha del motor, para asegurar la rápida vaporización del combustible. Esto se puede hacer mediante un calentador eléctrico o bujía de incandescencia que se debe instalar modificando la culata del motor.
- ✓ Otra posibilidad para ayudar a precalentar el medio poroso es precalentar el aire de admisión, por lo menos en condiciones de arranque en frío.
- ✓ Modificar la presión con la que se inyecta el combustible, por ejemplo con un sistema common rail, como se realiza en la investigación de M. Weclas [9], aunque no se menciona que debe ser necesario este sistema para hacer efectiva la penetración de las gotas de combustible en el medio poroso.
- ✓ Al aumentar la razón de compresión, la presión necesaria para las condiciones de autoignición se logra antes, por lo que se podría variar el retraso de la inyección y ver los

efectos generados. Aunque con este cambio el comienzo de la ignición ocurriría mucho antes de alcanzar el PMS y por ende el proceso de combustión no se llevaría a cabo sólo en el volumen del MP (efecto no deseado según lo estudiado).

- ✓ La fijación del medio poroso cerámico al aluminio del pistón también es crucial. En el caso de utilizar otro pegamento, se debe tomar en cuenta el coeficiente de expansión térmico y elasticidad del aditivo para funcionar dentro de la cavidad y poder compensar la dilatación térmica de los materiales, en especial, del aluminio. Otra posible solución es la unión entre el MP y el pistón con seguro seagers, que ejerce presión entre ellos, obligando al MP a mantenerse dentro de la cámara de combustión.
- ✓ El mecanizado del medio poroso, al no ser simple, se recomienda encontrar un proveedor que pueda fabricarlo en las dimensiones exactas.
- ✓ La espuma de cerámica no puede (o no debe) degradarse en las posiciones en las que el borde de pulverización toque el MP. El medio poroso recibe el impacto del spray en la inyección, alcanzando temperaturas mayores a 2000[K], mientras que en las paredes del pistón alrededor de 600[K], creando un gradiente de 1500 K en pocos milímetros (valores estimativos, cortesía del prof. Amir Oliveira, ver Anexo A). Por lo tanto, la espuma cerámica tiene que ser capaz de soportar gradientes de temperatura del orden de décimas de grados por milímetro con una frecuencia igual a la frecuencia del motor, sin presentar grietas y desprendimiento de trozos. Esto causaría grandes daños, como desgaste de piezas y golpeteos, perjudiciales para el funcionamiento óptimo del motor.
- ✓ Realizar pruebas para la caracterización del filtro adquirido para su aplicación en motores, pues no se tiene visualización de lo que realmente está pasando dentro de la cámara de combustión.
- ✓ Por lo anterior, se sugiere realizar ensayos en un reactor poroso, como el de trabajos de M. Weclas [4], donde se simula una cámara de combustión (transparente) en condiciones termodinámicas similares a un MCI para conocer el comportamiento del MP.
- ✓ Es posible asegurar la penetración de las gotas de combustible y su consiguiente vaporización aumentando su humectabilidad tratándolo con tecnología de plasma, como se demuestra en otros trabajos [15].
- ✓ Ver la posibilidad de una nueva configuración: colocar el MP adherido a la culata, alrededor del inyector. Siendo esta una superficie plana hay posibilidades de que se facilite la fijación del MP, a diferencia de la cavidad cóncava del pistón.

## CAPÍTULO 5. Simulación Numérica de la combustión en MPI

### 5.1. Metodología teórica

La segunda fase de la investigación consiste en estudiar el comportamiento termodinámico de la combustión de una mezcla de un combustible alternativo al diésel más aire en un quemador poroso para altas presiones. Como se explica en el Capítulo 2.4, la combustión en medios porosos inertes aplicada en quemadores porosos, tiene similares características que en un motor de combustión interna en cuanto al potencial de mejorar el proceso de combustión. Debido al intenso intercambio de calor a través del sólido hacia la mezcla gaseosa, por medio de los mecanismos de convección, convección y radiación, es posible quemar tanto mezclas excesivamente pobres como ricas en combustible.

El programa utilizado como herramienta para encontrar las soluciones para la combustión en MPI es el PREMIX modificado [16]. Cabe señalar que el modelo matemático no había sido utilizado para reactores a presiones mayores a 1 [atm]. El proceso de combustión en MPI considera: radiación térmica, conducción y convección de calor, propiedades térmicas y estructurales del sistema bifásico, pérdidas de calor desde el sistema hacia el medio ambiente y la cinética química de la combustión del respectivo combustible. En el modelo matemático se incorporan los mecanismos de transporte de materia y energía por convección, difusión, radiación térmica y reacción química. El modelo incluye las leyes de conservación de masa total, masa de la mezcla de gases entrante (metano + aire), energía del sólido, energía del gas y ley del gas perfecto.

Debido a que el combustible diésel comercial tiene más de mil moléculas diferentes y su composición no es bien conocida, para simular sus propiedades físicas o de combustión se utilizan combustibles sustitutos (*fuel surrogates*), que son mezclas de uno o más combustibles simples. Se utiliza el trabajo realizado por T. Zeuch [18] para *n*-heptano, junto con las propiedades termodinámicas y de transporte en formato CHEMKIN, y cuyo mecanismo de reacción contiene 47 especies y 468 reacciones. El heptano es bien utilizado para reemplazar al combustible diésel, por su índice de cetano (56), así como sus propiedades de encendido y de combustión.

Luego de acoplar los respectivos mecanismos en formato CHEMKIN II al PREMIX, no es posible para lo cual el algoritmo no converge en una solución. Como alternativa, se utiliza el

combustible metano junto con el mecanismo de reacción GRI – Mech 3.0 optimizado para gas metano, cuyo uso en el PREMIX ha sido ampliamente respaldado [16 - 18].

Para comparar los resultados numéricos, se toman como base los resultados obtenidos en la investigación realizada por M. Drayton [19], quien estudió experimentalmente la oxidación parcial de mezclas ricas de metano-aire en un reactor de MPI, para un rango de razón de equivalencia de 2 a 8 y presión del reactor 1, 3 y 5 [atm].

## 5.2. Características de la combustión en un quemador MPI

Los quemadores MPI poseen la característica de quemar mezclas excesivamente pobres ricas en combustible, debido al intenso intercambio de calor a través del sólido hacia la premezcla de combustible ocurrida aguas arriba del frente de llama, sosteniendo las reacciones químicas. Con esta recirculación de energía los quemadores de MPI tienen amplios rangos de combustión, capacidad que no poseen los quemadores convencionales. Otras características de la combustión en MPI se vieron en el Capítulo 2.4 de la presente tesis.

En este proceso de combustión de flujo permanente en MPI, se distinguen 3 zonas características dentro del medio poroso, como se ilustra en la Figura 5.1, en las cuales interactúa el medio poroso con el gas reactante:

- La primera zona se encuentra delante del frente donde el aire y el combustible se mezclan de manera natural y se precalientan aprovechando el calor desprendido por el medio poroso.
- La segunda zona es muy estrecha y representa la zona de reacción química, la cual se mueve en la misma dirección o en contra del flujo de gas y donde se produce una gran cantidad de entalpía, la que es absorbida por el medio poroso (gracias a su gran capacidad calorífica) y conducida hacia la primera zona. En esta zona, gracias a la gran área superficial específica que poseen los MPI, la energía acumulada es cedida a la mezcla entrante y trasladada por convección hacia la zona de la reacción. De esta forma se realiza una regeneración del calor en el sistema lo que lleva al exceso de la entalpía o liberación de calor en la zona de reacción química y a un paulatino aumento de la temperatura en el frente, la que puede superar a la temperatura adiabática.

- Por último, la tercera zona que se encuentra detrás del frente, contiene los productos de la combustión, los que intercambian activamente el calor por convección con el medio poroso.

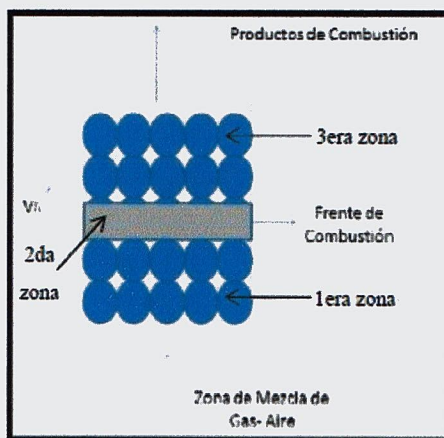


Figura 5.1 Frente de combustión en sistemas de flujo permanentes con MPI.

### 5.3. Modelo matemático de la combustión en medios porosos inertes.

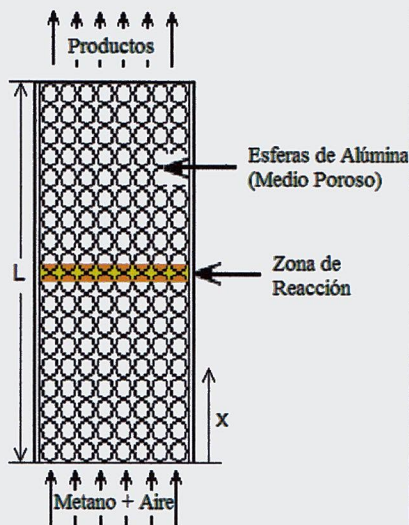
El modelo utilizado para esta tesis fue desarrollado en el estudio de M. Toledo et al. (2009) [16], en el cual, para un volumen de control se describe la combustión en MPI (o combustión filtrada). El modelo describe al gas y al sólido como dos fases que interactúan por la dinámica de fluidos y por la transferencia de calor, y es limitado para describir la combustión en un régimen de bajas velocidades del frente de combustión (*Low Velocity Regime – LVR*), esto es, del orden de velocidades de propagación de la flama de  $10^{-4}$  m/s.

#### 5.3.1. Suposiciones y esquema físico

La configuración física que se utiliza para el modelo matemático es de flujo axial, es decir, la mezcla de aire atraviesa un ducto de largo  $L$  lleno de esferas de alúmina, como se ilustra en la Figura 5.2. Cada uno de los mecanismos de transporte de calor y de masa, se incorporan en el modelo matemático según algunas suposiciones generales, que son:

1. El sistema es considerado constante, isobárico, unidimensional y se mueve con la zona de reacción.
2. El gas es incompresible y obedece la ley del gas perfecto.
3. No hay equilibrio térmico local entre las fases sólida y gaseosa.

4. El aire y el combustible metano, previamente premezclados entran en la sección  $x = 0$  con exceso de aire, a una temperatura inicial  $T_0$  y velocidad inicial del gas  $v_0$
5. La velocidad de propagación de la llama en el medio poroso ( $u$ ) es menor a la velocidad de filtración de la mezcla rica de metano-aire ( $v$ ), es decir,  $u \ll v$ .
6. El intercambio de energía entre el sólido y el gas es proporcional a la diferencia de temperatura local.
7. La transferencia de calor entre el sistema y el medio ambiente ocurre a través del medio poroso solamente por convección natural y radiación térmica.



**Figura 5.2 Representación físico del modelo matemático**

Las ecuaciones que describen el sistema de combustión de llama constante, son:

**Ecuación de continuidad.**

$$\frac{\partial(\dot{M})}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} (\varepsilon \rho v) = 0 \quad (5.1)$$

**Ecuación de energía para la fase gaseosa.**

$$\varepsilon (\rho c_p)_g v \frac{\partial T_g}{\partial x} = \varepsilon \frac{\partial}{\partial x} \left( [\lambda_g + (\rho c_p)_g D_{ax}] \frac{\partial T_g}{\partial x} \right) - \varepsilon \sum_k \dot{\omega}_k h_k W_k - \varepsilon \sum_k \rho_g Y_k V_k C_{pk} \frac{\partial T_g}{\partial x} - h_v (T_g - T_s) \quad (5.2)$$

**Ecuación de energía para la fase sólida.**

$$-(1 - \varepsilon) (\rho c_p)_s u \frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( [\lambda_{ef} + \lambda_r] \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) - h_v (T_g - T_s) - \beta (T_g - T_0) \quad (5.3)$$

**Ecuación de conservación de las especies.**

$$\rho_g v \frac{\partial Y_k}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_g Y_k V_k) = \dot{\omega}_k W_k \quad (5.4)$$

Asumiendo equilibrio térmico entre el gas y el sólido en todo en los límites, las condiciones de frontera son:

$$\text{En la entrada } x = 0: \quad T_g = T_s = T_0; \quad Y = Y_{k,0} \quad (5.5)$$

$$\text{Y en la salida } x = L: \quad \frac{\partial Y_k}{\partial x} = 0; \quad T_g = T_s = T; \quad (5.6)$$

$$\frac{\partial y}{\partial x} = \beta(T - T_0)\varepsilon\rho_g c_{pg}v - (1 - \varepsilon)\rho_s c_{ps}u$$

Para la temperatura de la llama, las condiciones de frontera se obtienen de una solución analítica de las ecuaciones (6.1) – (6.4), y con esto se asume que  $\frac{\partial Y_k}{\partial x} = 0$ ;  $T_g = T_s = T$ ;  $\dot{\omega}_k = 0$  y la radiación no es considerada en la interface lejana a la zona de reacción.

#### 5.4. Programa PREMIX modificado

El programa PREMIX es utilizado como herramienta para el desarrollo de las simulaciones realizadas en la presente investigación. Este programa fue diseñado originalmente para simular procesos de combustión de pre-mezcla de una llama libre. Sin embargo, en el estudio de Toledo et al. (2009)[16] es modificado para la modelación de la combustión en MPI. En la Figura 5.3 se muestra el diagrama de la estructura del programa PREMIX modificado para el cual se utiliza el software FORTRAN PowerStation 4.0.

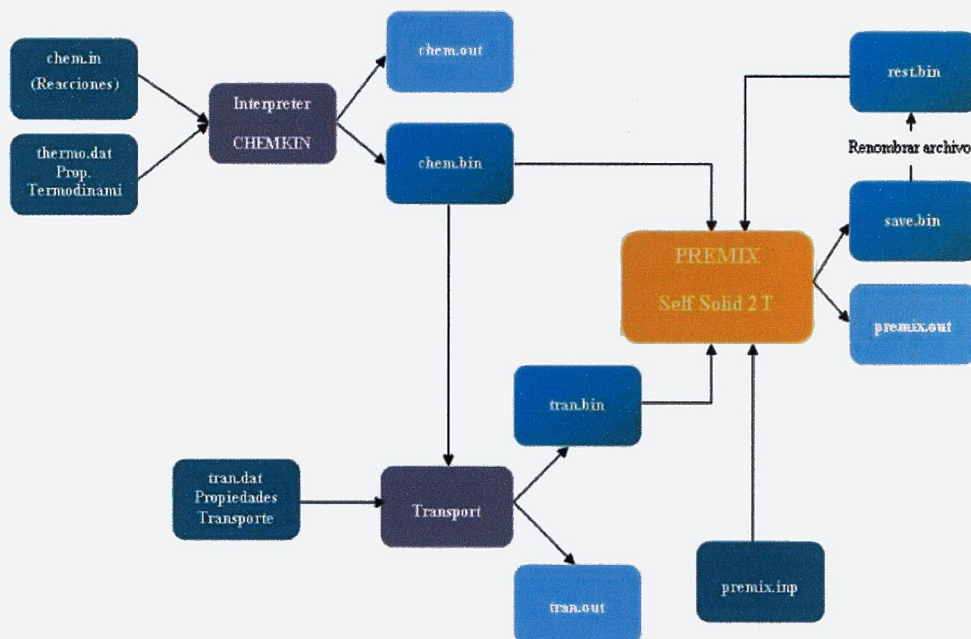


Figura 5.3. Diagrama del programa premix modificado.

Dentro del programa se desarrollaron varias subprogramas y subrutinas que ayudan a resolver el modelo. Uno de estos subprogramas es el Interpreter, que tiene como función generar las reacciones químicas en el formato CHEMKIN de acuerdo a los datos suministrados por el usuario. Esto se lleva a cabo a través de la modificación de los archivos chem.inp y therm.dat. Las reacciones químicas que ocurren en el proceso de combustión a analizar se encuentran en el archivo chem.inp, las que dependen directamente de la ecuación de Arrhenius:

$$k = k(T) = AT^b e^{\frac{-EA}{RT}} \quad (5.7)$$

en donde k es la velocidad específica de reacción, T es la temperatura, A es el factor de frecuencia, EA es la energía de activación y R es la constante universal de los gases. A, b y EA son constantes empíricas.

En cuanto a las propiedades termodinámicas de los compuestos de la reacción química a analizar, como la entalpía de formación y entropía a la temperatura de 298 [K], así como también el poder calorífico entre 300 y 500[K], se encuentran en el archivo therm.dat. Al ejecutar el subprograma Interpreter se generan dos archivos que contienen las soluciones como son el chem.bin y chem.out. Chem.bin es un archivo que contiene los datos de chem.inp y thermo.dat, en forma binaria. La solución del subprograma es el archivo chem.out, el cual está en formato legible de manera de verificar que la solución obtenido en este subprograma no contiene errores.

El otro subprograma es el Transport. Como su nombre lo indica genera los datos referentes a las propiedades de transporte de los compuestos, es decir, viscosidad, conductividad y difusividad. Se emplea el archivo tran.dat. y el archivo chem.bin generado anteriormente para este subprograma. Los archivos generados como solución por el Transport son el tran.bin y tran.out, siendo el primero el binario y el segundo el legible. Con este último se verifica que no haya errores. Luego, los archivos tran.bin y chem.bin, se transportan a la carpeta del programa principal, que además debe contener el archivo rest.bin (solución binaria que se ejecuta antes de iniciar el programa como archivo de arranque).

El programa principal es el PremixSelf Solid 2T, el cual simula el proceso de combustión en medios porosos inertes de forma unidimensional, transiente y sin considerar equilibrio térmico local entre el sólido y el gas, es decir,  $T_g \neq T_s$ .

Finalmente, en el archivo premix.inp se colocan los parámetros específicos del caso a estudiar como son: los porcentajes en volumen de los componentes de la mezcla combustible-aire (relación de equivalencia) y los parámetros de diseño del reactor poroso. Luego de que son generados todos los archivos “.bin” e ingresados los parámetros específicos deseados, se ejecuta el programa PremixSelf Solid 2T, obteniéndose los archivos premix.out y save.bin. El primero es la solución que contiene las temperaturas del gas y sólido, velocidades del frente de llama y los gases productos del proceso de combustión en MPI. El segundo es la solución binaria.

## 5.5. Mecanismo de reacción

El mecanismo de reacción utilizado para la simulación numérica es el GRI – Mech3.0, el cual está diseñado para optimizar la combustión de gas natural, incluida la formación de NO<sub>x</sub> y la química del requemado de gases. Este mecanismo contiene 325 reacciones (3 son duplicados) y 53 especies (incluido el argón).

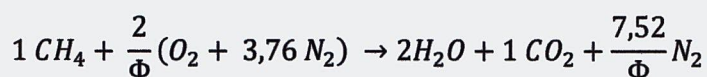
## 5.6. Procedimiento numérico

El flujo másico de mezcla de combustible-aire por unidad de área (FLRT) es constante para todas las relaciones de equivalencia utilizadas, correspondiendo a un valor de  $3.1 \cdot 10^{-2} \frac{g}{cm^2-sec}$ .

El canal poroso semi-infinito es construido con esferas de alúmina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de diámetro  $d = 5,6 [mm]$ , con porosidad  $\varepsilon = 0,4$  entre partículas. Se prueban relaciones de equivalencia en un rango  $0,5 < \Phi < 5$ , y trabajar con los  $\Phi$  cuyas soluciones converja el modelo. Además se cuenta con el trabajo realizado por Drayton [19], con el fin de poder contar con una base de comparación.

Los porcentajes en volumen de la mezcla metano-aire corresponden a la fracción molar de cada reactante. El cálculo de la mezcla de gases simulada para cada relación de equivalencia se detalla a continuación.

Se define la reacción química de combustión completa para mezclas ricas ( $\Phi > 1$ ) sin enriquecimiento de oxígeno para un mol de combustible metano:



donde  $\Phi$  es la relación de equivalencia dada como la relación entre el volumen de aire estequiométrico, es decir, la mínima cantidad de aire para obtener una combustión completa, y la cantidad de aire real presente en la combustión.

$$\Phi = \frac{V_{a,e}}{V_a}$$

Por lo tanto, la fracción molar para cada reactante y producto es:

$$Y_{CH_4} = \frac{1}{(1+2/\Phi+7,52/\Phi)} \quad (5.8)$$

$$Y_{O_2} = \frac{2/\Phi}{(1+2/\Phi+7,52/\Phi)} \quad (5.9)$$

$$Y_{N_2} = \frac{7,52/\Phi}{(1+2/\Phi+7,52/\Phi)} \quad (5.10)$$

Con los valores de fracción molar se puede calcular la densidad de la mezcla en función de  $\Phi$ , y a partir del valor de FLRT obtener la velocidad de filtración,  $v$ , como sigue,

$$\rho_{mezcla} = Y_{CH_4} \cdot \rho_{CH_4} + (Y_{O_2} + Y_{N_2}) \cdot \rho_{aire} \quad (5.11)$$

$$v = \frac{FLRT}{\rho_{mezcla} \cdot (1-\varepsilon)} \quad (5.12)$$

donde,

**Tabla 5.1. Valores utilizados para el cálculo de la velocidad de filtración**

Parámetro	Valor	Unidad
<i>FLRT</i>	$3,10 \cdot 10^{-02}$	$g/(cm^2 \cdot s)$
$\varepsilon$	40	%
$\rho_{CH_4}$ (*)	0,668	g/l
$\rho_{aire}$ (*)	1,293	g/l

(\*) Fuente: <http://www.valvias.com/prontuario-propiedades-materiales-densidad-gases.php>

Así, resolviendo las ecuaciones (5.8 – 5.12) para  $0,5 < \Phi < 5$ , se obtiene una velocidad de filtración entre 50 y 52 cm/s.

En el ANEXO F se encuentra la tabla con los valores de los porcentajes de cada componente (fracción molar) y velocidades de filtración, calculados mediante las fórmulas aquí descritas.

## 5.7. Resultados de la simulación numérica

Utilizando el software computacional PREMIX, se analiza el comportamiento termodinámico al incrementar la presión en una matriz porosa, a través del modelamiento de los perfiles de temperatura y especies químicas, en un sistema donde la onda de combustión se propaga libremente por éste (sistema transiente), aguas arriba o aguas abajo dentro de la matriz finita.

En vista de que el PREMIX no se ha utilizado para predecir la combustión a altas presiones, en primera instancia se verifica el rango alcanzable por el modelo, resultando en bajo número de convergencias para rangos de mezclas con exceso de aire ( $\Phi < 1$ ) excepto para  $\Phi = 0.9$ , pero convergiendo para mezclas pobres ( $\Phi > 1$ ), ambos en un rango de presión entre 1 y 5 atm. En el rango de mezclas pobres, las soluciones de  $\Phi = 2$  para presiones 1.5, 2, 2.5 y 3 atm predicen resultados fuera de la tendencia común, por lo que estos puntos se descartan de los resultados. De acuerdo a lo anterior, se analizan las tendencias de las temperaturas de fase sólida y gaseosa, y la velocidad de propagación de la llama para mezclas ricas ( $1.2 < \Phi < 5$ ) bajo la presión del reactor de 1 a 5 atm.

La tabla del ANEXO G detalla las temperaturas máximas de los perfiles de temperatura de la fase sólida y fase gaseosa, y velocidad del frente de combustión para las presiones y relación de equivalencia antes mencionadas. El análisis de estas tablas se realiza en las secciones siguientes. En los gráficos (Fig. 5.4 – 5-6), las curvas de tendencia se construyen por medio de una regresión polinómica de grado 2.

### 5.7.1. Validación del modelo matemático

En muchas investigaciones numéricas sobre combustión en quemadores porosos, para hacer una comparación más precisa con resultados experimentales se define la temperatura de combustión como la temperatura del sólido, bajo el criterio que, en el registro de la temperatura, las termocuplas hacen contacto con la matriz sólida y no con el gas. Esto es así, por lo menos en los trabajos utilizados en esta tesis como referencia [16-20].

Para validar el modelo matemático, se utilizan resultados experimentales con gas metano [20], a una velocidad de filtración de 12 cm/s, presión atmosférica y un rango de relación de equivalencia entre 0.2 y 2.5. Nótese que la velocidad de filtración de las simulaciones numéricas es del orden de 50 cm/s.

En la Figura 5.4 se muestran las curvas de temperaturas de fase sólida ( $T_s$ ), fase gaseosa ( $T_g$ ) y velocidad del frente de combustión ( $u$ ) en función de la relación de equivalencia entre 0.9 y 5. La línea gris es la temperatura adiabática a 1 atm, y se coloca como referencia [21]. Se observa que en la transición de mezcla pobre a rica tanto  $T_s$  como  $T_g$  aumentan y la velocidad de llama decrece hasta estabilizarse (combustión estacionaria,  $u = 0$ ) en  $\Phi = 2$  aproximadamente. En mezclas ricas  $T_g$  disminuye a medida que  $\Phi$  aumenta, mientras que  $T_s$  aumenta paulatinamente, debido a la absorción de energía de la combustión por parte de la fase sólida. Este “acercamiento” de las temperaturas puede deberse al aumento de transferencia de calor entre la fase sólida y gaseosa, es decir, a mayores concentraciones de metano (mezclas ultraricas) la transferencia de calor mejora hacia la fase sólida. En mezclas ultraricas las temperaturas se mantienen superadiabáticas en un valor constante del orden de 1600 K, independiente del contenido de metano. Experimentalmente, la máxima temperatura de combustión es 1630 K en  $\Phi = 1.4$

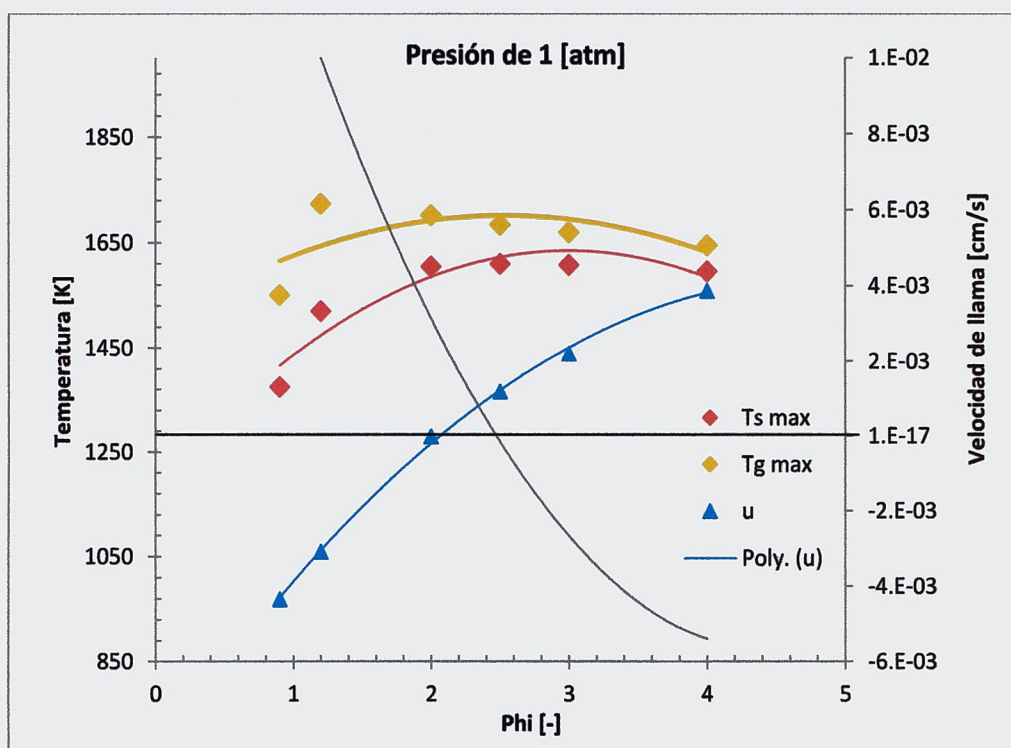


Figura 5.4.  $T_s$ ,  $T_g$  y  $u$  con el reactor a presión atmosférica.

La estabilización de llama entregada por el modelo está dentro de un rango aceptable (experimentalmente  $\Phi \approx 1.5$ ). Lo mismo ocurre con el rango de temperaturas máximas alcanzadas.

Por otro lado, se observa que bajo condiciones de temperaturas sub-adiabáticas, la velocidad de propagación de llama es descendente a contraflujo (aguas arriba) y a medida que aumenta la relación de equivalencia ésta va disminuyendo hasta estabilizarse. Con el modelo, en mezclas casi estequiométricas,  $u = -4.3 \cdot 10^{-3}$  cm/s, mientras que experimentalmente es del orden de  $-5 \cdot 10^{-3}$  cm/s. Para relaciones de equivalencia mayores a 2, el frente de combustión se propaga aguas abajo del flujo ( $u > 0$ ), alcanzando condiciones de temperatura de combustión super-adiabáticas. Este comportamiento se condice con los resultados experimentales.

El medio poroso, por su alta capacidad calorífica, actúa como un acumulador de calor absorbiendo la energía térmica de los productos de combustión por convección, el que a su vez, transfiere este calor por conducción y radiación aguas arriba del frente de combustión recirculando la energía y provocando un exceso de entalpía que da lugar a temperaturas super-adiabáticas. Este efecto se observa en mezclas ultra-ricas, donde existe un control en la temperatura de combustión, al ser independientes del contenido de metano en la mezcla. Este fenómeno se observa en todos los rangos de presión analizados (1 a 5 atm).

Para el rango de presiones entre 1 y 5 atm, las temperaturas  $T_s$  y  $T_g$  tienen una tendencia muy similar. En el anexo F se muestran los gráficos para el resto de las presiones.

Por otro lado, las temperaturas superadiabáticas se alcanzan en  $\Phi > 2$ , donde el frente de combustión viaja aguas abajo ( $u > 0$ ). Esto es así para todas las presiones simuladas.

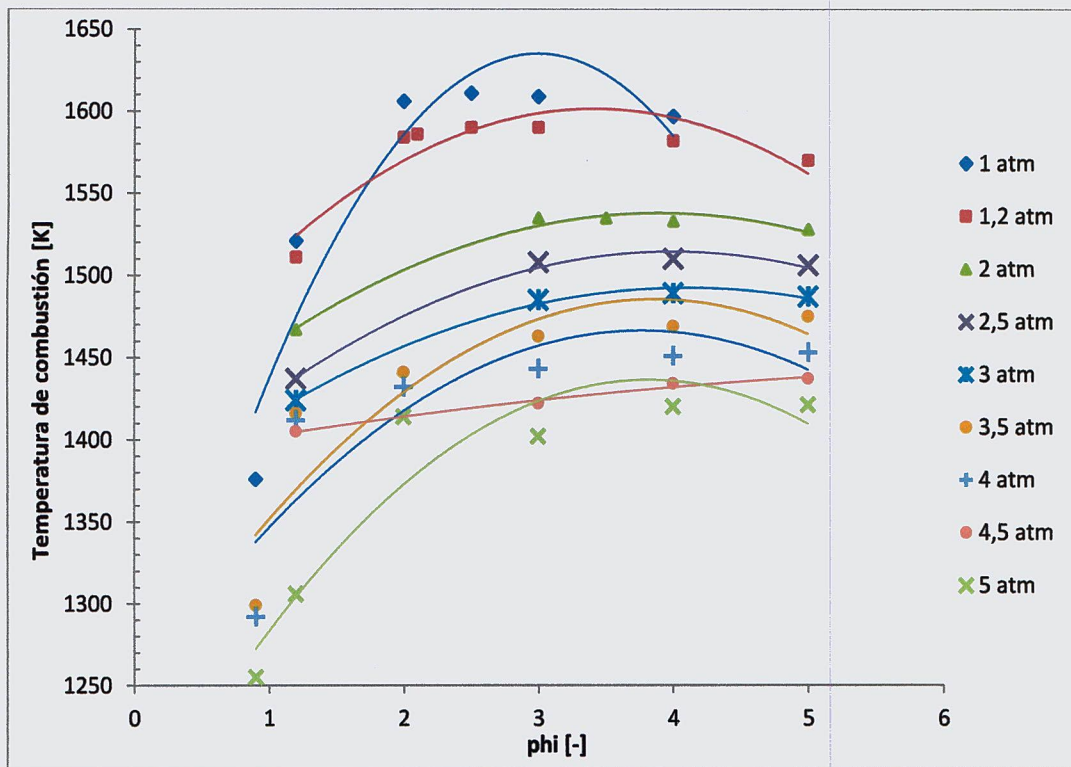
Por lo tanto, en base al reporte de las investigaciones de referencia [20] sobre las tendencias de las curvas de temperatura de sólido, gas y velocidad de llama, se demuestra que el modelo predice correctamente su comportamiento para el rango de presiones analizadas.

## **5.7.2. Efecto de la presión en la combustión en reactores porosos**

### ***5.7.2.1. Temperatura del sólido y gas***

El comportamiento de la temperatura del sólido nos aproxima a conocer la capacidad de la fase sólida del medio poroso para absorber el calor de los gases de combustión y la consiguiente recirculación de calor reportada en las investigaciones vistas. Sin embargo, si se pretende conocer el efecto de la presión en el comportamiento termofísico de la reacción química, se debe hacer un análisis sobre la temperatura del gas.

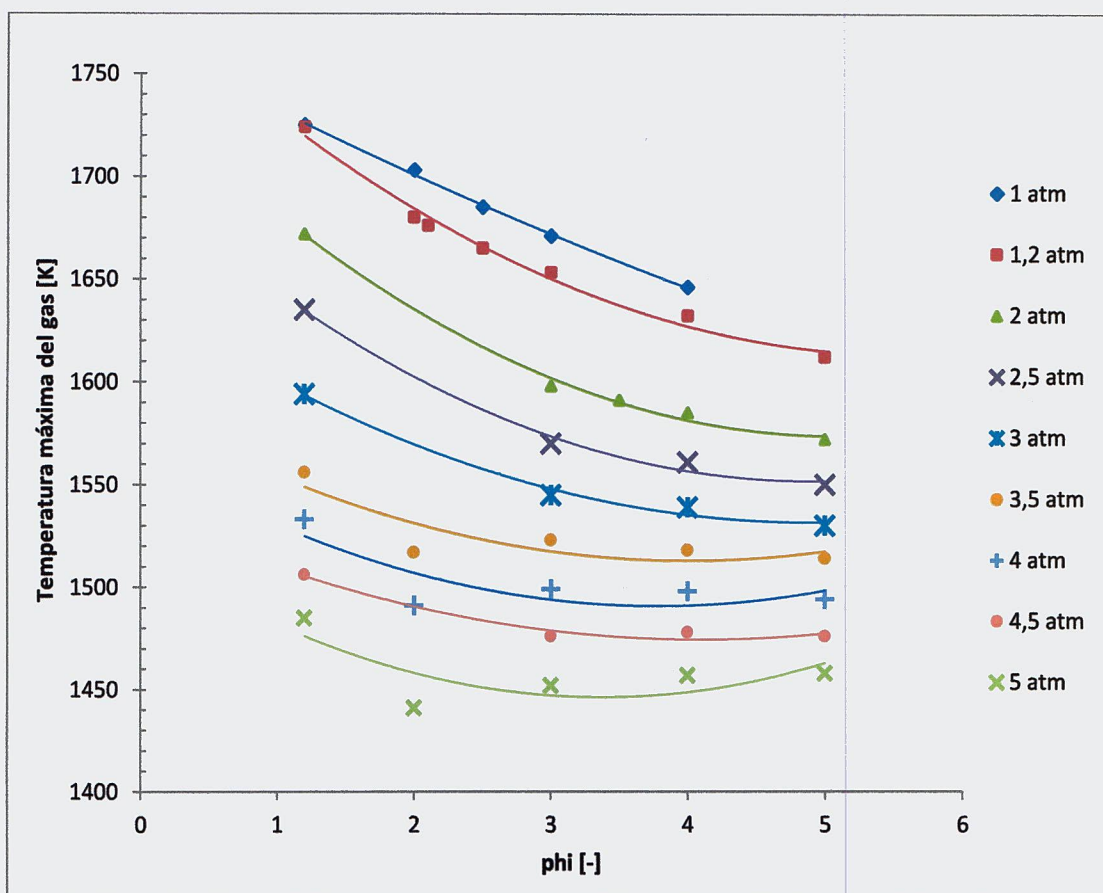
En la Figura 5.5, se muestran las curvas de temperaturas de combustión en función de la relación de equivalencia ( $0.9 < \Phi < 5$ ) para presiones entre 1 y 5 atm.



**Figura 5.5** Temperatura de combustión para distintas presiones

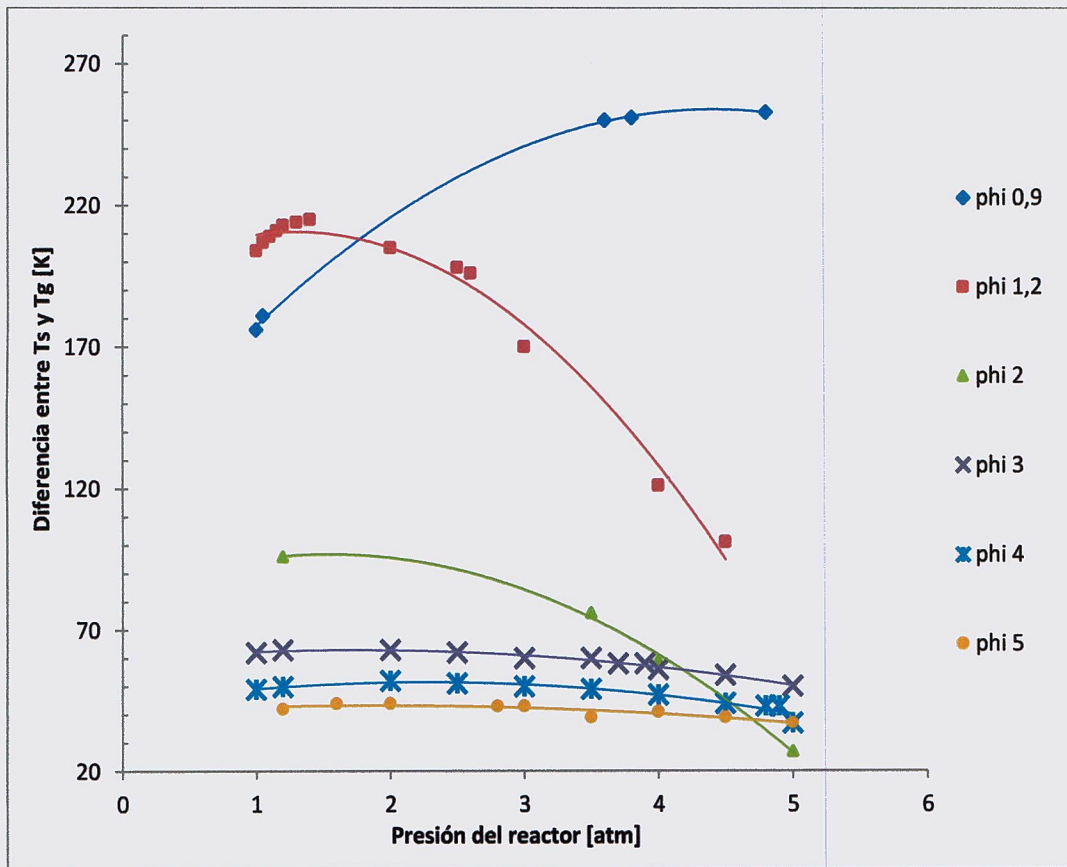
Como se dijo anteriormente, la tendencia es que a medida aumenta la relación de equivalencia las temperaturas de combustión aumentan, para en mezclas ultra ricas ( $\Phi > 2$ ) ser independiente del contenido de metano. Para presiones 1, 2, 3, 4 y 5 atm estas máximas temperaturas son aproximadamente 1590 ( $\Phi = 3$ ), 1535 ( $\Phi = 3$ ), 1489 ( $\Phi = 4$ ), 1453 ( $\Phi = 5$ ) y 1421 ( $\Phi = 5$ ) K, respectivamente. Se observa que con el incremento de la presión se pueden llegar a alcanzar las temperaturas de combustión en mezclas cada vez más ricas.

El efecto en la combustión a causa del cambio en la presión interna del reactor poroso se observa en la Figura 5.6. Se aprecia que las pendientes de las curvas de Tg van disminuyendo a medida que aumenta la presión.



**Figura 5.6. Temperaturas máximas del gasen función de la relación de equivalencia para presiones entre 1 y 5 atm.**

Los resultados numéricos muestran que con el incremento de presión, tanto las curvas de temperatura de sólido como gas, disminuyen. Los resultados experimentales de la investigación de Drayton [19], para una velocidad de filtración de 70 cm/s y  $\Phi = 4$  muestran que las temperaturas de combustión son 1453, 1533, 1653 K para 1, 3 y 5 atm, respectivamente. En cambio las temperaturas de combustión como resultado de las simulaciones para  $\Phi = 4$  para las mismas presiones son 1597, 1489 y 1420, respectivamente. El comportamiento se contradice con el experimental, pues en ellos la tendencia es que tras aumentar la presión, se modifica la reacción de combustión aumentando la energía térmica de combustión y por ende se alcanzan mayores temperaturas en el reactor. Esta diferencia puede deberse a que en dicha investigación se utiliza un quemador de flujo reverso, en donde la mezcla ingresa por los extremos del quemador resultando en un perfil de temperatura estacionario, es decir, se estabiliza el frente de llama (zona de reacción) en el centro del reactor.



**Figura 5.7. Diferencia entre  $T_s$  y  $T_{gen}$  función de la presión del reactor, para relaciones de equivalencia entre 0,9 y 5.**

Otro punto de vista del efecto de la presión tiene que ver con la diferencia entre las temperaturas máximas de las fases, en la zona de reacción. Se observa en la Figura 5.7 que a medida que aumenta la presión interna del reactor: en mezclas pobres ( $\Phi = 9$ ), esta diferencia crece; en mezclas ricas ( $\Phi = 1.2$  y  $\Phi = 2$ ) las temperaturas son cada vez más cercanas entre ellas; y para mezclas ultraricas ( $\Phi > 3$ ), se observa que la diferencia es independiente de la presión. Además, con el incremento de la relación de equivalencia, la diferencia decrece. Este resultado puede significar que en mezclas pobres la transferencia de calor va disminuyendo con el incremento de la presión, en mezclas ricas se mejora con el aumento de presión y para mezclas ultraricas el efecto de la presión es mínimo. Por lo que la mayor transferencia de calor, esto es mínima diferencia es una relación de equivalencia igual a 2, a una presión de 5 atm. La mayor mejora se da en  $\Phi=2$ , desde 96 K de diferencia entre fases a una presión de 1.2 atm, a una diferencia entre fases de 27 K a 5 atm de presión. Esto nos dice que se puede mejorar la transferencia de calor en un 72% app. aumentando la presión de 1.2 a 5 atm.

### 5.7.2.2. Velocidad de propagación

La Figura 5.7 muestra las velocidades de propagación del frente de combustión obtenidas con las simulaciones numéricas, en función de la relación de equivalencia ( $0.9 < \Phi < 5$ ), para el rango de presiones entre 1 y 5 atm.

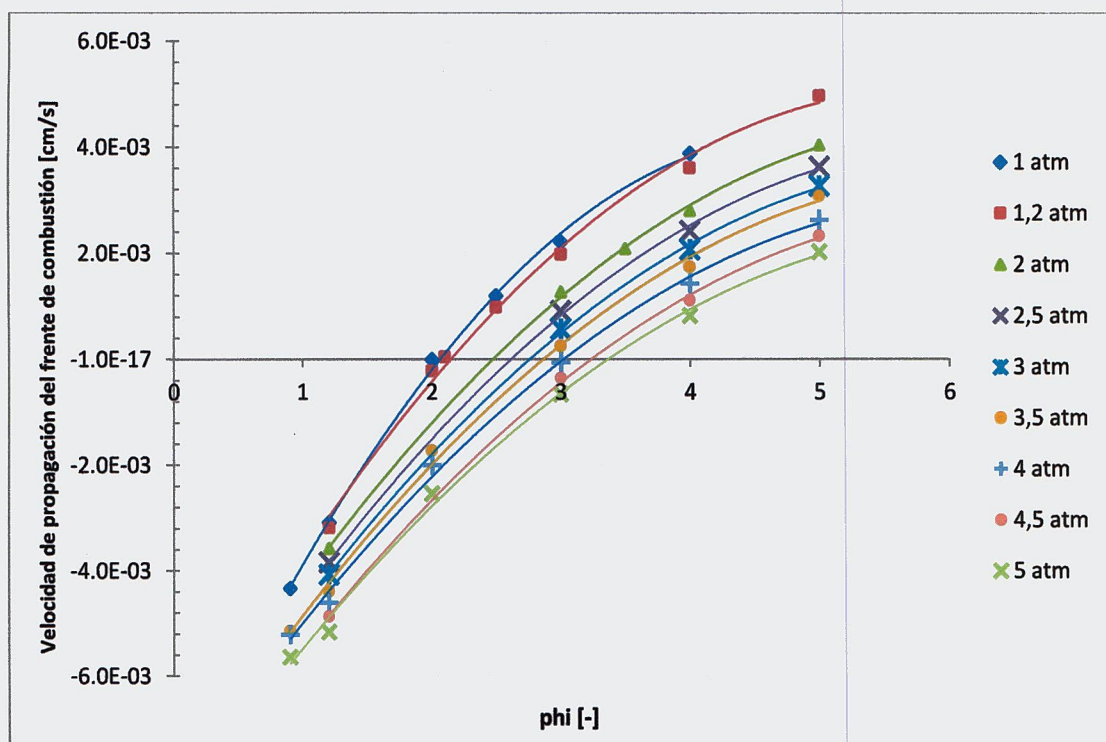


Figura 5.8. Velocidad de propagación de la llama en función de  $\Phi$ .

Con una presión atmosférica en el reactor, la llama estable se alcanza en la relación de equivalencia 2 app.; en cambio, para presiones entre 3.5 y 4.5 la estabilización de llama se alcanza para  $\Phi = 3$  y para una presión de 5 atm se alcanza en  $\Phi = 3.5$  app.

El valor máximo de velocidad es  $5.6 \cdot 10^{-3}$  m/s (contraflujo) en  $\Phi = 0.9$  a 5 atm de presión del reactor y la temperatura de combustión, en estas condiciones es 1508 K, temperatura subadiabática ( $T_{ad} = 2132$  K para  $\Phi = 0.9$  y 5 atm [21]). Esta velocidad no corresponde a la temperatura máxima de combustión, cuyo valor supera a la temperatura adiabática, es 1609 K en  $\Phi = 3$  a presión atmosférica ( $T_{ad} = 1018$  K para  $\Phi = 3$  [21]), con una velocidad aguas arriba de  $2.2 \cdot 10^{-3}$  m/s.

### 5.7.2.3. Productos de la combustión

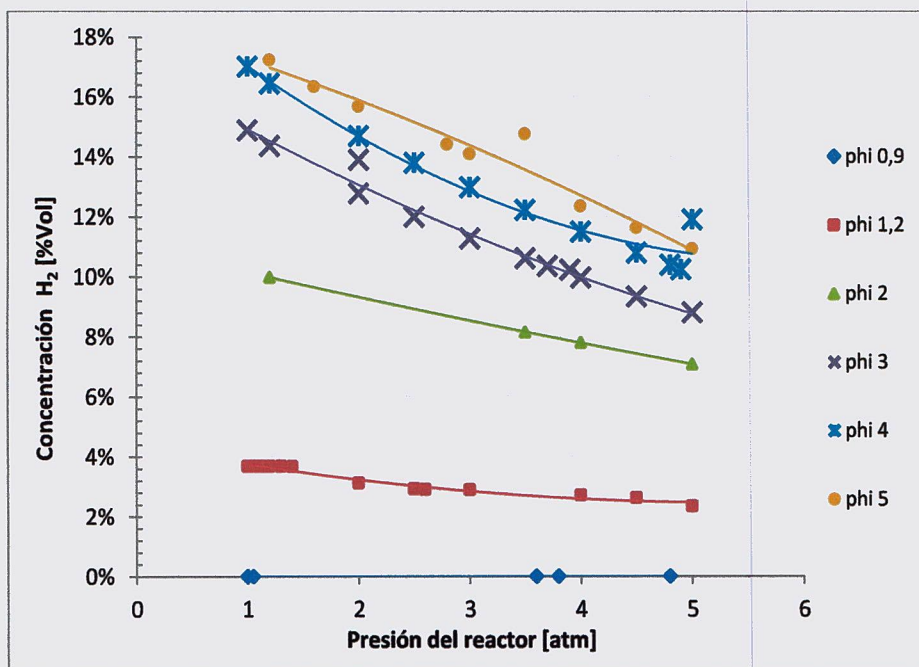


Figura 5.9. Generación de H<sub>2</sub> en función de la presión para distintos  $\Phi$ .

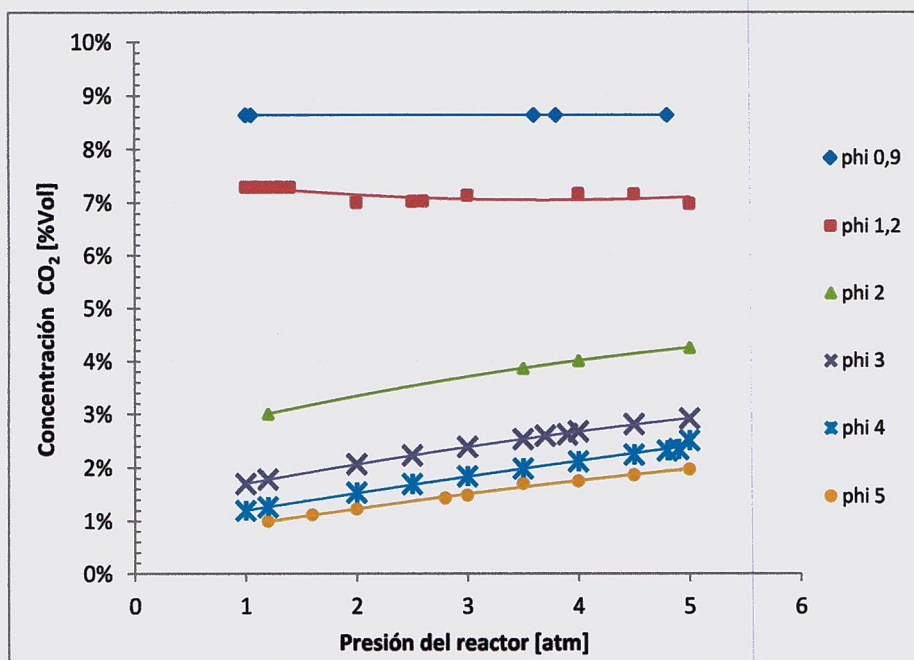


Figura 5.10. Emisiones de CO<sub>2</sub> en función de la presión para distintos  $\Phi$ .

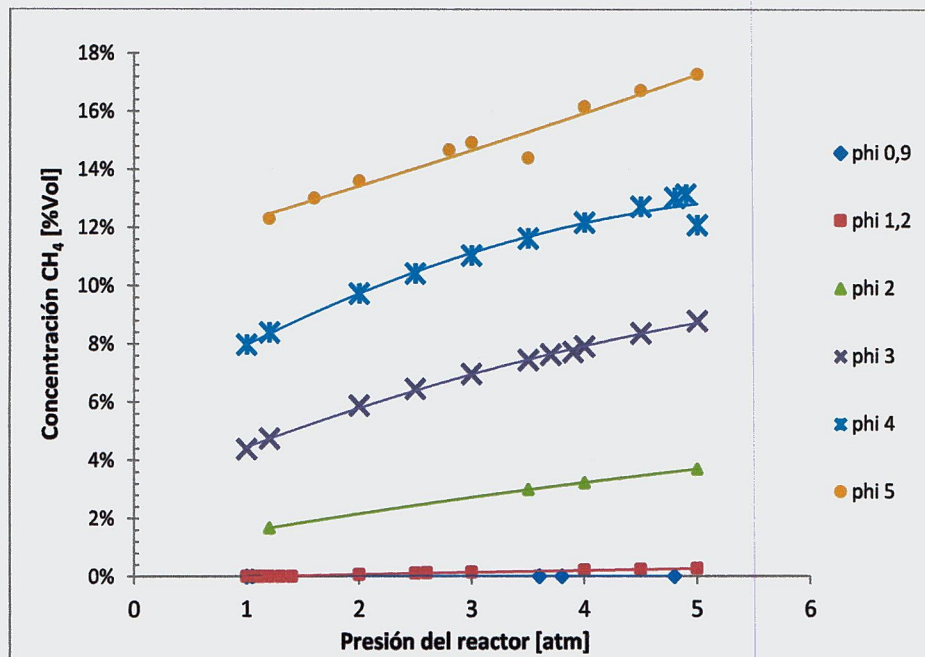


Figura 5.11. Emisiones de CO en función de la presión para distintos  $\Phi$ .

Se observa que para  $\phi$  0.9 y 1.2 el efecto de la presión no genera cambios notables en las emisiones de los gases de combustión.

Para relaciones de equivalencia mayor a 1.2 se observa en la Fig. 5.9, que la generación de hidrógeno disminuye al aumentar la presión dentro del reactor, mientras que las emisiones de  $\text{CO}_2$  (Fig. 5.10), aumentan, y las de CO (Fig. 5.11) disminuyen. Tomando en cuenta que la generación de  $\text{H}_2$  es producto de una reacción de oxidación parcial y que el  $\text{CO}_2$  y CO son indicadores de combustión, los gráficos sugieren que existe una mejora en el proceso de combustión a medida que la presión aumenta. Sin embargo, al observar las emisiones de metano (Fig. 5.12), se observa que éstas aumentan con la presión, por lo que se constata que el proceso global de combustión no es más completo, y que su incremento puede ser producto de una regeneración de  $\text{CH}_4$  por la recombinación de hidrocarburos en presencia de  $\text{H}_2$  (hidrogenación) a altas presiones y altas temperaturas.

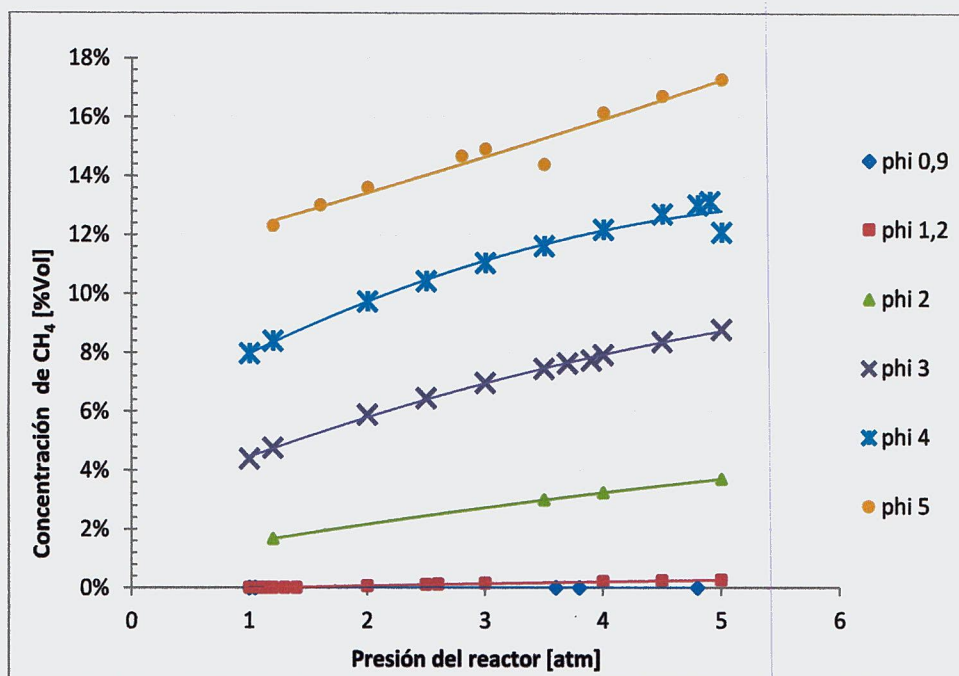


Figura 5.12. Emisiones de CH<sub>4</sub> en función de la presión para distintos  $\Phi$ .

Cabe señalar que la combustión de mezclas ricas se utiliza para la generación de gas de síntesis (H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO), por lo que no es deseable una combustión completa para este propósito.

Los resultados revelan que el efecto de la presión en la generación de hidrógeno se pronuncia con mezclas ultraricas, llegando, por ejemplo en  $\Phi = 5a$  disminuir desde 17,2% de concentración en los gases de escape a 1.2 atm, a una concentración del 10.9% a 5 atm, es decir, en un 36%.

## CONCLUSIONES

Científicos de todo el mundo enfocan sus energías en lograr una combustión más limpia sin perjudicar la eficiencia de los procesos de combustión. En un motor, se pretende lograr un proceso de combustión homogéneo en todo el volumen de la cámara de combustión, mediante la aplicación de tecnologías de medios porosos (MP), en especial en motores de inyección directa de combustible, ya que por la alta presión de inyección, se generan mejores condiciones para la atomización del combustible y su posterior mezclado con el aire.

Los esfuerzos de este trabajo, apuntaron a generar un aporte al desarrollo experimental de este nuevo tipo de tecnología. Para este fin, se estudió y analizó, en primer lugar, el comportamiento de un motor de combustión interna encendido por compresión y alimentado con combustible diesel, para luego insertar un medio poroso en la cavidad superior del pistón, sin considerar modificaciones en el motor, con la intención de mejorar el proceso de combustión, reducir el consumo específico de combustible y las emisiones contaminantes contenidas en los gases de escape. Se probaron distintas configuraciones del medio poroso, combinando distintos materiales y geometrías. Los ensayos realizados con MP no consiguieron el encendido del motor. Se desprende que la mayor influencia no es tanto las características del medio poroso, si no que su fijación al pistón, a cuya cavidad no era fácil de adaptar. Además se vislumbró la necesidad de precalentar el medio poroso previo a la puesta en marcha, con una bujía de incandescencia por ejemplo, con el objetivo de asegurar una rápida vaporización del combustible. Otros desafíos a tener en cuenta para futuros desarrollos en esta aplicación es la búsqueda de materiales porosos comerciales que puedan ser sometidos a las condiciones térmicas y mecánicas de un motor, esto es, altas presiones, altas temperaturas, grandes gradientes térmicos, altas vibraciones, etc.

Acerca de la fase numérica, las simulaciones computacionales revelan que el modelo matemático, junto con el software PREMIX modificado puede predecir resultados aceptables para rangos de razón de equivalencia ( $0.9 < \Phi < 5$ ) y presión del reactor (1 a 5 atm) para la combustión de gas metano en un reactor poroso, donde las temperaturas de combustión alcanzan valores superadiabáticos en mezclas ultra-ricas, independiente del contenido de metano en la mezcla. Los resultados numéricos nos demuestran que el incremento de la presión en el reactor no produce un aumento en las temperaturas de los gases, sin embargo sí afecta a la transferencia de calor entre fases, haciéndola más efectiva solo en mezclas

ultraricas y en el rango entre 1.2 y 2 de relación de equivalencia. El mayor efecto es  $\Phi = 2$  con una mejora de 72%. Para rangos de  $\Phi$  mayor a 2, el efecto de la presión es mínimo y para rangos menores de  $\Phi = 1.2$ , el efecto es perjudicial en cuanto a la absorción de calor del sólido. Otra consecuencia del incremento de presión se observa en las emisiones de  $H_2$ , las cuales disminuyen. Esto, se acentúa a medida que se agrega metano a la mezcla reactante, llegando a disminuir en un 36% para  $\Phi = 5$ . Basándose en los resultados de las emisiones de  $CH_4$ , que aumentan con la presión, se puede inferir que el hidrógeno participa en procesos de recombinación con hidrocarburos o radicales de estos mismos, en condiciones de alta presión y temperatura del reactor. Por lo tanto, en mezclas ricas y ultraricas no se favorece la generación de gas de síntesis con el aumento de presión en el reactor.

## REFERENCIAS

- [1] M. Weclas, "Potential of Porous Media Combustion Technology as Applied to Internal Combustion Engines," *J. of Thermodynamics*, 2010, Vol. 2010, Article ID 789262, 39 pages.
- [2] Weclas, M., "Potential of Porous Medium Combustion Technology as Applied to Internal Combustion Engines", *SonderdruckSchriftenreihe der Georg-Simon-Ohm-FachhochschuleNürnberg, Germany*, 2001, No. 32, ISSN: 1616-0762.
- [3] K. Chidambaram, T. Packirisamu, "Smart Ceramic Materials for Homogeneous Combustion in Internal Combustion Engines – A Review", *Journal of Thermal Science*, 2009, Vol. 13, No.3, pp. 153-163.
- [4] M. Weclas, J. Cypris, T.M.A. Maksoud, "Thermodynamic Properties of Real Porous Combustion Reactor under Diesel Engine-Like Conditions", *Journal of Thermodynamics Volume 2012*, Article ID 798104, 11 pages.
- [5] T. Fend, D. Trimis, R. Pitz-Paal, B. Hoffschmidt, and O. Reutter, "Thermal properties," in *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*, M. Scheffler and P. Colombo, Eds., Wiley-VCH, Cambridge, UK, 2005.
- [6] R. W. Rice, "Mechanical properties," in *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*, M. Scheffler and P. Colombo, Eds., Wiley-VCH, Cambridge, UK, 2005.
- [7] H.-P. Martin and J. Adler, "Electrical properties", in *Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications*, M. Scheffler and P. Colombo, Eds., Wiley-VCH, Cambridge, UK, 2005.
- [8] M. Weclas, "Strategy for Intelligent Internal Combustion Engine with Homogeneous Combustion in Cylinder", *SonderdruckSchriftenreihe University of Applied Sciences in Nuernberg*, 2004.
- [9] F. Durst, M. Weclas, "A New Type of Internal Combustion Engine Based on the Porous Medium Combustion Technique", *Journal of Automobile Engineering, IMechE, part D*, 2001, Vol. 215, pp. 63-81.
- [10] F. Durst, M. Weclas, "A New Concept of I.C. Engine with Homogeneous Combustion in Porous –Medium (PM)", *5th Int. Symposium COMODIA 2001, Nagoya, Japan*.

- [11] C. Park, M. Koviany, “Evaporation-Combustion affected by in-cylinder, reciprocating porous regenerator”, *Trans. of ASME*, 2002, Vol. 124, pp. 184-194.
- [12] D. Ashok, K.Gajanan, S.Mahendra, “Analysis of Internal Combustion Engine with a new concept of porous medium combustion for the future clean engine”, *Journal of Thermal Science*, 2010, Vol. 14, No. 4, pp. 943 – 956.
- [13] C. Kannan, P.Tamilporai, “Part Load Performance and Emission Improvement of Direct Injection Diesel Engine through Porous Medium Combustion Technique”, *Journal Clean*, 2009, Vol. 37, No.10, pp. 806 – 810.
- [14] D. Ashok, K. Awari, M. Singh, “Improved Combustion Technique with Porous Structure in Internal Combustion Engine”, *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012, ISSN:2248-9622, pp. 79 – 83.
- [15] Le DucChien, Chae Jae Ou, Kwak Yong Hwan, “Improving surface characteristics of Porous Medium reactor in diesel engine by Plasma Technology”, *International Federation of Automotive Engineering Societies, papers 2006*.
- [16] M. Toledo, V. Bubnovich, A. Saveliev, “Hydrogen production in ultrarich combustion of hydrocarbon fuels in porous media”, *Int. Journal of Hydrogen Energy*, 2009, Vol. 34, pp. 1818 – 1827.
- [17] K. Utria, F. González, M. Toledo, Simulación Numérica de la Oxidación Parcial de la Mezcla Metano-aire en Presencia de Vapor de Agua en Medios Porosos Inertes, *Mecánica Computacional Vol XXX, No. 20*, pp. 1733– 1746.
- [18] T. Zeuch, G. Moréac, S. Ahmed c, F. Mauss, “Comprehensive Skeletal Mechanism for the Oxidation of n-heptane Generated by Chemistry-Guided Reduction”, *J. Combustion Flame*, 2008, Vol. 155, pp. 651 – 674.
- [19] M. Drayton, A. Saveliev, L. Kennedy, A.Fridman, Y. Li, “Syngas Production Using Superadiabatic Combustion of Ultrarich Methane-Air Mixtures”, *27th Symposium (International) on Combustion*, 1998, pp.136 – 1367.
- [20] M. Toledo, V. Bubnovich, A.Saveliev, L. Kennedy, “Comparative study of lean and rich filtration combustion of methane/air, ethane/air, and propane/air mixtures”. *4<sup>th</sup> Int. Conf. on Heat Transfer, Thermal Engineering and Environment*, 2006, pp.146 – 152.
- [21] <http://elearning.cerfacs.fr/combustion/tools/adiabaticflametemperature/index.php>

## **ANEXO A: Contacto investigadores**

### **➤ Prof. Ing. Paolo Colombo**

Departamento de Ingeniería Industrial

Universidad de Padua - Italia

También, prof. del Departamento de Ciencia de Materiales e Ingeniería

Universidad Estatal de Pennsylvania – EEUU

Aporte a esta investigación: Editor del libro: “Cellularceramics”, muy utilizado en esta investigación.

Email: paolo.colombo@unipd.it

### **➤ Prof. Amir A. M. Oliveira**

Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC) – EEUU.

Aporte a esta investigación: Experiencia en reactores de MP y combustión.

Email : amir.oliveira@gmail.com / amirol@emc.ufsc.br

### **➤ Prof. Dr. Murilo Daniel de Mello Innocentini**

Departamento de Ingeniería Química

Universidad de Ribeirão Preto – Brasil

Aporte a esta investigación: Fluidos dinámicos y caracterización de materiales cerámicos porosos para distintas aplicaciones (pruebas de permeabilidad)

Email: muriloinnocentini@yahoo.com.br

### **➤ Prof. Dachamir Hotza**

Universidad Federal de Santa Catarina (UFSC) – EEUU.

Aporte a esta investigación: Trabaja con filtros de zirconia puro.

Email: dhotza@gmail.com

### **➤ Prof. Fernando dos Santos Ortega**

Universidad de Vale do Paraíba – Brasil.

Aporte a esta investigación: Trabaja con medios porosos de cerámica y con empresas de filtros de cerámica.

Email: ferortega@fei.edu.br

## **ANEXO B: Orden de compra medios porosos**

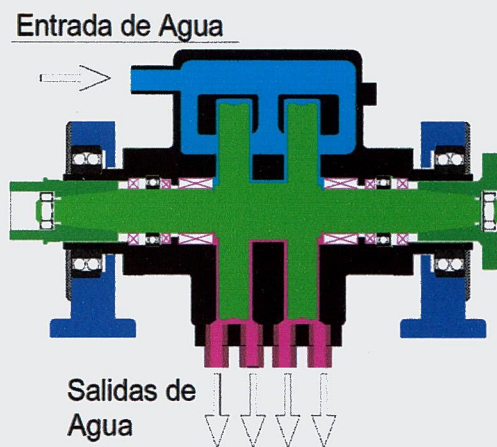
- 1 filtro HT 007, 10 ppi. Grosor: 6.3 [mm]
- 1 filtro HT 007, 30 ppi. Grosor: 6.3 [mm]
- 1 filtro HT 007, 20 ppi. Grosor: 6.3 [mm]
- 1 filtro S 007, 10 ppi. Grosor: 6.3 [mm]
- 1 filtro S 007, 20 ppi. Grosor: 6.3 [mm]
- 1 filtro S 007, 30 ppi Grosor: 6.3 [mm]
- 1 filtro HT 007, 30 ppi. Grosor: 17 [mm]
- 1 filtro S 007, 30 ppi. Grosor: 17 [mm]
- Diámetro de todas las muestras: 43.4 [mm]

## ANEXO C: Freno dinamométrico SAENZ

El freno es de tipo hidráulico por torbellino de agua. El motor se conecta al eje por medio de un cardan y hace girar al eje y a los rotores solidarios (color verde). El agua es el agente frenante, la cual ingresa al freno de la forma descrita en la Figura C.1(a) (color celeste, agua fría) y es sometida a continuas aceleraciones por los álabes del rotor y desaceleraciones por los álabes del estator (color negro). Esto provoca una turbulencia que da por resultado el frenado de los rotores, el eje solidario y el motor impulsor. El paso de agua para el freno se controla manualmente desde la sala de mandos del laboratorio.

Dentro del freno se genera calor ya que la potencia del motor (energía por unidad de tiempo) se transforma en otra forma de energía dentro del freno que es energía calórica. Esto produce un calentamiento del agua que sale por las salidas con temperatura (color magenta).

El estator está montado sobre rodamientos oscilantes en cajas color azul (Figura C.1(b)), fijadas a la base. Por principio de acción y reacción el estator es forzado a girar sobre estos rodamientos, pero un brazo de palanca unido a la base del freno mediante una celda de carga impide que el giro ocurra. La celda de carga a su vez mide el esfuerzo que está haciendo, con lo cual conociendo el largo del brazo se mide el Torque con que el motor es frenado. Estos datos (torque, rpm, potencia) se recogen automáticamente por el sistema de adquisición de datos mostrando los resultados en la pantalla del computador.



(a)

DS2	
Tipo de absorción	Freno hidráulico
Agente Frenante	Agua
Material rotor	Fundición Nodular
Material Estator	Fundición gris
Material eje	Acero alta resistencia
Lubricación cojinetes	Grasa
Rango de operación	1000 - 10000 RPM
Requerimiento de agua	15 lts/hp-hora
Sensor torque	Celda de Carga
Sensor de velocidad	Pulsos magnéticos
Salidas de agua	Dos de 3/4" BSP
Diámetro del rotor	280 mm
Diámetro del estator	320 mm
Peso	105 kg.
Arranque	Eléctrico
Motor de Arranque	Trifásico 10 CV

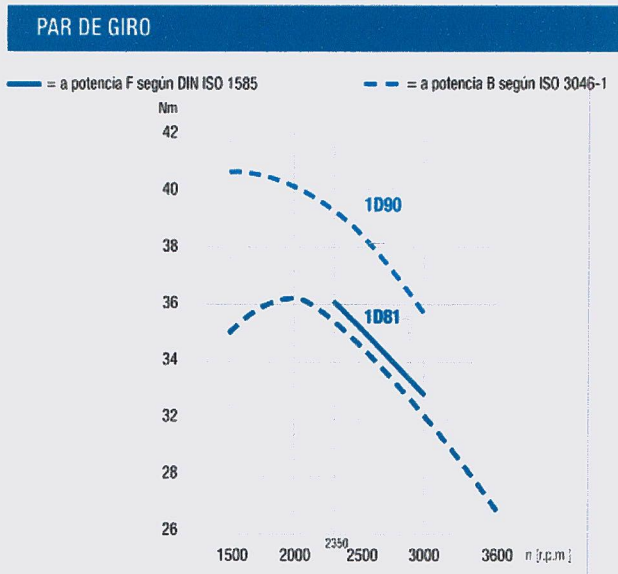
(b)

Figura C.1. (a) Esquema del principio de funcionamiento del freno; (b) Especificaciones técnicas del freno

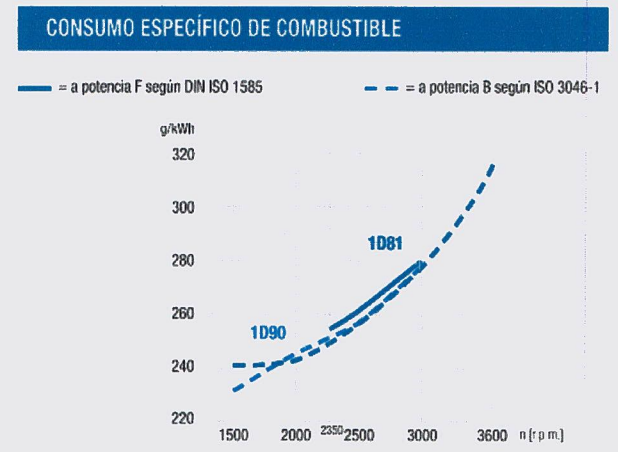
## ANEXO D: Potencia, Par de giro, Consumo específico, según ficha del fabricante del motor Hatz 1D81

POTENCIA			1D81.		1D90.	
Norma	Hatz-Espec.	r.p.m.	kW*	HP*	kW*	HP*
▶ Potencia de vehículo según DIN ISO 1585.	NF	3000	10.3	14.0	—	—
		2600	9.5	12.9	—	—
		2350	8.9	12.1	—	—
▶ Potencia neta al freno ISO (IFN) para carga altamente intermitente según ISO 3046-1.	NB <sub>Si</sub>	3000	10.3	14.0	—	—
		2600	9.5	12.9	—	—
		2300	8.7	12.1	—	—
		2000	7.9	10.7	—	—
		1800	7.1	9.7	—	—
		1500	5.7	7.8	—	—
▶ Potencia neta al freno ISO (IFN) para carga intermitente según ISO 3046-1.	NB	3600	10.1	13.7	—	—
		3000	10.1	13.7	11.2	15.2
		2600	9.3	12.6	10.3	14.0
		2300	8.4	11.4	9.5	12.9
		2000	7.6	10.3	8.4	11.4
		1800	6.8	9.2	7.6	10.3
		1500	5.5	7.5	6.4	8.7
▶ Potencia normal ISO (ICXN) (admite sobrecargas de hasta 10%)  ▶ Potencia normal al freno ISO (no admite sobrecarga) según ISO 3046-1. Válida para régimen y carga constantes. (ICFN)	NS (NA)	3000	9.3	12.6	10.2	13.9
		2600	8.4	11.4	9.4	12.8
		2300	7.6	10.3	8.6	11.7
		2000	6.7	9.1	7.7	10.5
		1800	6.1	8.3	6.8	9.2
		1500	5.0	6.8	5.8	7.9

**Figura D.1. Potencia ajustada a distintas Normas [Ficha técnica del fabricante]**



**Figura D.2. Torque según DIN ISO 1585 e ISO 3046-1 [Ficha técnica del fabricante]**



**Figura D.3. Consumo específico de combustible según DIN ISO 1585 e ISO 3046-1 [Ficha técnica del fabricante]**

## ANEXO E: Resultados Línea Base motor Hatz

Tabla E.1. Datos de los ensayos.

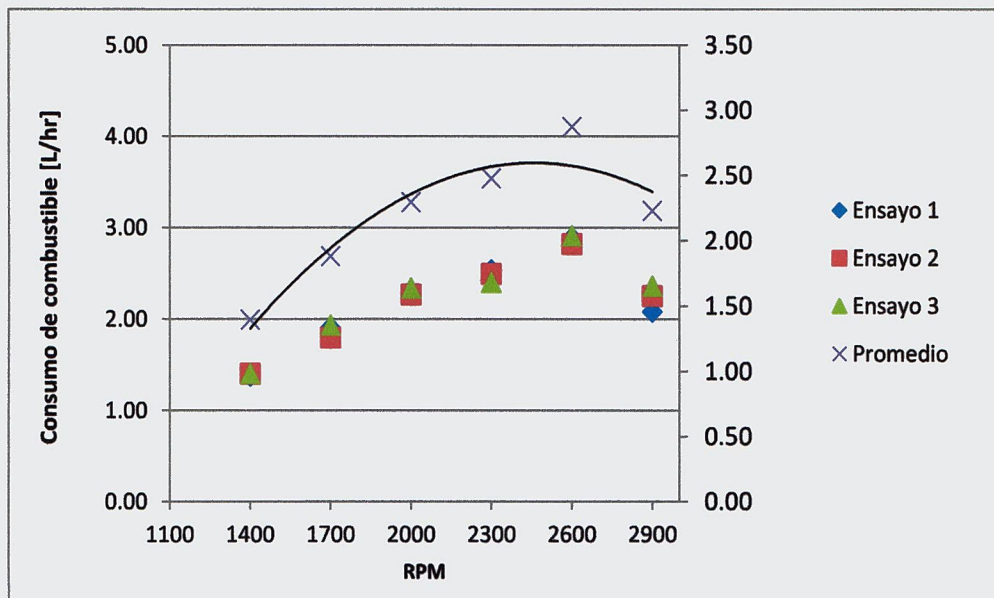
N° de Ensayo	Fecha	Inicio	Término	Duración
1	10-dic-2013	17:50	20:10	2:20
2	27-dic-2013	15:10	17:10	2:00
3	11-en-2014	11:00	13:40	2:40

Tabla E.2. Condiciones ambientales y registro termocuplas

ENSAYO 1					
CONDICIONES AMBIENTALES			TERMOCUPLAS		
RPM ( $\pm 10$ )	T°amb	Presión Atm.	HR	T° Aceite	T° Escape
	[°C]	[mmHg]	[%]	[°C]	[°C]
1400	28,54	752,84	28,64	90,53	250,59
1700	29,46	752,97	29,27	96,49	303,10
2000	29,14	752,98	28,50	101,96	
2300	29,23	753,01	28,91	105,20	339,70
2600	29,87	753,01	28,72	109,63	378,04
2900	29,75	753,05	29,01	105,19	288,63
<b>Promedio</b>	<b>29,25</b>	<b>752,93</b>	<b>30,99</b>		
ENSAYO 2					
RPM ( $\pm 10$ )	T°amb	Presión Atm.	HR	T° Aceite	T° Escape
	[°C]	[mmHg]	[%]	[°C]	[°C]
1400	31,45	753,05	33,11	94,33	255,39
1700	32,20	753,02	29,50	97,99	294,68
2000	32,98	753,06	27,13	105,20	347,28
2300	33,57	753,14	25,75	110,36	364,18
2600	33,88	753,20	25,30	113,60	390,52
2900	33,91	753,09	24,54	111,38	320,45
<b>Promedio</b>	<b>33,31</b>	<b>753,11</b>	<b>26,55</b>		
ENSAYO 3					
RPM ( $\pm 10$ )	T°amb	Presión Atm.	HR	T° Aceite	T° Escape
	[°C]	[mmHg]	[%]	[°C]	[°C]
1400	25,55	750,67	46,03	87,21	251,54
1700	26,54	750,92	43,91	95,58	309,91
2000	27,10	751,04	42,49	98,61	343,69
2300	27,46	751,12	41,01	102,51	359,93
2600	27,79	751,19	40,30	106,00	385,70
2900	28,19	751,52	39,32	106,65	344,09
<b>Promedio</b>	<b>27,13</b>	<b>751,08</b>	<b>42,03</b>		

**Tabla E.3. Consumo de combustible ( $Q_{comb}$ )**

	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3	Promedio
RPM ( $\pm 10$ )	[l/hr]	[l/hr]	[l/hr]	[l/hr]
1400	1,38	1,40	1,40	1,40
1700	1,91	1,80	1,93	1,88
2000	2,28	2,27	2,34	2,29
2300	2,53	2,50	2,40	2,48
2600	2,89	2,82	2,91	2,87
2900	2,08	2,25	2,36	2,23



**Figura E.1. Consumo de combustible para los ensayos 1, 2 y 3**

Tabla E.4. Ensayo de corrida 1

RPM	POTENCIA EFECTIVA[kW]						TORQUE [Nm]					
	P1	P3	P4	P5	P6	P <sub>prom</sub>	T1	T3	T4	T5	T6	T <sub>prom</sub>
1400	6,44	6,51	6,31	6,32	6,16	6,35	43,03	43,4	42,04	42,07	41,06	42,32
1500	6,98	7,14	6,88	6,71	6,68	6,88	43,52	44,42	42,77	41,71	41,56	42,80
1600	7,51	7,52	7,41	7,34	6,72	7,30	43,85	43,9	43,4	42,75	39,17	42,61
1700	8,05	8,14	7,72	7,8	7,46	7,83	44,27	44,71	42,4	42,75	40,96	43,02
1800	8,72	8,97	8,42	8,1	7,62	8,37	45,3	46,5	43,66	41,94	39,49	43,38
1900	9,17	9,52	8,67	8,3	8,02	8,74	45,13	46,78	42,57	40,73	39,37	42,92
2000	9,19	9,87	8,99	8,61	8,44	9,02	42,93	46,08	41,94	40,12	39,37	42,09
2100	9,14	9,71	9,6	9,05	8,76	9,25	40,66	43,17	42,67	40,17	38,9	41,11
2200	9,27	10,16	9,25	8,79	9,06	9,31	39,4	43,1	39,23	37,24	38,42	39,48
2300	9,99	10,5	9,91	9,13	9,62	9,83	40,6	42,62	40,21	36,99	39,02	39,89
2400	10,91	10,87	10,24	9,33	10,17	10,30	42,48	42,3	39,8	36,23	39,53	40,07
2500	11,34	10,57	10,62	9,7	10,63	10,57	42,4	39,48	39,66	36,18	39,67	39,48
2600	11,52	10,68	10,84	10,1	11,19	10,87	41,42	38,35	38,92	36,21	40,15	39,01
2700	12,12	11,42	11,21	10,52	11,48	11,35	41,97	39,49	38,73	36,31	39,67	39,23
2800	11,13	11,24	11,27	11,16	11,5	11,26	37,15	37,48	37,57	37,17	38,3	37,53
2900	11,94	12,18	12,33	12,34	12,5	12,26	38,48	39,2	39,68	39,67	40,21	39,45

Tabla E.5. Ensayo de corrida 2

RPM	POTENCIA EFECTIVA [kW]						TORQUE [Nm]					
	P1	P3	P4	P7	P8	P <sub>prom</sub>	T1	T3	T4	T7	T8	T <sub>prom</sub>
1400	6,46	6,4	6,39	6,34	6,41	6,40	43,03	42,59	42,47	42,09	42,56	42,55
1500	6,95	6,91	6,81	6,84	6,89	6,88	43,2	42,92	42,24	42,37	42,67	42,68
1600	7,36	7,39	7,29	7,42	7,39	7,37	42,93	43,01	42,38	43,1	42,94	42,87
1700	8,08	8,24	7,54	8,12	8,04	8,00	44,34	45,14	41,28	44,37	43,97	43,82
1800	8,83	8,98	8,27	8,93	9	8,80	45,77	46,47	42,76	46,08	46,48	45,51
1900	9,36	9,55	8,92	9,44	9,54	9,36	45,94	46,8	43,68	46,19	46,66	45,85
2000	10	10,01	8,98	9,96	9,95	9,78	46,65	46,63	41,77	46,28	46,25	45,52
2100	10,04	10,32	9,57	10,35	10,49	10,15	44,6	45,76	42,41	45,81	46,41	45,00
2200	10,15	10,66	10,14	10,65	10,51	10,42	43,02	45,12	42,89	44,97	44,4	44,08
2300	10,16	11,02	10,54	10,89	10,93	10,71	41,2	44,62	42,61	44	44,15	43,32
2400	10,53	10,93	10,59	11,31	11,03	10,88	40,94	42,43	41,05	43,8	42,7	42,18
2500	10,9	11,27	10,9	11,53	11,5	11,22	40,67	41,97	40,56	42,85	42,73	41,76
2600	11,28	11,35	10,62	11,78	11,85	11,38	40,48	40,65	38	42,12	42,37	40,72
2700	11,26	11,76	10,66	11,79	11,94	11,48	38,91	40,55	36,73	40,59	41,1	39,58
2800	10,75	11,07	11,34	11,53	11,51	11,24	35,81	36,83	37,67	38,28	38,2	37,36
2900	10,65	11,58	11,99	12,33	11,75	11,66	34,25	37,18	38,47	39,52	37,67	37,42

Tabla E.6. Ensayo de corrida 3

RPM	POTENCIA EFECTIVA[kW]						TORQUE [Nm]					
	P1	P3	P4	P7	P8	P <sub>prom</sub>	T1	T3	T4	T7	T8	T <sub>prom</sub>
1400	6,44	6,34	6,39	6,47	6,38	6,40	43,14	42,39	42,75	43,25	42,63	42,83
1500	6,86	6,86	7,02	6,93	7,05	6,94	42,93	42,85	43,79	43,18	43,97	43,34
1600	7,36	7,41	7,61	7,36	7,52	7,45	43,17	43,38	44,51	43,05	43,95	43,61
1700	7,92	8,05	8,16	8,21	8,06	8,08	43,68	44,37	44,95	45,19	44,34	44,51
1800	8,53	8,63	8,78	8,86	8,84	8,73	44,47	44,93	45,68	46,02	45,93	45,41
1900	9,02	9,08	9,41	9,22	9,42	9,23	44,56	44,77	46,36	45,37	46,37	45,49
2000	9,37	9,59	9,88	9,61	9,91	9,67	43,93	44,92	46,25	44,92	46,34	45,27
2100	9,74	10,2	10,38	10,1	10,37	10,16	43,5	45,49	46,27	45	46,18	45,29
2200	10,28	10,76	10,46	10,46	10,52	10,50	43,86	45,83	44,5	44,48	44,74	44,68
2300	10,66	11,02	10,76	10,74	10,81	10,80	43,46	44,88	43,79	43,66	43,95	43,95
2400	11,03	11,31	10,91	11,1	10,99	11,07	43,1	44,16	42,56	43,27	42,83	43,18
2500	11,22	11,13	10,88	11,41	11,07	11,14	42,12	41,72	40,73	42,67	41,4	41,73
2600	11,6	11,09	11,05	11,73	11,35	11,36	41,85	39,98	39,78	42,18	40,82	40,92
2700	11,78	11,51	11,26	11,74	11,34	11,53	40,92	39,95	39,04	40,66	39,28	39,97
2800	11,14	11,36	10,87	11,07	10,75	11,04	37,31	38,01	36,33	36,99	35,91	36,91
2900	10,28	9,54	9,9	10,33	10,14	10,04	33,26	30,83	31,95	33,31	32,69	32,41

Tabla E.7. Consumo específico del motor Hatz.

RPM	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
	Be [g/kWhr]	Be [g/kWhr]	Be [g/kWhr]
1400	184,87	186,04	186,33
1700	207,11	191,15	203,22
2000	214,55	197,15	205,49
2300	219,16	198,15	189,23
2600	225,94	210,81	217,65
2900	144,25	164,23	199,87

Fórmula utilizada para el cálculo de Be de cada ensayo:

$$Be = \frac{Q_{comb}(\text{ver Tabla D.3}) \cdot P_{prom}(\text{ver Tabla D.4 - 6})}{\rho_{comb}}$$

Donde la densidad del combustible es:  $\rho_{comb} = 850 \left[ \frac{g}{l} \right]$  (según Capítulo 3.3)

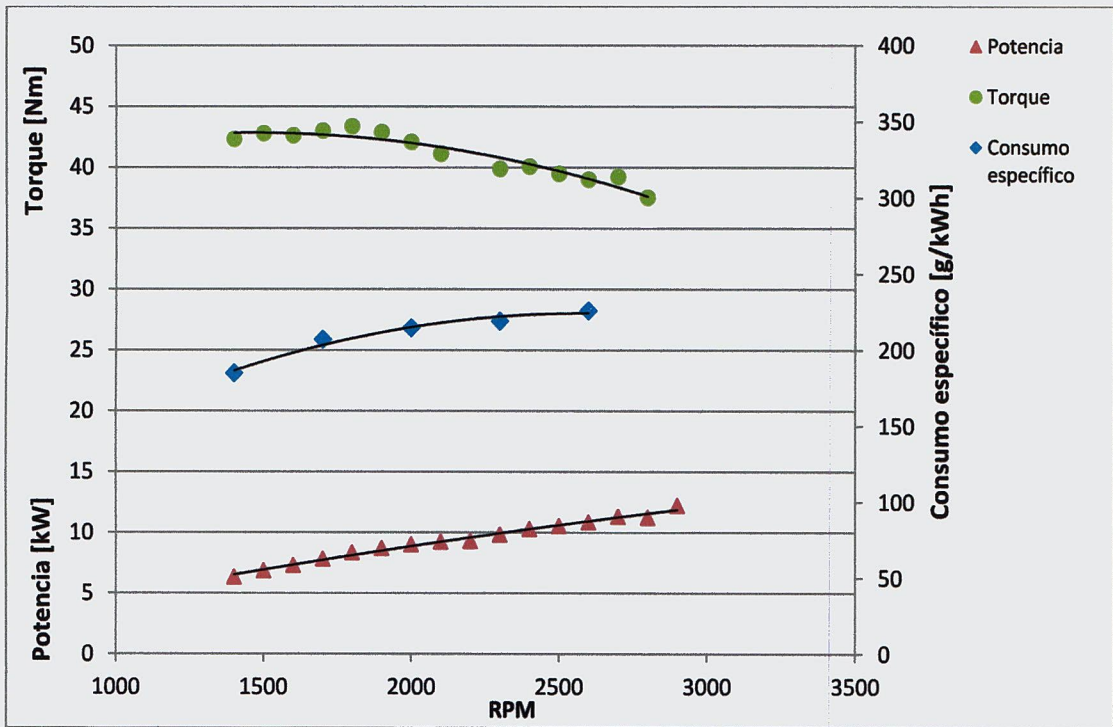


Figura E.2. Curvas Características Motor Hatz, Ensayo 1

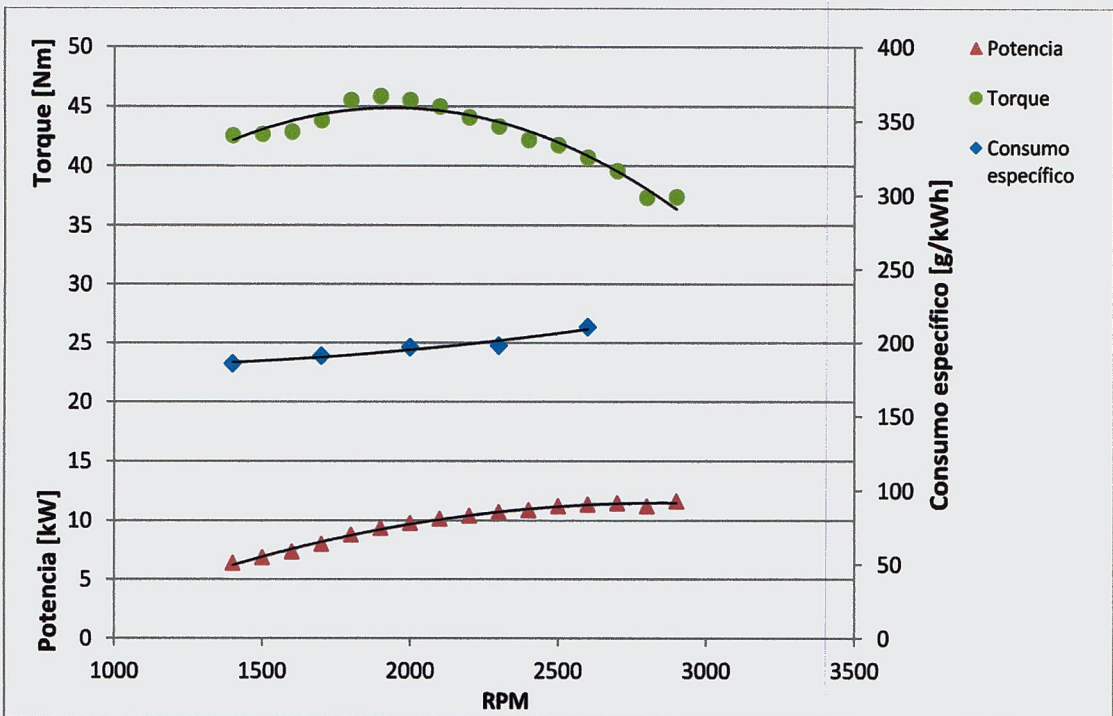


Figura E.3. Curvas Características Motor Hatz, Ensayo 2

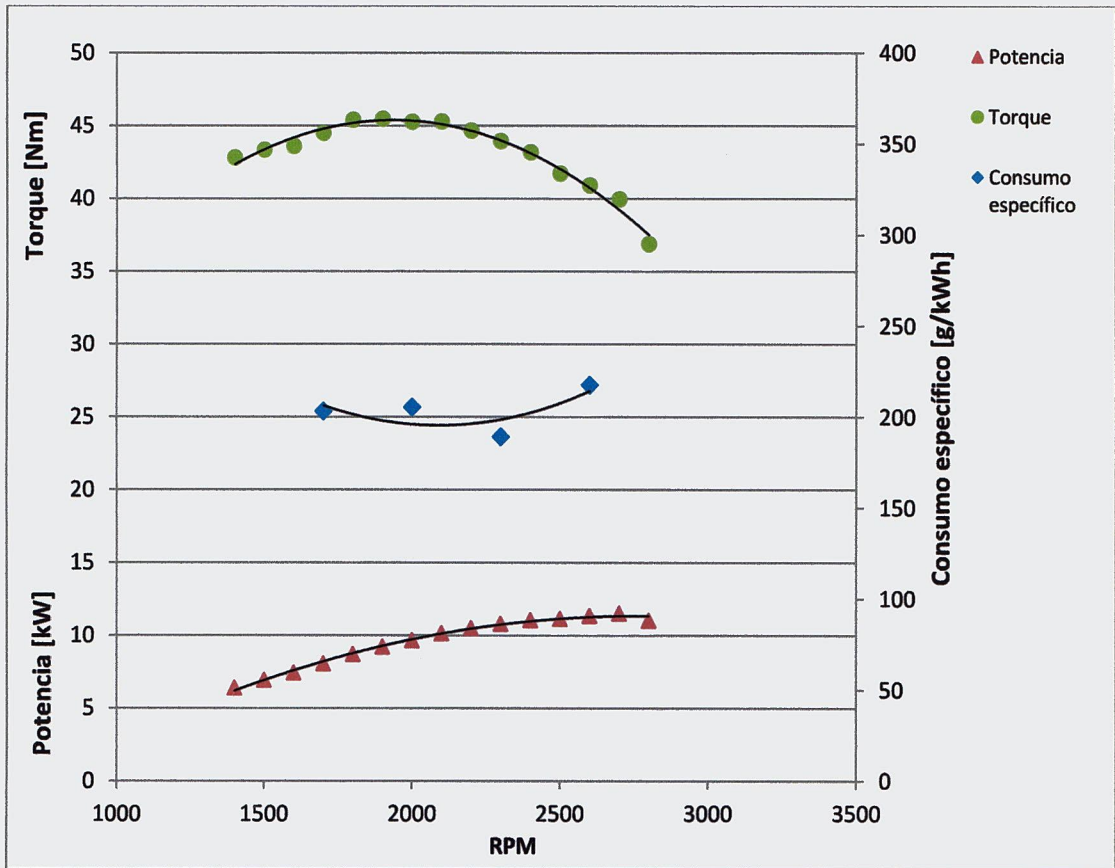


Figura E.4. Curvas Características Motor Hatz, Ensayo 3

Eficiencia globales calculadas de acuerdo a ecuaciones (3.1 – 3.2), del Capítulo 3.4

Tabla E.8. Eficiencia global para cada ensayo

RPM	Ensayo 1	Ensayo 2	Ensayo 3
1400	0,45	0,45	0,45
1700	0,40	0,44	0,41
2000	0,39	0,42	0,41
2300	0,38	0,42	0,44
2600	0,37	0,40	0,38
2900	0,58	0,51	0,42
<b><math>\eta_{m\acute{a}x}</math></b>	<b>0,58</b>	<b>0,51</b>	<b>0,45</b>

## Emisiones de contaminantes

**Tabla E.9. Emisiones de CO, CO<sub>2</sub> y HC para cada día ensayado (1, 2 y 3)**

RPM (±10)	CO [%vol]			CO <sub>2</sub> [%vol]			HC [ppm]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1400	0,045	0,039	0,03	2,39	0,73	2,86	11	13	2
1700	0,026	0,067	0,061	3,02	1,08	4,82	3	10	2
2000	0,041	0,067	0,071	4,49	2,92	4,81	5	10	5
2300	0,038	0,047	0,061	4,74	4,51	1,97	6	9	6
2600	0,045	0,039	0,054	5,21	4,94	5,75	29	10	2
2900	0,041	0,032	0,04	5,00	5,25	5,57	7	12	29

**Tabla E.10. Emisiones de O<sub>2</sub>, NO índice de ennegrecimiento para cada día ensayado (1, 2 y 3)**

RPM (±10)	O <sub>2</sub> [%vol]			NO [ppm]			Índice de ennegrecimiento [-]		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
1400	17,685	20,09	-	228	62	247	7,7	7,8	7,8
1700	16,776	19,55	-	256	88	363	7,9	7,8	7,9
2000	14,713	16,96	-	343	208	328	7,9	7,9	8,1
2300	14,31	14,69	-	325	300	123	7,8	7,9	7,9
2600	13,617	14,06	-	308	277	337	8,0	7,9	7,9
2900	13,929	13,59	-	255	263	271	7,7	7,7	7,7

## ANEXO F: Tabla de fracciones molares

Los parámetros más importantes de entrada para el PREMIX modificado para una relación de equivalencia entre 0,5 y 5 se presentan en la siguiente tabla. Estos valores se calculan mediante el procedimiento descrito en el Capítulo 5.6.

**Tabla F.1. Fracciones molares y velocidad de filtración para distintos  $\Phi$ .**

Relación de equivalencia	Composición de la mezcla [%]			Densidad de la mezcla [g/l]	Velocidad filtración [cm/s]
	CH4	O2	N2		
5,00	0,3444	0,1377	0,5179	1,0241	50,45
4,90	0,3398	0,1387	0,5215	1,0265	50,33
4,80	0,3352	0,1397	0,5251	1,0289	50,21
4,70	0,3305	0,1406	0,5288	1,0314	50,09
4,60	0,3258	0,1416	0,5326	1,0339	49,97
4,50	0,3210	0,1427	0,5364	1,0364	49,85
4,40	0,3161	0,1437	0,5402	1,0390	49,73
4,30	0,3111	0,1447	0,5441	1,0416	49,61
4,20	0,3061	0,1458	0,5481	1,0442	49,48
4,10	0,3010	0,1468	0,5521	1,0469	49,35
4,00	0,2959	0,1479	0,5562	1,0496	49,23
3,90	0,2906	0,1490	0,5604	1,0523	49,10
3,80	0,2853	0,1502	0,5646	1,0551	48,97
3,70	0,2799	0,1513	0,5688	1,0580	48,84
3,60	0,2744	0,1524	0,5732	1,0609	48,70
3,50	0,2688	0,1536	0,5776	1,0638	48,57
3,40	0,2632	0,1548	0,5820	1,0668	48,43
3,30	0,2574	0,1560	0,5866	1,0698	48,30
3,20	0,2516	0,1572	0,5912	1,0728	48,16
3,10	0,2456	0,1585	0,5959	1,0760	48,02
3,00	0,2396	0,1597	0,6006	1,0791	47,88
2,90	0,2335	0,1610	0,6055	1,0823	47,74
2,80	0,2273	0,1623	0,6104	1,0856	47,59
2,70	0,2209	0,1637	0,6154	1,0889	47,45
2,60	0,2145	0,1650	0,6205	1,0923	47,30
2,50	0,2080	0,1664	0,6256	1,0957	47,15
2,40	0,2013	0,1678	0,6309	1,0992	47,00
2,30	0,1946	0,1692	0,6362	1,1028	46,85
2,20	0,1877	0,1706	0,6416	1,1064	46,70
2,10	0,1807	0,1721	0,6472	1,1101	46,54
2,00	0,1736	0,1736	0,6528	1,1138	46,39
1,90	0,1664	0,1751	0,6585	1,1176	46,23
1,80	0,1590	0,1767	0,6643	1,1215	46,07
1,70	0,2632	0,1548	0,5820	1,0668	48,43
1,60	0,3352	0,1397	0,5251	1,0289	50,21
1,50	0,3866	0,1289	0,4845	1,0019	51,57
1,40	0,4237	0,1211	0,4552	0,9824	52,59
1,30	0,4503	0,1155	0,4342	0,9684	53,35
1,20	0,4688	0,1116	0,4196	0,9588	53,89
1,10	0,4803	0,1092	0,4105	0,9527	54,23
1,00	0,4860	0,1080	0,4060	0,9497	54,40
0,90	0,4860	0,1080	0,4060	0,9497	54,40
0,80	0,4803	0,1092	0,4105	0,9527	54,23
0,70	0,4688	0,1116	0,4196	0,9588	53,89
0,60	0,4503	0,1155	0,4342	0,9684	53,35
0,50	0,4237	0,1211	0,4552	0,9824	52,59
<b>PROMEDIO =</b>					<b>49,57</b>

## ANEXO G: Resultados de la Modelación Numérica

La temperatura máxima, tanto para el sólido como para el gas y velocidad del frente de combustión y para relación de equivalencia entre 0,9 y 5, y presiones entre 1 y 5 atm, como resultado de las simulaciones numéricas mediante el programa PREMIX modificado, se presentan a continuación.

**Tabla G.1. Resultados de las simulaciones numéricas**

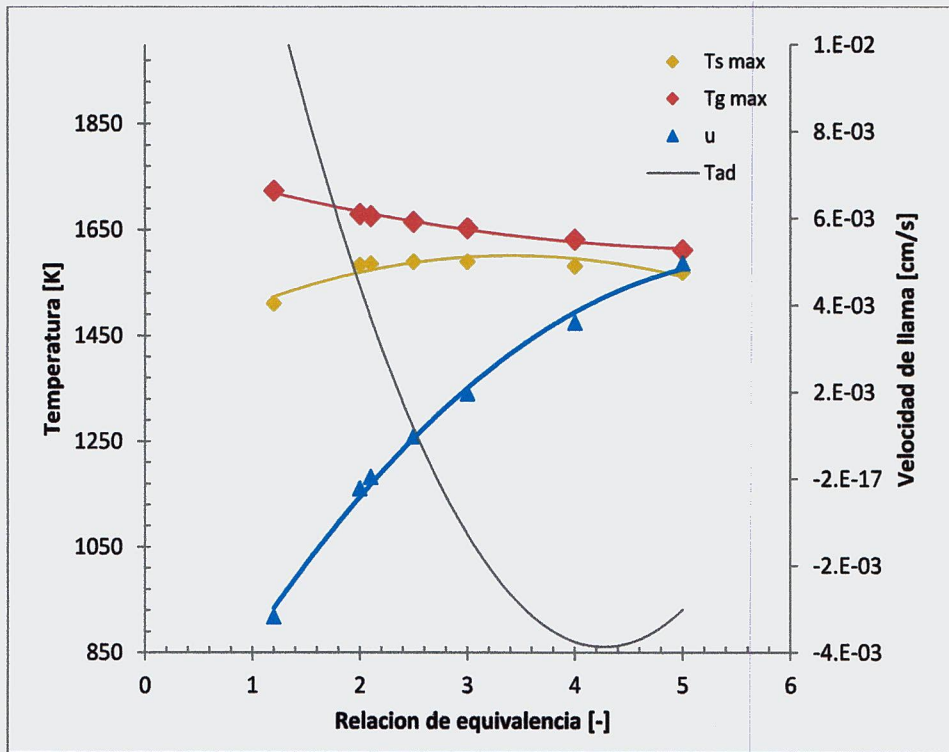
$\Phi$ [-]	Presión [atm]	$u$ [cm/s]	Tsmax [K]	Tgmax [K]	$\Delta(T_{g-s})$ [K]	H <sub>2</sub> [%vol]	CH <sub>4</sub> [%vol]	CO [%vol]	CO <sub>2</sub> [%vol]
0,9	1	-4,3E-03	1376	1552	176	0,0	0,0	0,0	8,6
0,9	1,05	-4,4E-03	1372	1553	181	0,0	0,0	0,0	8,6
0,9	3,6	-5,1E-03	1299	1549	250	0,0	0,0	0,0	8,6
0,9	3,8	-5,2E-03	1292	1543	251	0,0	0,0	0,0	8,6
0,9	4,8	-5,6E-03	1255	1508	253	0,0	0,0	0,0	8,6
1,2	1	-3,1E-03	1521	1725	204	3,7	0,0	3,5	7,3
1,2	1,05	-3,1E-03	1518	1725	207	3,7	0,0	3,5	7,3
1,2	1,1	-3,1E-03	1516	1725	209	3,7	0,0	3,5	7,3
1,2	1,15	-3,2E-03	1514	1725	211	3,7	0,0	3,5	7,3
1,2	1,2	-3,2E-03	1511	1724	213	3,7	0,0	3,5	7,3
1,2	1,3	-3,2E-03	1507	1721	214	3,7	0,0	3,5	7,3
1,2	1,4	-3,3E-03	1502	1717	215	3,7	0,0	3,5	7,3
1,2	2	-3,6E-03	1467	1672	205	3,1	0,1	3,7	7,0
1,2	2,5	-3,8E-03	1437	1635	198	2,9	0,1	3,6	7,0
1,2	2,6	-3,9E-03	1431	1627	196	2,9	0,1	3,6	7,0
1,2	3	-4,1E-03	1424	1594	170	2,9	0,1	3,4	7,1
1,2	4	-4,6E-03	1412	1533	121	2,7	0,2	3,3	7,2
1,2	4,5	-4,9E-03	1405	1506	101	2,6	0,2	3,3	7,2
1,2	5	-5,2E-03	1306	1485	179	2,3	0,3	3,5	7,0
2	1,2	-2,1E-04	1584	1680	96	10,0	1,7	8,6	3,0
2(*)	1,5	6,2E-03	1937	1973	36	8,2	3,0	7,4	3,9
2(*)	2	6,2E-03	1937	1974	37	7,8	3,2	7,2	4,0
2(*)	2,5	6,2E-03	1938	1975	37	7,1	3,7	6,8	4,3
2(*)	3	6,2E-03	1938	1975	37	10,6	1,9	8,7	2,8
2	3,5	-1,7E-03	1441	1517	76	12,6	3,1	9,1	2,2
2	4	-2,0E-03	1432	1491	59	3,7	0,0	3,5	7,3
2	5	-2,5E-03	1414	1441	27	3,7	0,0	3,5	7,3
2,1	1,2	4,8E-05	1586	1676	90	3,7	0,0	3,5	7,3
2,5	1,2	9,8E-04	1590	1665	75	3,7	0,0	3,5	7,3

**Tabla G.2. Resultados de las simulaciones numéricas (continuación)**

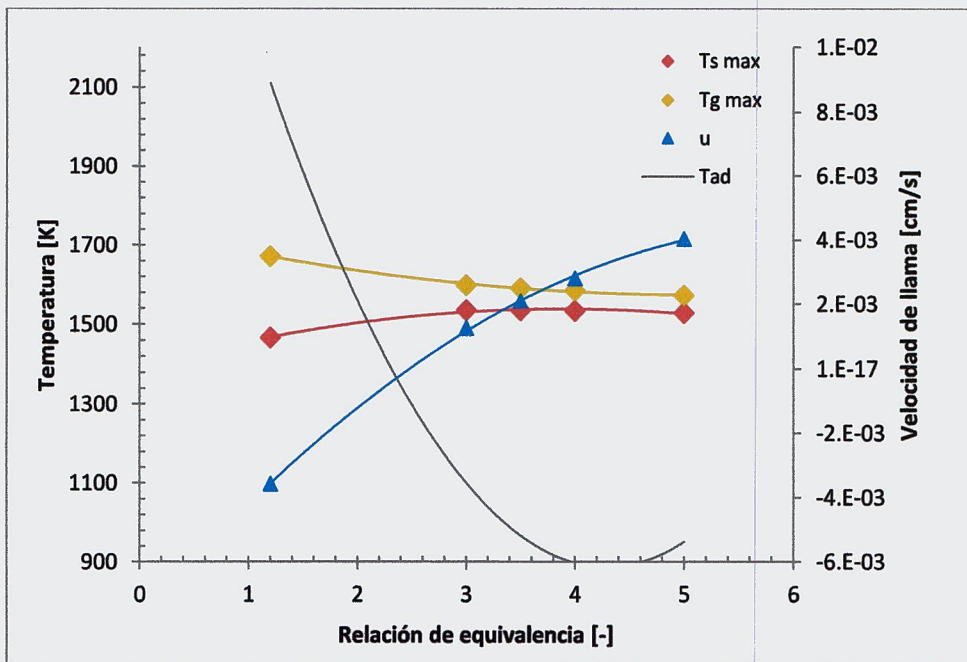
$\Phi$ [-]	Presión [atm]	$u$ [cm/s]	Tsmax [K]	Tgmax [K]	$\Delta(T_{g-s})$ [K]	H <sub>2</sub> [%vol]	CH <sub>4</sub> [%vol]	CO [%vol]	CO <sub>2</sub> [%vol]
3	1	2,2E-03	1609	1671	62	14,9	4,4	9,3	1,7
3	1,2	2,0E-03	1590	1653	63	14,4	4,7	9,2	1,8
3	2	1,3E-03	1535	1598	63	12,8	5,9	8,9	2,1
3	2,5	9,0E-04	1508	1570	62	12,0	6,5	8,7	2,2
3	3	5,7E-04	1485	1545	60	11,3	7,0	8,5	2,4
3	3,5	2,5E-04	1463	1523	60	10,6	7,4	8,3	2,5
3	3,7	1,2E-04	1455	1513	58	10,4	7,6	8,2	2,6
3	3,9	6,2E-05	1451	1509	58	10,2	7,7	8,2	2,6
3	4	-6,1E-05	1443	1499	56	10,0	7,9	8,1	2,7
3	4,5	-3,6E-04	1422	1476	54	9,3	8,4	7,9	2,8
3	5	-6,6E-04	1402	1452	50	8,8	8,8	7,7	2,9
4	1	3,9E-03	1597	1646	49	13,9	7,8	8,9	1,8
4	1,2	3,6E-03	1582	1632	50	17,0	8,0	9,1	1,2
4	2	2,8E-03	1533	1585	52	16,5	8,4	9,0	1,3
4	2,5	2,4E-03	1510	1561	51	14,7	9,7	8,8	1,5
4	3	2,1E-03	1489	1539	50	13,8	10,4	8,6	1,7
4	3,5	1,7E-03	1469	1518	49	13,0	11,0	8,5	1,8
4	4	1,4E-03	1451	1498	47	12,2	11,6	8,3	2,0
4	4,5	1,1E-03	1434	1478	44	11,5	12,2	8,1	2,1
4	4,8	9,3E-04	1423	1466	43	10,8	12,7	7,9	2,2
4	4,9	8,7E-04	1419	1462	43	10,4	13,0	7,8	2,3
4	5	8,2E-04	1420	1457	37	10,3	13,1	7,8	2,3
5	1,2	5,0E-03	1570	1612	42	11,9	12,1	7,5	2,5
5	1,6	4,4E-03	1547	1591	44	17,2	12,3	8,7	1,0
5	2	4,0E-03	1528	1572	44	16,3	13,0	8,6	1,1
5	2,8	3,4E-03	1495	1538	43	15,7	13,6	8,5	1,2
5	3	3,3E-03	1487	1530	43	14,4	14,7	8,3	1,4
5	3,5	3,1E-03	1475	1514	39	14,1	14,9	8,2	1,5
5	4	2,6E-03	1453	1494	41	14,8	14,4	7,9	1,7
5	4,5	2,3E-03	1437	1476	39	12,4	16,2	7,9	1,8
5	5	2,0E-03	1421	1458	37	11,6	16,7	7,8	1,9

(\*) A pesar de que el modelo converge en una solución para estas relaciones de equivalencia y presión, el resultado difiere mucho de la tendencia del resto de las soluciones, por lo que se eliminan del análisis y por ende no se grafican.

**Gráficos Ts, Tg y u para presiones entre 1.2 y 5 atm**



**Figura G.1. Ts, Tg y u para presión del reactor de 1.2 atm.**



**Figura G.2. Ts, Tg y u para presión del reactor de 2 atm.**

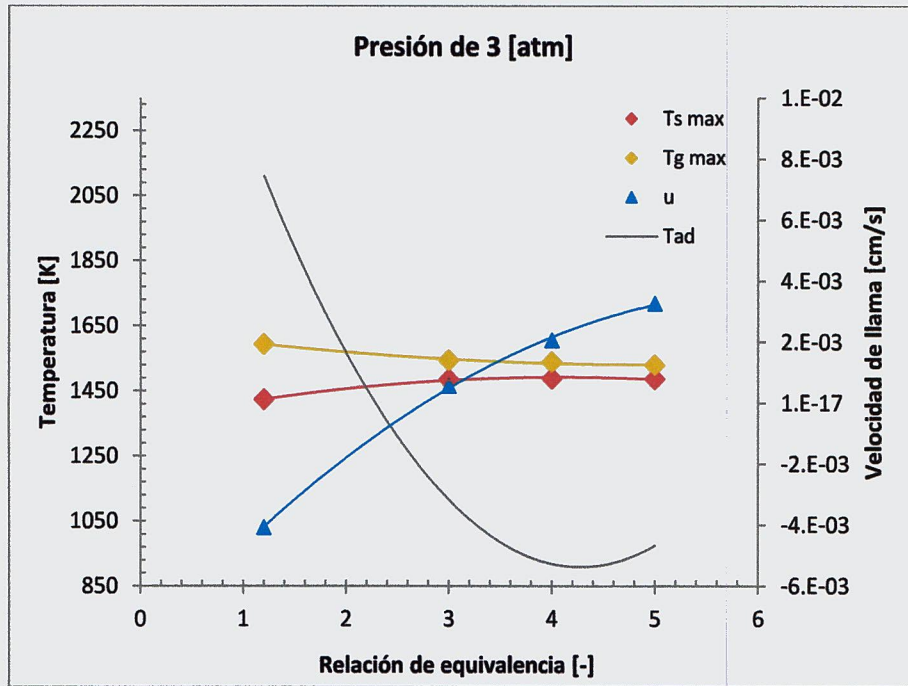


Figura G.3. Ts, Tg y u para presión del reactor de 3 atm.

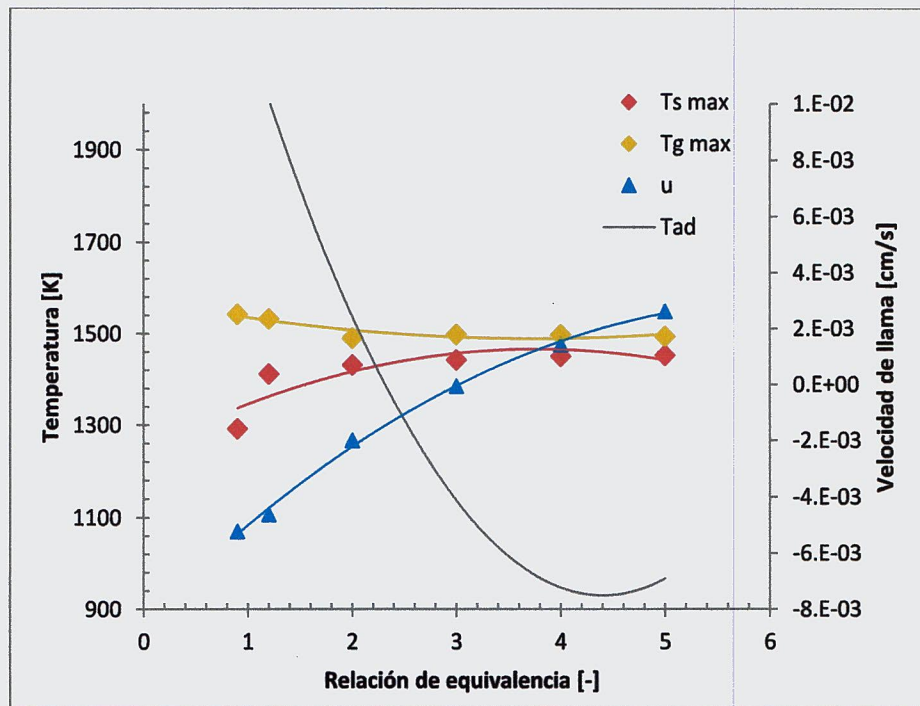


Figura G.4. Ts, Tg y u para presión del reactor de 4 atm.

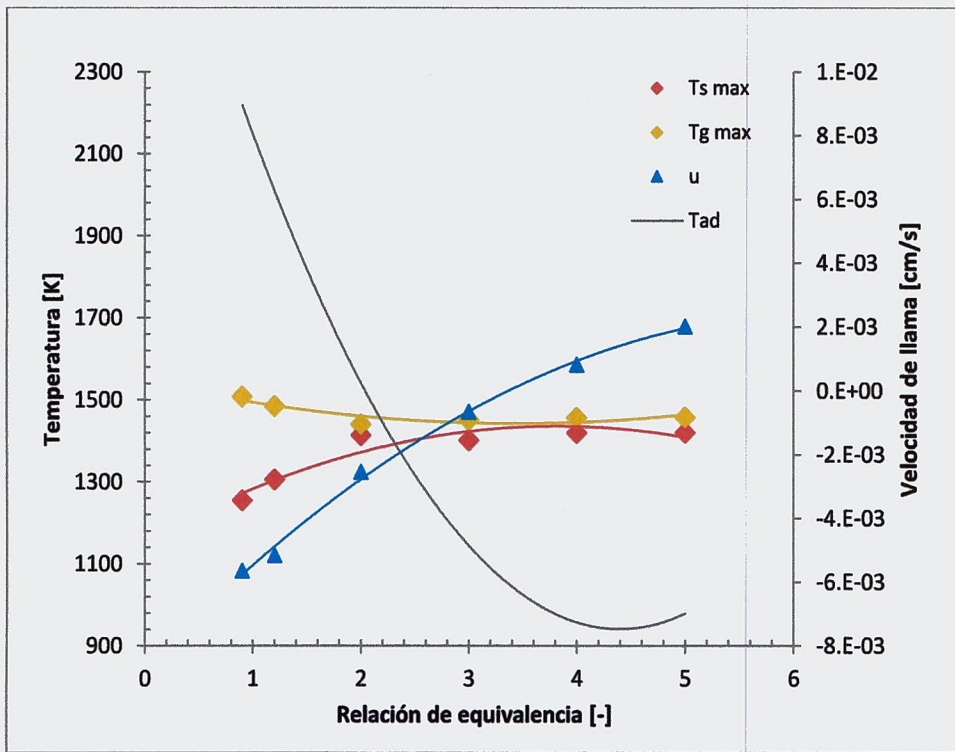


Figura G.5. Ts, Tg y u para presión del reactor de 5 atm.

USM. BIBLIOTECA CENTRAL



3560900235505

0