

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO



FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS, ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

MAESTRÍA EN FÍSICA APLICADA, MENCIÓN FÍSICA COMPUTACIONAL

Tema: Modelo paramétrico de fluidos para gases de combustión de un motor a gasolina extra

Trabajo de titulación previo a la obtención del grado académico de Magíster en
Física Aplicada Mención Física Computacional

Modalidad de Titulación: Proyecto de Desarrollo

Autor: Ingeniero, Jorge Anibal Gavilanes Sani.

Director: Ingeniero, Víctor Hugo Hidalgo Díaz, PhD.

Ambato-Ecuador

2022

APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

A la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería en Sistemas Electrónica e Industrial.

El Tribunal receptor del Trabajo de Titulación, presidido por la Ingeniera Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Magíster, e integrado por el señor: Físico Christian Leonardo Vásconez Vega, PhD, y el señor Doctor Jaime Rodrigo Guilcapi Mosquera, Magíster, designados por la Unidad Académica de Titulación de la Universidad Técnica de Ambato, para receptor el Trabajo de Titulación con el tema: "MODELO PARAMÉTRICO DE FLUIDOS PARA GASES DE COMBUSTIÓN DE UN MOTOR A GASOLINA EXTRA", elaborado y presentado por el señor Ingeniero Jorge Anibal Gavilanes Sani, para optar por el Grado Académico de Magíster en Física Aplicada mención Física Computacional; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Elsa Pilar Urrutia Urrutia, Mg.
Presidente y Miembro del Tribunal de Defensa

Fís. Christian Leonardo Vásconez Vega, PhD.
Miembro del Tribunal de Defensa

Dr. Jaime Rodrigo Guilcapi Mosquera, Mg.
Miembro del Tribunal de Defensa

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

La Responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación, presentado con el tema: “MODELO PARAMÉTRICO DE FLUIDOS PARA GASES DE COMBUSTIÓN DE UN MOTOR A GASOLINA EXTRA”, le corresponde exclusivamente a el: Ingeniero Jorge Anibal Gavilanes Sani, autor bajo la Dirección del Ingeniero, Víctor Hugo Hidalgo Díaz, PhD, Director del Trabajo de Titulación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato

Ing. Jorge Anibal Gavilanes Sani
AUTOR

Ing. Víctor Hugo Hidalgo Díaz, PhD.
DIRECTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y proceso de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad Técnica de Ambato.

Ing. Jorge Anibal Gavilanes Sani
C.I. 1715182760

INDICE DE GENERAL

CONTENIDOS

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR.....	iv
INDICE DE TABLAS	vii
INDICE DE FIGURAS.....	viii
AGRADECIMIENTO.....	xi
DEDICATORIA	xii
RESUMEN EJECUTIVO	xiii
EXECUTIVE SUMMARY.....	xv
CAPITULO I.....	1
1. EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. JUSTIFICACIÓN	2
1.3. OBJETIVOS.....	2
CAPÍTULO II	4
2. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS	4
2.1. ESTADO DEL ARTE	4
2.2. CFD FORTE.....	7
2.3. ECUACIONES DE ESTADO	8
2.4. MODELO DE TURBULENCIA	11
2.5. FORMULACIÓN CINÉTICA QUÍMICA	13
2.6. MODELO DE INTERACCIÓN CINETICO-TURBULENTO.....	14
2.7. MODELO DE SPRAY.....	14
2.8. MODELO DE PROPAGACIÓN DE LLAMA TURBULENTO.....	16
2.9. COMBUSTIBLE	17
2.10. EMISIONES CONTAMINANTES	17
2.11. DISEÑO DE EXPERIMENTOS	19
CAPÍTULO III	21
3. MARCO METODOLÓGICO.....	21
3.1. UBICACIÓN	21

3.2.	EQUIPOS Y MATERIALES	21
3.3.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	21
3.4.	PRUEBA DE HIPÓTESIS - PREGUNTA CIENTÍFICA - IDEA A DEFENDER.....	22
3.5.	POBLACIÓN O MUESTRA	22
3.6.	RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	22
3.7.	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO	23
3.8.	CONSTRUCCIÓN DE GEOMETRÍA Y MALLADO DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN	25
3.9.	FACTORES DE EXPERIMENTACIÓN	29
3.10.	VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA	29
3.11.	ALEATORIZACIÓN DE MUESTRAS.....	30
CAPÍTULO IV		31
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	31
4.1.	CONDICIONES INICIALES	31
4.2.	RESULTADOS GENERALES	31
4.3.	RESULTADOS DE VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA	33
CAPÍTULO V		51
5.	CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS	51
5.1.	CONCLUSIONES.....	51
5.2.	RECOMENDACIONES.....	52
5.3.	BIBLIOGRAFÍA.....	53
5.4.	ANEXOS	57
ANEXO A: DATOS CO		57
ANEXO B: DATOS CO ₂		63
ANEXO C: DATOS NO		69
ANEXO D: DATOS NO ₂		75
ANEXO E: DATOS HNC		81

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Valores de las constantes utilizadas en el modelo RNG k- ϵ	13
Tabla 2-2: Resultado de los ensayos de laboratorio para requisitos bajo normas INEN y ASTM de la gasolina extra	18
Tabla 2-3: La combinación de niveles del factorial 3^2 está representado por los niveles bajos 00 y por 22 de los niveles altos para los factores A y B, el resto de los factores son resultado de combinación de niveles altos y bajos.....	20
Tabla 3-1: Equipos y materiales utilizados en el desarrollo de la investigación.	21
Tabla 3-2: Desarrollo de preguntas para la obtención de información y cumplimiento de objetivos de la investigación.	22
Tabla 3-3: Detalle de la cantidad de dominios utilizados para la construcción de la cámara de combustión de un motor a gasolina.	25
Tabla 3-4: Datos geométricos de la cámara de combustión del motor utilizado en la simulación. Se detalla los valores de la carrera, biela, relación de compresión, número de agujeros del inyector y diámetro de su boquilla.	25
Tabla 3-5: Estadística del número de componentes de la malla luego del procesamiento de mallado con tamaño de 2 mm y calidad media en un área de 110.83 mm ²	27
Tabla 3-6: Configuración de refinamientos según zonas de interés, fracciones en tamaño y rangos de activación.....	27
Tabla 3-7: Aleatorización de muestras desarrollada en software Minitab para la configuración de los 9 tratamientos para llevar a simulación.....	30
Tabla 4-1: Resultados de la simulación para los gases de combustión en ppm y la eficiencia de trabajo del motor en % en el punto EVO.	33
Tabla 4-2: Análisis de varianza de CO. Los valores de VRM, T y sus interacciones tienen valor $p < 0.05$ con nivel de confianza de 95%.	37
Tabla 4-3: Análisis de varianza de CO ₂ . Los valores de VRM, T y sus interacciones tienen valor $p < 0.05$ con nivel de confianza de 95%.	40
Tabla 4-4: Análisis de varianza de NO. Los valores de VRM, T y sus interacciones tienen valor $p < 0.05$ con nivel de confianza de 95%.	43
Tabla 4-5: Análisis de varianza de NO ₂ . Los valores de VRM, T y sus interacciones tienen valor $p > 0.05$	46
Tabla 4-6: Análisis de varianza de HNC. Los valores de VRM, T y sus interacciones tienen valor $p < 0.05$ con nivel de confianza de 95%.	49

INDICE DE FIGURAS

Figura 2-1: Vista de la geometría de la cámara de combustión luego del postproceso en Ensignt.	8
Figura 2-2: Representación del flujo a través de la boquilla, velocidad de entrada y la zona de cavitación donde se produce la evaporación a bajas temperaturas [26].	16
Figura 2-3: Representación de la expulsión de la combinación de los gases contaminantes producidos en la cámara de combustión [24]	19
Figura 3-1: La estructura metodológica describe cada uno de los pasos necesarios para desarrollar la investigación. Inicia con selección de variables de entrada y salida, luego procede a realizar el DOE para crear los tratamientos. El tercer paso es la simulación de los 9 tratamientos con sus respectivos seteos y finalizar con el análisis, proceso e interpretación de resultados.	24
Figura 3-2: Geometría de la cámara de combustión en donde se detallan los puertos de entrada y salida, válvulas de entrada y salida, inyector y spark.	26
Figura 3-3: Construcción de los dominios que conforman la cámara de combustión. Se denotan en amarillo los objetos que poseen movimiento (Válvulas de entrada y salida, inyector y spark)...	26
Figura 3-4: Sub-volumen de cámara de combustión con especial refinación para captar reacciones químicas que producen gases de combustión.	27
Figura 3-5: Superficie de cámara de combustión. Las zonas oscuras representan un mayor refinamiento para mejor captación de reacciones químicas.....	28
Figura 3-6: Mallado de inyector y spark, elementos importantes responsables directos de la combustión.	28
Figura 3-7: Proceso del diseño experimental con factores controlables y no controlables en la entrada (causas), y para la salida variables de respuesta (efectos).....	29
Figura 4-1: Inyección de combustible por medio de 3 boquillas del inyector en forma de spray a los 436 CA.	32
Figura 4-2: Propagación de la flama (color rojo) debido a la ignición del combustible a los 725 CA.	32
Figura 4-3: Distribución de presiones para las combinaciones de tratamientos de VRM y T desde la inyección de combustible a los 420 CA, ignición a los 720 CA y salida de los gases a los 880 CA. Como referencia, CA de inyección (- - - - roja), CA de ignición (- - - - azul) y CA de EVO (- - - - verde).....	34
Figura 4-4: Simulación de propagación de presión por la cámara y el pistón. Los paneles de interés son: a) Presión en la ignición, d) Máximo valor de presión y i) Presión a la apertura de la válvula de salida. Como referencia, alta presión (rojo) y baja presión (a Como referencia, alta presión (rojo) y baja presión (azul).	34

Figura 4-5: Distribución de temperatura para las combinaciones de los 9 tratamientos de VRM y T. Como referencia, CA de inyección (- - - - roja), CA de ignición (- - - - azul) y CA de EVO (- - - - verde).....	35
Figura 4-6: Simulación de propagación de la Temperatura por la cámara y el pistón. Como referencia, a) Ignición (720 CA), d) Máximo valor de temperatura (780 CA) y i) Temperatura a la apertura de la válvula de salida (880 CA).....	35
Figura 4-7: Distribución de monóxido de carbono CO. Mayor concentración de CO con valores de RPM bajos y T altos. Como referencia, CA de inyección (- - - - roja), CA de ignición (- - - - azul) y CA de EVO (- - - - verde).....	36
Figura 4-8: Simulación de la propagación de CO en el cilindro. Como referencia, b) Concentración inicial de CO, c) Máximo valor de concentración de CO y i) Concentración de CO a EVO.	37
Figura 4-9: Diagrama de Pareto de efectos sobre concentración de CO. Como referencia, efecto A equivale a VRM, efecto B equivale a temperatura de inyección y significancia estadística para $\alpha=0.05$ (- - - - roja).....	38
Figura 4-10: Superficie de respuesta de concentración de CO. Con una Temperatura de 450K y 3600 RPM se obtiene el valor más alto de concentración.	38
Figura 4-11: Distribución de concentración de dióxido de Carbono. Como referencia, CA de inyección (- - - - roja), CA de ignición (- - - - azul) y CA de EVO (- - - - verde).....	39
Figura 4-12: Simulación de la propagación de CO ₂ en la cámara de combustión. Como referencia, b) Concentración inicial de CO ₂ , c) Máximo valor de concentración de CO ₂ y i) Concentración de CO ₂ a EVO.	40
Figura 4-13: Diagrama de Pareto de efectos sobre concentración de CO ₂ . Como referencia, efecto A equivale a VRM, efecto B equivale a temperatura de inyección y significancia estadística para $\alpha=0.05$ (- - - - roja).....	41
Figura 4-14: Superficie de respuesta de concentración de CO ₂ . Con una Temperatura de 350K y 2800 RPM se obtiene el valor más alto de concentración.	42
Figura 4-15: Distribución de monóxido de nitrógeno. Como referencia, CA de inyección (- - - - roja), CA de ignición (- - - - azul) y CA de EVO (- - - - verde).	42
Figura 4-16: Simulación de propagación de NO. c) Punto de ignición, b) Máximo valor de concentración de NO y i) Proceso de salida por medio de la EVO.....	43
Figura 4-17: Diagrama de Pareto de efectos sobre concentración de NO. Como referencia, efecto A equivale a VRM, efecto B equivale a temperatura de inyección y significancia estadística para $\alpha=0.05$ (- - - - roja).....	44
Figura 4-18: Superficie de respuesta de concentración de NO. A la temperatura de 400K y 2800 RPM se tiene los valores más altos de concentración de NO.....	44

Figura 4-19: Distribución de Dióxido de nitrógeno. Como referencia, CA de inyección (- - - - roja), CA de ignición (- - - - azul) y CA de EVO (- - - - verde).....	45
Figura 4-20: Simulación de propagación de dióxido de nitrógeno. a) Presión en la ignición, d) Máximo valor de presión y i) Presión a la apertura de la válvula de salida.	46
Figura 4-21: Distribución de óxidos nitrogenados Como referencia, CA de inyección (- - - - roja), CA de ignición (- - - - azul) y CA de EVO (- - - - verde).....	47
Figura 4-22: Distribución de Hidrocarburos no combustionados. Como referencia, CA de inyección (- - - - roja), CA de ignición (- - - - azul) y CA de EVO (- - - - verde).....	48
Figura 4-23: Simulación de Hidrocarburos no combustionados. a) Ignición, b) Máximo valor de HNC y i) Reducción a casi cero de HNC.	48
Figura 4-24: Diagrama de Pareto de efectos sobre concentración de HNC. Como referencia, efecto A equivale a VRM, efecto B equivale a temperatura de inyección y significancia estadística para $\alpha=0.05$ (- - - - roja).	49
Figura 4-25: Superficie de respuesta de concentración de HNC. A la temperatura de 450K y 3600 RPM se tiene los valores más altos de concentración de HNC.	50

AGRADECIMIENTO

Al Doctor Víctor Hugo Hidalgo Díaz director del proyecto, quien con sus enseñanzas e ideas despertó mi curiosidad en la investigación y permitió la conclusión de este trabajo con éxito.

Al Doctor Freddy Benalcázar coordinador de la Maestría en Física Aplicada, quien con su predisposición de siempre brindar su ayuda hizo que la maestría fuera una gran experiencia.

A cada uno de mis profesores, quienes módulo a módulo, me brindaron las herramientas y el conocimiento necesario para poder culminar este proyecto.

A mis compañeros Sivananda, Guillermo y Roberto, quienes siempre fueron un gran apoyo a lo largo de los módulos y siempre estuvieron dispuestos a brindarme su conocimiento y experiencia.

DEDICATORIA

A Dios, quien siempre estuvo en mi mente y mi corazón como guía para ayudarme a conseguir cada una de mis metas.

A mis padres, Anibal y Piedad, quienes me dieron la vida y me han brindado las oportunidades para crecer como profesional y que con su paciencia y cariño siempre han sido el apoyo incondicional que me ha permitido alcanzar cada una de las metas que me he propuesto. A ellos se los debo todo.

A mi hermano, Byron, quien siempre ha estado pendiente de cada uno de mis pasos con sus consejos y sabiduría.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA
E INDUSTRIAL
MAESTRÍA DE FÍSICA APLICADA MENCIÓN FÍSICA
COMPUTACIONAL

TEMA:

Modelo paramétrico de fluidos para gases de combustión de un motor a gasolina extra

AUTOR: Jorge Anibal Gavilanes Sani.

DIRECTOR: Ingeniero, Víctor Hugo Hidalgo Díaz, PhD.

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

– Energías renovables y desarrollo sostenible.

FECHA: 23 de junio 2022.

RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación está enfocada en la simulación Computacional de la Dinámica de Fluidos (CFD) de los gases de combustión de un motor a gasolina extra mediante el software Ansys. Como primer paso se realizó la selección de los parámetros de entrada para poder investigar si tienen alguna influencia en la producción de gases de combustión como monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2), monóxido de nitrógeno (NO), dióxido de nitrógeno (NO_2) e hidrocarburos no combustionados (HNC). Una vez seleccionadas tanto los parámetros de entrada como los de salida, se procedió a establecer los niveles de cada parámetro de entrada con el fin de crear tratamientos basándose en el diseño experimental (DOE) y construyendo un diseño factorial 3^2 con un total de 9 tratamientos sin repetición para proceder. El siguiente paso consistió en utilizar la geometría de la cámara de combustión que el mismo software proporciona, construir las zonas de interés mediante el software Design modeler, realizar el mallado considerando mallas con más detalle en zonas de interés como el spray y el punto ignición mediante el software Meshing Autodine. En el tercer paso se resolvió las ecuaciones de Navier Stokes

utilizando el modelo de turbulencia $k - \varepsilon$ (RNG) Re-Normalization Group en conjunto con la química de inyección de combustible y el modelo de inyección del mismo. El último paso consiste en el seteo del ambiente de la simulación al realizar la selección del modelo de ignición para el modelamiento de la turbulencia de la flama, definición de las condiciones de borde y de inicio de la cámara de combustión. El procedimiento detallado en el anterior párrafo, se realizó para los 9 tratamientos propuestos por el diseño factorial y una vez culminadas cada una de las simulaciones, se procedió a analizar e interpretar los resultados obtenidos durante el proceso de la combustión que se da entre los ángulos de desplazamiento del pistón de 720 a 740 Crank Angle (CA).

Palabras Claves: Parámetros, motor a gasolina, gases de combustión, simulación, CFD, tratamientos.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ELECTRÓNICA
E INDUSTRIAL
MAESTRÍA DE FÍSICA APLICADA MENCIÓN FÍSICA
COMPUTACIONAL

THEME:

Parametric model of fluids for combustion gases of an extra gasoline engine.

AUTHOR: Jorge Anibal Gavilanes Sani.

DIRECTED BY: Engineer, Víctor Hugo Hidalgo Díaz, PhD.

LINE OF RESEARCH:

– Renewable energies and sustainable development.

DATE: June 23rd, 2022.

EXECUTIVE SUMMARY

The present investigation is focused on the simulation of Computational Fluid Dynamics (CFD) of the combustion gases in an extra gasoline engine using the Ansys software. As a first step, the selection of the input parameters was carried out in order to investigate if they have any influence on the production of combustion gases such as carbon monoxide (CO), carbon dioxide (CO₂), nitrogen monoxide (NO), nitrogen dioxide (NO₂) and unburned hydrocarbons (HNC). Once both the input and output parameters were selected, the levels of each input parameter were established in order to create treatments based on the experimental design (DOE) and building a 3² factorial design with a total of 9 treatments without repetition to proceed. The next step was to use the geometry of the combustion chamber that the software itself provides, build the areas of interest using the Design modeler software, perform the mesh considering meshes in more detail in areas of interest such as the spray and the ignition point using Meshing Autodine software. In the third step, the Navier Stokes equations were solved using the $k - \epsilon$ (RNG) Re-Normalisation Group turbulence model in conjunction with the fuel injection chemistry and the fuel injection model. The last step consists of setting the simulation environment when selecting the ignition

model for modeling the turbulence of the flame, defining the boundary conditions and the start of the combustion chamber. The procedure detailed in the previous paragraph was carried out for the 9 treatments proposed by the factorial design and once each of the simulations had been completed, the results obtained during the combustion process that occurred between the angles were analyzed and interpreted. piston displacement from 720 to 740 Crank Angle (CA).

Keywords: Parameters, gasoline engine, combustion gases, simulation, CFD, treatments.

CAPITULO I

1. EL PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Esta investigación se encuentra enfocada en construir un modelo paramétrico de dinámica de fluidos de los gases de combustión en un motor a gasolina extra, El primer paso consiste en realizar una simulación del fenómeno físico-químico de la combustión de la mezcla de aire y combustible en la cámara de combustión de un motor a gasolina. En el segundo paso, se procedió a elegir las variables de entrada del sistema (Temperatura de inyección de gasolina en grados °K y velocidad de rotación del motor (VRM) en revoluciones por minuto (RPM) con el fin de observar si su variación representa alguna influencia significativa en la concentración de los gases de combustión producidos durante dicho proceso. El trabajo se encuentra estructurado, iniciando con el capítulo uno en donde se realizó una recopilación amplia del estado del arte que relaciona la simulación de un motor de inyección a gasolina, en el capítulo dos se desarrolla los modelos y ecuaciones que gobiernan el fenómeno de la combustión, para luego pasar al capítulo tres, donde, se describe la metodología utilizada para realizar las diferentes simulaciones y proceder a exponer los resultados y discusión de los mismos en el capítulo cuatro. Por último, en el capítulo cinco se desarrollan las conclusiones y recomendaciones relacionadas con los resultados obtenidos. Las limitaciones y desafíos que se presentaron a lo largo de la investigación incluyen la obtención de datos reales de combustión. Sin embargo, se utilizó los datos del tutorial de la simulación de un motor de encendido por chispa del software Ansys, el segundo desafío que se presentó fue el tiempo muy extenso para desarrollar las simulaciones, ya que cada una duró entre 2 a 3 días. Una vez, solventados los desafíos, se obtuvieron los resultados que verificaron que existe una influencia al variar la temperatura de inyección en los gases de combustión y de igual manera sucedió en el caso de variar la velocidad de rotación del motor, permitiendo alcanzar los objetivos de esta investigación.

1.2. JUSTIFICACIÓN

La presente investigación sirve como un aporte al conocimiento de los procesos que se producen en la cámara de combustión de un motor a gasolina, tiene, por utilidad, sembrar una base que permita simular el comportamiento desde el punto de vista de la dinámica de fluidos de los gases de combustión, y además beneficiar a todos aquellos investigadores interesados en comprender la dinámica de fluidos de los gases de combustión en la cámara de un motor a gasolina. El modelo resultante brindará la opción de realizar comparaciones; ya no solo con motores a gasolina, sino también extrapolando la investigación a otro tipo de motores de combustión. La simulación ayudará a brindar una idea aproximada del comportamiento de los gases de combustión, permitiendo resolver problemas que radiquen en consumo excesivo de combustible o incluso en la mejora de las reducciones de emisiones de gases contaminantes, generando un aporte más para las investigaciones que involucran el campo de la combustión y la simulación computacional mediante CFD. Por último, la investigación proporcionará un modelo paramétrico que permitirá indicar la influencia que ejerce el cambio de ciertas variables en la generación de los gases en la cámara de combustión de un motor a gasolina, permitiendo realizar ajustes de acuerdo a las necesidades del investigador en pro de generar una simulación lo más acercada posible a la realidad.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo paramétrico de dinámica de fluidos para gases de combustión de un motor a gasolina extra.

1.3.2. Objetivos específicos

- Recopilar información sobre el estado del arte, en libros y artículos científicos, sobre la dinámica de fluidos aplicada a gases de combustión.
- Determinar los principales parámetros que intervienen en la dinámica de fluidos para gases de combustión de un motor gasolina.
- Realizar un modelo paramétrico de comportamiento de los gases de combustión basado en dinámica de fluidos para un motor de gasolina tipo extra.

- Realizar la simulación de la dinámica de fluidos de los gases de combustión con base en el modelo propuesto.

CAPÍTULO II

2. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

2.1. ESTADO DEL ARTE

La combustión es un fenómeno estudiado por varios investigadores en los últimos años debido a su campo amplio y su gran complejidad, siendo un poco más específicos, como es el caso de esta investigación en el campo de la combustión de motores de ignición (IC) y la producción de gases contaminantes [1]–[3]. Por ejemplo, Maurya and Mishria [4] en su investigación utilizaron el modelo reactor estocástico cero dimensiones (0-D SRM) [5] para el análisis paramétrico de motores de combustible dual. Ellos variaron los parámetros operativos como relación de premezcla de combustibles, velocidad del motor y el porcentaje de recirculación de gases de escape (EGR) [6] y para el proceso de combustión del motor a combustible dual, lo analizaron mediante el CFD comercial “STAR-CD” [7]. Las conclusiones a las que llegaron fueron: La tasa máxima de aumento de presión (MPRR) aumenta directamente con el aumento de la relación de equivalencia de premezcla de gas natural y disminuye con el incremento en la velocidad del motor [8]. Además, encontraron que las emisiones de CO son afectadas por el porcentaje de EGR en el rango de funcionamiento de combustible dual a velocidad constante del motor, algo similar a los resultados que obtuvieron Yang et al. [9] en su estudio mediante el cual propusieron un método híbrido que combina el modelo de cinética de reacción [10] junto con un mecanismo sustituto de gasolina que monitorea las características de la combustión, además ellos aplicaron un método de análisis de sensibilidad global basado en la densidad para decodificar el efecto que producen los factores del índice de octanaje de la gasolina, la sensibilidad del combustible y la relación de equivalencia en los comportamientos de combustión. La conclusión en función de los resultados de su investigación denota que las composiciones de gasolina juegan un papel importante en los regímenes de baja temperatura y baja presión [11], donde la sensibilidad reactiva en la composición del combustible fue más significativa.

De manera similar, los efectos de la premezcla y la tasa de EGR en las características de combustión y emisiones de un motor a gasolina estudiados por He et al. [12]

mediante el uso de modelos de turbulencia, transferencia de calor, ignición, combustión y modelo de emisiones en complemento con el software computacional "CFD CONVERGE" para la simulación, concluyeron que un aumento de la tasa de inyección de la mezcla de hidrógeno mejora las características de combustión. Como resultado de lo anterior, ellos obtuvieron una mayor influencia en la emisión de óxidos nitrosos (NO_x) y las emisiones de los gases contaminantes CO y HNC aumentaron con el aumento de la tasa EGR, aun así, al comparar los resultados con un motor convencional, la inyección directa de hidrógeno tiene un mejor rendimiento en las características de la combustión. Sin embargo, los autores sugieren que esto se puede solucionar manteniendo una tasa de EGR moderada entre 15% al 20% mejorando la combustión y el rendimiento de las emisiones simultáneamente.

En el mundo de hoy en día, la contaminación es un punto importante en la agenda de los investigadores, sobre todo en los estudios realizados por Reddy and Mallikarjuna [13] quienes hace un análisis CFD mediante "CFD CONVERGE" y el uso del modelo RNG $k-\varepsilon$ [14] para la turbulencia, "SAGE" [15] para la cinética química y el modelo "kh-rt" [16] para la pulverización de combustible, por consiguiente obtuvieron resultados que indican que al aumentar las presiones de inyección, las emisiones contaminantes disminuyen en porcentajes de alrededor de 80% y que mientras avanza el tiempo de encendido de la chispa las emisiones se triplican o cuadruplican en orden de magnitud. De acuerdo al estudio, indican también que, si se aumentan los orificios en los inyectores de gasolina a 10, las emisiones decrecen al rededor del un 70 % a comparación de uno de 6 orificios. Los resultados presentados aquí, también fueron comparables con los de la investigación realizada por Krishna et al. [17] quienes mediante el uso de software "STAR-CD" para el análisis CFD decidieron experimentar con tres modelos de turbulencia RNG $k-\varepsilon$, estándar $k-\varepsilon$ y $k-\varepsilon$ [18] para identificar con cuál se obtiene una mejor predicción del campo de flujo de fluido dentro del cilindro de un motor de dos tiempos. La conclusión a la que llegaron es que el modelo de turbulencia RNG $k-\varepsilon$ es el que ofrece una mejor predicción y que por consiguiente puede representar de mejor manera las reacciones en la cámara de combustión que generan los gases contaminantes.

Otra de las posibilidades que existen para reducir las emisiones contaminantes fue desarrollado por los investigadores, Lamani et al. [19] quienes proponen utilizar una mezcla de combustible y oxígeno en proporciones de un 30%. Las herramientas "AVL ESE CFD" [20] fueron usadas para el mallado y el modelado geométrico computacional en ayuda con un clúster de 32 núcleos con 64 GB de RAM y procesamiento paralelo. Los modelos empleados en la simulación fueron: turbulencia, ruptura, dispersión turbulenta, impacto de pared, tratamiento de paredes, transferencia de calor, evaporación, combustión, encendido, formación de oxidación de hollín, mecanismo NOx y solucionador de química. Como resultado, los autores denotaron que un aumento de n-butanol en las mezclas de aire-combustible conduce a una oxidación mejorada que produce reducciones de hollín y gas contaminante CO debido a que existe una mayor relación de oxígeno/carbono. Un proceso similar fue realizado por Petranovic et al. [21] como consecuencia del uso un modelo numérico para la predicción de contaminantes en motores de combustión interna y la simulación con "CFD FIRE" [22] fueron capaces de capturar fenómenos químicos y predecir tendencias de concentración de emisiones contaminantes. El aporte novedoso de su investigación fue el uso de biodiésel para reducir las emisiones de NO contaminantes en un promedio de 8% en relación con un motor con combustible diesel. Además, concluyen que si se realizan mezclas entre diesel y biodiésel se puede hallar un equilibrio para obtener reducción de NO contaminante [23]. Sin embargo, debido a que la combustión en motores de encendido por compresión sigue siendo un fenómeno complejo, ya que depende de varios parámetros cuyo efecto en la mayoría de veces es difícil determinar con precisión, se necesitan más estudios de modelados numéricos que permitan un desarrollo y ampliar el conocimiento del campo.

Un estudio interesante del generador lineal de motor de gasolina de pistón libre (FPELG) se desarrolló con modelos simplificados de cero dimensión y un análisis paramétrico con el objetivo de encontrar las características de operación del pistón y los rendimientos de la FPELG durante el proceso de generación realizado por Chendong et al. [24] plantearon un modelo numérico basado en la segunda ley de Newton con el objetivo de representar la carga del motor considerando como parámetros variables para el modelo de combustión el tiempo de encendido y la inyección secuenciada. Sin embargo, la eliminación del mecanismo del cigüeñal es utilizada como señal de referencia para decidir la sincronización del encendido para

desplazamiento del pistón. Entre las conclusiones obtenidas detallan que: Con una masa en movimiento relativamente más alta, tanto la presión máxima del cilindro como la relación de compresión alcanzada son más altas, mientras que el proceso de liberación de calor estaba más cerca de un proceso de volumen constante cuando la masa en movimiento era menor [25]. Por último, concluyeron que, la velocidad máxima del pistón, la velocidad promedio y la relación de compresión variaron en correlación positiva con la carga.

2.2. CFD FORTE

El software está diseñado para brindar soluciones de aplicaciones en el diseño de motores de combustión interna mediante representaciones teóricas preestablecidas del flujo de fluidos en tres dimensiones (3D) y con la ayuda de la dinámica de pulverización y el comportamiento de la combustión para modelar con precisión y eficiencia en los elementos del motor. En los motores de inyección directa, aporta una excelente precisión en la ruptura y vaporización de las gotas de combustible rociado, permitiendo acoplarse a la par con los modelos químicos de múltiples componentes para la representación del transporte de gas de la pulverización a la cuadrícula y por ende brindando simulaciones más precisas con un bajo coste computacional sin calibración externa. Forte incorpora la tecnología de Chemkin-Pro para química de superficie y fase gaseosa, el software puede predecir de forma rápida y precisa las mejoras de rendimiento y diseño. Los flujos de trabajo optimizados y la generación automática de mallas reducen el tiempo de trabajo manual, lo que permite más tiempo para alcanzar ideas de diseño óptimo. Entre las especificaciones, modelos y solucionadores que posee el software se tiene generación automática de malla, modelos de combustible multicomponente, modelado de pulverización validado, solucionador de refinamiento de malla adaptativa, modelado de brechas, base de datos de refrigerantes, refinamiento de malla adaptable, tecnología Chemkin-Pro solver y capacidades paramétricas [26].

En la Figura 2-1 se puede observar el resultado de la geometría del postproceso en Ensignht de la cámara de combustión de un motor de gasolina, en donde se visualiza en azul, el puerto de entrada, en verde el puerto de salida, en la parte inferior el pistón y la zona transparente representa el volumen del cilindro.

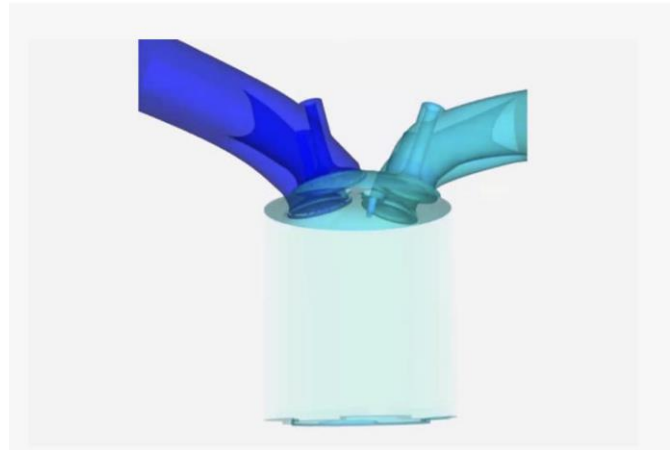


Figura 2-1: Vista de la geometría de la cámara de combustión luego del postproceso en Enight.

2.3. ECUACIONES DE ESTADO

Para establecer una simulación acertada de los fenómenos químicos y termodinámicos y sus interacciones en la cámara de combustión, es necesario un modelo que combine la velocidad de la llama turbulenta y el conjunto de las concentraciones de las especies, incluyendo CO, NO₂, NO y NO₂ [27].

En los motores de combustión interna, la mezcla de combustible y aire antes de la combustión y los productos quemados después de la combustión son los fluidos de trabajo. La dinámica de fluidos básica utilizada está gobernada por las ecuaciones de Navier Stokes. En resumen, las ecuaciones de transporte y los modelos de conservación de masa, momentum y energía se usan para los flujos compresibles en fase gaseosa, representando la naturaleza turbulenta del flujo. En el caso de la inyección de aerosoles se utilizan funciones de intercambio que consideran la interacción entre la fase gaseosa y las gotas líquidas [28]. Los principales supuestos utilizados en la derivación de las ecuaciones de gobierno son el uso de la Ley del gas ideal [29] en la ecuación de estado de fase gaseosa y la Ley de Fick [30] en la difusión de la masa. En el caso de la difusión térmica se usa la suposición de trabajar con un fluido newtoniano [31] y la Ley de Fourier para la difusión térmica [32]. El flujo turbulento se caracteriza por una amplia gama de escalas de longitud de flujo, así como variaciones significativas e irregulares del campo de flujo. ANSYS Forte ofrece la opción del enfoque de Reynolds-Averaged-Navier-Stokes (RANS), que tiene como objetivo capturar el conjunto promedio del campo de flujo de muchas realizaciones de flujos en condiciones equivalentes. Dado que un efecto importante de la turbulencia es

un transporte y una mezcla de fluidos más efectivos en comparación con un flujo laminar, el conjunto promedio del transporte y la mezcla turbulentos es análogo a una difusión a gran escala. El enfoque RANS elimina la necesidad de resolver las estructuras y fluctuaciones a pequeña escala que se observan en las realizaciones de flujo individuales, al tiempo que conserva los efectos principales de la turbulencia en el flujo promedio y las características de combustión. Para lograr esto, se emplea el promedio de Favre para representar una cantidad instantánea, como el vector de velocidad de flujo \mathbf{u} , en un promedio de conjunto $\tilde{\mathbf{u}}$, y una parte fluctuante \mathbf{u}'' , como $\mathbf{u} = \tilde{\mathbf{u}} + \mathbf{u}''$. En este enfoque, la parte promedio $\tilde{\mathbf{u}}$ se define como un promedio ponderado por densidad convencional por $\tilde{\mathbf{u}} = \overline{\rho\mathbf{u}}/\bar{\rho}$, donde $\bar{\rho}$ es el campo de densidad filtrado, mientras que la fluctuación \mathbf{u}'' se define para satisfacer $\overline{\rho\mathbf{u}''} = 0$, donde la barra superior representa un operador de promedio.

Los fluidos de fase gaseosa del motor de combustión son modelados como mezcla de componentes de gas individuales, o especies [33]. La composición varía según el ciclo del motor debido a varios factores como la difusión molecular, el transporte turbulento, la convección del flujo y las interacciones entre la combustión y los aerosoles de combustible. La ecuación de conservación de la masa de especies $n = 1, \dots, N$ está dada por

$$\frac{\partial \bar{\rho}_n}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho}_n \tilde{\mathbf{u}}) = \nabla \cdot [\bar{\rho} D \nabla \bar{y}_n] + \nabla \cdot \Phi + \dot{\rho}_n^c + \dot{\rho}_n^s, \quad (1)$$

donde N es el número total de especies y $\bar{y}_n = \rho_n/\rho$ es la fracción en masa de las especies n . Así pues, como resultado de la ley de difusión de Fick se tiene el coeficiente de difusión molecular promediado D , el término Φ explica los efectos del promedio del filtrado del término de convección que es $\Phi = \bar{y}_n \tilde{\mathbf{u}} - \overline{\rho_n \mathbf{u}}$. Por último, $\dot{\rho}_n^c$ y $\dot{\rho}_n^s$ son términos de origen debido a reacciones químicas y evaporación por pulverización, respectivamente.

La ecuación de continuidad usada sobre todas las especies para el fluido total en fase gaseosa [34], está dada por

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}}) = \dot{\rho}^s. \quad (2)$$

La ecuación de momentum considera los efectos de la tensión viscosa, la fuerza de presión, el transporte turbulento y la convección, así como el impacto de los aerosoles líquidos y la fuerza corporal [35], como se indica en la Ecuación de conservación del momentum tal como

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}} \tilde{\mathbf{u}}) = -\nabla \bar{p} + \nabla \cdot \bar{\boldsymbol{\sigma}} - \nabla \cdot \boldsymbol{\Gamma} + \bar{\mathbf{F}}^s + \bar{\rho} \bar{\mathbf{g}}, \quad (3)$$

donde p es la presión, $\bar{\mathbf{F}}^s$ es la tasa de ganancia de momento, g es la fuerza corporal específica y $\bar{\boldsymbol{\sigma}}$ es la tensión de cizallamiento viscosa dada por

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}} = \bar{\rho} \nu [\nabla \tilde{\mathbf{u}} + (\nabla \tilde{\mathbf{u}})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}}) \mathbf{I}], \quad (4)$$

en donde ν es la viscosidad, \mathbf{I} y \mathbf{T} son los tensores de identidad y transporte, respectivamente. $\boldsymbol{\Gamma} = \bar{\rho}(\tilde{\mathbf{u}}\tilde{\mathbf{u}} - \tilde{\mathbf{u}}\tilde{\mathbf{u}})$ en el enfoque RANS representa el estrés de Reynolds, para el cual, se necesita el modelo de turbulencia para efectuar el cierre.

Con la ayuda de la primera ley de la Termodinámica [36], el cambio de energía interna fue balanceado entre la presión de trabajo y la transferencia de calor. En los motores de combustión interna para problemas de flujo se debe considerar los efectos de la convección, transporte y disipación turbulenta, pulverizaciones, reacciones químicas y la difusión de entalpía de un flujo de múltiples componentes [37]. La ecuación de transporte de energía interna está representada por

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{l}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}} \tilde{l}) = -\bar{p} \nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}} - \nabla \cdot \bar{\mathbf{J}} - \nabla \cdot \mathbf{H} + \bar{\rho} \bar{\varepsilon} + \bar{Q}^c + \bar{Q}^s, \quad (5)$$

donde l es la energía interna específica y las contribuciones debido a la difusión de entalpía y la conducción de calor son representadas por el vector de flujo $\bar{\mathbf{J}}$ representado por la ecuación

$$\bar{\mathbf{J}} = -\lambda \nabla \bar{T} - \bar{\rho} D \sum_n \bar{h}_n \nabla \tilde{y}_n, \quad (6)$$

donde $\lambda = \bar{\rho} c_p \alpha$ es la conductividad térmica, la cual, está ligada a la difusividad térmica α y la capacidad calorífica c_p . T es la temperatura, h_n la entalpía específica, $\bar{\varepsilon}$ la tasa de disipación de la energía cinética turbulenta, \bar{Q}^s y \bar{Q}^c son términos que se relacionan a las interacciones de pulverización y liberación química de calor, respectivamente. $\mathbf{H} = \bar{\rho}(\tilde{\mathbf{u}}\tilde{l} - \tilde{\mathbf{u}}\tilde{l})$, explica los efectos del promedio de conjunto de términos de convección y debe modelarse desde el enfoque de turbulencia.

La ecuación de estado de mezcla gaseosa tiene dos supuestos. El primero, las relaciones de estado termodinámico para mezcla gaseosa obedecen a la Ley del gas ideal, y segundo, la mezcla de los componentes del gas obedecen a la Ley de Dalton [38], donde cada componente del gas se comporta individualmente como un gas ideal a la temperatura T y volumen de la mezcla [39]. La ecuación de estado de mezcla gaseosa está dada por

$$\bar{p} = R_u \tilde{T} \sum_n \frac{\bar{\rho}_n}{W_n}, \quad (7)$$

donde R_u es la constante universal de los gases y W_n es el peso molecular de las especies n .

2.4. MODELO DE TURBULENCIA

Como se había indicado en las Ecuaciones (1), (2) y (5) se necesitaba complementar los términos Φ , Γ y \mathbf{H} respectivamente con un modelo de turbulencia RANS. El enfoque Reynolds Average Navier Stokes es el más utilizado para modelar procesos de transporte turbulento con supuestos de gradiente-difusión. Los términos están del modelo están dados por: Primero, la ecuación de momentum considera que los componentes de la tensión de Reynolds son proporcionales a la tasa de deformación media, donde el tensor de Reynolds Γ está definido por

$$\Gamma = -\bar{\rho} \nu_T [\nabla \tilde{\mathbf{u}} + (\nabla \tilde{\mathbf{u}})^T - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}}) \mathbf{I}] + \frac{2}{3} \bar{\rho} \tilde{k} \mathbf{I}, \quad (8)$$

donde ν_T es la viscosidad cinemática turbulenta y \tilde{k} la energía cinética turbulenta definida por:

$$\tilde{k} = \frac{1}{2\bar{\rho}} \text{tr}(\Gamma) = \frac{1}{2} \widetilde{\mathbf{u}'' \cdot \mathbf{u}''}, \quad (9)$$

en consecuencia, la viscosidad turbulenta está relacionada con la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación se representa mediante la ecuación

$$\nu_n = c_\mu \frac{\tilde{k}^2}{\tilde{\epsilon}}. \quad (10)$$

Segundo, el término de flujo turbulento Φ del transporte de especies de la Ecuación (1) está definido por

$$\Phi = \bar{\rho} D_T \nabla \bar{y}_n, \quad (11)$$

donde D_T es la difusividad térmica. Y tercero, similarmente, el término de flujo turbulento \mathbf{H} en la Ecuación (5) de energía desde el enfoque de turbulencia está modelado por

$$\mathbf{H} = -\lambda_T \nabla \bar{\mathbf{T}} - \bar{\rho} D_T \sum_n \tilde{\mathbf{h}}_n \nabla \bar{y}_n, \quad (12)$$

en la cual, λ_T es la conductividad térmica turbulenta y está relacionada con la difusividad térmica turbulenta α_T y la capacidad calorífica c_p por $\lambda = \bar{\rho} c_p \alpha$. Aquí, la masa turbulenta y la difusividad térmica están relacionadas con la viscosidad turbulenta de la siguiente manera

$$D_T = \frac{v_T}{Sc_T} \quad (13)$$

y

$$\alpha_T = \frac{v_T}{Pr_T}, \quad (14)$$

donde Sc_T y Pr_T son los números turbulentos de Schmidt and Prandtl, respectivamente. Como se observó antes en la Ecuación (10), tanto la energía cinética turbulenta \tilde{k} y su tasa de disipación $\tilde{\varepsilon}$ necesitan ser modeladas. Para ello, el software tiene disponible el modelo $k - \varepsilon$ y RNG $k - \varepsilon$ donde, consideran la dilatación de velocidad en la ecuación de ε y los términos de fuente inducida por pulverización para las ecuaciones de k y ε , respectivamente.

La versión avanzada (y recomendada) del modelo $k - \varepsilon$ se deriva de la teoría del grupo Re-Normalizado (RNG), como propusieron por primera vez Yakhot and Orszag [40]. La Ecuación k en la versión RNG del modelo es la misma que la versión estándar, pero la ecuación ε se basa en una derivación matemática rigurosa en lugar de en constantes derivadas empíricamente. Las ecuaciones de k y ε RNG se escriben de la siguiente manera:

$$\frac{\partial \bar{\rho} \tilde{k}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}} \tilde{k}) = -\frac{2}{3} \bar{\rho} \tilde{k} \nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}} + (\bar{\boldsymbol{\sigma}} - \Gamma) : \nabla \tilde{\mathbf{u}} + \nabla \cdot \left[\frac{(\mu + \mu_T)}{Pr_k} \nabla \tilde{k} \right] - \bar{\rho} \tilde{\varepsilon} + \dot{W}^S, \quad (15)$$

y

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\varepsilon}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}} \tilde{\varepsilon}) = & -\left(\frac{2}{3} c_{\varepsilon 1} - c_{\varepsilon 3}\right) \bar{\rho} \tilde{\varepsilon} \nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}} + \nabla \cdot \left[\frac{(\mu + \mu_T)}{Pr_\varepsilon} \nabla \tilde{\varepsilon} \right] \\ & + \frac{\tilde{\varepsilon}}{k} \left[c_{\varepsilon 1} (\boldsymbol{\sigma} - \Gamma) : \nabla \tilde{\mathbf{u}} - c_{\varepsilon 2} \bar{\rho} \tilde{\varepsilon} + c_S \dot{W}^S \right] - \bar{\rho} R, \end{aligned} \quad (16)$$

donde

$$R = \frac{c_\mu \eta^3 (1 - \eta/\eta_0) \tilde{\varepsilon}^2}{1 + \beta \eta^3} \frac{\tilde{\varepsilon}^2}{\bar{k}}, \quad (17)$$

y

$$\eta = S \frac{\tilde{\varepsilon}^2}{\bar{k}}, \quad (18)$$

además,

$$S = (2\bar{\mathbf{S}} : \bar{\mathbf{S}})^{1/2}, \quad (19)$$

donde, $\bar{\mathbf{S}}$ es tensor promedio de estrés definido por

$$\bar{\mathbf{S}} = \frac{1}{2} (\nabla \tilde{\mathbf{u}} + (\nabla \tilde{\mathbf{u}})^T). \quad (20)$$

La Tabla 2-1 indica los valores de las principales constantes que se usa en el modelo RNG k - ε , que se presentaron en las ecuaciones (15) - (20).

Tabla 2-1: Valores de las constantes utilizadas en el modelo RNG k- ε

	c_μ	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	$c_{\varepsilon 3}$	$1/Pr_k$	$1/Pr_\varepsilon$	η_0	β
RNG k- ε	0.0845	1.42	1.68	Ecuación (21)	1.39	1.39	4.38	0.012

Para concluir, el modelo RNG tiene un término que acopla la turbulencia no isotrópica, como describen Yakhot and Orszag [40]. El valor de la variable $c_{\varepsilon 3}$ está basado en el trabajo de Han and Reitz [41], quienes modificaron la variable tomando en cuenta el efecto de compresibilidad.

$$c_{\varepsilon 3} = \frac{-1 + 2c_{\varepsilon 2} - 3m(n-1) + (-1)^\delta \sqrt{6} c_\mu c_\eta \eta}{3}, \quad (21)$$

donde $m = 0.5$, $n = 1.4$ para gases ideales,

$$c_\eta = \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta \eta^3}, \quad (22)$$

y finalmente,

$$\delta = \begin{cases} 1, & \text{si } \nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}} < 0 \\ 0, & \text{si } \nabla \cdot \tilde{\mathbf{u}} > 0 \end{cases} \quad (23)$$

2.5. FORMULACIÓN CINÉTICA QUÍMICA

Las reacciones químicas que ocurren en la simulación de la combustión pueden ser descritas utilizando ciertos mecanismos desde el punto de la cinética química, la cual

asocia las velocidades de las reacciones con el cambio de concentraciones de las especies. Los mecanismos cinéticos pueden representarse por la ecuación

$$\sum_{j=1}^J v'_{ji} \chi_j \Leftrightarrow \sum_{j=1}^J v''_{ji} \chi_j, \quad i = 1, \dots, I \quad (24)$$

y la tasa de producción de la j -ésima especie en la reacción i -ésima se puede escribir mediante

$$\dot{\omega}_{ji} = (v''_{ji} - v'_{ji}) q_i, \quad j = 1, \dots, J, \quad (25)$$

donde q_i es la tasa de avance de la reacción i .

2.6. MODELO DE INTERACCIÓN CINÉTICO-TURBULENTO

El modelo general para interacción turbulenta-química es un trabajo adaptado de Kong and Reitz [42], Kong et al. [43]. El modelo indica la simulación de los efectos de la turbulencia en la combustión cinética, considera que la química de la combustión debe ser controlada en parte por medio de la ruptura de remolinos turbulentos debido a la mezcla imperfecta de combustible y oxidante en un proceso de motor real. Además, el modelo asume un movimiento en una escala de tiempo T_{eff} donde cada especie se mueve hacia sus valores de equilibrio local. La tasa real de producción efectiva de la especie j es expresada por

$$\tilde{\omega}_{j,eff} = \frac{Y_{j,EQ} - Y_j}{\tau_{eff}}, \quad (26)$$

donde la escala de tiempo efectiva τ_{eff} está relacionada con la escala de tiempo química más la escala de tiempo de la mezcla turbulenta escalar dada por

$$\tau_{eff} = \tau_{chem} + \tau_{mix}. \quad (27)$$

Para garantizar que las tasas efectivas de producción de especies no llegue a cero cuando la escala de tiempo de la mezcla turbulenta es muy grande, el modelo se desactiva cuando el valor de τ_{mix} llega alrededor de 1 milisegundo [26].

2.7. MODELO DE SPRAY

Los modelos que se encargan de simular la pulverización de combustible incluyen subprocesos como el flujo de boquilla, atomización por pulverización, ruptura de gotas, colisión y coalescencia de gotas, vaporización de gotas e impacto de paredes. Para los aerosoles de cono sólido, las condiciones iniciales de pulverización en la

salida de la boquilla se obtienen mediante el coeficiente de descarga o el modelo de flujo de boquilla, además del modelo de Kelvin-Helmholtz / Rayleigh-Taylor (KH / RT) se utiliza para la ruptura de gotas [44]. Cabe recalcar que los modelos utilizados en el software emplean técnicas que disminuyen la dependencia de resultados en el tamaño de la malla y el tamaño del paso del tiempo. Los parámetros de entrada que considera son el flujo másico, presión ambiente, propiedades físicas del combustible líquido, diámetro geométrico del hoyo, radio L/D y radio R/D donde R es el radio de curvatura de la región de entrada del inyector como se muestra en la Figura 2-2. Con las entradas, el modelo determina el coeficiente de descarga instantánea C_d , ángulo de spray, velocidad efectiva de inyección y el flujo efectivo de área de salida. La ecuación del coeficiente de descarga viene dado por

$$C_d = \frac{1}{\sqrt{K_{inlet} + fL/D + 1}}, \quad (28)$$

donde K_{inlet} es la pérdida de entrada y

$$f = \text{Max}(0.316Re^{-0.25}, 64/Re_D) \quad (29)$$

donde Re_D es el número de Reynolds en función del diámetro de la boquilla. El ángulo de spray en el modelo de flujo de la boquilla se estima utilizando un modelo aerodinámico. Este enfoque se basa en el análisis de Taylor de la ruptura de líquidos de alta velocidad debido al crecimiento inestable de las ondas superficiales y el desprendimiento de masa resultante. En este enfoque, el ángulo de pulverización,

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{4\pi}{A} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_l}} f(T), \quad (30)$$

donde A es $3 + 0.28(L/D)$,

$$f(T) = \frac{\sqrt{3}}{6} (1 - \exp(-10T)) \quad (31)$$

y

$$T = \left(\frac{Re}{We}\right)^2 \frac{\rho_l}{\rho_g}. \quad (32)$$

La Figura 2-2 muestra el paso del flujo a través de la boquilla, tomando en cuenta el radio de curvatura de la entrada (R/L), la zona de estrangulación, la zona de cavitación en donde se produce la evaporación a bajas temperaturas y por último la salida donde se relaciona la longitud de la boquilla con el diámetro (L/D).

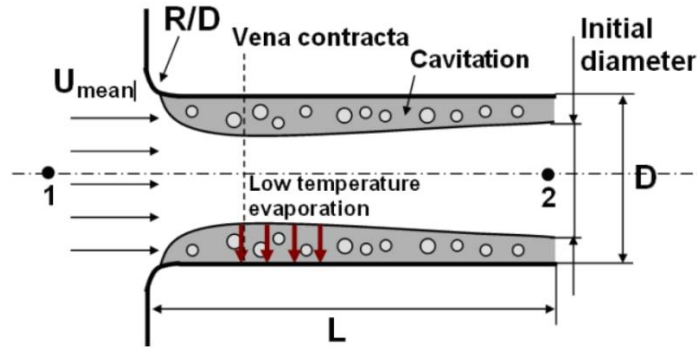


Figura 2-2: Representación del flujo a través de la boquilla, velocidad de entrada y la zona de cavitación donde se produce la evaporación a bajas temperaturas [26].

2.8. MODELO DE PROPAGACIÓN DE LLAMA TURBULENTA

Los motores de encendido por ignición están caracterizados por la iniciación de la flama cerca de la ubicación de la chispa seguida de la propagación de la llama en el cilindro del motor. Para solventar el fenómeno, se utiliza el modelo de ecuación G para rastrear la propagación de llamas completamente desarrolladas, pre mezcladas o parcialmente pre mezcladas. El modelo de la ecuación G está basado en la teoría de combustión turbulenta de Peters [45] tomando en cuenta dos regímenes de interés práctico:

- Régimen de flamelet corrugado
- Régimen de zona de reacción delgada

La aplicación del modelo de ecuación G en motores IC fue desarrollada por Tan [46] y Liang and Reitz [47]. El modelo de ecuación G consta de un conjunto de ecuaciones de conjuntos de niveles promediados por Favre. Esto incluye las ecuaciones para la media de Favre \tilde{G} y su varianza \tilde{G}''^2 . La aplicación de la ecuación para la relación del área superficial de la llama turbulenta/laminar da como resultado una expresión explícita para la velocidad de la llama turbulenta S_T^0 . Junto con las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds y las ecuaciones de modelado de turbulencia, proporcionan un conjunto de ecuaciones que describen la propagación del frente de llama turbulenta

$$\frac{\partial \tilde{G}}{\partial t} + (\tilde{u} - \vec{u}_{vertex}) \cdot \nabla \tilde{G} = \frac{\bar{\rho}_u}{\bar{\rho}_b} S_T^0 |\nabla \tilde{G}| - D_T \tilde{k} |\nabla \tilde{G}| \quad (33)$$

y

$$\frac{\partial \widetilde{G''^2}}{\partial t} + \widetilde{\vec{u}} \cdot \nabla \widetilde{G''^2} = \nabla_{||} \cdot \left(\frac{\bar{\rho}_u}{\bar{\rho}_b} D_T \nabla_{||} \widetilde{G''^2} \right) + 2D_T (\nabla \widetilde{G})^2 - C_s \frac{\tilde{\varepsilon}}{\tilde{k}} \widetilde{G''^2}, \quad (34)$$

donde $\nabla_{||}$ denota el operador de gradiente tangencial, $\widetilde{\vec{u}}$ es la velocidad media del fluido, \vec{u}_{vertex} es la velocidad del vértice en movimiento, $\bar{\rho}_u$ y $\bar{\rho}_b$ son las densidades medias de las mezclas no quemadas y quemadas, respectivamente. D_T es la difusividad turbulenta, \tilde{k} es la curvatura frontal de la llama media de Favre. C_s , a_4 , b_1 y b_3 son constantes de modelado, \tilde{k} y $\tilde{\varepsilon}$ son la media de Favre de la energía cinética turbulenta y su tasa de disipación del modelo RNG k - ε y finalmente u' es la intensidad de la turbulencia.

2.9. COMBUSTIBLE

El combustible utilizado en esta investigación es la gasolina. La cual, es un combinado químico formado por cadenas de hidrocarburos. Para que exista combustión se necesita que se combinen el hidrógeno, el carbono y el oxígeno del aire. La cantidad de aire necesaria para que se combustione un gramo de gasolina es de aproximadamente 14.7 gramos [48]. Entre las características de la gasolina se tiene:

- Densidad entre 0.6695 kg/l y 0.770 kg/l
- Índice de octanaje, capacidad que posee para resistir la autodetonación.

La Tabla 2-2: Resultado de los ensayos de laboratorio para requisitos bajo normas INEN y ASTM de la gasolina extra representa las especificaciones de la gasolina extra utilizada en el Ecuador obtenidas en el laboratorio, donde se detalla las unidades, el rango de valores aceptables y el método de ensayo realizado bajo normas INEN y ASTM.

2.10. EMISIONES CONTAMINANTES

Todo proceso de combustión que se da en motores de combustión interna lleva asociado un problema de contaminación ambiental. El funcionamiento de un vehículo conlleva la generación de gases contaminantes producidos por hidrocarburos no combustionados HNC, óxidos de nitrógeno NO_x producidos por combustiones incompletas de gases de escape, monóxido de carbono CO y dióxido de carbono CO_2 [49]. Es importante agregar que la contaminación producida por el parque automotor tiene tres orígenes:

- Gases resultantes de la combustión
- Vapores de la gasolina
- Vapores del cárter del motor.

Tabla 2-2: Resultado de los ensayos de laboratorio para requisitos bajo normas INEN y ASTM de la gasolina extra

REQUISITOS	UNIDAD	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉTODO DE ENSAYO
Número de Octano Research	RON	87	–	NTE INEN 2102
Destilación:				
10%	⁰ C	-	70	NTE INEN 926
50%	⁰ C	77	121	NTE INEN 926
90%	⁰ C	-	189	NTE INEN 926
Punto final	⁰ C	-	215	NTE INEN 926
Residuo de destilación, ϕ_T	%	-	2	NTE INEN 926
Relación vapor - líquido, a 60°C, V/L	-	-	20	NTE INEN 932 ASTM D 5188
Presión de Vapor	kPa	-	60	NTE INEN 928 ASTM D 4953 ASTM D 5191
Corrosión lámina de cobre	-	-	1	NTE INEN 927
Contenido de gomas	mg/100cm ³	-	3	NTE INEN 933
Contenido de azufre	ppm	-	650	NTE INEN 929 ASTM D 4294
Contenido de aromáticos, ϕ_a	%	-	30	NTE INEN 2252 ASTM D 6730
Contenido de benceno, ϕ_b	%	-	1	ASTM D 3606 ASTM D 5580 ASTM D 6277 ASTM D 6230
Contenido de olefinas, ϕ_o	%	-	18	NTE INEN 2252 ASTM D 6730
Estabilidad a la oxidación	mín.	240	-	NTE INEN 934 ASTM D 7525
W contenido de oxígeno	%	-	2,7	ASTM D 4815 ASTM D 5845 ASTM D 6730
Contenido de plomo	mg/l	-	No detectado	ASTM D 3257 ASTM D 5185
Contenido de manganeso	mg/l	-	No detectado	ASTM D 3831 ASTM D 5185
Contenido de hierro	mg/l	-	No detectado	ASTM D 5185

Entre los gases contaminantes más importantes producidos en la cámara de combustión tenemos: 1) Los hidrocarburos no combustionados que son moléculas de combustible inicial que parcialmente oxidados no se quemaron y son fruto de mala combustión, ya sea por, falta de oxígeno durante la combustión (mezcla rica) o

velocidad de inflamación baja (mezcla pobre). 2) El monóxido de carbono que es un gas incoloro e inodoro que se produce cuando se realizan combustiones incompletas de carácter de mezclas ricas en las que no existe el suficiente oxígeno para formar CO_2 . 3) El dióxido de Carbono CO_2 es un gas incoloro e inodoro provocado por la combustión, posee un grado de toxicidad bajo, pero reemplaza al oxígeno y reduce su proporción. Es uno de los principales culpables del efecto invernadero. 4) El oxígeno (O_2) en los gases de escape, es el remanente del aire que sobró luego del proceso de combustión, donde un remanente alto puede ser causa de una mezcla pobre debido a combustiones que no se completaron en el tubo de escape defectuoso. Un valor nulo corresponde a que se consumió todo el oxígeno durante el proceso de combustión. Sin embargo, si el CO_2 es alto, es indicativo de una mezcla rica. 5) Los óxidos nitrosos NO_x en el caso de altas temperaturas, como es el caso de la combustión, los átomos de nitrógeno se combinan con los de oxígeno para formar óxidos y dióxidos de nitrógeno (NO y NO_2) conocidos en lo general como NO_x . Los NO_x presentan alta peligrosidad, porque bajo la irradianza solar y presencia de humedad tienden a transformarse en ácido nítrico que en suspensión del aire produce afectaciones al tracto respiratorio [49]. La Figura 2-3 representa la expulsión de la combinación de los gases de combustión producidos en el interior de la cámara de combustión.



Figura 2-3: Representación de la expulsión de la combinación de los gases contaminantes producidos en la cámara de combustión [24]

2.11. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El diseño de experimentos (DOE) es un enfoque estadístico para la optimización de procesos que da la posibilidad de variar factores al mismo tiempo con el objetivo de observar el comportamiento en el espacio de reacción y obtener valores óptimos [50]. La ventaja de la implementación de DOE en el ámbito químico, radica en la posibilidad

de evaluar al mismo tiempo factores como temperatura, presión, concentraciones y determinar su influencia en las variables de respuesta (productos).

El diseño factorial es un conjunto de arreglos experimentales o tratamientos, que se forman a partir de la consideración de las posibles combinaciones de los factores [50].

Las ventajas que ofrecen son:

- Permiten estudiar el efecto individual y de interacción de los factores que intervienen en el experimento.
- Son diseños que se pueden ampliar para formar diseños compuestos si se requiere una exploración más completa.
- Sirven para descartar factores que no representan influencia en las variables de respuesta.

El Diseño factorial 3^2 es el diseño más simple del sistema 3^k , el cual consiste en dos factores A y B, y cada uno posee tres niveles. La notación a usarse es digital (0, 1, 2) [50]. En un diseño 3^2 , la distribución de los factores y la creación de los tratamientos se puede observar en la Tabla 2-3, donde 00 representa la combinación de los niveles bajos de los dos factores A y B y 22 representa la combinación de los niveles altos de los dos factores A y B. Puesto que se tiene $3^2 = 9$ combinaciones de tratamientos, los grados de libertad están distribuidos de la siguiente manera:

- 8 grados de libertad entre las combinaciones.
- 2 grados de libertad para cada uno de los efectos principales A y B.
- 4 grados de libertad para las combinaciones de A y B.
- $3^2(n - 1)$ grados de libertad del error.
- $3^2n - 1$ grados de libertad totales.

donde n es el número de réplicas.

Tabla 2-3: La combinación de niveles del factorial 3^2 está representado por los niveles bajos 00 y por 22 de los niveles altos para los factores A y B, el resto de los factores son resultado de combinación de niveles altos y bajos.

		Factor A		
Factor B	0	1	2	
0	00	01	02	
1	10	11	12	
2	20	21	22	

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1. UBICACIÓN

La investigación se realiza en la ciudad de Quito, bajo las condiciones estándar de presión y temperatura, dichas condiciones fueron ingresadas en el software computacional Ansys Forte IC engine con el propósito de realizar una simulación del comportamiento de los gases de combustión bajo la manipulación de ciertas variables de entrada.

3.2. EQUIPOS Y MATERIALES

En la Tabla 3-1 se describen los equipos y materiales utilizados en el proyecto de investigación.

Tabla 3-1: Equipos y materiales utilizados en el desarrollo de la investigación.

<u>Equipos/materiales</u>	<u>Costo (USD)</u>
Laptop, software	4300
Suministros	200
Material bibliográfico	200
Gastos varios	100
Total	4800

3.3. TIPO DE INVESTIGACIÓN

Se considera una investigación bibliográfica, ya que se realizó una búsqueda de información en artículos científicos, libros y fuentes bibliográficas que utilizaban información o datos sobre la simulación de los gases de combustión producidos en un motor a gasolina similares a lo que se busca obtener con la investigación. También, se considera descriptiva porque ayuda a identificar los parámetros que ejercen una real influencia en el comportamiento de los gases de la cámara de combustión del motor a gasolina y en consecuencia permitiendo la creación del modelo. Cabe denotar que es una investigación correlacional ya que se usó las variables de estudio como la velocidad de rotación del motor y temperatura con el fin de ver su influencia en las variables de salida y si existe alguna correlación entre ellas. Una vez conocido el grado de correlación entre las variables, se puede predecir el comportamiento del sistema si

se modifican alguna de ellas. Por último, la investigación tiene carácter experimental porque permite testear la hipótesis a través de experimentos, utilizando software para simular el comportamiento de los gases de combustión de un motor a gasolina extra bajo las condiciones de variación de las RPM del motor y la temperatura de inyección de combustible.

3.4. PRUEBA DE HIPÓTESIS - PREGUNTA CIENTÍFICA - IDEA A DEFENDER

La simulación numérica mediante CFD permitirá conocer la influencia de la velocidad de rotación del motor y la temperatura de inyección en la dinámica de fluidos de los gases de combustión de un motor a gasolina extra.

3.5. POBLACIÓN O MUESTRA

Debido a que el proyecto es del tipo investigativo, no se utiliza una población o muestra.

3.6. RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La recolección de información para la investigación planteada se la realizó mediante una búsqueda en fuentes de información como IEEE, Scopus y ScienceDirect, tomando en cuenta que cumplan con criterios de búsqueda acorde a la naturaleza de esta investigación.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** representa las preguntas que se contestaron durante cada etapa para recolectar información mientras se fue avanzando en la investigación para alcanzar los objetivos planteados.

Tabla 3-2: Desarrollo de preguntas para la obtención de información y cumplimiento de objetivos de la investigación.

Preguntas	Detalle
1. ¿Para qué?	Lograr los objetivos de la investigación
2. ¿Sobre qué aspectos?	Gases de combustión
3. ¿Cuándo?	Año 2022
4. ¿Dónde?	Motor de encendido por chispa de Ansys Forte
5. ¿Cuántas veces?	9 simulaciones
6. ¿Técnicas?	Experimental
7. ¿Con qué?	Tablas de datos de simulaciones

3.7. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Inicio.- Se toma como modelo base, la simulación realizada bajo las condiciones de estándar de un motor de encendido por chispa alimentado por gasolina extra. Los datos obtenidos de presión, temperatura, y gases de combustión sirven como base para establecer comparaciones cuando se realicen los cambios en las variables de entrada.

Selección.- Basado en datos de investigaciones de otros autores, se selecciona como variables de entrada a la velocidad de rotación del motor y la temperatura de inyección de combustible, y como variables de salida los gases de combustión, entre ellos CO, CO₂, NO, NO₂ y NO_x

Simulación.- Con el uso del software para motores de combustión interna Ansys se realiza simulaciones con diferentes configuraciones de las variables de entrada antes mencionadas.

Observación.- Utilización de búsqueda bibliográfica que sirva de apoyo para la fundamentación de la simulación de un motor de combustión interna.

La metodología aplicada en la investigación, busca evidenciar el beneficio que se puede obtener al utilizar la simulación de de motores de combustión interna a gasolina mediante simulación CFD para observar la producción de gases de combustión en relación del incremento de temperatura de inyección de combustible y la modificación de las revoluciones por minuto del motor.

La Figura 3-1 muestra todo el proceso realizado desde el inicio de la investigación hasta su fin. Iniciando por la selección de las variables de entrada, luego de analizar la bibliografía sobre el tema y escoger como variables de entrada a la velocidad de rotación del motor junto a la temperatura de inyección de combustible. Para continuar, se procedió a seleccionar las variables de salida, las cuales, tienen estrecha relación con la dinámica de fluidos de los gases producidos por la combustión CO, CO₂, NO_x. En el tercer paso, se realiza el diseño factorial, donde a cada variable de entrada se le asigna tres estados, para la VRM se le asignaron 2000, 2800 y 3600 RPM, para la temperatura de inyección de combustible de igual manera se le asignaron tres estados 350, 400 y 450 K. El resultado de los niveles asignados a las variables de entrada, desemboca en un diseño factorial de $3^2 = 9$, es decir, 9 posibles tratamientos que se

deben simular en el software CFD. El cuarto paso es el seteo de las características de

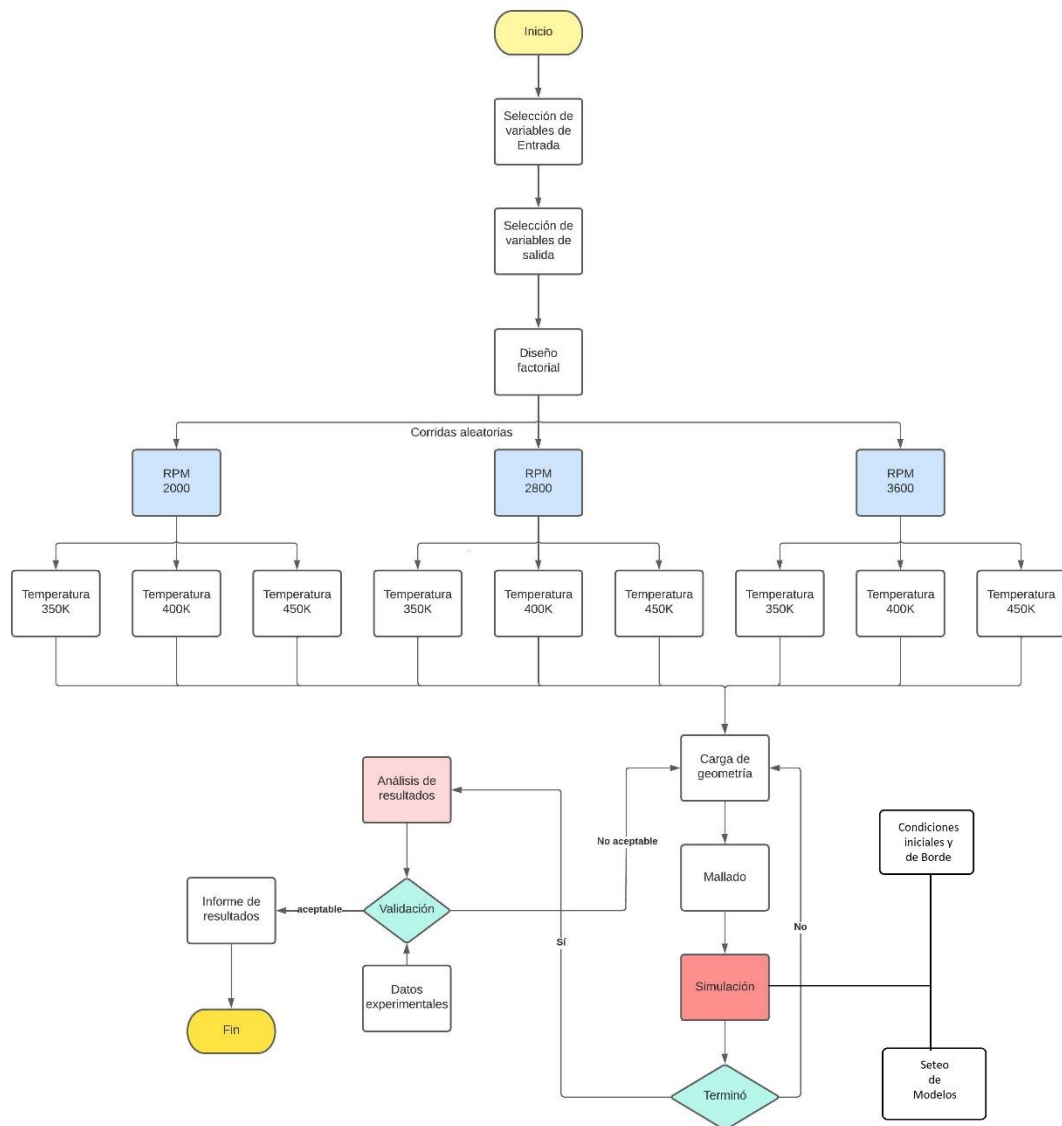


Figura 3-1: La estructura metodológica describe cada uno de los pasos necesarios para desarrollar la investigación. Inicia con selección de variables de entrada y salida, luego procede a realizar el DOE para crear los tratamientos. El tercer paso es la simulación de los 9 tratamientos con sus respectivos seteos y finalizar con el análisis, proceso e interpretación de resultados.

los 9 tratamientos, iniciando por el caso estándar que tiene Ansys en donde, se considera el motor trabajando a 2000 RPM y a una temperatura de inyección de 400K grados Kelvin. Una vez, se tengan emparejados los tratamientos, se procede a cargar la geometría en el software, realizar el mallado automático de la misma, tomando en cuenta que se hace un refinamiento en las zonas más importantes para su debido análisis posterior. Luego del mallado, se hace el seteo de las condiciones iniciales y de borde para posteriormente pasar a la simulación. Una vez que se hayan terminado las

9 simulaciones se procede a realizar el análisis de los resultados y se establece una comparación con el tratamiento utilizado como base para validar los mismos. Por último, se procede a realizar el post procesamiento en el software POST-CFD, en el cual, se crean los gráficos de campos de presión, temperatura, concentraciones de gases de combustión y se realiza una animación del recorrido que hacen los gases desde la ignición hasta la salida por la válvula de escape (EVO).

3.8. CONSTRUCCIÓN DE GEOMETRÍA Y MALLADO DE LA CÁMARA DE COMBUSTIÓN

La geometría de la cámara de combustión utilizada viene pre cargada en el software de dinámica de Fluidos Ansys Forte. La Tabla 3-3 presenta los detalles de los componentes de la geometría de la cámara de combustión en donde se tiene un total de 245 caras, 619 aristas y 389 vértices.

Tabla 3-3: Detalle de la cantidad de dominios utilizados para la construcción de la cámara de combustión de un motor a gasolina.

Detalle	Número
Cuerpos	2
Caras	245
Aristas	619
Vértices	389
PF puntos	8

En la Figura 3-2 se puede observar el resultado de la importación de la geometría desarrolla en el paquete DesignModeler de Ansys. Para complementar la geometría, se consideró los datos geométricos de de la cámara de combustión del motor utilizado para la simulación. La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** detalla los valores de la carrera, biela, relación de compresión, número de agujeros en el inyector y diámetro de la boquilla del motor estándar que usa el software.

Tabla 3-4: Datos geométricos de la cámara de combustión del motor utilizado en la simulación. Se detalla los valores de la carrera, biela, relación de compresión, número de agujeros del inyector y diámetro de su boquilla.

Nombre	Detalle
Carrera	90 mm
Biela	144.3 mm
Relación de compresión	10.5:1
Número de agujeros/diámetro de la boquilla	3/0.12 mm

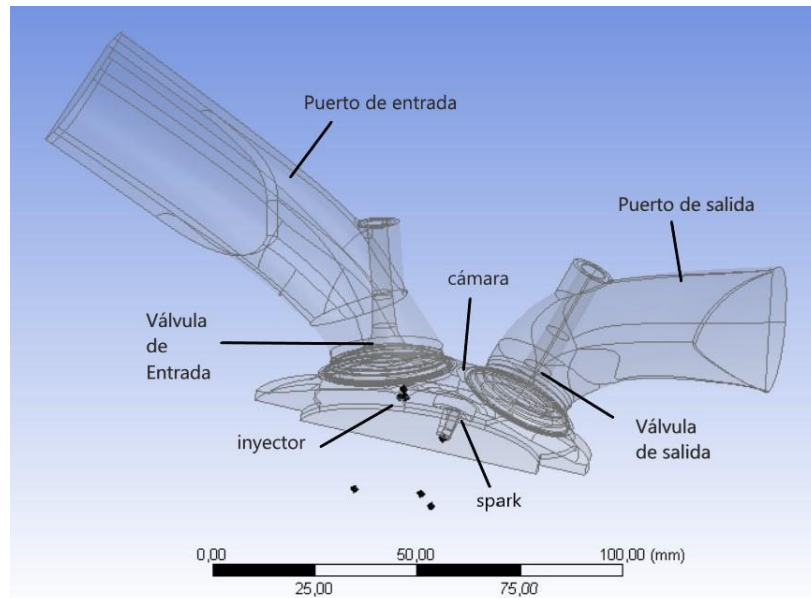


Figura 3-2: Geometría de la cámara de combustión en donde se detallan los puertos de entrada y salida, válvulas de entrada y salida, inyector y spark.

Una vez procesada la geometría, se fue creando los dominios con los cuales va a trabajar el solucionador, dejando delimitadas las zonas de entrada, salida, válvulas, pistón, puerto de inyección y encendido de chispa como se muestra en la Figura 3-3:

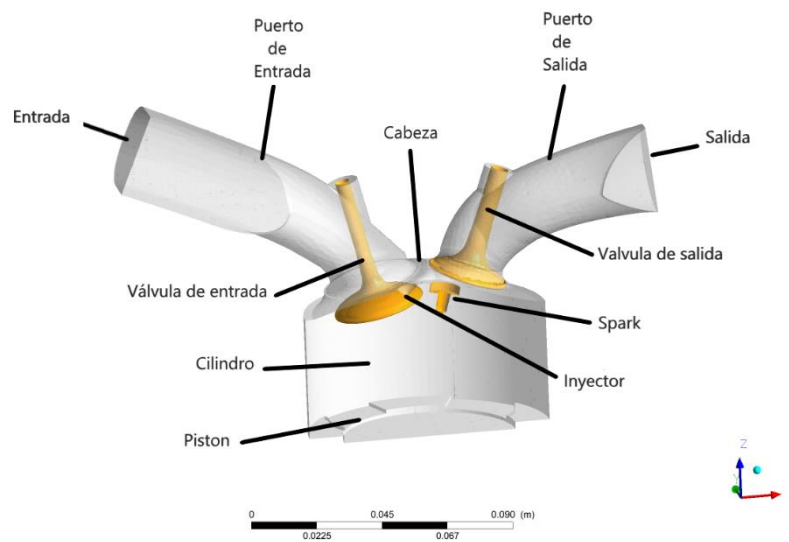


Figura 3-3: Construcción de los dominios que conforman la cámara de combustión. Se denotan en amarillo los objetos que poseen movimiento (Válvulas de entrada y salida, inyector y spark).

La construcción del mallado se la realizó en el paquete ICE - Meshing[ANSYS AUTODYN PrepPost] considerando un tamaño de elementos de 2 mm con una calidad

media, un sesgo de 0.9 y un área total de 110.83 mm². Las estadísticas de la malla al finalizar el proceso se pueden observar en la Tabla 3-5:

Tabla 3-5: Estadística del número de componentes de la malla luego del procesamiento de mallado con tamaño de 2 mm y calidad media en un área de 110.83 mm².

Detalle	Número
Nodos	82366
Elementos	414369

Adicionalmente, se creó un sub volumen, donde se incluyen la cámara, el inyector, y el spark para realizar un mayor refinamiento con el objetivo de poder captar las reacciones químicas que dan origen a los gases producto de la combustión. La Figura 3-4 representa un mallado más fino en función de la escala de las relaciones químicas para que puedan ser captadas por el solucionador.

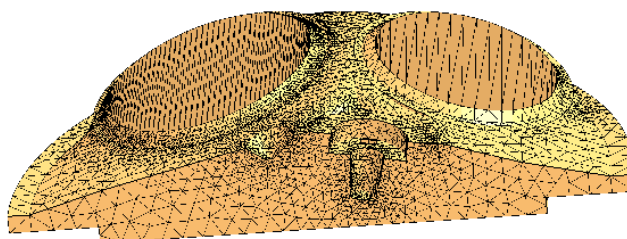


Figura 3-4: Sub-volumen de cámara de combustión con especial refinación para captar reacciones químicas que producen gases de combustión.

Para la malla general, se realizó un refinamiento por cada una de las zonas de interés para un mejor registro del los procesos de las reacciones químicas que se dan en la cámara de combustión y en el pistón. La Tabla 3-6 detalla los refinamientos que se hicieron a cada dominio, tomando en cuenta la locación de los mismos, el tipo de refinamiento, ya sea superficie, punto o volumen, la fracción del tamaño para la celda, las capas y el ángulo de desplazamiento del pistón al que es activada según el caso.

Tabla 3-6: Configuración de refinamientos según zonas de interés, fracciones en tamaño y rangos de activación.

Nombre	Locación	Tipo de refinamiento	Fracción en tamaño	Capas	Activo
Wall	Cylinder Symmetry, Exhaust symmetry, Intake symmetry, Exhaust port, Intake port, Head, Piston, Liner, Spark plug	Superficie	1/2	1	Siempre
Wall2	Inlet, Outlet	Superficie	1/2	2	Siempre
Spark	0.551, 0.0945, -0.1678 cm	Punto (radio=0.6 cm)	1/4	N/A	Siempre
Valves	Exhaust valve, Intake valve	Superficie	1/4	2	Siempre
tdc1	Head, Piston, Liner	Superficie	1/4	2	340 -380 CA
tdc2	Head, Piston, Liner	Superficie	1/4	2	700 -740 CA
Chamber	Chamber	Volumen secundario	1/2	N/A	Siempre

En la Figura 3-5 se puede observar el resultado de la aplicación de los diferentes tipos de refinamientos que se realizaron sobre la geometría y teniendo en cuenta que hay mayor refinamiento en la zona de la cámara de combustión para mejor captación de reacciones químicas.

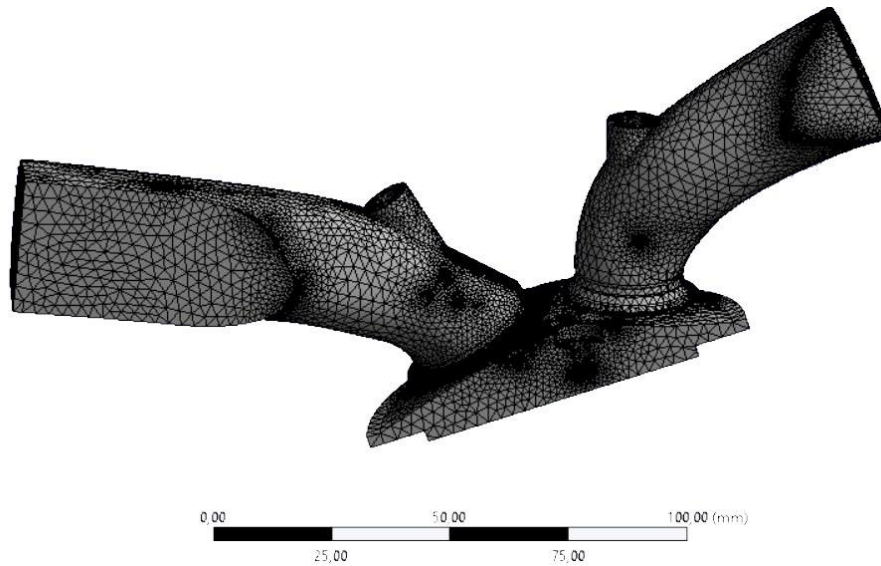


Figura 3-5: Superficie de cámara de combustión. Las zonas oscuras representan un mayor refinamiento para mejor captación de reacciones químicas.

Además, en la Figura 3-6 se señalan el inyector y el spark, elementos importantes durante la combustión, ya que la configuración y el mallado de ellos depende que el proceso químico que se da lugar en la cámara pueda ser captado por el programa.

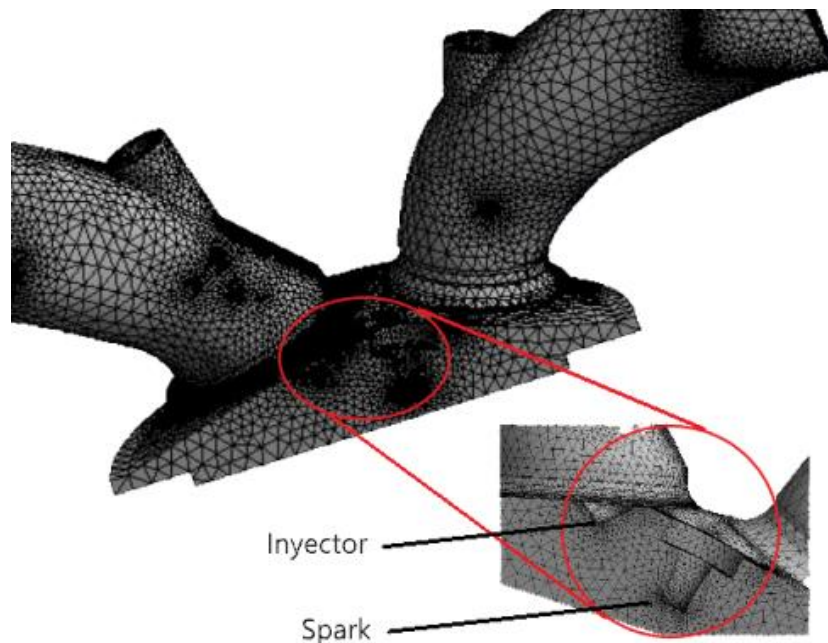


Figura 3-6: Mallado de inyector y spark, elementos importantes responsables directos de la combustión.

3.9. FACTORES DE EXPERIMENTACIÓN

En el diseño experimental se define a los factores como todo lo que puede ser observado, medido o analizado. Un factor cuenta con varios niveles que permiten desarrollar el experimento. La Figura 3-7 representa la interacción entre los factores de entrada al sistema y su efecto en las variables de salida.

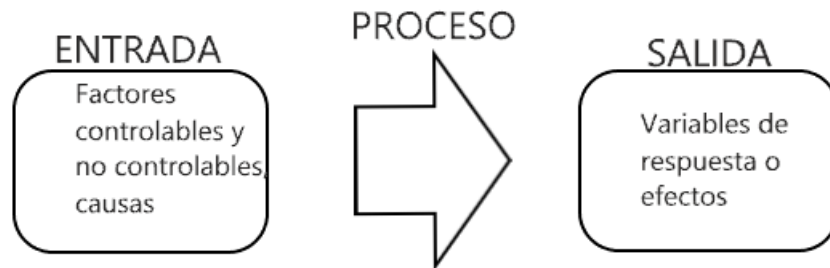


Figura 3-7: Proceso del diseño experimental con factores controlables y no controlables en la entrada (causas), y para la salida variables de respuesta (efectos).

Temperatura de inyección

Los datos de utilizados de temperatura de inyección de combustible para la simulación presenta tres niveles (350, 400 y 450) K con los cuales se pretende obtener datos que indiquen la influencia o no en los gases producidos por la combustión.

Velocidad de rotación del motor

El factor de trabajo del motor está caracterizado por las RPM a las que trabaja el mismo, para el estudio se ha seleccionado también 3 niveles en los que consta 2000 RPM, 2800 RPM y 3600 RPM utilizados para la simulación. El ajuste de las revoluciones a las que trabaja el motor se realizó en la configuración del ambiente de controles de simulación, en donde además de que se seleccionó trabajar entre los ángulos de 415 - 880 rango en donde se produce la combustión.

3.10. VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA

Las variables de entrada que influyen en las variables de salida, son factores independientes entre ellos y no deben presentar cambios en otros factores de entrada. Las variables de entrada seleccionadas para el estudio son: la temperatura de inyección de combustible (T) y la velocidad de rotación del motor (VRM).

Las variables de salida juegan un papel importante en el análisis experimental, ya que sus efectos son consecuencia de la variación de las de entrada. Brindan una idea de funcionamiento del sistema. En el caso del motor de ciclo de Otto se pueden obtener varias variables de salida. Sin embargo, en esta investigación solo se analizarán las relacionadas con la combustión.

3.11. ALEATORIZACIÓN DE MUESTRAS

Para la toma de muestras se utiliza la aleatorización con el objetivo de eliminar efectos no deseados. El orden aleatorio garantiza la independencia de errores por prueba y minimiza los errores provocados por el investigador, para esto se ha utilizado el software Minitab. La Tabla 3-7 indica el proceso de aleatorización de muestras desarrollado en Minitab para la creación de los tratamientos que se van a simular en el software CFD.

Tabla 3-7: Aleatorización de muestras desarrollada en software Minitab para la configuración de los 9 tratamientos para llevar a simulación.

OrdenEst	OrdenCorrida	TipoPt	Bloques	T	VRM
1	9	1	1	350	2000
2	2	1	1	350	2800
3	5	1	1	350	3600
4	4	1	1	400	2000
5	6	1	1	400	2800
6	8	1	1	400	3600
7	7	1	1	450	2000
8	3	1	1	450	2800
9	1	1	1	450	3600

Los resultados de los muestreos se detallan en el capítulo IV.

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CONDICIONES INICIALES

El seteo de cada simulación conllevó a utilizar 3 regiones, las cuales necesitaron de condiciones iniciales que se detallan a continuación:

Región 1: Entrada

- Presión = 1.054 bar
- Temperatura = 1070 °K
- Energía cinética turbulenta = $1.0E04 \text{ cm}^2/\text{s}^2$
- Escala longitudinal de turbulencia = 1 cm

Región 2: Cámara

- Presión = 0.8 bar
- Temperatura = 313 °K
- Energía cinética turbulenta = $1.0E04 \text{ cm}^2/\text{s}^2$
- Escala longitudinal de turbulencia = 1 cm

Región 3: Salida

- Presión = 1.0 bar
- Temperatura = 1070 °K
- Energía cinética turbulenta = $1.0E04 \text{ cm}^2/\text{s}^2$
- Escala longitudinal de turbulencia = 1 cm

4.2. RESULTADOS GENERALES

Las simulaciones realizadas de los 9 tratamientos se llevaron a cabo en un total de 10 días, ya que cada simulación dura alrededor de 15 a 17 horas.

Cabe recalcar que el solucionador resolvió cada tratamiento, iniciando en el rango de 415 a 880° del desplazamiento del pistón (CA). Se tomó estos valores debido a que a los 419 CA de desplazamiento del pistón se inicia la inyección de combustible. La inyección dura aproximadamente 14 CA de desplazamiento. La Figura 4-1 representa el ingreso del combustible a los 436 CA por medio de 3 chorros expulsados por las

tres boquillas del inyector, los colores representan las 49 especies de partículas que conforman la gasolina extra.

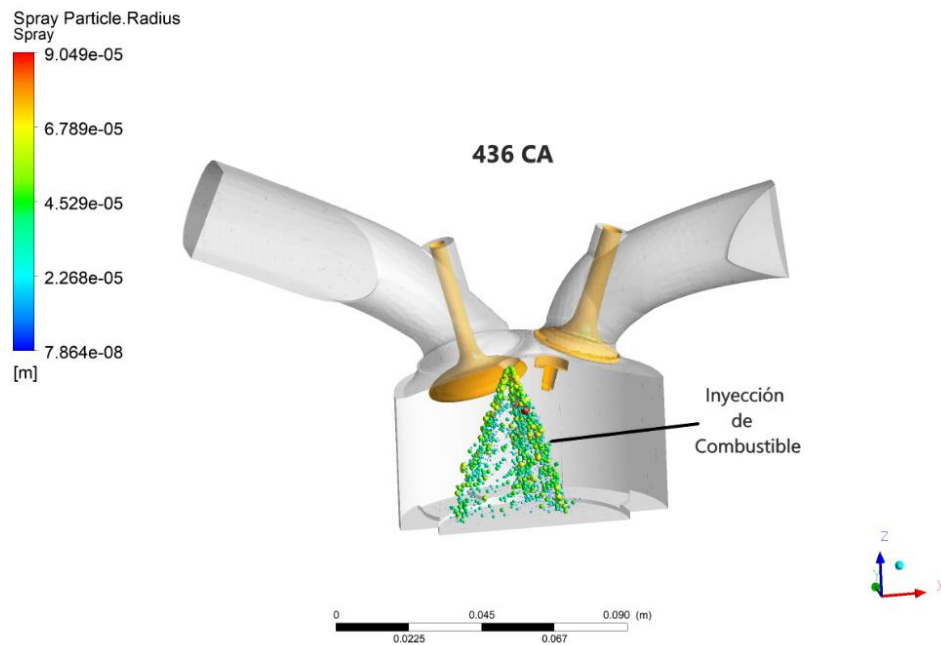


Figura 4-1: Inyección de combustible por medio de 3 boquillas del inyector en forma de spray a los 436 CA.

La combustión se produce a los 720 CA por el encendido de chispa. El encendido de la chispa se produce alrededor de unos 10 CA, hasta aproximadamente los 730 CA. La Figura 4-2 indica la propagación de la flama una vez que que la ignición se inició desde los 720 CA.

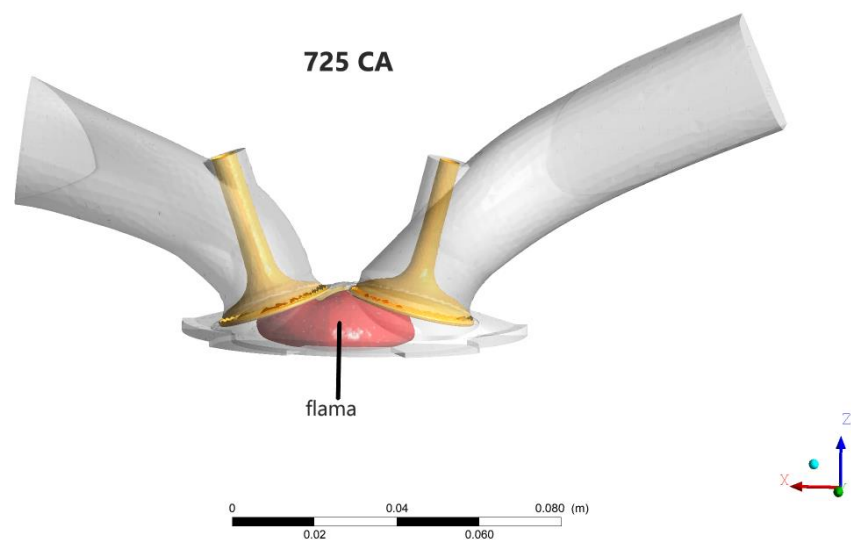


Figura 4-2: Propagación de la flama (color rojo) debido a la ignición del combustible a los 725 CA.

4.3. RESULTADOS DE VARIABLES DE ENTRADA Y SALIDA

En la Tabla 4-1 se puede visualizar los resultados de cada tratamiento conformado por una variable de temperatura y una de velocidad del motor y su incidencia en los valores obtenidos para cada gas producido en la combustión en el punto de apertura de la válvula de salida (EVO) a los 880 CA.

Tabla 4-1: Resultados de la simulación para los gases de combustión en ppm y la eficiencia de trabajo del motor en % en el punto EVO.

No	T(°K)	VRM (rpm)	CO (ppm)	CO ₂ (ppm)	NO (ppm)	NO ₂ (ppm)	NO _x (ppm)	HNC (ppm)
1	350	2000	68673.1	80.0596	1128.7253	0.0071	72.5345	85.4309
2	400	2000	74962.9	76.3467	736.0091	0.0397	47.6897	146.6880
3	450	2000	81712.4	72.3483	502.3713	0.0607	33.1004	186.7440
4	350	2800	65296.4	82.2918	1487.7978	0.2768	95.6207	151.4770
5	400	2800	71478.6	78.2718	899.1100	0.1200	58.2756	235.1540
6	450	2800	80340.5	72.9895	535.4277	0.1575	35.1439	475.1060
7	350	3600	71692.8	77.7413	303.1214	0.0733	19.7503	1249.1100
8	400	3600	79650.6	72.9946	167.992	0.0706	11.0610	1271.8200
9	450	3600	84889.3	69.6344	67.6222	0.0626	4.5611	1856.800

La Figura 4-3 representa la distribución de presiones de los 9 tratamientos. En la gráfica se puede observar que los tratamientos que poseen revoluciones de 2000 RPM son los que alcanzan los valores más altos de presión. Además, se puede notar que conforme se aumenta el valor de la temperatura de inyección de combustible los valores de presión en los diferentes tratamientos van decayendo, esto se debe a que a mayor velocidad del motor se necesita más combustible. Por último, se puede observar que el valor máximo de presión obtenido corresponde al tratamiento de 2000 RPM con 350 K de temperatura con un valor de 3.17 MPa. con un ángulo de 740 CA. Como referencia, los CA que identifican a los puntos de inyección de combustible (420), ignición (720) y apertura de válvula de salida (880) están representados por las líneas verticales de color rojo, azul y verde respectivamente.

En la Figura 4-4 se observa los resultados de la simulación de la distribución de la presión, donde se considera el desplazamiento del pistón desde la ignición a los 720 CA hasta la apertura de la válvula de expulsión 880 CA. Cada uno de los paneles representa la presión en pasos de 20 CA y el color rojo las zonas de mayor valor de presión. Como referencia, el color rojo representa los valores altos de presión y el color azul valores bajos o cero de presión.

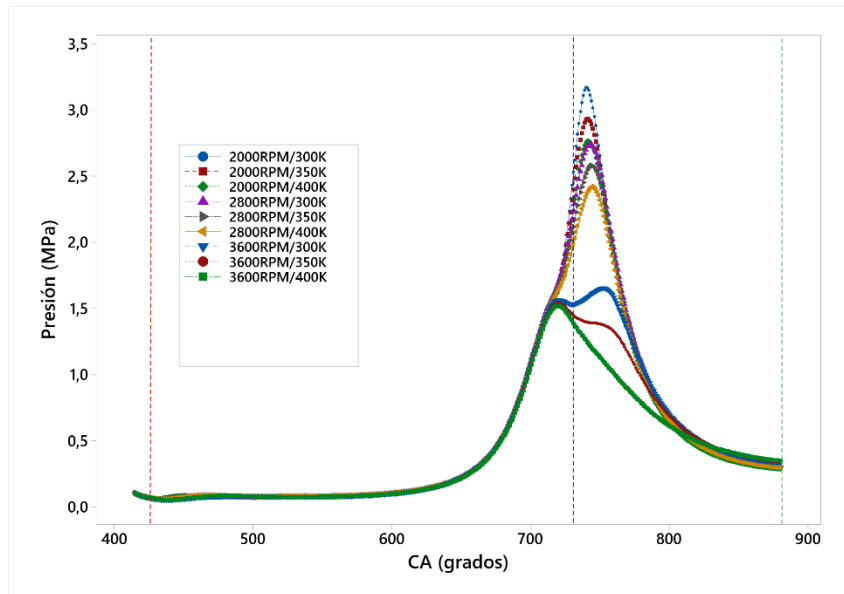


Figura 4-3: Distribución de presiones para las combinaciones de tratamientos de VRM y T desde la inyección de combustible a los 420 CA, ignición a los 720 CA y salida de los gases a los 880 CA. Como referencia, CA de inyección (- - - roja), CA de ignición (- - - azul) y CA de EVO (- - - verde).

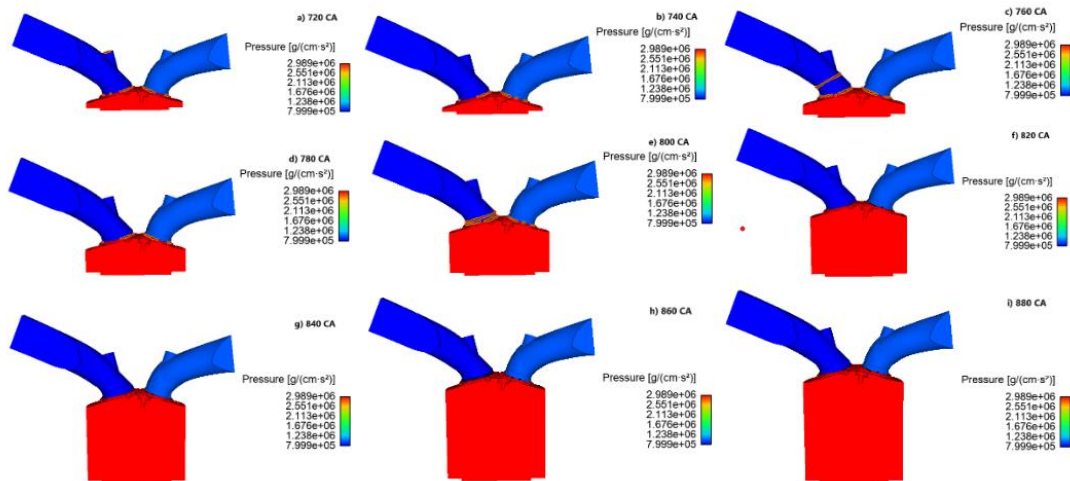


Figura 4-4: Simulación de propagación de presión por la cámara y el pistón. Los paneles de interés son: a) Presión en la ignición, d) Máximo valor de presión y i) Presión a la apertura de la válvula de salida. Como referencia, alta presión (rojo) y baja presión (a Como referencia, alta presión (rojo) y baja presión (azul).

En la Figura 4-5 muestra el resultado de los datos de simulación para la Temperatura para los 9 tratamientos. Se puede observar que existen tres grupos delimitados por las RPM del motor, donde los valores más altos de Temperatura se los obtiene con las 2000 RPM, así mismo, los valores más bajos de Temperatura se los obtiene con las 3600 RPM. La temperatura de inyección juega un papel secundario, ya que al observar la gráfica se ve que no existen cambios significantes de su valor entre los 3 grupos de VRM. El valor más alto de temperatura se relaciona con el tratamiento de 2000 RPM

y 350 K con un valor de 2222,47 K a los 740 CA de desplazamiento del pistón. Como referencia, los CA que identifican a los puntos de inyección de combustible (420), ignición (720) y apertura de válvula de salida (880) están representados por las líneas verticales de color rojo, azul y verde respectivamente.

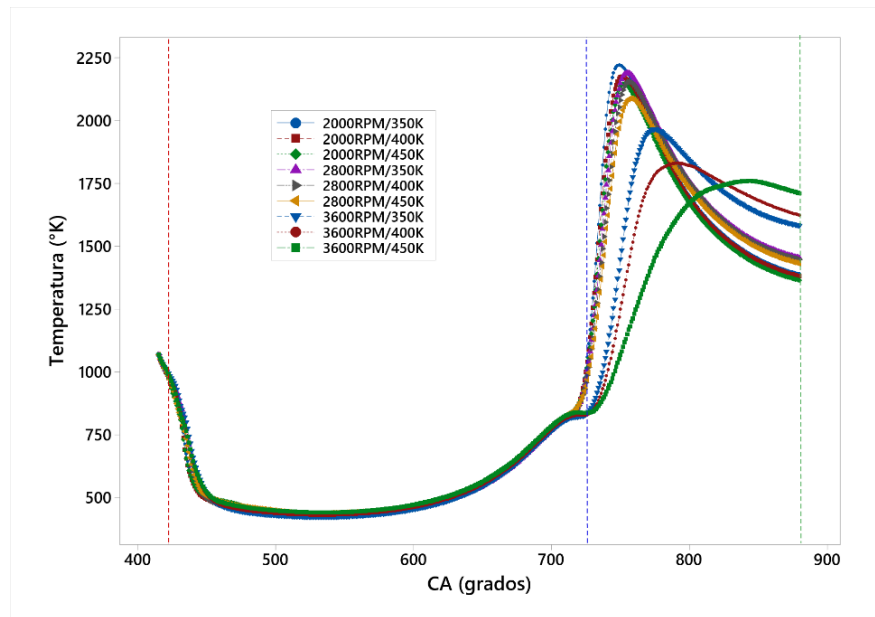


Figura 4-5: Distribución de temperatura para las combinaciones de los 9 tratamientos de VRM y T. Como referencia, CA de inyección (- - - roja), CA de ignición (- - - azul) y CA de EVO (- - - verde).

En la Figura 4-6 se observa los resultados de la simulación de la distribución de la temperatura, donde se considera el desplazamiento del pistón desde la ignición a los 720 CA. hasta los 880 CA donde se abre la EVO.

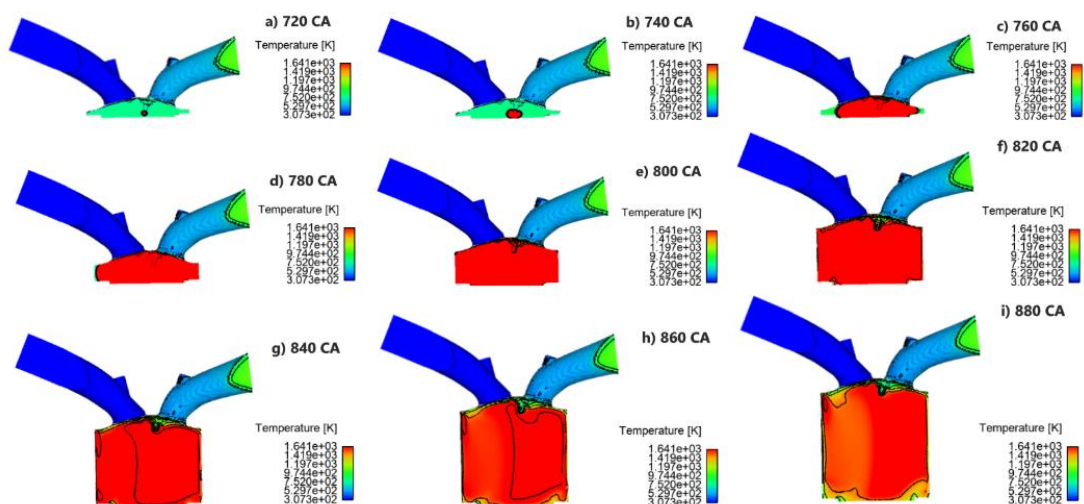


Figura 4-6: Simulación de propagación de la Temperatura por la cámara y el pistón. Como referencia, a) Ignición (720 CA), d) Máximo valor de temperatura (780 CA) y i) Temperatura a la apertura de la válvula de salida (880 CA).

En la Figura 4-7 muestra que la mayor concentración de CO tiene lugar con la combinación de bajas RPM (2000) y T de inyección (450K). El comportamiento de las RPM medias (2800) es similar, ya que a mayor temperatura mayor concentración de CO. Por último, se puede observar que a altas revoluciones (3600 RPM) las gráficas están desplazadas a la derecha debido a que por la rapidez de las revoluciones las reacciones químicas se dan más lento y se producen unos cuantos grados más adelante del desplazamiento del pistón. El valor más alto de concentración de CO se da con el tratamiento de 3600 RPM y 450 K a partir de los 840 CA. Como referencia, los CA que identifican a los puntos de inyección de combustible (420), ignición (720) y apertura de válvula de salida (880) están representados por las líneas verticales de color rojo, azul y verde respectivamente.

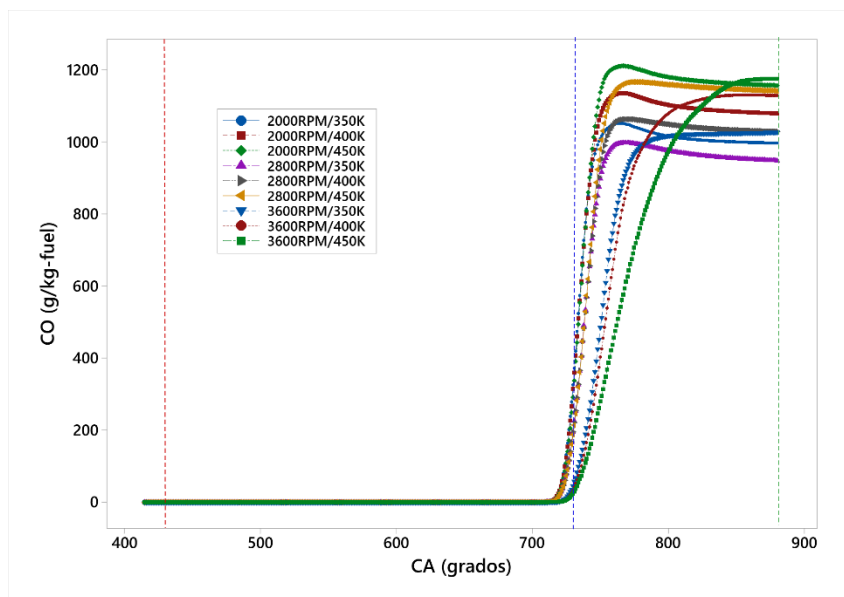


Figura 4-7: Distribución de monóxido de carbono CO. Mayor concentración de CO con valores de RPM bajos y T altos. Como referencia, CA de inyección (- - - - roja), CA de ignición (- - - - azul) y CA de EVO (- - - - verde).

En la Figura 4-8 se puede observar los resultados de la simulación de la distribución del monóxido de carbono, donde se considera el desplazamiento del pistón desde la ignición a los 720 CA hasta los 880 CA tope de llegada. Como referencia, el panel b) muestra las primeras concentraciones de CO, el panel c) y d) representan la mayor concentración de CO debido a su intenso color naranja. A partir de este punto, la concentración de CO se distribuye a lo largo del cilindro, dejando zonas con menos coloración como se puede observar en el panel i).

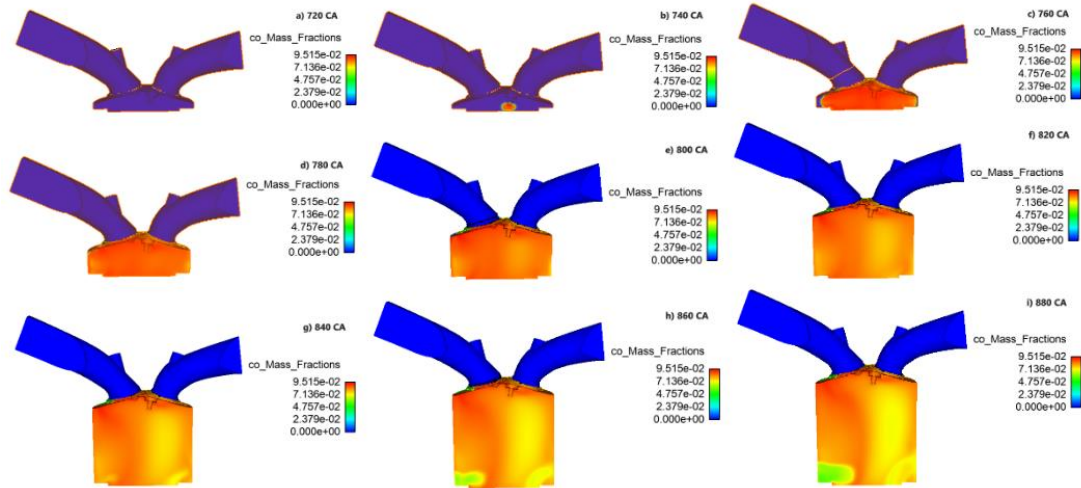


Figura 4-8: Simulación de la propagación de CO en el cilindro. Como referencia, b) Concentración inicial de CO, c) Máximo valor de concentración de CO y i) Concentración de CO a EVO.

4.3.1. Modelo paramétrico de CO

En la Tabla 4-2 se detalla que las variables VRM y T son influyentes en la concentración de CO, ya que sus valores p son inferiores a 0.05 con un nivel de confianza del 95 %.

Tabla 4-2: Análisis de varianza de CO. Los valores de VRM, T y sus interacciones tienen valor $p < 0.05$ con nivel de confianza de 95%.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	3314496	1104832	45.56	0
Lineal	2	2789826	1394913	57.52	0
VRM	1	2612105	2612105	107.71	0
T	1	177722	177722	7.33	0.042
Cuadrado	1	524670	524670	21.63	0.006
VRM*VRM	1	524670	524670	21.63	0.006
Error	5	121259	24252		
Total	8	3435755			

La ecuación del modelo paramétrico con un R^2 ajustado de 98.3% y un R^2 predicho de 96.57% está dada por

$$C_{CO} = 66823 - 37.62(VRM) + 137.60(T) + 0.007122(VRM)^2, \quad (35)$$

donde C_{CO} es la concentración en ppm.

En la Figura 4-9, el diagrama de Pareto muestra que la temperatura de inyección genera el mayor efecto en la concentración de CO. Como referencia, el factor A representa el efecto VRM, el factor B representa el efecto de temperatura de inyección y la línea

roja representa la referencia para representar la significancia estadística denotada por $\alpha = 0.05$.

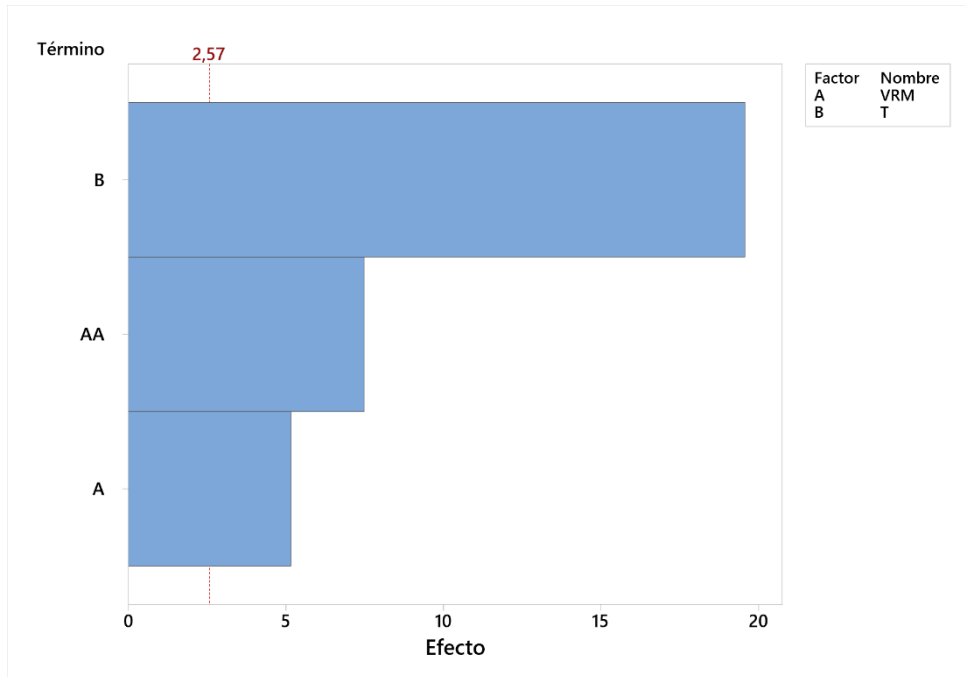


Figura 4-9: Diagrama de Pareto de efectos sobre concentración de CO. Como referencia, efecto A equivale a VRM, efecto B equivale a temperatura de inyección y significancia estadística para $\alpha=0.05$ (- - - roja).

La superficie de respuesta dada por la Figura 4-10 indica la combinación de las variables de VRM, T y su efecto en la concentración de CO. La figura indica que si T Aumenta la concentración de CO también.

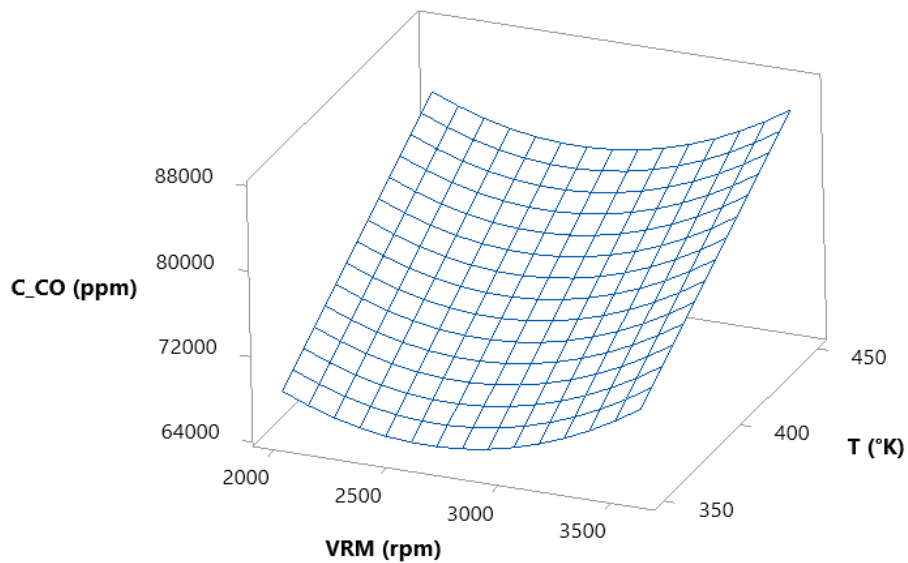


Figura 4-10: Superficie de respuesta de concentración de CO. Con una Temperatura de 450K y 3600 RPM se obtiene el valor más alto de concentración.

En la Figura 4-11 se puede observar que no existe mucha diferencia en la concentración de CO₂ en los 9 tratamientos, debido a que todos se encuentran muy cercanos en el orden de 0.06 a 0.08 ppm. Lo interesante de la gráfica es que a 3600 RPM la concentración de CO₂ se incrementa unos 50 CA después que los demás tratamientos.

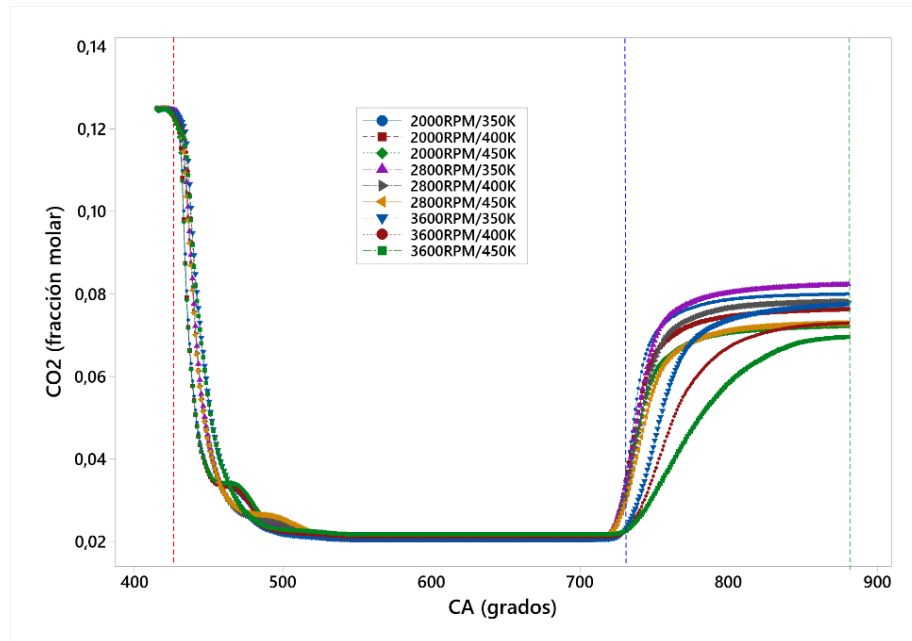


Figura 4-11: Distribución de concentración de dióxido de Carbono. Como referencia, CA de inyección (- - - roja), CA de ignición (- - - azul) y CA de EVO (- - - verde).

En la Figura 4-12 se puede observar los resultados de la simulación de la distribución del dióxido de carbono. De acuerdo, a la coloración de los paneles, se puede observar que existe relativamente bajas concentraciones de CO₂. Como referencia, el panel b) muestra las primeras concentraciones de CO₂, el panel c) y d) representan la mayor concentración de CO₂ debido a su intenso color verde y en algunas zonas mímicas de color tomate, la zona del puerto de salida indica una mayor concentración de CO₂ ya que se encuentra enlazada con el medio ambiente.

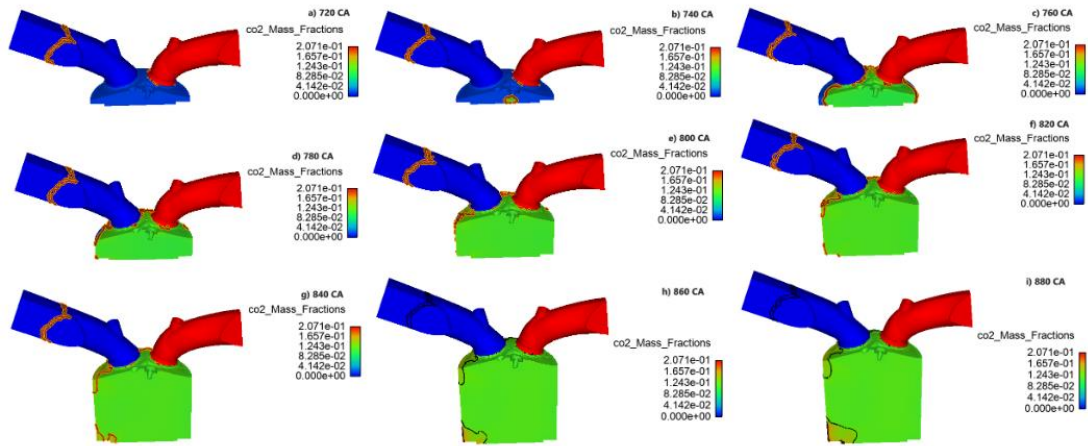


Figura 4-12: Simulación de la propagación de CO₂ en la cámara de combustión. Como referencia, b) Concentración inicial de CO₂, c) Máximo valor de concentración de CO₂ y i) Concentración de CO₂ a EVO.

4.3.2. Modelo paramétrico de CO₂

En la Tabla 4-3 se detalla que las variables VRM y T influyen en la concentración de CO₂, ya que sus valores p son inferiores a 0.05 con un nivel de confianza del 95 %.

Tabla 4-3: Análisis de varianza de CO₂. Los valores de VRM, T y sus interacciones tienen valor p < 0.05 con nivel de confianza de 95%.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	134.852	44.951	174.81	0
Lineal	2	116.89	58.445	227.29	0
VRM	1	11.716	11.716	45.56	0.001
T	1	105.174	105.74	409.02	0
Cuadrado	1	17.963	17.963	69.86	0
VRM*VRM	1	17.963	17.963	69.86	0
Error	5	1.286	0.257		
Total	8	136.138			

La ecuación del modelo paramétrico con un R² ajustado de 98.49% y un R² predicho de 96.74% está dada por

$$C_{CO_2} = 79.52 + 0.02448(VRM) - 0.08374(T) - 0.000005(VRM)^2, \quad (36)$$

donde C_{CO_2} es la concentración en ppm.

En la Figura 4-13 el diagrama de Pareto muestra que la temperatura de inyección genera el mayor efecto en la concentración de CO. Como referencia, el factor A representa el efecto VRM, el factor B representa el efecto de temperatura de inyección

y la línea roja representa la referencia para representar la significancia estadística denotada por $\alpha = 0.05$.

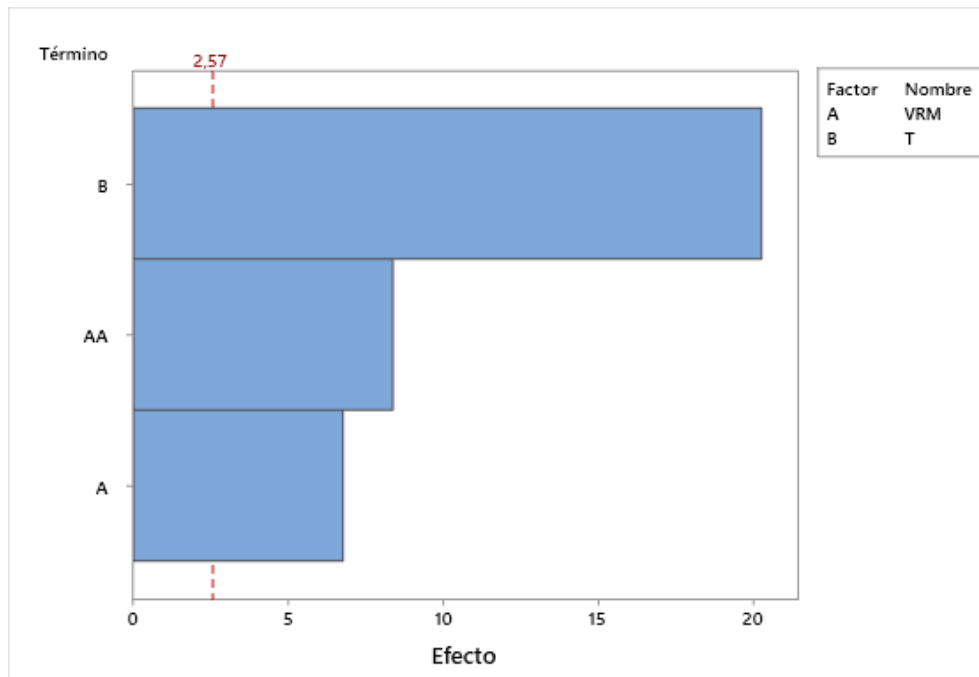


Figura 4-13: Diagrama de Pareto de efectos sobre concentración de CO_2 . Como referencia, efecto A equivale a VRM, efecto B equivale a temperatura de inyección y significancia estadística para $\alpha=0.05$ (- - - roja).

La superficie de respuesta dada por la Figura 4-14 indica la combinación de las variables de VRM, T y su efecto en la concentración de CO_2 . La figura indica que si T disminuye la concentración de CO_2 también.

En la Figura 4-15 se puede observar que la mayor concentración de NO se alcanza con el tratamiento de 2800 RPM y 350 K. Además, se nota que cuando se aumenta la temperatura de inyección de combustible, la concentración disminuye. esto se debe a que debido a la falta de combustible no se efectúan reacciones completas.

En la Figura 4-16 se observan los resultados de la simulación de la distribución de NO, donde se considera el desplazamiento del pistón desde la ignición a los 720 CA. hasta los 880 CA. Se puede observar que debido a la poca cantidad producida de NO, no logra colorear el cilindro como con las anteriores gases y solo se concentra en una zona reducida mientras se dirige a la EVO. Como referencia, el panel c) muestra las primeras concentraciones de NO, el panel d) representa la mayor concentración de NO debido a su intenso color rojo. A partir de este punto, la concentración de NO se

distribuye a lo largo del cilindro, dejando zonas con menos coloración como se puede observar en el panel i).

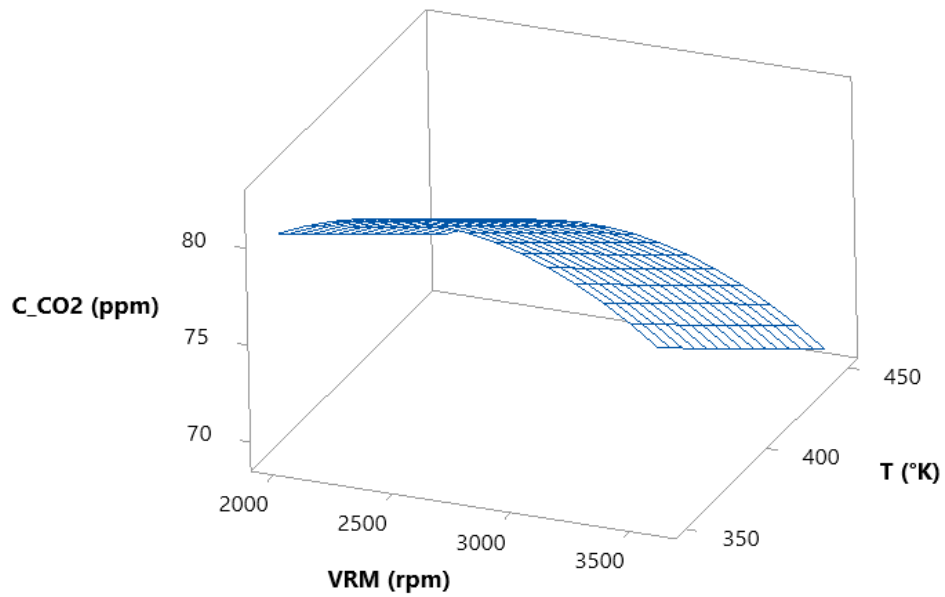


Figura 4-14: Superficie de respuesta de concentración de CO₂. Con una Temperatura de 350K y 2800 RPM se obtiene el valor más alto de concentración.

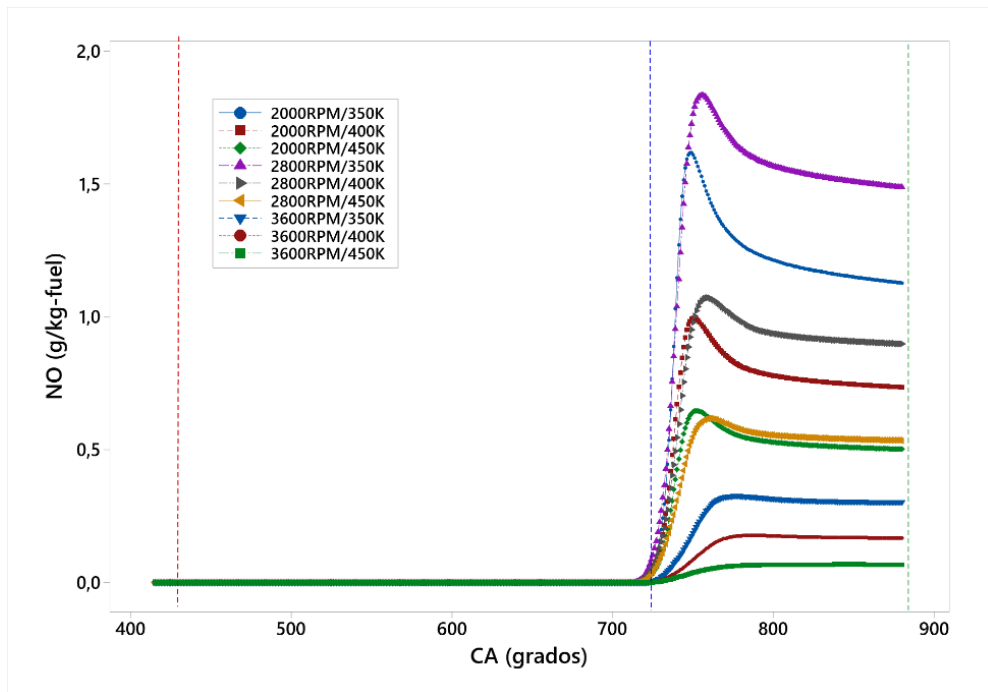


Figura 4-15: Distribución de monóxido de nitrógeno. Como referencia, CA de inyección (- - - roja), CA de ignición (- - - azul) y CA de EVO (- - - verde).

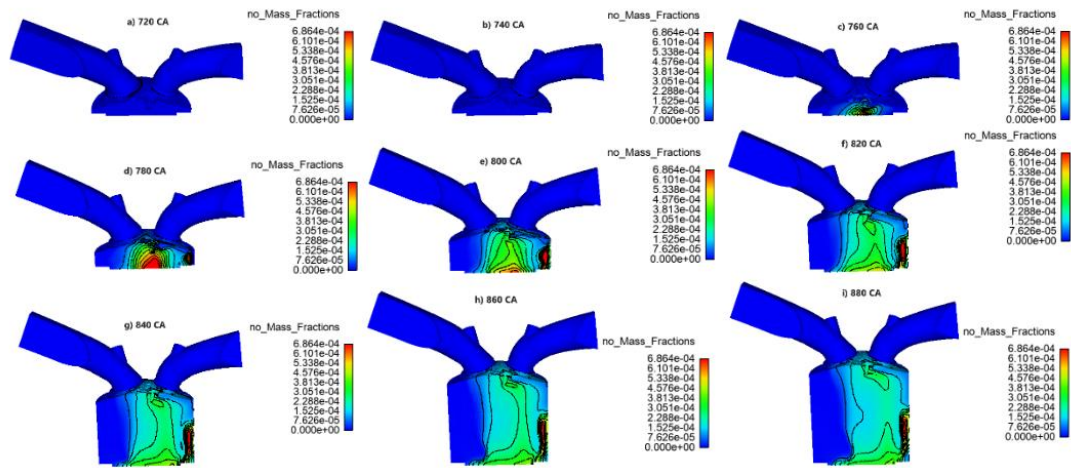


Figura 4-16: Simulación de propagación de NO. c) Punto de ignición, b) Máximo valor de concentración de NO y i) Proceso de salida por medio de la EVO.

4.3.3. Modelo paramétrico de NO

En la Tabla 4-4 se detalla las variables VRM y T que ejercen un efecto significativo en la concentración de NO, ya que sus valores p son inferiores a 0.05 con un nivel de confianza del 95 %.

La ecuación del modelo paramétrico con un R^2 ajustado de 86.88% y un R^2 predicho de 68.06% no llega al 90%, sin embargo, es un ajuste aceptable y está dada por

$$C_{NO} = -1540 + 3.90(VRM) - 6.05(T) - 0.000765(VRM)^2, \quad (37)$$

donde C_{NO} es la concentración en ppm.

Tabla 4-4: Análisis de varianza de NO. Los valores de VRM, T y sus interacciones tienen valor $p < 0.05$ con nivel de confianza de 95%.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	1585541	528514	18.65	0.004
Lineal	2	1105724	552862	19.51	0.004
VRM	1	557156	557156	19.66	0.007
T	1	548568	548568	19.36	0.007
Cuadrado	1	479818	479818	16.93	0.009
VRM*VRM	1	479818	479818	16.93	0.009
Error	5	141683	28337		
Total	8	1727225			

En la Figura 4-17 el diagrama de Pareto muestra que tanto la temperatura de inyección como la velocidad de rotación del motor ejercen casi el mismo efecto en la concentración de NO. Como referencia, el factor A representa el efecto VRM, el factor

B representa el efecto de temperatura de inyección y la línea roja representa la referencia para representar la significancia estadística denotada por $\alpha = 0.05$.

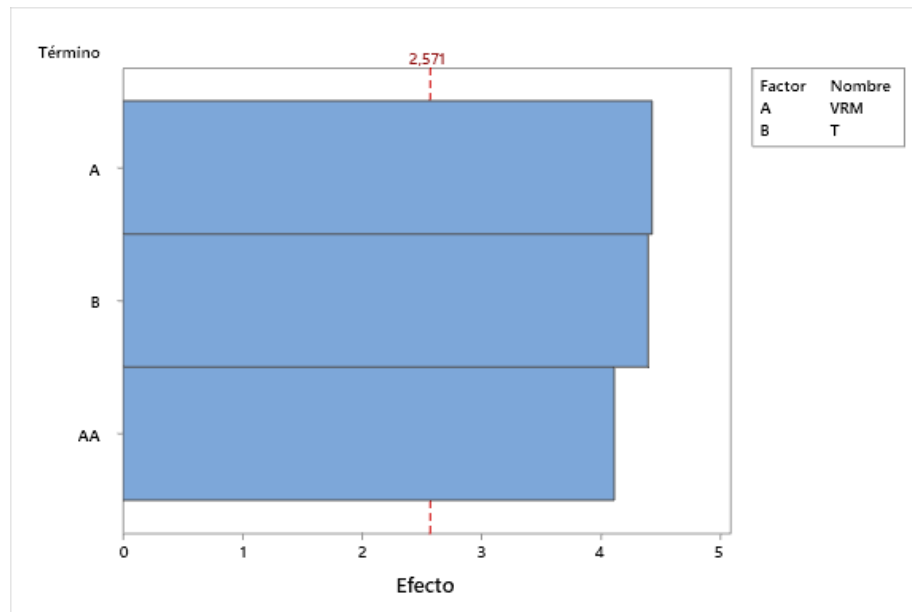


Figura 4-17: Diagrama de Pareto de efectos sobre concentración de NO. Como referencia, efecto A equivale a VRM, efecto B equivale a temperatura de inyección y significancia estadística para $\alpha=0.05$ (- - - roja).

La superficie de respuesta dada por la Figura 4-18 indica la combinación de las variables de VRM, T y su efecto en la concentración de NO. La superficie detalla que si se aumentan las RPM disminuye la concentración de NO, mientras que la temperatura tiene una ligera tendencia a permanecer constante.

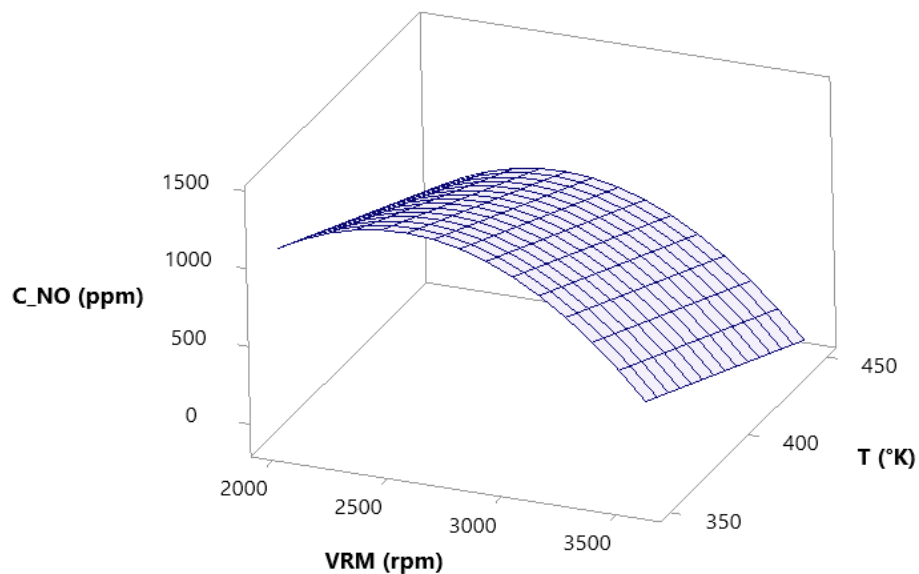


Figura 4-18: Superficie de respuesta de concentración de NO. A la temperatura de 400K y 2800 RPM se tiene los valores más altos de concentración de NO.

En la Figura 4-19 se puede denotar que se tiene un comportamiento similar al que se revisó en el punto anterior. El punto más alto de concentración se obtiene con el tratamiento de 2800 RPM y 350K, además se puede observar que a revoluciones medias (2800 RPM) existe las concentraciones más altas. Por último, se observa que casi en todos los tratamientos la concentración se reduce casi a cero pasado los 760 CA. Como referencia, los CA que identifican a los puntos de inyección de combustible (420), ignición (720) y apertura de válvula de salida (880) están representados por las líneas verticales de color rojo, azul y verde respectivamente.

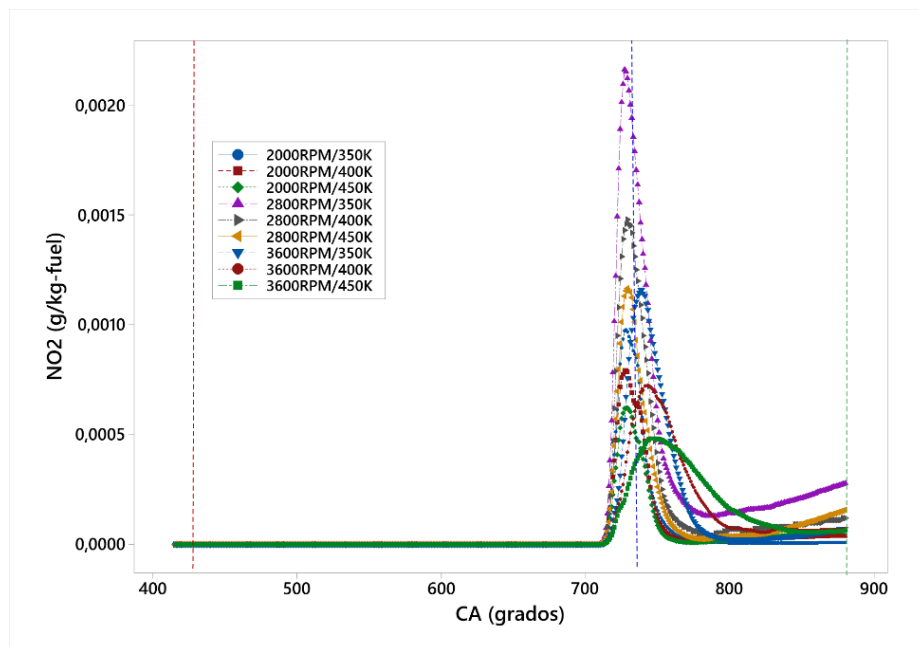


Figura 4-19: Distribución de Dióxido de nitrógeno. Como referencia, CA de inyección (- - - roja), CA de ignición (- - - azul) y CA de EVO (- - - verde).

En la Figura 4-20 se puede observar los resultados de la simulación de la distribución del dióxido de nitrógeno, como se visualiza no existe un cambio de color significativo, lo que nos da a entender que las cantidades de son tan pequeñas que el software fue incapaz de captar el fenómeno.

4.3.4. Modelo paramétrico de NO₂

En la Tabla 4-5 se detalla las variables VRM y T que debido a que los valores de sus efectos son mayores al valor p no son efectos significativos para el dióxido de carbono NO₂.

La ecuación del modelo paramétrico no pudo ser obtenida, ya que el modelo de NO₂ no pudo ser ajustado. De igual manera, sin la posibilidad de una ecuación tampoco fue factible desarrollar una superficie de respuesta.

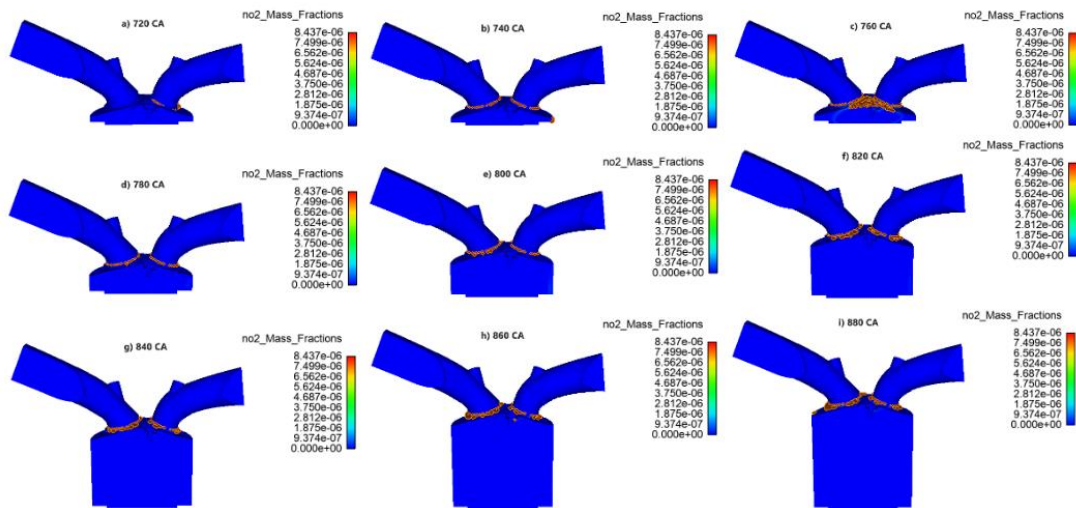


Figura 4-20: Simulación de propagación de dióxido de nitrógeno. a) Presión en la ignición, d) Máximo valor de presión y i) Presión a la apertura de la válvula de salida.

Tabla 4-5: Análisis de varianza de NO₂. Los valores de VRM, T y sus interacciones tienen valor $p > 0.05$.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	4	0.039436	0.009859	3.23	0.141
Lineal	2	0.002608	0.001304	0.43	0.679
VRM	1	0.001635	0.001635	0.54	0.505
T	1	0.000973	0.000973	0.32	0.602
Cuadrado	2	0.036829	0.018414	6.04	0.062
VRM*VRM	1	0.035078	0.035078	11.5	0.027
T*T	1	0.001751	0.001751	0.57	0.491
Error	4	0.012198	0.003049		
Total	8	0.051634			

En la Figura 4-21 se puede denotar que se tiene un comportamiento similar al de la concentración de NO, esto se debe a que tanto el NO y NO₂ son parte de los óxidos nitrosos. Especialmente en este análisis es la misma gráfica debido a que los NO₂ no aportaron de manera significativa.

Tanto el modelo paramétrico, la simulación, el diagrama de Pareto y la superficie son las mismas que las del monóxido de nitrógeno NO, por tal razón no se grafican y analizan nuevamente.

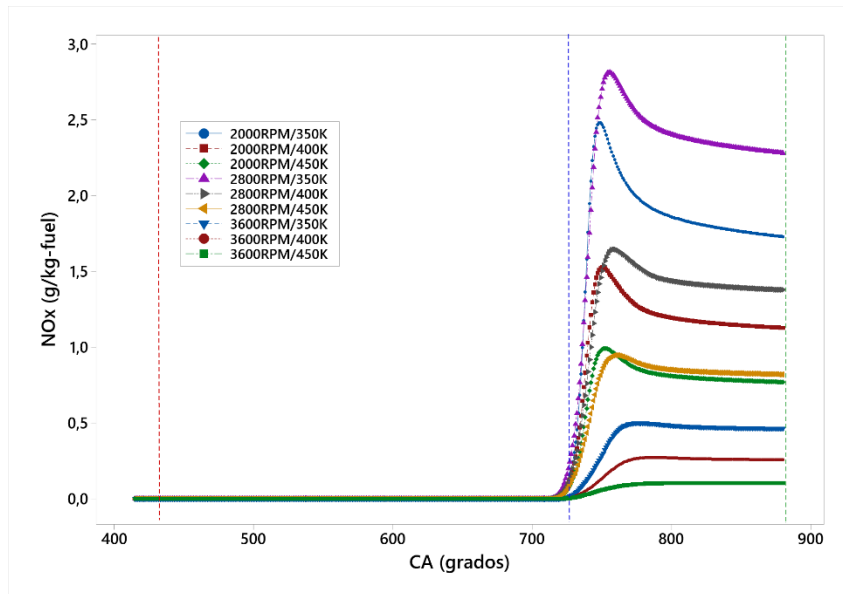


Figura 4-21: Distribución de óxidos nitrogenados Como referencia, CA de inyección (- - - roja), CA de ignición (- - - azul) y CA de EVO (- - - verde).

Recordando que, los HNC, hace referencia a todo el resto de hidrocarburos que no fueron combustionados, o tuvieron una combustión incompleta, se puede observar en la Figura 4-22 que desde el punto que el combustible es inyectado 420 CA, en todos los tratamientos mantiene su cantidad hasta el punto en donde se se realiza la ignición 720 CA. Lugar donde comienzan a reducirse debido a que se realiza la combustión, llegando a agotarse en todos los casos y solo en las revoluciones altas (3600 RPM) se observa que tardó un poco más en llegar a cero. Como referencia, los CA que identifican a los puntos de inyección de combustible (420), ignición (720) y apertura de válvula de salida (880) están representados por las líneas verticales de color rojo, azul y verde respectivamente.

En la Figura 4-23 se puede observar los resultados de la simulación de la distribución de los hidrocarburos no combustionados. Como referencia, el panel a) 420 CA se tiene la totalidad del hidrocarburo hasta llegar al punto de combustión 720 CA, lugar donde se comienzan a consumir por el proceso químico hasta casi agotarse hasta la totalidad panel i).

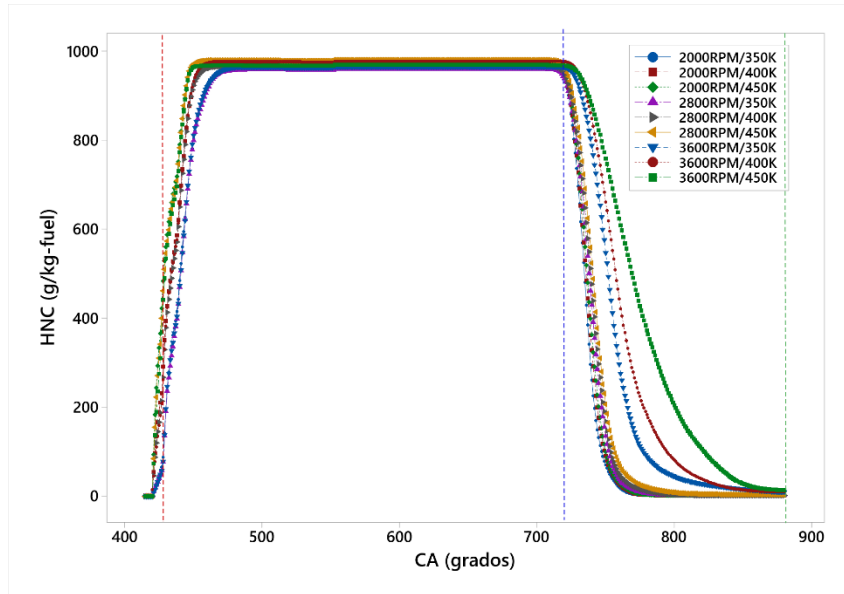


Figura 4-22: Distribución de Hidrocarburos no combustionados. Como referencia, CA de inyección (- - - roja), CA de ignición (- - - azul) y CA de EVO (- - - verde).

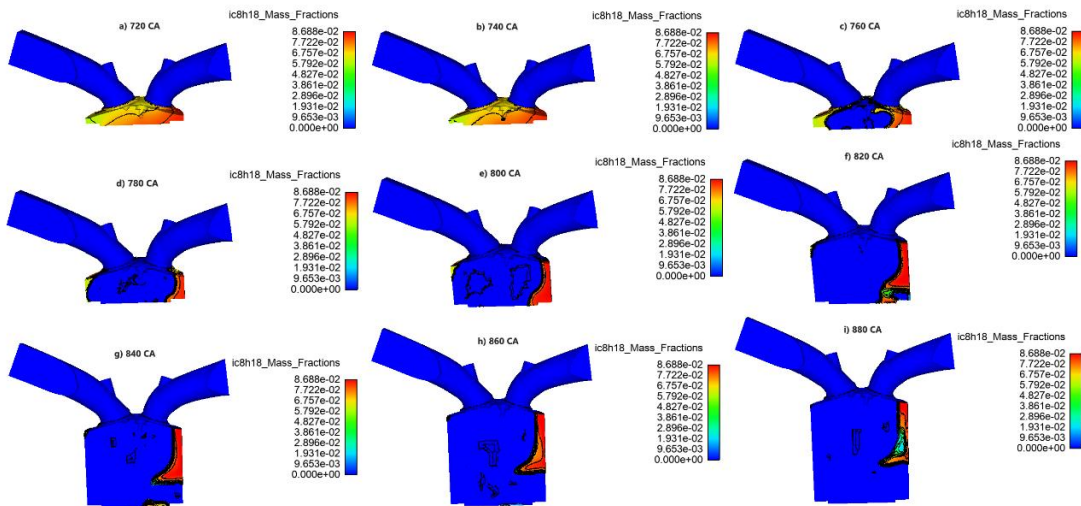


Figura 4-23: Simulación de Hidrocarburos no combustionados. a) Ignición, b) Máximo valor de HNC y i) Reducción a casi cero de HNC.

4.3.5. Modelo paramétrico de HNC

En la Tabla 4-6 se detalla las variables VRM y T que ejercen un efecto significativo en la concentración de HNC, ya que sus valores p son inferiores a 0.05 con un nivel de confianza del 95 %.

La ecuación del modelo paramétrico con un R^2 ajustado de 94.35% y un R^2 predicho de 87.81% no llega al 90%, sin embargo, es un ajuste aceptable y está dada por,

$$C_{HNC} = 2875 - 3.657(VRM) + 3.44(T) + 0.000800(VRM)^2, \quad (38)$$

donde C_{HNC} es la concentración en ppm.

En la Figura 4-24 el diagrama de Pareto muestra que tanto la velocidad de rotación del motor tiene el efecto predominante en la concentración de HNC. Como referencia, el factor A representa el efecto VRM, el factor B representa el efecto de temperatura de inyección y la línea roja representa la referencia para representar la significancia estadística denotada por $\alpha = 0.05$.

Tabla 4-6: Análisis de varianza de HNC. Los valores de VRM, T y sus interacciones tienen valor $p < 0.05$ con nivel de confianza de 95%.

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	3	3314496	1104832	45.56	0
Lineal	2	2789826	1394913	57.52	0
VRM	1	2612105	2612105	107.71	0
T	1	177722	177722	7.33	0.042
Cuadrado	1	524670	524670	21.63	0.006
VRM*VRM	1	524670	524670	21.63	0.006
Error	5	121259	24252		
Total	8	3435755			

La superficie de respuesta dada por la Figura 4-25 indica la combinación de las variables de VRM, T y su efecto en la concentración de HNC. La superficie detalla que si se aumentan las RPM aumenta la concentración de HNC, mientras que la temperatura tiene una ligera tendencia a aumentar y por consiguiente lo mismo pasará con la concentración de HNC.

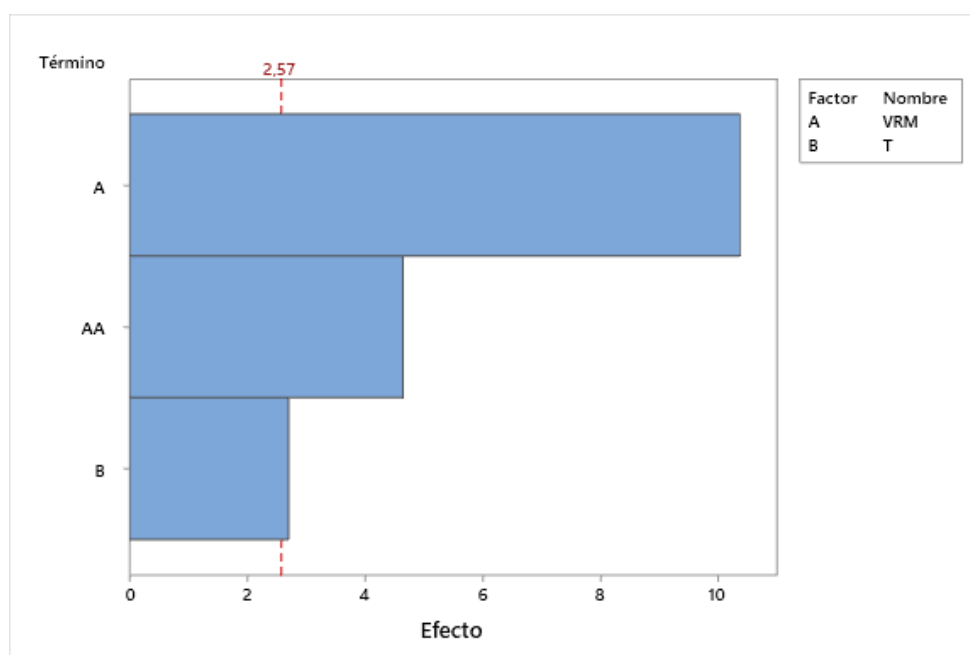


Figura 4-24: Diagrama de Pareto de efectos sobre concentración de HNC. Como referencia, efecto A equivale a VRM, efecto B equivale a temperatura de inyección y significancia estadística para $\alpha=0.05$ (- - - - roja).

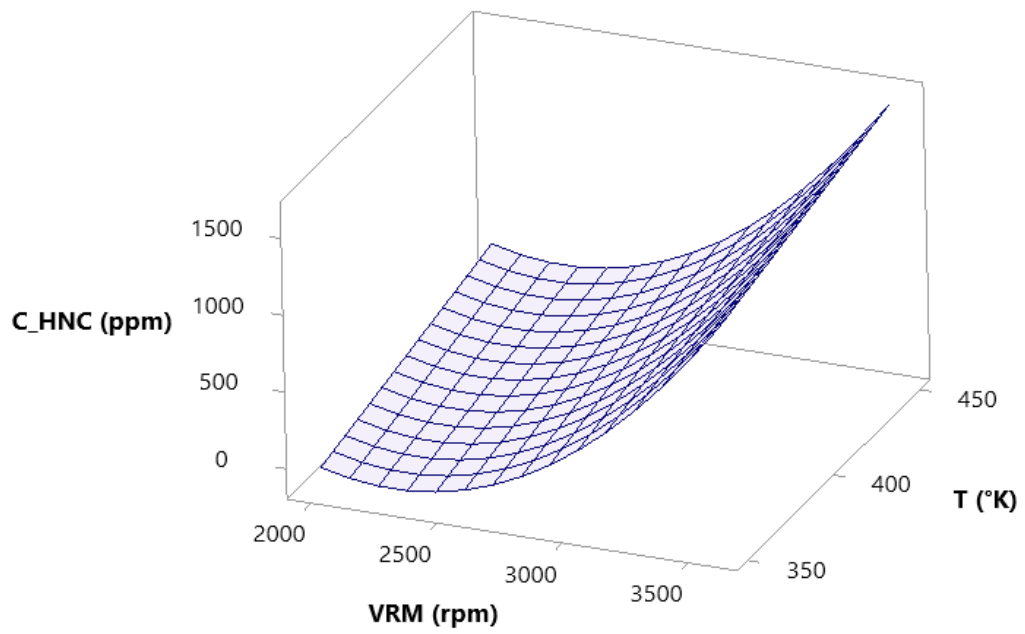


Figura 4-25: Superficie de respuesta de concentración de HNC. A la temperatura de 450K y 3600 RPM se tiene los valores más altos de concentración de HNC.

Las tablas de los datos de concentraciones se encuentran en los Anexos 1 al 5.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES, BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS

5.1. CONCLUSIONES

- El modelo paramétrico desarrollado nos da una correcta información sobre la influencia de la modificación de la velocidad de rotación del motor y la temperatura de inyección de combustible sobre la concentración de gases de combustión CO, CO₂, NO, NO₂, NO_x y HNC desde el punto de la inyección del combustible hasta la salida de los gases por medio de la apertura en la válvula de expulsión.
- El modelo paramétrico de cada gas contaminante permite predecir la concentración en ppm que se podrá obtener para cualquier temperatura de inyección y velocidad de rotación del motor que se desee calcular.
- La simulación permitió observar el fenómeno complejo que se da en la cámara de combustión, sobre todo la visualización del proceso químico que da lugar a los diferentes gases de combustión y su paso a través del movimiento del pistón durante su expansión hasta la apertura de la válvula de salida.
- Los resultados de la simulación de NO_x, diagrama de Pareto y superficie no se desarrollaron porque son idénticos a los resultados de NO. El motivo que llevo a esto es porque como se mencionó el NO_x es la suma de NO y NO₂ y cuando se realizaron las simulaciones, los valores obtenidos de NO₂ se encontraban en una escala mucho menor en comparación de los de NO.
- Según los resultados obtenidos, la variable que más influencia tiene sobre la concentración de gases de combustión es la temperatura de inyección, ya que en la mayoría de los tratamientos utilizados se registró una mayor concentración a altas temperaturas.
- El diseño de experimentos y las superficies de respuesta permiten realizar una estimación de los parámetros más influyentes a la hora de estudiar un fenómeno tan complejo como lo es la combustión. Su entorno amigable e intuitivo ayudan al investigador a desarrollar modelos aproximados a la realidad.
- Los software de dinámica de fluidos como Ansys Forte tienen una gran versatilidad a la hora de simular los fenómenos que se producen en la cámara de combustión, ya que su creación está basada en modelos ya probados por la

comunidad científica. Esto hace posible que los investigadores puedan crear varios escenarios de condiciones de trabajo del motor y puedan predecir y optimizar su desempeño.

5.2. RECOMENDACIONES

- Realizar la experimentación en otros motores de combustión interna, con el objetivo de obtener datos para establecer comparaciones con la simulación. Esto permitirá a los investigadores realizar optimización del modelo y por consiguiente crear un panorama mucho más amplio y completo de la dinámica de fluidos de los gases de combustión.
- Realizar simulaciones nuevas con la ayuda de otros software CFD que estén orientados a la simulación de motores de combustión interna para establecer comparaciones de las metodologías, modelos aplicados, simulación y resultados para adquirir más conocimiento sobre el fenómeno de la combustión, mejorar resultados y complementar a esta investigación.
- La combustión es un fenómeno altamente complicado, por lo que es necesario para futuras investigaciones utilizar más variables de entrada y modelos que permitan crear un escenario cada vez más parecido al real con el objetivo de poder optimizar el desempeño del motor y también reducir las emisiones contaminantes que dañan la salud del ser humano y destruyen el medio ambiente.
- Utilizar un clúster con gran capacidad de procesamiento para realizar simulaciones en paralelo puede ayudar a reducir los tiempos exageradamente extendidos de simulación de un computador convencional con el fin de realizar más combinaciones de variables que permitan la optimización del modelo.

5.3. BIBLIOGRAFÍA

- [1] D. Zhao, S. Li, y H. Zhao, «Entropy-involved energy measure study of intrinsic thermoacoustic oscillations», *Appl. Energy*, vol. 177, pp. 570-578, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.05.142>.
- [2] D. Zhao, Z. Lu, H. Zhao, X. Y. Li, B. Wang, y P. Liu, «A review of active control approaches in stabilizing combustion systems in aerospace industry», *Prog. Aerosp. Sci.*, vol. 97, pp. 35-60, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.01.002>.
- [3] D. Zhao y J. Li, «Feedback Control of Combustion Instabilities Using a Helmholtz Resonator with an Oscillating Volume», *Combust. Sci. Technol.*, vol. 184, n.º 5, pp. 694-716, 2012, doi: 10.1080/00102202.2012.660224.
- [4] R. K. Maurya y P. Mishra, «Parametric investigation on combustion and emissions characteristics of a dual fuel (natural gas port injection and diesel pilot injection) engine using 0-D SRM and 3D CFD approach», *Fuel*, vol. 210, pp. 900-913, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.021>.
- [5] E. Svensson *et al.*, «Potential levels of soot, NOx, HC and CO for methanol combustion», 2016.
- [6] T. Pachiannan, W. Zhong, S. Rajkumar, Z. He, X. Leng, y Q. Wang, «A literature review of fuel effects on performance and emission characteristics of low-temperature combustion strategies», *Appl. Energy*, vol. 251, p. 113380, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113380>.
- [7] H. Jasak *et al.*, «Rapid CFD simulation of internal combustion engines», *SAE Trans.*, pp. 1694-1703, 1999.
- [8] A. Turkcan, «The effects of different types of biodiesels and biodiesel-bioethanol-diesel blends on the cyclic variations and correlation coefficient», *Fuel*, vol. 261, p. 116453, 2020.
- [9] J. Yang, Y. Ma, J. Fu, J. Shu, y J. Liu, «Parametric study of gasoline properties on combustion characteristics of gasoline compression engines using reaction kinetics simulation and density-based global sensitivity analysis», *Appl. Energy*, vol. 255, p. 113858, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113858>.
- [10] J. F. Izquierdo y J. F. I. Torres, *Cinética de las reacciones químicas*, vol. 16. Edicions Universitat Barcelona, 2004.
- [11] A. J. Jiménez Núñez, «Efectos del Gas Combustible en el Rendimiento de los Motores de Combustión Interna».
- [12] L. He, L. Jingyuan, Y. Xiumin, L. Mengliang, y. Tian, «Numerical Study on Combustion and Emission Characteristics of a PFI Gasoline Engine with Hydrogen Direct-Injection», *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 1449-1454, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.348>.
- [13] A. A. Reddy y J. Mallikarjuna, «Parametric study on a gasoline direct injection engine-A CFD analysis», SAE Technical Paper, 2017.
- [14] W. Rodi, *Turbulence models and their application in hydraulics: A state-of-the-art review*. Routledge, 2017.

- [15] X. Sun, X. Liang, G. Shu, Y. Wang, Y. Wang, y H. Yu, «Effect of different combustion models and alternative fuels on two-stroke marine diesel engine performance», *Appl. Therm. Eng.*, vol. 115, pp. 597-606, 2017.
- [16] J. C. Beale y R. D. Reitz, «Modeling spray atomization with the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor hybrid model», *At. Sprays*, vol. 9, n.º 6, 1999.
- [17] A. S. Krishna, J. M. Mallikarjuna, K. Davinder, y R. Babu, «In-cylinder flow analysis in a two-stroke engine-A comparison of different turbulence models using CFD», SAE Technical Paper, 2013.
- [18] E. J. López, H. J. Aguerre, C. I. Pairetti, S. Márquez Damián, J. M. Giménez, y N. M. Nigro, «Contrastación de modelos para combustión premezclada en aplicaciones de motores de combustión interna», 2016.
- [19] V. T. Lamani, A. K. Yadav, y K. N. Gottkere, «Performance, emission, and combustion characteristics of twin-cylinder common rail diesel engine fuelled with butanol-diesel blends», *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 24, n.º 29, pp. 23351-23362, 2017, doi: 10.1007/s11356-017-9956-7.
- [20] F. Juretić, W. Moser, y G. Rainer, «RECENT ADVANCES IN AVL'S MESH GENERATION SOFTWARE-ESE-TOOLS», 2008.
- [21] Z. Petranović, T. Bešenić, M. Vujanović, y N. Duić, «Modelling pollutant emissions in diesel engines, influence of biofuel on pollutant formation», *J. Environ. Manage.*, vol. 203, pp. 1038-1046, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.033>.
- [22] J. Floyd, K. B. McGrattan, y others, «Validation of a CFD fire model using two step combustion chemistry using the NIST reduced-scale ventilation-limited compartment data», en *9th International IAFSS Symposium, Karlsruhe, Germany*, 2008, pp. 21-26.
- [23] O. J. Barrera Flórez y others, «Evaluación termodinámica de la operación de un motor diésel KOHLER KDI 2504m empleando mezclas biodiesel-diésel en ASPEN HYSYS», 2018.
- [24] G. Chendong, Z. Zuo, B. Jia, Z. Ziwei, F. Huihua, y A. P. Roskilly, «Parametric analysis of a dual-piston type free-piston gasoline engine linear generator», *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 1431-1436, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.346>.
- [25] M. Nieto Salinas y others, «Caracterización del proceso de combustión de gas de síntesis en bombas de combustión a volumen constante para su utilización en motores de combustión interna alternativos», 2019.
- [26] Ansys, «ANSYS® Forte. User Guide». Ansys, 2021.
- [27] A. Gosman, «State of the art of multi-dimensional modeling of engine reacting flows», *Oil Gas Sci. Technol.*, vol. 54, n.º 2, pp. 149-159, 1999.
- [28] A. J. Chorin, «Numerical solution of the Navier-Stokes equations», *Math. Comput.*, vol. 22, n.º 104, pp. 745-762, 1968.
- [29] A. I. Woody, «How is the ideal gas law explanatory?», *Sci. Educ.*, vol. 22, n.º 7, pp. 1563-1580, 2013.

- [30] D. Jaynes y A. Rogowski, «Applicability of Fick's law to gas diffusion», *Soil Sci. Soc. Am. J.*, vol. 47, n.º 3, pp. 425-430, 1983.
- [31] Q. Xiong, M. V. Bozorg, M. H. Doranehgard, K. Hong, y G. Lorenzini, «A CFD investigation of the effect of non-Newtonian behavior of Cu–water nanofluids on their heat transfer and flow friction characteristics», *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 139, n.º 4, pp. 2601-2621, 2020.
- [32] L. Wang, «Generalized Fourier law», *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 37, n.º 17, pp. 2627-2634, 1994.
- [33] G. E. Cossali y S. Tonini, «Conservation Equations», en *Drop Heating and Evaporation: Analytical Solutions in Curvilinear Coordinate Systems*, Springer, 2021, pp. 185-206.
- [34] M. H. Zawawi *et al.*, «A review: Fundamentals of computational fluid dynamics (CFD)», en *AIP conference proceedings*, 2018, vol. 2030, n.º 1, p. 020252.
- [35] D. Taler, «Mass, Momentum and Energy Conservation Equations», en *Numerical Modelling and Experimental Testing of Heat Exchangers*, Springer, 2019, pp. 9-46.
- [36] M. R. Wormald, «1st Year Thermodynamic Lectures».
- [37] W. Ma *et al.*, «Nox formation in fixed-bed biomass combustion: Chemistry and modeling», *Fuel*, vol. 290, p. 119694, 2021.
- [38] F. B. Dutton, «Dalton's law of partial pressures», *J. Chem. Educ.*, vol. 38, n.º 8, p. A545, 1961.
- [39] H. Espinoza, L. Patino, Y. González, y L. Irving, «Modelo predictivo de combustión de mezclas de gas natural en motores de encendido por chispa (MECH)», *Ing. E Investig.*, vol. 27, n.º 2, pp. 11-17, 2007.
- [40] V. Yakhot y S. A. Orszag, «Renormalization group analysis of turbulence. I. Basic theory», *J. Sci. Comput.*, vol. 1, n.º 1, pp. 3-51, 1986.
- [41] Z. Han y R. D. Reitz, «Turbulence modeling of internal combustion engines using RNG κ - ϵ models», *Combust. Sci. Technol.*, vol. 106, n.º 4-6, pp. 267-295, 1995.
- [42] S.-C. Kong y R. D. Reitz, «Use of detailed chemical kinetics to study HCCI engine combustion with consideration of turbulent mixing effects», *J Eng Gas Turbines Power*, vol. 124, n.º 3, pp. 702-707, 2002.
- [43] D. Kong, R. K. Eckhoff, y F. Alfert, «Auto-ignition of CH₄air, C₃H₈air, CH₄/C₃H₈/air and CH₄/CO₂/air using a 11 ignition bomb», *J. Hazard. Mater.*, vol. 40, n.º 1, pp. 69-84, 1995.
- [44] J. C. Beale y R. D. Reitz, «Modeling spray atomization with the Kelvin-Helmholtz/Rayleigh-Taylor hybrid model», *At. Sprays*, vol. 9, n.º 6, 1999.
- [45] N. Peters, «Turbulent combustion». IOP Publishing, 2001.
- [46] Z. Tan, *Multi-dimensional modeling of ignition and combustion in premixed and DIS/CI (direct injection spark/compression ignition) engines*. The University of Wisconsin-Madison, 2003.

- [47] L. Liang y R. D. Reitz, «Spark ignition engine combustion modeling using a level set method with detailed chemistry», SAE Technical Paper, 2006.
- [48] C. Geron y M. Hays, «Air emissions from organic soil burning on the coastal plain of North Carolina», *Atmos. Environ.*, vol. 64, pp. 192-199, 2013.
- [49] O. A. Towoju y F. A. Ishola, «A case for the internal combustion engine powered vehicle», *Energy Rep.*, vol. 6, pp. 315-321, 2020.
- [50] S. Fernández Bao, «Diseño de experimentos: Diseño factorial», Master's Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2020.

5.4. ANEXOS

ANEXO A: DATOS CO

	2000/350	2000/400	2000/450	2800/350	2800/400	2800/450	3600/350	3600/400	3600/450
Crank angle (deg)	CO (g/kgfuel)	CO (g/kgfuel)	CO (g/kgfuel)	CO (g/kgfuel)	CO (g/kgfuel)	CO (g/kgfuel)	CO (g/kgfuel)	CO (g/kgfuel)	CO (g/kgfuel)
705,00	0,003	0,0002	0,000216	0,0002	0,0004	0,000	0,0009	0,0002	0,0004
706,01	0,022	0,019	0,021	0,010	0,013	0,014	0,012	0,011	0,011
707,09	0,061	0,061	0,053	0,030	0,030	0,031	0,024	0,022	0,024
708,05	0,152	0,141	0,134	0,075	0,077	0,074	0,041	0,039	0,038
709,01	0,280	0,260	0,243	0,149	0,154	0,153	0,063	0,066	0,065
710,09	0,470	0,466	0,405	0,259	0,272	0,271	0,108	0,100	0,110
711,05	0,784	0,734	0,674	0,424	0,439	0,445	0,164	0,157	0,155
712,01	1,188	1,114	1,022	0,659	0,674	0,681	0,219	0,225	0,219
713,09	1,883	1,845	1,526	0,955	1,020	1,015	0,308	0,295	0,289
714,05	3,224	2,958	2,514	1,586	1,655	1,480	0,431	0,396	0,394
715,00	4,938	4,658	3,810	2,617	2,506	2,370	0,576	0,500	0,513
716,08	7,809	7,494	5,918	4,547	4,071	3,805	0,729	0,662	0,688
717,04	11,604	11,059	9,222	6,547	6,409	5,978	0,949	0,850	0,838
718,12	17,508	16,587	13,349	9,911	9,743	9,097	1,160	1,055	1,073
719,08	24,651	23,257	18,975	14,784	14,284	13,398	1,474	1,325	1,290
720,04	33,766	31,801	27,397	20,469	20,237	19,038	2,251	1,661	1,600
721,12	47,191	44,321	37,273	27,713	27,776	26,249	3,079	2,218	1,969
722,08	62,044	58,278	49,599	37,471	37,221	35,230	4,531	3,161	2,547
723,04	80,586	75,577	67,258	49,197	46,767	44,324	6,645	4,454	3,475
724,12	105,902	99,397	86,502	63,297	60,434	57,276	8,900	5,904	4,722
725,08	132,117	124,196	109,145	77,103	77,580	72,903	12,596	8,379	6,069
726,04	163,502	154,090	140,610	95,879	95,865	91,153	16,530	11,081	8,399
727,12	201,050	190,297	171,002	116,499	117,094	111,829	22,346	15,270	10,782
728,08	238,431	226,802	205,630	139,708	140,482	134,738	29,449	20,494	14,420
729,04	278,759	266,757	248,898	165,505	166,720	160,296	36,159	25,666	18,980

730,12	326,430	314,270	290,736	193,762	195,484	188,332	46,238	32,696	23,448
731,08	372,344	359,941	336,865	224,860	221,411	213,542	57,907	41,722	29,868
732,04	419,373	406,877	390,933	252,621	254,383	246,196	68,490	51,918	37,396
733,12	474,447	461,176	442,636	288,664	290,197	282,532	82,990	61,311	44,308
734,08	524,229	509,950	494,856	325,791	326,974	320,440	98,655	74,163	53,799
735,04	574,597	558,840	553,686	365,156	366,008	361,512	112,388	85,537	64,337
736,12	630,960	613,837	607,323	406,003	405,948	403,251	130,602	100,882	73,324
737,08	680,297	662,319	658,037	447,578	447,165	446,406	146,192	117,078	85,404
738,04	727,503	710,023	714,882	490,575	482,648	483,462	166,707	130,937	95,415
739,12	776,610	761,833	763,521	534,204	526,104	529,470	188,657	149,179	108,658
740,00	814,303	801,817	810,130	570,762	568,963	574,663	206,712	165,606	120,420
741,04	852,196	844,828	860,304	613,084	612,248	620,343	230,781	187,249	134,425
742,00	881,414	882,034	901,530	653,981	655,780	667,900	256,853	208,868	149,581
743,08	910,208	921,645	940,809	694,403	699,187	715,960	278,889	227,376	162,127
744,04	931,698	952,437	981,579	731,705	740,388	762,873	307,758	251,268	178,599
745,00	949,896	979,048	1013,914	766,743	779,517	807,373	337,453	271,819	195,557
746,08	967,995	1006,013	1044,125	798,997	815,823	849,359	361,919	298,409	209,559
747,04	980,949	1025,951	1073,341	828,075	848,575	888,013	392,679	325,151	227,871
748,00	992,245	1044,041	1096,939	850,844	879,392	923,891	425,261	346,749	246,201
749,08	1002,664	1061,123	1117,553	875,771	903,141	950,421	451,930	374,179	261,130
750,04	1010,795	1074,286	1138,139	897,802	929,042	980,622	486,121	402,862	279,882
751,00	1017,636	1085,026	1152,785	916,599	952,326	1006,862	513,537	426,040	295,174
752,08	1024,177	1095,151	1164,776	932,354	972,757	1031,687	548,002	455,769	314,168
753,04	1029,127	1102,534	1175,568	945,257	989,898	1052,595	582,489	485,375	333,488
754,00	1033,306	1108,622	1183,162	955,916	1004,576	1071,514	609,765	509,322	348,938
755,08	1037,402	1114,373	1189,198	964,857	1016,532	1086,914	642,802	539,352	368,515
756,04	1040,723	1118,870	1194,714	971,165	1025,092	1098,575	674,722	563,736	387,752
757,00	1043,369	1122,556	1198,453	977,336	1033,437	1109,918	698,732	594,128	403,056
758,08	1046,118	1125,996	1201,409	982,487	1040,680	1119,891	727,366	623,637	421,821
759,04	1048,147	1128,476	1203,994	986,623	1046,635	1128,150	749,007	646,858	437,321

760,00	1049,692	1130,556	1205,736	989,791	1051,070	1135,090	774,137	674,863	456,415
761,08	1051,155	1132,636	1207,336	992,216	1054,520	1141,169	796,998	701,976	475,381
762,04	1052,030	1134,076	1208,761	994,148	1057,270	1146,547	813,863	722,666	490,545
763,00	1052,619	1135,189	1209,830	995,228	1059,222	1150,832	833,335	748,231	509,054
764,08	1052,964	1136,069	1210,656	996,354	1060,784	1153,952	851,389	767,292	527,713
765,04	1052,874	1136,362	1211,221	997,053	1062,067	1157,004	865,154	789,675	542,801
766,00	1052,629	1136,479	1211,602	997,512	1062,962	1159,337	881,206	810,289	561,474
767,08	1052,042	1136,364	1211,700	997,739	1063,610	1161,558	895,886	825,856	576,190
768,04	1051,287	1136,055	1211,538	997,902	1064,073	1163,140	906,875	843,575	594,510
769,00	1050,484	1135,648	1211,353	997,919	1064,315	1164,553	919,409	860,745	612,477
770,08	1049,410	1135,026	1210,916	997,838	1064,416	1165,525	928,547	873,353	626,721
771,04	1048,302	1134,254	1210,143	997,661	1064,373	1166,220	938,733	888,266	643,895
772,00	1047,115	1133,285	1209,333	997,324	1064,236	1166,760	947,928	899,634	661,251
773,08	1045,722	1132,085	1208,384	996,885	1064,028	1167,210	954,497	912,778	674,764
774,04	1044,434	1130,951	1207,270	996,314	1063,686	1167,485	961,710	925,360	691,164
775,00	1043,122	1129,757	1206,218	995,731	1063,341	1167,602	968,269	934,243	707,130
776,08	1041,635	1128,370	1205,107	995,128	1062,932	1167,641	973,027	945,230	719,446
777,04	1040,306	1127,125	1203,865	994,501	1062,487	1167,597	978,272	955,055	734,279
778,00	1038,994	1125,882	1202,730	993,791	1061,924	1167,401	981,849	962,425	746,317
779,08	1037,550	1124,485	1201,556	993,181	1061,464	1167,274	985,999	971,174	760,599
780,04	1036,294	1123,250	1200,237	992,362	1060,927	1167,028	989,595	979,252	774,561
781,00	1035,063	1122,025	1199,060	991,480	1060,393	1166,708	992,227	985,719	785,334
782,08	1033,709	1120,674	1197,899	990,602	1059,808	1166,456	995,196	993,737	798,213
783,04	1032,537	1119,507	1196,610	989,730	1059,199	1166,171	997,832	999,660	810,995
784,00	1031,397	1118,373	1195,488	988,866	1058,555	1165,865	999,827	1006,931	821,030
785,08	1030,155	1117,130	1194,404	988,007	1057,911	1165,560	1002,108	1013,933	833,171
786,04	1029,090	1116,063	1193,217	987,302	1057,270	1165,244	1003,781	1019,151	842,721
787,00	1028,052	1115,021	1192,187	986,459	1056,746	1164,907	1005,591	1025,551	854,398
788,08	1026,923	1113,888	1191,189	985,626	1056,117	1164,567	1007,302	1031,579	865,749
789,04	1025,951	1112,904	1190,100	984,819	1055,525	1164,188	1008,480	1036,120	874,772

790,00	1025,007	1111,956	1189,185	984,016	1054,965	1163,785	1009,813	1041,591	885,576
791,08	1023,984	1110,928	1188,281	983,191	1054,452	1163,367	1011,032	1045,707	896,396
792,04	1023,104	1110,042	1187,301	982,334	1053,978	1162,951	1011,946	1050,471	904,705
793,00	1022,253	1109,186	1186,455	981,484	1053,486	1162,543	1012,990	1055,146	914,816
794,08	1021,328	1108,252	1185,647	980,786	1053,066	1162,143	1013,949	1058,693	922,845
795,04	1020,534	1107,456	1184,745	979,967	1052,560	1161,744	1014,638	1062,916	932,617
796,00	1019,766	1106,692	1183,980	979,152	1052,048	1161,429	1015,434	1066,913	941,980
797,08	1018,933	1105,864	1183,215	978,344	1051,527	1161,058	1016,053	1069,875	949,311
798,04	1018,218	1105,146	1182,383	977,547	1051,008	1160,698	1016,778	1073,360	958,400
799,00	1017,524	1104,451	1181,670	976,764	1050,487	1160,358	1017,455	1076,092	966,763
800,00	1016,836	1103,744	1180,984	976,108	1050,038	1160,061	1017,964	1079,031	973,063
801,03	1016,159	1103,064	1180,289	975,323	1049,561	1159,831	1018,430	1082,083	980,718
802,11	1015,467	1102,371	1179,711	974,626	1049,159	1159,645	1018,907	1085,136	988,536
803,07	1014,874	1101,764	1179,145	973,933	1048,667	1159,403	1019,260	1088,072	994,767
804,03	1014,302	1101,181	1178,524	973,363	1048,150	1159,094	1019,702	1090,269	1002,308
805,11	1013,684	1100,528	1177,987	972,698	1047,633	1158,749	1020,075	1092,768	1009,370
806,07	1013,155	1099,969	1177,446	972,036	1047,124	1158,385	1020,350	1094,646	1014,757
807,03	1012,646	1099,425	1176,855	971,393	1046,616	1158,009	1020,718	1096,902	1021,479
808,11	1012,094	1098,829	1176,333	970,765	1046,119	1157,626	1021,072	1098,893	1027,605
809,07	1011,622	1098,315	1175,830	970,153	1045,625	1157,306	1021,310	1100,385	1032,431
810,03	1011,167	1097,816	1175,308	969,554	1045,218	1156,928	1021,603	1102,163	1038,243
811,11	1010,674	1097,263	1174,844	968,973	1044,740	1156,559	1021,804	1103,843	1042,682
812,07	1010,251	1096,795	1174,402	968,497	1044,281	1156,204	1022,012	1105,144	1048,139
813,03	1009,844	1096,343	1173,892	967,939	1043,837	1155,852	1022,222	1106,684	1053,448
814,11	1009,401	1095,836	1173,454	967,398	1043,409	1155,508	1022,383	1108,145	1057,521
815,07	1009,022	1095,405	1173,043	966,858	1042,993	1155,162	1022,600	1109,180	1062,416
816,03	1008,655	1094,981	1172,594	966,339	1042,591	1154,888	1022,844	1110,464	1067,159
817,11	1008,257	1094,512	1172,194	965,845	1042,199	1154,574	1022,971	1111,491	1070,855
818,07	1007,916	1094,109	1171,808	965,347	1041,883	1154,269	1023,086	1112,659	1075,275
819,03	1007,586	1093,721	1171,397	964,864	1041,517	1153,976	1023,178	1113,779	1078,701

820,11	1007,228	1093,294	1171,045	964,458	1041,158	1153,692	1023,291	1114,658	1082,947
821,07	1006,920	1092,921	1170,683	963,993	1040,809	1153,421	1023,385	1115,725	1087,153
822,03	1006,621	1092,564	1170,279	963,528	1040,466	1153,160	1023,483	1116,786	1090,501
823,11	1006,297	1092,178	1169,929	963,076	1040,141	1152,904	1023,546	1117,589	1094,562
824,07	1006,018	1091,839	1169,583	962,639	1039,822	1152,699	1023,601	1118,570	1098,479
825,03	1005,747	1091,512	1169,212	962,214	1039,557	1152,452	1023,652	1119,345	1101,560
826,11	1005,452	1091,145	1168,897	961,790	1039,243	1152,207	1023,721	1120,305	1105,364
827,07	1005,198	1090,827	1168,600	961,437	1038,938	1151,964	1023,764	1121,180	1109,108
828,03	1004,951	1090,521	1168,273	961,025	1038,643	1151,730	1023,796	1121,849	1112,054
829,11	1004,682	1090,191	1167,980	960,626	1038,359	1151,503	1023,846	1122,658	1115,657
830,07	1004,451	1089,900	1167,686	960,249	1038,079	1151,280	1023,889	1123,413	1118,526
831,03	1004,225	1089,608	1167,359	959,877	1037,805	1151,054	1023,943	1123,985	1121,992
832,11	1003,979	1089,279	1167,085	959,511	1037,543	1150,869	1024,023	1124,677	1125,453
833,07	1003,766	1088,993	1166,811	959,159	1037,329	1150,647	1024,103	1125,201	1128,097
834,03	1003,559	1088,712	1166,507	958,817	1037,077	1150,428	1024,193	1125,823	1131,239
835,11	1003,333	1088,421	1166,232	958,537	1036,829	1150,214	1024,295	1126,412	1134,309
836,07	1003,137	1088,160	1165,965	958,210	1036,581	1150,002	1024,389	1126,890	1136,681
837,03	1002,947	1087,902	1165,679	957,878	1036,346	1149,787	1024,506	1127,411	1139,582
838,11	1002,738	1087,624	1165,449	957,556	1036,118	1149,577	1024,599	1127,920	1141,824
839,07	1002,558	1087,378	1165,203	957,235	1035,896	1149,407	1024,727	1128,285	1144,605
840,03	1002,382	1087,144	1164,930	956,925	1035,713	1149,205	1024,848	1128,696	1147,280
841,11	1002,189	1086,878	1164,682	956,617	1035,492	1149,000	1024,935	1129,048	1149,406
842,07	1002,022	1086,643	1164,434	956,367	1035,281	1148,796	1025,049	1129,295	1151,875
843,03	1001,859	1086,417	1164,159	956,077	1035,078	1148,588	1025,137	1129,579	1154,243
844,11	1001,681	1086,168	1163,924	955,800	1034,879	1148,386	1025,212	1129,798	1155,968
845,07	1001,526	1085,951	1163,697	955,527	1034,680	1148,189	1025,288	1130,040	1157,944
846,03	1001,374	1085,730	1163,462	955,250	1034,485	1147,994	1025,335	1130,262	1159,424
847,11	1001,208	1085,479	1163,248	954,984	1034,293	1147,835	1025,384	1130,419	1161,164
848,07	1001,063	1085,265	1163,030	954,720	1034,134	1147,645	1025,426	1130,598	1162,764
849,03	1000,922	1085,066	1162,792	954,462	1033,948	1147,455	1025,460	1130,754	1163,959

850,11	1000,767	1084,845	1162,594	954,248	1033,770	1147,265	1025,504	1130,864	1165,329
851,07	1000,632	1084,655	1162,402	953,989	1033,595	1147,078	1025,575	1130,984	1166,601
852,03	1000,500	1084,465	1162,186	953,736	1033,418	1146,897	1025,639	1131,063	1167,514
853,11	1000,355	1084,250	1162,002	953,484	1033,251	1146,720	1025,727	1131,146	1168,518
854,07	1000,228	1084,063	1161,820	953,239	1033,085	1146,572	1025,805	1131,205	1169,443
855,03	1000,105	1083,872	1161,608	953,007	1032,918	1146,399	1025,902	1131,235	1170,092
856,11	999,969	1083,663	1161,426	952,779	1032,783	1146,227	1025,986	1131,266	1170,832
857,07	999,850	1083,479	1161,249	952,554	1032,623	1146,053	1026,045	1131,278	1171,363
858,03	999,734	1083,300	1161,054	952,376	1032,465	1145,876	1026,111	1131,279	1171,990
859,11	999,606	1083,097	1160,880	952,163	1032,309	1145,703	1026,161	1131,265	1172,533
860,07	999,495	1082,924	1160,716	951,949	1032,155	1145,545	1026,201	1131,239	1172,936
861,03	999,385	1082,755	1160,534	951,743	1032,006	1145,393	1026,268	1131,202	1173,382
862,11	999,265	1082,569	1160,365	951,545	1031,859	1145,268	1026,339	1131,154	1173,777
863,07	999,160	1082,409	1160,201	951,338	1031,738	1145,118	1026,397	1131,109	1174,063
864,03	999,056	1082,255	1160,025	951,145	1031,598	1144,966	1026,468	1131,044	1174,382
865,11	998,942	1082,081	1159,870	950,983	1031,460	1144,808	1026,526	1130,973	1174,622
866,07	998,843	1081,907	1159,717	950,798	1031,323	1144,651	1026,601	1130,912	1174,875
867,03	998,745	1081,761	1159,548	950,613	1031,189	1144,495	1026,681	1130,840	1175,081
868,11	998,638	1081,603	1159,400	950,426	1031,058	1144,339	1026,746	1130,760	1175,232
869,07	998,543	1081,471	1159,264	950,251	1030,926	1144,194	1026,828	1130,693	1175,380
870,03	998,451	1081,336	1159,120	950,074	1030,797	1144,079	1026,907	1130,595	1175,498
871,11	998,348	1081,190	1158,977	949,894	1030,685	1143,933	1026,978	1130,513	1175,570
872,07	998,259	1081,061	1158,841	949,723	1030,543	1143,801	1027,065	1130,408	1175,632
873,03	998,171	1080,937	1158,694	949,585	1030,417	1143,674	1027,129	1130,300	1175,665
874,11	998,073	1080,796	1158,558	949,418	1030,283	1143,546	1027,192	1130,212	1175,690
875,07	997,988	1080,667	1158,423	949,257	1030,153	1143,414	1027,246	1130,094	1175,699
876,03	997,904	1080,546	1158,285	949,089	1030,018	1143,284	1027,270	1129,976	1175,706
877,11	997,811	1080,414	1158,165	948,931	1029,894	1143,179	1027,295	1129,883	1175,688
878,07	997,730	1080,294	1158,031	948,773	1029,768	1143,055	1027,304	1129,766	1175,647
879,03	997,650	1080,160	1157,890	948,617	1029,669	1142,931	1027,307	1129,670	1175,611

880,11	997,572	1080,022	1157,780	948,519	1029,561	1142,829	1027,306	1129,573	1175,576
--------	---------	----------	----------	---------	----------	----------	----------	----------	----------

ANEXO B: DATOS CO₂

	2000/350	2000/400	2000/450	2840/350	2840/400	2840/450	3600/350	3600/400	3600/450
Crank angle (deg)	co2 (molefrac)	co2 (molefrac)	co2 (molefrac)	co2 (molefrac)	co2 (molefrac)	co2 (molefrac)	co2 (molefrac)	co2 (molefrac)	co2 (molefrac)
704,1	0,0204	0,0207	0,0212	0,0203	0,0206	0,0211	0,0207	0,0211	0,0217
705,1	0,0204	0,0207	0,0212	0,0203	0,0206	0,0211	0,0207	0,0211	0,0217
706,1	0,0204	0,0207	0,0212	0,0203	0,0206	0,0211	0,0207	0,0211	0,0217
707,0	0,0204	0,0207	0,0212	0,0203	0,0206	0,0211	0,0207	0,0211	0,0217
708,1	0,0204	0,0207	0,0212	0,0203	0,0206	0,0211	0,0207	0,0211	0,0217
709,1	0,0204	0,0207	0,0212	0,0203	0,0206	0,0211	0,0207	0,0211	0,0217
710,0	0,0204	0,0207	0,0212	0,0203	0,0206	0,0211	0,0207	0,0211	0,0217
711,1	0,0204	0,0207	0,0212	0,0203	0,0206	0,0211	0,0207	0,0211	0,0217
712,1	0,0204	0,0207	0,0212	0,0203	0,0206	0,0211	0,0207	0,0211	0,0217
713,0	0,0204	0,0208	0,0212	0,0204	0,0207	0,0211	0,0207	0,0211	0,0217
714,1	0,0205	0,0208	0,0213	0,0204	0,0207	0,0211	0,0207	0,0211	0,0217
715,0	0,0206	0,0209	0,0213	0,0205	0,0207	0,0212	0,0207	0,0211	0,0217
716,0	0,0207	0,0210	0,0214	0,0207	0,0208	0,0213	0,0207	0,0211	0,0218
717,0	0,0209	0,0211	0,0215	0,0208	0,0210	0,0214	0,0207	0,0211	0,0218
718,1	0,0211	0,0214	0,0217	0,0211	0,0212	0,0215	0,0207	0,0211	0,0218
719,0	0,0214	0,0216	0,0219	0,0214	0,0214	0,0217	0,0207	0,0211	0,0218
720,0	0,0218	0,0220	0,0222	0,0218	0,0218	0,0220	0,0208	0,0212	0,0218
721,1	0,0224	0,0225	0,0225	0,0223	0,0222	0,0223	0,0208	0,0212	0,0218
722,0	0,0230	0,0231	0,0230	0,0230	0,0227	0,0227	0,0209	0,0212	0,0218
723,0	0,0238	0,0238	0,0236	0,0238	0,0232	0,0231	0,0210	0,0213	0,0218
724,1	0,0250	0,0247	0,0243	0,0247	0,0240	0,0237	0,0211	0,0213	0,0219
725,0	0,0261	0,0257	0,0251	0,0256	0,0249	0,0244	0,0213	0,0214	0,0219
726,0	0,0275	0,0269	0,0262	0,0269	0,0259	0,0252	0,0215	0,0215	0,0220

727,1	0,0292	0,0284	0,0273	0,0282	0,0270	0,0261	0,0217	0,0217	0,0221
728,0	0,0309	0,0298	0,0285	0,0296	0,0282	0,0270	0,0221	0,0219	0,0222
729,0	0,0327	0,0314	0,0300	0,0312	0,0295	0,0281	0,0224	0,0221	0,0224
730,1	0,0349	0,0333	0,0314	0,0329	0,0309	0,0293	0,0229	0,0224	0,0225
731,0	0,0370	0,0351	0,0330	0,0347	0,0322	0,0303	0,0235	0,0227	0,0228
732,0	0,0392	0,0370	0,0348	0,0363	0,0338	0,0316	0,0241	0,0231	0,0230
733,1	0,0418	0,0391	0,0366	0,0383	0,0356	0,0330	0,0248	0,0235	0,0233
734,0	0,0443	0,0411	0,0384	0,0404	0,0373	0,0345	0,0256	0,0240	0,0236
735,0	0,0468	0,0431	0,0403	0,0425	0,0391	0,0361	0,0263	0,0245	0,0240
736,1	0,0496	0,0453	0,0421	0,0446	0,0410	0,0377	0,0272	0,0251	0,0243
737,0	0,0522	0,0473	0,0438	0,0468	0,0428	0,0393	0,0280	0,0257	0,0247
738,0	0,0546	0,0492	0,0458	0,0490	0,0444	0,0406	0,0291	0,0263	0,0251
739,1	0,0572	0,0514	0,0474	0,0512	0,0463	0,0423	0,0302	0,0270	0,0256
740,0	0,0592	0,0531	0,0490	0,0530	0,0482	0,0439	0,0311	0,0277	0,0260
741,1	0,0612	0,0549	0,0507	0,0550	0,0501	0,0454	0,0323	0,0285	0,0265
742,0	0,0628	0,0565	0,0522	0,0570	0,0519	0,0471	0,0336	0,0294	0,0270
743,1	0,0643	0,0582	0,0535	0,0589	0,0538	0,0487	0,0347	0,0301	0,0275
744,1	0,0655	0,0596	0,0550	0,0607	0,0556	0,0503	0,0361	0,0311	0,0281
745,0	0,0666	0,0608	0,0561	0,0624	0,0572	0,0518	0,0375	0,0319	0,0287
746,1	0,0676	0,0620	0,0572	0,0639	0,0588	0,0532	0,0387	0,0329	0,0292
747,1	0,0684	0,0629	0,0583	0,0653	0,0602	0,0545	0,0402	0,0340	0,0298
748,0	0,0691	0,0638	0,0592	0,0664	0,0616	0,0558	0,0417	0,0348	0,0305
749,1	0,0697	0,0646	0,0600	0,0676	0,0626	0,0567	0,0430	0,0359	0,0310
750,1	0,0703	0,0653	0,0609	0,0687	0,0638	0,0578	0,0446	0,0370	0,0317
751,0	0,0708	0,0658	0,0615	0,0697	0,0649	0,0587	0,0458	0,0379	0,0322
752,1	0,0713	0,0664	0,0621	0,0706	0,0659	0,0597	0,0474	0,0390	0,0329
753,1	0,0717	0,0669	0,0627	0,0714	0,0668	0,0605	0,0490	0,0402	0,0336
754,0	0,0720	0,0673	0,0631	0,0721	0,0676	0,0613	0,0503	0,0411	0,0342
755,1	0,0724	0,0677	0,0635	0,0727	0,0683	0,0620	0,0518	0,0422	0,0349
756,1	0,0728	0,0681	0,0639	0,0732	0,0688	0,0625	0,0533	0,0432	0,0355

757,0	0,0731	0,0685	0,0643	0,0737	0,0694	0,0631	0,0544	0,0443	0,0361
758,1	0,0734	0,0688	0,0646	0,0741	0,0699	0,0637	0,0557	0,0455	0,0368
759,1	0,0737	0,0691	0,0649	0,0745	0,0703	0,0641	0,0567	0,0464	0,0373
760,0	0,0740	0,0694	0,0652	0,0749	0,0707	0,0646	0,0579	0,0475	0,0380
761,1	0,0743	0,0697	0,0655	0,0752	0,0711	0,0650	0,0590	0,0485	0,0387
762,1	0,0745	0,0700	0,0658	0,0755	0,0714	0,0653	0,0599	0,0493	0,0392
763,0	0,0748	0,0702	0,0661	0,0757	0,0717	0,0657	0,0608	0,0503	0,0399
764,1	0,0750	0,0705	0,0663	0,0759	0,0719	0,0659	0,0618	0,0511	0,0406
765,1	0,0752	0,0707	0,0666	0,0762	0,0721	0,0662	0,0625	0,0520	0,0412
766,0	0,0754	0,0710	0,0668	0,0764	0,0724	0,0665	0,0633	0,0529	0,0418
767,1	0,0756	0,0712	0,0670	0,0766	0,0726	0,0668	0,0641	0,0535	0,0424
768,1	0,0757	0,0714	0,0672	0,0768	0,0728	0,0670	0,0647	0,0543	0,0431
769,0	0,0759	0,0716	0,0674	0,0770	0,0730	0,0673	0,0654	0,0550	0,0437
770,1	0,0761	0,0718	0,0676	0,0772	0,0732	0,0675	0,0659	0,0556	0,0443
771,1	0,0762	0,0719	0,0678	0,0774	0,0734	0,0677	0,0666	0,0563	0,0449
772,0	0,0763	0,0721	0,0680	0,0775	0,0736	0,0679	0,0671	0,0568	0,0456
773,1	0,0765	0,0723	0,0681	0,0777	0,0738	0,0681	0,0675	0,0574	0,0461
774,1	0,0766	0,0724	0,0683	0,0779	0,0739	0,0682	0,0680	0,0580	0,0467
775,0	0,0767	0,0725	0,0684	0,0780	0,0741	0,0684	0,0685	0,0585	0,0473
776,1	0,0768	0,0727	0,0686	0,0782	0,0742	0,0686	0,0688	0,0590	0,0478
777,1	0,0769	0,0728	0,0687	0,0783	0,0744	0,0688	0,0692	0,0595	0,0484
778,0	0,0771	0,0729	0,0688	0,0784	0,0745	0,0689	0,0695	0,0599	0,0488
779,1	0,0772	0,0730	0,0690	0,0785	0,0747	0,0691	0,0698	0,0604	0,0494
780,1	0,0773	0,0731	0,0691	0,0787	0,0748	0,0692	0,0702	0,0609	0,0500
781,0	0,0774	0,0732	0,0692	0,0788	0,0749	0,0693	0,0704	0,0612	0,0504
782,1	0,0775	0,0733	0,0693	0,0789	0,0751	0,0695	0,0707	0,0617	0,0509
783,1	0,0776	0,0734	0,0694	0,0790	0,0752	0,0696	0,0710	0,0620	0,0514
784,0	0,0776	0,0735	0,0695	0,0791	0,0753	0,0697	0,0712	0,0624	0,0518
785,1	0,0777	0,0736	0,0696	0,0792	0,0754	0,0699	0,0714	0,0629	0,0524
786,1	0,0778	0,0737	0,0697	0,0793	0,0755	0,0700	0,0716	0,0632	0,0528

787,0	0,0779	0,0738	0,0698	0,0794	0,0756	0,0701	0,0718	0,0636	0,0533
788,1	0,0780	0,0739	0,0699	0,0795	0,0757	0,0702	0,0721	0,0639	0,0538
789,1	0,0781	0,0740	0,0699	0,0796	0,0758	0,0703	0,0722	0,0642	0,0541
790,0	0,0781	0,0740	0,0700	0,0797	0,0759	0,0704	0,0724	0,0646	0,0546
791,1	0,0782	0,0741	0,0701	0,0797	0,0760	0,0705	0,0726	0,0648	0,0551
792,1	0,0783	0,0742	0,0702	0,0798	0,0761	0,0706	0,0727	0,0652	0,0554
793,0	0,0783	0,0743	0,0702	0,0799	0,0762	0,0707	0,0729	0,0655	0,0559
794,1	0,0784	0,0743	0,0703	0,0800	0,0762	0,0708	0,0731	0,0657	0,0563
795,1	0,0785	0,0744	0,0704	0,0800	0,0763	0,0708	0,0732	0,0660	0,0567
796,0	0,0785	0,0744	0,0704	0,0801	0,0764	0,0709	0,0734	0,0663	0,0571
797,1	0,0786	0,0745	0,0705	0,0802	0,0765	0,0710	0,0735	0,0665	0,0574
798,1	0,0786	0,0746	0,0705	0,0802	0,0765	0,0711	0,0736	0,0668	0,0578
799,0	0,0787	0,0746	0,0706	0,0803	0,0766	0,0711	0,0738	0,0670	0,0582
800,0	0,0787	0,0747	0,0707	0,0803	0,0766	0,0712	0,0739	0,0672	0,0585
801,0	0,0788	0,0747	0,0707	0,0804	0,0767	0,0713	0,0740	0,0674	0,0589
802,1	0,0788	0,0748	0,0708	0,0804	0,0768	0,0713	0,0741	0,0676	0,0592
803,1	0,0789	0,0748	0,0708	0,0805	0,0768	0,0714	0,0742	0,0679	0,0595
804,0	0,0789	0,0749	0,0709	0,0805	0,0769	0,0714	0,0743	0,0680	0,0598
805,1	0,0789	0,0749	0,0709	0,0806	0,0769	0,0715	0,0745	0,0682	0,0602
806,1	0,0790	0,0749	0,0709	0,0806	0,0770	0,0715	0,0745	0,0684	0,0604
807,0	0,0790	0,0750	0,0710	0,0807	0,0770	0,0716	0,0746	0,0685	0,0608
808,1	0,0791	0,0750	0,0710	0,0807	0,0771	0,0716	0,0747	0,0687	0,0611
809,1	0,0791	0,0751	0,0711	0,0808	0,0771	0,0717	0,0748	0,0688	0,0613
810,0	0,0791	0,0751	0,0711	0,0808	0,0771	0,0717	0,0749	0,0690	0,0616
811,1	0,0792	0,0751	0,0711	0,0809	0,0772	0,0718	0,0750	0,0692	0,0618
812,1	0,0792	0,0752	0,0712	0,0809	0,0772	0,0718	0,0751	0,0693	0,0621
813,0	0,0792	0,0752	0,0712	0,0809	0,0772	0,0718	0,0752	0,0694	0,0624
814,1	0,0792	0,0752	0,0712	0,0810	0,0773	0,0719	0,0752	0,0696	0,0626
815,1	0,0793	0,0753	0,0713	0,0810	0,0773	0,0719	0,0753	0,0697	0,0628
816,0	0,0793	0,0753	0,0713	0,0810	0,0773	0,0719	0,0754	0,0698	0,0631

817,1	0,0793	0,0753	0,0713	0,0811	0,0774	0,0720	0,0754	0,0699	0,0633
818,1	0,0793	0,0754	0,0713	0,0811	0,0774	0,0720	0,0755	0,0700	0,0635
819,0	0,0794	0,0754	0,0714	0,0812	0,0774	0,0720	0,0756	0,0701	0,0637
820,1	0,0794	0,0754	0,0714	0,0812	0,0774	0,0721	0,0756	0,0702	0,0639
821,1	0,0794	0,0754	0,0714	0,0812	0,0775	0,0721	0,0757	0,0704	0,0641
822,0	0,0794	0,0755	0,0715	0,0812	0,0775	0,0721	0,0758	0,0705	0,0643
823,1	0,0795	0,0755	0,0715	0,0813	0,0775	0,0721	0,0758	0,0705	0,0645
824,1	0,0795	0,0755	0,0715	0,0813	0,0775	0,0722	0,0759	0,0707	0,0647
825,0	0,0795	0,0755	0,0715	0,0813	0,0776	0,0722	0,0759	0,0707	0,0649
826,1	0,0795	0,0756	0,0716	0,0814	0,0776	0,0722	0,0760	0,0708	0,0651
827,1	0,0795	0,0756	0,0716	0,0814	0,0776	0,0722	0,0760	0,0709	0,0653
828,0	0,0796	0,0756	0,0716	0,0814	0,0776	0,0723	0,0761	0,0710	0,0655
829,1	0,0796	0,0756	0,0716	0,0815	0,0777	0,0723	0,0761	0,0711	0,0657
830,1	0,0796	0,0757	0,0716	0,0815	0,0777	0,0723	0,0762	0,0712	0,0658
831,0	0,0796	0,0757	0,0717	0,0815	0,0777	0,0723	0,0762	0,0712	0,0660
832,1	0,0796	0,0757	0,0717	0,0815	0,0777	0,0724	0,0763	0,0713	0,0662
833,1	0,0796	0,0757	0,0717	0,0816	0,0777	0,0724	0,0763	0,0714	0,0664
834,0	0,0796	0,0757	0,0717	0,0816	0,0777	0,0724	0,0764	0,0715	0,0665
835,1	0,0797	0,0758	0,0717	0,0816	0,0778	0,0724	0,0764	0,0715	0,0667
836,1	0,0797	0,0758	0,0718	0,0816	0,0778	0,0724	0,0765	0,0716	0,0668
837,0	0,0797	0,0758	0,0718	0,0816	0,0778	0,0725	0,0765	0,0717	0,0670
838,1	0,0797	0,0758	0,0718	0,0817	0,0778	0,0725	0,0765	0,0717	0,0671
839,1	0,0797	0,0758	0,0718	0,0817	0,0778	0,0725	0,0766	0,0718	0,0673
840,0	0,0797	0,0758	0,0718	0,0817	0,0778	0,0725	0,0766	0,0718	0,0674
841,1	0,0797	0,0759	0,0719	0,0817	0,0779	0,0725	0,0767	0,0719	0,0675
842,1	0,0798	0,0759	0,0719	0,0817	0,0779	0,0725	0,0767	0,0719	0,0676
843,0	0,0798	0,0759	0,0719	0,0818	0,0779	0,0726	0,0767	0,0720	0,0678
844,1	0,0798	0,0759	0,0719	0,0818	0,0779	0,0726	0,0768	0,0720	0,0679
845,1	0,0798	0,0759	0,0719	0,0818	0,0779	0,0726	0,0768	0,0721	0,0680
846,0	0,0798	0,0759	0,0719	0,0818	0,0779	0,0726	0,0768	0,0721	0,0681

847,1	0,0798	0,0760	0,0720	0,0818	0,0779	0,0726	0,0769	0,0722	0,0682
848,1	0,0798	0,0760	0,0720	0,0819	0,0780	0,0726	0,0769	0,0722	0,0683
849,0	0,0798	0,0760	0,0720	0,0819	0,0780	0,0726	0,0769	0,0723	0,0684
850,1	0,0798	0,0760	0,0720	0,0819	0,0780	0,0727	0,0770	0,0723	0,0685
851,1	0,0798	0,0760	0,0720	0,0819	0,0780	0,0727	0,0770	0,0723	0,0685
852,0	0,0799	0,0760	0,0720	0,0819	0,0780	0,0727	0,0770	0,0724	0,0686
853,1	0,0799	0,0761	0,0720	0,0819	0,0780	0,0727	0,0771	0,0724	0,0687
854,1	0,0799	0,0761	0,0721	0,0820	0,0780	0,0727	0,0771	0,0724	0,0688
855,0	0,0799	0,0761	0,0721	0,0820	0,0780	0,0727	0,0771	0,0725	0,0688
856,1	0,0799	0,0761	0,0721	0,0820	0,0780	0,0727	0,0772	0,0725	0,0689
857,1	0,0799	0,0761	0,0721	0,0820	0,0781	0,0728	0,0772	0,0725	0,0689
858,0	0,0799	0,0761	0,0721	0,0820	0,0781	0,0728	0,0772	0,0726	0,0690
859,1	0,0799	0,0761	0,0721	0,0820	0,0781	0,0728	0,0772	0,0726	0,0690
860,1	0,0799	0,0761	0,0721	0,0821	0,0781	0,0728	0,0773	0,0726	0,0691
861,0	0,0799	0,0762	0,0722	0,0821	0,0781	0,0728	0,0773	0,0726	0,0691
862,1	0,0799	0,0762	0,0722	0,0821	0,0781	0,0728	0,0773	0,0727	0,0691
863,1	0,0800	0,0762	0,0722	0,0821	0,0781	0,0728	0,0774	0,0727	0,0692
864,0	0,0800	0,0762	0,0722	0,0821	0,0781	0,0728	0,0774	0,0727	0,0692
865,1	0,0800	0,0762	0,0722	0,0821	0,0781	0,0728	0,0774	0,0727	0,0693
866,1	0,0800	0,0762	0,0722	0,0821	0,0781	0,0729	0,0774	0,0728	0,0693
867,0	0,0800	0,0762	0,0722	0,0821	0,0782	0,0729	0,0775	0,0728	0,0693
868,1	0,0800	0,0762	0,0722	0,0822	0,0782	0,0729	0,0775	0,0728	0,0694
869,1	0,0800	0,0762	0,0722	0,0822	0,0782	0,0729	0,0775	0,0728	0,0694
870,0	0,0800	0,0763	0,0723	0,0822	0,0782	0,0729	0,0775	0,0728	0,0694
871,1	0,0800	0,0763	0,0723	0,0822	0,0782	0,0729	0,0775	0,0728	0,0694
872,1	0,0800	0,0763	0,0723	0,0822	0,0782	0,0729	0,0776	0,0729	0,0695
873,0	0,0800	0,0763	0,0723	0,0822	0,0782	0,0729	0,0776	0,0729	0,0695
874,1	0,0800	0,0763	0,0723	0,0822	0,0782	0,0729	0,0776	0,0729	0,0695
875,1	0,0800	0,0763	0,0723	0,0822	0,0782	0,0729	0,0776	0,0729	0,0695
876,0	0,0800	0,0763	0,0723	0,0823	0,0782	0,0730	0,0777	0,0729	0,0696

877,1	0,0800	0,0763	0,0723	0,0823	0,0782	0,0730	0,0777	0,0730	0,0696
878,1	0,0800	0,0763	0,0723	0,0823	0,0783	0,0730	0,0777	0,0730	0,0696
879,0	0,0801	0,0763	0,0723	0,0823	0,0783	0,0730	0,0777	0,0730	0,0696
880,1	0,0801	0,0763	0,0723	0,0823	0,0783	0,0730	0,0777	0,0730	0,0696

ANEXO C: DATOS NO

	2000/350	2000/400	2000/450	2840/350	2840/400	2840/450	3600/350	3600/400	3600/450
Crank angle (deg)	NO (g/kgfuel)	NO (g/kgfuel)	NO (g/kgfuel)	NO (g/kgfuel)	NO (g/kgfuel)	NO (g/kgfuel)	NO (g/kgfuel)	NO (g/kgfuel)	NO (g/kgfuel)
708,05	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
709,01	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
710,09	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
711,05	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
712,01	0,0002	0,0002	0,0001	0,0003	0,0002	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
713,09	0,0006	0,0005	0,0002	0,0007	0,0004	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000
714,05	0,0012	0,0010	0,0006	0,0017	0,0010	0,0005	0,0001	0,0000	0,0000
715,00	0,0019	0,0017	0,0011	0,0033	0,0018	0,0012	0,0001	0,0001	0,0001
716,08	0,0031	0,0029	0,0018	0,0062	0,0032	0,0021	0,0001	0,0001	0,0001
717,04	0,0047	0,0044	0,0029	0,0092	0,0052	0,0034	0,0002	0,0002	0,0001
718,12	0,0073	0,0067	0,0043	0,0140	0,0080	0,0053	0,0003	0,0002	0,0002
719,08	0,0104	0,0095	0,0062	0,0209	0,0118	0,0078	0,0004	0,0003	0,0002
720,04	0,0144	0,0130	0,0090	0,0289	0,0167	0,0112	0,0006	0,0004	0,0003
721,12	0,0205	0,0182	0,0121	0,0385	0,0228	0,0153	0,0009	0,0005	0,0005
722,08	0,0276	0,0241	0,0161	0,0519	0,0302	0,0203	0,0016	0,0007	0,0005
723,04	0,0364	0,0314	0,0218	0,0673	0,0377	0,0253	0,0026	0,0011	0,0007
724,12	0,0489	0,0414	0,0280	0,0857	0,0481	0,0323	0,0037	0,0015	0,0009
725,08	0,0628	0,0522	0,0355	0,1037	0,0610	0,0403	0,0056	0,0023	0,0012
726,04	0,0799	0,0651	0,0456	0,1284	0,0747	0,0496	0,0075	0,0031	0,0017
727,12	0,1028	0,0823	0,0561	0,1564	0,0908	0,0600	0,0103	0,0044	0,0022

728,08	0,1277	0,1006	0,0684	0,1890	0,1090	0,0713	0,0136	0,0059	0,0030
729,04	0,1580	0,1227	0,0850	0,2263	0,1300	0,0841	0,0168	0,0074	0,0039
730,12	0,1989	0,1518	0,1024	0,2694	0,1537	0,0981	0,0212	0,0092	0,0048
731,08	0,2427	0,1816	0,1222	0,3188	0,1756	0,1108	0,0262	0,0115	0,0060
732,04	0,2961	0,2164	0,1474	0,3656	0,2052	0,1276	0,0307	0,0140	0,0073
733,12	0,3685	0,2613	0,1731	0,4287	0,2381	0,1460	0,0368	0,0163	0,0085
734,08	0,4453	0,3068	0,2017	0,4996	0,2746	0,1660	0,0432	0,0194	0,0100
735,04	0,5357	0,3576	0,2376	0,5781	0,3144	0,1877	0,0488	0,0220	0,0116
736,12	0,6511	0,4203	0,2720	0,6639	0,3577	0,2109	0,0561	0,0256	0,0130
737,08	0,7665	0,4803	0,3082	0,7555	0,4037	0,2356	0,0624	0,0293	0,0148
738,04	0,8898	0,5432	0,3505	0,8528	0,4443	0,2570	0,0705	0,0324	0,0162
739,12	1,0310	0,6149	0,3884	0,9538	0,4949	0,2838	0,0791	0,0365	0,0181
740,00	1,1478	0,6727	0,4259	1,0390	0,5454	0,3102	0,0861	0,0399	0,0197
741,04	1,2711	0,7374	0,4659	1,1419	0,5982	0,3380	0,0952	0,0442	0,0215
742,00	1,3675	0,7916	0,4991	1,2419	0,6517	0,3662	0,1050	0,0487	0,0233
743,08	1,4561	0,8465	0,5296	1,3377	0,7047	0,3946	0,1132	0,0525	0,0248
744,04	1,5170	0,8882	0,5598	1,4265	0,7556	0,4223	0,1237	0,0575	0,0268
745,00	1,5614	0,9223	0,5823	1,5068	0,8036	0,4487	0,1347	0,0615	0,0286
746,08	1,5949	0,9522	0,6013	1,5779	0,8486	0,4738	0,1437	0,0667	0,0302
747,04	1,6115	0,9714	0,6183	1,6391	0,8883	0,4969	0,1548	0,0719	0,0321
748,00	1,6188	0,9845	0,6296	1,6833	0,9247	0,5180	0,1664	0,0762	0,0340
749,08	1,6178	0,9930	0,6378	1,7280	0,9518	0,5338	0,1759	0,0817	0,0355
750,04	1,6112	0,9961	0,6439	1,7637	0,9802	0,5507	0,1878	0,0872	0,0374
751,00	1,6000	0,9958	0,6468	1,7913	1,0040	0,5653	0,1973	0,0917	0,0389
752,08	1,5834	0,9923	0,6478	1,8113	1,0238	0,5779	0,2094	0,0974	0,0407
753,04	1,5670	0,9872	0,6470	1,8245	1,0397	0,5885	0,2213	0,1030	0,0423
754,00	1,5497	0,9807	0,6451	1,8322	1,0522	0,5973	0,2307	0,1075	0,0435
755,08	1,5294	0,9723	0,6424	1,8350	1,0613	0,6042	0,2421	0,1131	0,0451
756,04	1,5113	0,9643	0,6385	1,8344	1,0670	0,6089	0,2530	0,1176	0,0465
757,00	1,4937	0,9560	0,6344	1,8308	1,0714	0,6131	0,2609	0,1225	0,0475

758,08	1,4755	0,9466	0,6300	1,8248	1,0733	0,6160	0,2702	0,1275	0,0487
759,04	1,4601	0,9383	0,6249	1,8170	1,0733	0,6178	0,2771	0,1313	0,0497
760,00	1,4455	0,9300	0,6204	1,8076	1,0720	0,6184	0,2851	0,1362	0,0510
761,08	1,4300	0,9209	0,6159	1,7970	1,0696	0,6184	0,2922	0,1408	0,0522
762,04	1,4171	0,9131	0,6106	1,7859	1,0662	0,6176	0,2973	0,1443	0,0532
763,00	1,4048	0,9055	0,6060	1,7763	1,0622	0,6163	0,3029	0,1482	0,0543
764,08	1,3919	0,8971	0,6015	1,7647	1,0585	0,6148	0,3078	0,1513	0,0553
765,04	1,3810	0,8900	0,5966	1,7531	1,0536	0,6127	0,3110	0,1548	0,0561
766,00	1,3708	0,8829	0,5924	1,7415	1,0482	0,6103	0,3145	0,1579	0,0570
767,08	1,3599	0,8754	0,5883	1,7307	1,0429	0,6078	0,3174	0,1603	0,0577
768,04	1,3509	0,8690	0,5838	1,7206	1,0375	0,6051	0,3194	0,1628	0,0585
769,00	1,3423	0,8629	0,5800	1,7110	1,0322	0,6023	0,3215	0,1651	0,0592
770,08	1,3333	0,8565	0,5764	1,7018	1,0270	0,5995	0,3229	0,1667	0,0598
771,04	1,3258	0,8512	0,5725	1,6943	1,0227	0,5972	0,3243	0,1685	0,0605
772,00	1,3188	0,8458	0,5693	1,6855	1,0177	0,5943	0,3253	0,1698	0,0611
773,08	1,3115	0,8401	0,5663	1,6770	1,0129	0,5915	0,3259	0,1712	0,0615
774,04	1,3054	0,8355	0,5631	1,6691	1,0082	0,5887	0,3265	0,1725	0,0621
775,00	1,2997	0,8312	0,5606	1,6613	1,0037	0,5860	0,3269	0,1733	0,0626
776,08	1,2936	0,8269	0,5582	1,6538	0,9993	0,5836	0,3270	0,1742	0,0630
777,04	1,2881	0,8234	0,5557	1,6468	0,9951	0,5813	0,3271	0,1750	0,0634
778,00	1,2830	0,8201	0,5537	1,6408	0,9911	0,5792	0,3270	0,1756	0,0637
779,08	1,2776	0,8167	0,5518	1,6362	0,9879	0,5776	0,3268	0,1761	0,0640
780,04	1,2731	0,8138	0,5498	1,6311	0,9838	0,5757	0,3265	0,1766	0,0643
781,00	1,2688	0,8112	0,5481	1,6261	0,9795	0,5740	0,3263	0,1769	0,0645
782,08	1,2642	0,8084	0,5466	1,6213	0,9755	0,5724	0,3258	0,1772	0,0648
783,04	1,2604	0,8061	0,5450	1,6167	0,9718	0,5709	0,3254	0,1774	0,0650
784,00	1,2567	0,8038	0,5437	1,6125	0,9684	0,5695	0,3250	0,1776	0,0652
785,08	1,2529	0,8015	0,5424	1,6085	0,9653	0,5681	0,3245	0,1778	0,0654
786,04	1,2495	0,7996	0,5411	1,6054	0,9624	0,5669	0,3241	0,1778	0,0655
787,00	1,2464	0,7978	0,5400	1,6018	0,9599	0,5659	0,3236	0,1778	0,0657

788,08	1,2431	0,7958	0,5389	1,5984	0,9571	0,5648	0,3230	0,1778	0,0659
789,04	1,2403	0,7942	0,5377	1,5951	0,9548	0,5637	0,3226	0,1777	0,0660
790,00	1,2375	0,7926	0,5368	1,5920	0,9528	0,5627	0,3220	0,1776	0,0661
791,08	1,2345	0,7909	0,5359	1,5890	0,9509	0,5618	0,3213	0,1775	0,0663
792,04	1,2320	0,7894	0,5349	1,5862	0,9491	0,5609	0,3207	0,1774	0,0664
793,00	1,2295	0,7880	0,5341	1,5835	0,9475	0,5600	0,3200	0,1772	0,0665
794,08	1,2269	0,7865	0,5333	1,5814	0,9462	0,5592	0,3194	0,1771	0,0666
795,04	1,2246	0,7852	0,5324	1,5789	0,9447	0,5585	0,3188	0,1769	0,0667
796,00	1,2223	0,7840	0,5316	1,5765	0,9434	0,5579	0,3182	0,1767	0,0668
797,08	1,2199	0,7827	0,5309	1,5743	0,9421	0,5572	0,3178	0,1765	0,0669
798,04	1,2179	0,7816	0,5301	1,5720	0,9408	0,5565	0,3173	0,1763	0,0670
799,00	1,2159	0,7804	0,5295	1,5699	0,9396	0,5559	0,3167	0,1761	0,0671
800,00	1,2139	0,7793	0,5288	1,5681	0,9387	0,5554	0,3163	0,1759	0,0671
801,03	1,2119	0,7782	0,5281	1,5660	0,9374	0,5548	0,3158	0,1756	0,0671
802,11	1,2098	0,7771	0,5275	1,5641	0,9365	0,5543	0,3153	0,1754	0,0671
803,07	1,2080	0,7761	0,5269	1,5623	0,9354	0,5538	0,3149	0,1751	0,0672
804,03	1,2063	0,7752	0,5263	1,5608	0,9344	0,5533	0,3145	0,1749	0,0672
805,11	1,2044	0,7742	0,5257	1,5591	0,9334	0,5528	0,3141	0,1746	0,0672
806,07	1,2028	0,7733	0,5252	1,5574	0,9325	0,5523	0,3137	0,1744	0,0672
807,03	1,2011	0,7724	0,5246	1,5558	0,9316	0,5519	0,3134	0,1742	0,0672
808,11	1,1994	0,7715	0,5240	1,5542	0,9307	0,5514	0,3130	0,1740	0,0672
809,07	1,1978	0,7707	0,5235	1,5526	0,9299	0,5511	0,3128	0,1738	0,0672
810,03	1,1963	0,7699	0,5230	1,5510	0,9292	0,5506	0,3125	0,1736	0,0672
811,11	1,1946	0,7690	0,5225	1,5496	0,9284	0,5502	0,3122	0,1734	0,0672
812,07	1,1932	0,7682	0,5221	1,5484	0,9277	0,5498	0,3119	0,1732	0,0672
813,03	1,1917	0,7675	0,5215	1,5469	0,9269	0,5495	0,3116	0,1730	0,0673
814,11	1,1902	0,7667	0,5211	1,5456	0,9262	0,5491	0,3114	0,1728	0,0673
815,07	1,1888	0,7660	0,5207	1,5442	0,9255	0,5487	0,3111	0,1727	0,0673
816,03	1,1874	0,7653	0,5202	1,5429	0,9248	0,5484	0,3109	0,1725	0,0674
817,11	1,1860	0,7645	0,5198	1,5416	0,9241	0,5481	0,3106	0,1723	0,0674

818,07	1,1847	0,7638	0,5194	1,5403	0,9236	0,5477	0,3104	0,1721	0,0674
819,03	1,1835	0,7632	0,5190	1,5391	0,9230	0,5474	0,3102	0,1720	0,0674
820,11	1,1821	0,7624	0,5186	1,5380	0,9224	0,5471	0,3099	0,1719	0,0675
821,07	1,1809	0,7618	0,5182	1,5368	0,9218	0,5468	0,3097	0,1717	0,0675
822,03	1,1797	0,7612	0,5178	1,5356	0,9212	0,5465	0,3095	0,1716	0,0676
823,11	1,1784	0,7605	0,5174	1,5344	0,9206	0,5462	0,3093	0,1715	0,0676
824,07	1,1773	0,7599	0,5170	1,5332	0,9200	0,5460	0,3091	0,1714	0,0677
825,03	1,1762	0,7593	0,5167	1,5320	0,9196	0,5457	0,3089	0,1713	0,0677
826,11	1,1749	0,7587	0,5163	1,5309	0,9191	0,5454	0,3088	0,1712	0,0678
827,07	1,1739	0,7581	0,5160	1,5300	0,9185	0,5451	0,3086	0,1710	0,0678
828,03	1,1728	0,7576	0,5156	1,5289	0,9180	0,5449	0,3084	0,1710	0,0679
829,11	1,1716	0,7570	0,5153	1,5278	0,9175	0,5446	0,3082	0,1709	0,0679
830,07	1,1705	0,7564	0,5149	1,5267	0,9170	0,5443	0,3081	0,1708	0,0680
831,03	1,1695	0,7559	0,5146	1,5257	0,9165	0,5441	0,3079	0,1707	0,0680
832,11	1,1684	0,7553	0,5143	1,5247	0,9160	0,5439	0,3077	0,1706	0,0681
833,07	1,1673	0,7548	0,5140	1,5237	0,9156	0,5436	0,3076	0,1705	0,0681
834,03	1,1663	0,7543	0,5136	1,5227	0,9152	0,5434	0,3074	0,1704	0,0682
835,11	1,1652	0,7537	0,5133	1,5219	0,9147	0,5432	0,3073	0,1703	0,0682
836,07	1,1642	0,7533	0,5130	1,5209	0,9143	0,5429	0,3072	0,1702	0,0683
837,03	1,1633	0,7528	0,5127	1,5199	0,9138	0,5427	0,3070	0,1701	0,0683
838,11	1,1622	0,7522	0,5124	1,5190	0,9134	0,5425	0,3069	0,1701	0,0683
839,07	1,1612	0,7518	0,5121	1,5181	0,9129	0,5423	0,3068	0,1700	0,0683
840,03	1,1603	0,7513	0,5118	1,5172	0,9126	0,5421	0,3067	0,1699	0,0684
841,11	1,1593	0,7508	0,5115	1,5162	0,9121	0,5419	0,3066	0,1698	0,0684
842,07	1,1584	0,7504	0,5112	1,5155	0,9117	0,5417	0,3064	0,1698	0,0684
843,03	1,1575	0,7499	0,5109	1,5146	0,9113	0,5414	0,3063	0,1697	0,0684
844,11	1,1564	0,7494	0,5107	1,5137	0,9109	0,5412	0,3062	0,1696	0,0684
845,07	1,1556	0,7490	0,5104	1,5129	0,9105	0,5410	0,3061	0,1696	0,0685
846,03	1,1547	0,7486	0,5101	1,5120	0,9101	0,5408	0,3060	0,1695	0,0685
847,11	1,1537	0,7481	0,5099	1,5112	0,9097	0,5407	0,3059	0,1695	0,0685

848,07	1,1528	0,7477	0,5096	1,5103	0,9094	0,5405	0,3058	0,1694	0,0685
849,03	1,1520	0,7473	0,5093	1,5095	0,9090	0,5403	0,3057	0,1693	0,0685
850,11	1,1510	0,7468	0,5091	1,5088	0,9086	0,5401	0,3056	0,1693	0,0684
851,07	1,1502	0,7464	0,5088	1,5080	0,9083	0,5399	0,3055	0,1692	0,0684
852,03	1,1494	0,7460	0,5085	1,5072	0,9079	0,5397	0,3054	0,1692	0,0684
853,11	1,1485	0,7455	0,5083	1,5064	0,9075	0,5395	0,3053	0,1691	0,0684
854,07	1,1477	0,7452	0,5081	1,5056	0,9072	0,5394	0,3052	0,1690	0,0684
855,03	1,1469	0,7448	0,5078	1,5048	0,9068	0,5392	0,3051	0,1690	0,0683
856,11	1,1460	0,7443	0,5076	1,5041	0,9065	0,5390	0,3050	0,1690	0,0683
857,07	1,1452	0,7440	0,5073	1,5033	0,9062	0,5389	0,3049	0,1689	0,0683
858,03	1,1445	0,7436	0,5071	1,5027	0,9058	0,5387	0,3048	0,1689	0,0683
859,11	1,1436	0,7432	0,5069	1,5019	0,9055	0,5385	0,3047	0,1688	0,0682
860,07	1,1429	0,7428	0,5066	1,5011	0,9051	0,5384	0,3047	0,1688	0,0682
861,03	1,1421	0,7425	0,5064	1,5004	0,9048	0,5382	0,3046	0,1687	0,0682
862,11	1,1413	0,7420	0,5062	1,4997	0,9045	0,5381	0,3045	0,1687	0,0681
863,07	1,1406	0,7417	0,5059	1,4989	0,9042	0,5379	0,3044	0,1686	0,0681
864,03	1,1398	0,7413	0,5057	1,4982	0,9038	0,5377	0,3043	0,1686	0,0681
865,11	1,1390	0,7410	0,5055	1,4976	0,9035	0,5376	0,3042	0,1685	0,0681
866,07	1,1383	0,7406	0,5053	1,4969	0,9032	0,5374	0,3041	0,1685	0,0680
867,03	1,1376	0,7403	0,5050	1,4962	0,9029	0,5373	0,3041	0,1685	0,0680
868,11	1,1368	0,7399	0,5048	1,4955	0,9026	0,5371	0,3040	0,1684	0,0680
869,07	1,1362	0,7396	0,5046	1,4948	0,9023	0,5369	0,3039	0,1684	0,0679
870,03	1,1355	0,7392	0,5044	1,4941	0,9019	0,5368	0,3038	0,1683	0,0679
871,11	1,1347	0,7389	0,5042	1,4934	0,9017	0,5367	0,3038	0,1683	0,0679
872,07	1,1340	0,7386	0,5040	1,4927	0,9014	0,5365	0,3037	0,1683	0,0678
873,03	1,1334	0,7382	0,5037	1,4922	0,9011	0,5364	0,3036	0,1682	0,0678
874,11	1,1326	0,7379	0,5035	1,4915	0,9008	0,5362	0,3035	0,1682	0,0678
875,07	1,1320	0,7376	0,5034	1,4908	0,9005	0,5361	0,3034	0,1682	0,0678
876,03	1,1313	0,7373	0,5031	1,4902	0,9002	0,5359	0,3034	0,1681	0,0677
877,11	1,1306	0,7369	0,5029	1,4895	0,8999	0,5358	0,3033	0,1681	0,0677

878,07	1,1300	0,7366	0,5027	1,4889	0,8996	0,5357	0,3032	0,1681	0,0677
879,03	1,1294	0,7363	0,5025	1,4882	0,8994	0,5355	0,3032	0,1680	0,0676
880,11	1,1287	0,7360	0,5024	1,4878	0,8991	0,5354	0,3031	0,1680	0,0676

ANEXO D: DATOS NO₂

	2000/350	2000/400	2000/450	2840/350	2840/400	2840/450	3600/350	3600/400	3600/450
Crank angle (deg)	NO2 (g/kgfuel)	NO2 (g/kgfuel)	NO2 (g/kgfuel)	NO2 (g/kgfuel)	NO2 (g/kgfuel)	NO2 (g/kgfuel)	NO2 (g/kgfuel)	NO2 (g/kgfuel)	NO2 (g/kgfuel)
704,02	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
705,00	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
706,01	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
707,09	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
708,05	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
709,01	0,000000	0,000000	0,000001	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
710,09	0,000001	0,000001	0,000001	0,000002	0,000001	0,000000	0,000000	0,000000	0,000000
711,05	0,000004	0,000003	0,000003	0,000006	0,000003	0,000002	0,000000	0,000000	0,000000
712,01	0,000010	0,000009	0,000007	0,000016	0,000008	0,000007	0,000002	0,000002	0,000001
713,09	0,000022	0,000021	0,000013	0,000034	0,000020	0,000018	0,000005	0,000004	0,000003
714,05	0,000049	0,000042	0,000027	0,000074	0,000044	0,000032	0,000010	0,000008	0,000007
715,00	0,000077	0,000070	0,000047	0,000139	0,000078	0,000058	0,000019	0,000012	0,000012
716,08	0,000121	0,000113	0,000077	0,000264	0,000141	0,000101	0,000031	0,000021	0,000021
717,04	0,000172	0,000161	0,000119	0,000382	0,000224	0,000162	0,000049	0,000035	0,000029
718,12	0,000248	0,000233	0,000170	0,000564	0,000333	0,000240	0,000071	0,000051	0,000042
719,08	0,000326	0,000305	0,000225	0,000781	0,000468	0,000335	0,000112	0,000078	0,000056
720,04	0,000409	0,000381	0,000289	0,001016	0,000625	0,000449	0,000146	0,000112	0,000078
721,12	0,000513	0,000474	0,000348	0,001221	0,000786	0,000571	0,000166	0,000140	0,000106
722,08	0,000613	0,000558	0,000407	0,001492	0,000951	0,000698	0,000202	0,000164	0,000130
723,04	0,000717	0,000638	0,000475	0,001711	0,001081	0,000799	0,000257	0,000184	0,000153
724,12	0,000821	0,000717	0,000531	0,001891	0,001213	0,000915	0,000315	0,000206	0,000165

725,08	0,000894	0,000760	0,000574	0,002014	0,001312	0,001013	0,000403	0,000241	0,000175
726,04	0,000936	0,000776	0,000598	0,002096	0,001387	0,001083	0,000470	0,000273	0,000188
727,12	0,000973	0,000793	0,000619	0,002162	0,001433	0,001131	0,000569	0,000318	0,000202
728,08	0,000977	0,000792	0,000619	0,002154	0,001461	0,001155	0,000673	0,000375	0,000225
729,04	0,000969	0,000786	0,000621	0,002122	0,001475	0,001166	0,000757	0,000419	0,000256
730,12	0,000947	0,000756	0,000612	0,002066	0,001464	0,001155	0,000846	0,000463	0,000276
731,08	0,000927	0,000724	0,000604	0,002002	0,001449	0,001149	0,000923	0,000507	0,000302
732,04	0,000908	0,000691	0,000580	0,001942	0,001419	0,001125	0,000977	0,000549	0,000328
733,12	0,000882	0,000655	0,000539	0,001856	0,001364	0,001072	0,001033	0,000573	0,000346
734,08	0,000867	0,000641	0,000511	0,001788	0,001311	0,001014	0,001082	0,000606	0,000366
735,04	0,000851	0,000636	0,000484	0,001705	0,001248	0,000932	0,001107	0,000626	0,000381
736,12	0,000815	0,000639	0,000471	0,001639	0,001200	0,000860	0,001134	0,000649	0,000393
737,08	0,000737	0,000624	0,000466	0,001559	0,001142	0,000792	0,001148	0,000673	0,000407
738,04	0,000661	0,000600	0,000437	0,001465	0,001091	0,000745	0,001159	0,000692	0,000419
739,12	0,000579	0,000564	0,000415	0,001390	0,001027	0,000693	0,001161	0,000709	0,000433
740,00	0,000503	0,000514	0,000388	0,001323	0,000952	0,000641	0,001145	0,000703	0,000437
741,04	0,000438	0,000471	0,000355	0,001257	0,000905	0,000602	0,001132	0,000723	0,000457
742,00	0,000382	0,000420	0,000321	0,001182	0,000845	0,000563	0,001097	0,000722	0,000466
743,08	0,000331	0,000357	0,000285	0,001098	0,000785	0,000520	0,001068	0,000723	0,000474
744,04	0,000295	0,000304	0,000246	0,001014	0,000722	0,000479	0,001020	0,000722	0,000479
745,00	0,000264	0,000259	0,000212	0,000926	0,000653	0,000434	0,000980	0,000718	0,000481
746,08	0,000234	0,000215	0,000180	0,000844	0,000590	0,000393	0,000950	0,000711	0,000483
747,04	0,000211	0,000185	0,000150	0,000762	0,000526	0,000354	0,000916	0,000703	0,000483
748,00	0,000190	0,000158	0,000126	0,000698	0,000466	0,000319	0,000873	0,000692	0,000482
749,08	0,000169	0,000134	0,000106	0,000627	0,000421	0,000293	0,000839	0,000676	0,000481
750,04	0,000152	0,000115	0,000086	0,000564	0,000372	0,000262	0,000797	0,000665	0,000480
751,00	0,000137	0,000100	0,000072	0,000508	0,000326	0,000237	0,000763	0,000658	0,000479
752,08	0,000122	0,000086	0,000061	0,000462	0,000285	0,000210	0,000726	0,000648	0,000477
753,04	0,000111	0,000076	0,000051	0,000423	0,000252	0,000188	0,000686	0,000638	0,000474
754,00	0,000101	0,000068	0,000044	0,000390	0,000224	0,000166	0,000655	0,000626	0,000471

755,08	0,000090	0,000059	0,000038	0,000364	0,000200	0,000148	0,000615	0,000611	0,000466
756,04	0,000082	0,000053	0,000033	0,000346	0,000183	0,000134	0,000577	0,000600	0,000463
757,00	0,000075	0,000047	0,000029	0,000325	0,000167	0,000119	0,000544	0,000580	0,000459
758,08	0,000067	0,000042	0,000026	0,000306	0,000153	0,000106	0,000504	0,000558	0,000454
759,04	0,000061	0,000038	0,000023	0,000288	0,000141	0,000096	0,000473	0,000537	0,000449
760,00	0,000056	0,000034	0,000021	0,000274	0,000132	0,000087	0,000436	0,000512	0,000443
761,08	0,000051	0,000031	0,000019	0,000261	0,000123	0,000079	0,000403	0,000489	0,000440
762,04	0,000046	0,000028	0,000017	0,000249	0,000116	0,000071	0,000379	0,000472	0,000437
763,00	0,000042	0,000025	0,000015	0,000240	0,000109	0,000065	0,000351	0,000448	0,000433
764,08	0,000039	0,000023	0,000014	0,000229	0,000104	0,000060	0,000324	0,000430	0,000427
765,04	0,000035	0,000021	0,000013	0,000219	0,000098	0,000055	0,000302	0,000409	0,000422
766,00	0,000033	0,000020	0,000012	0,000210	0,000093	0,000051	0,000275	0,000391	0,000414
767,08	0,000029	0,000019	0,000011	0,000202	0,000088	0,000047	0,000249	0,000377	0,000408
768,04	0,000027	0,000018	0,000010	0,000194	0,000083	0,000043	0,000228	0,000362	0,000400
769,00	0,000025	0,000018	0,000010	0,000186	0,000079	0,000040	0,000204	0,000345	0,000391
770,08	0,000023	0,000016	0,000009	0,000179	0,000076	0,000037	0,000185	0,000332	0,000385
771,04	0,000021	0,000017	0,000010	0,000174	0,000072	0,000035	0,000165	0,000315	0,000378
772,00	0,000019	0,000014	0,000008	0,000168	0,000069	0,000033	0,000146	0,000301	0,000370
773,08	0,000017	0,000014	0,000008	0,000163	0,000066	0,000031	0,000134	0,000285	0,000362
774,04	0,000016	0,000014	0,000008	0,000157	0,000063	0,000030	0,000120	0,000270	0,000353
775,00	0,000015	0,000014	0,000008	0,000153	0,000060	0,000028	0,000106	0,000259	0,000343
776,08	0,000014	0,000014	0,000008	0,000149	0,000057	0,000027	0,000097	0,000244	0,000336
777,04	0,000015	0,000015	0,000008	0,000146	0,000055	0,000026	0,000086	0,000232	0,000327
778,00	0,000014	0,000014	0,000009	0,000142	0,000053	0,000025	0,000079	0,000222	0,000319
779,08	0,000013	0,000014	0,000010	0,000139	0,000051	0,000025	0,000071	0,000211	0,000310
780,04	0,000013	0,000013	0,000010	0,000138	0,000050	0,000025	0,000065	0,000200	0,000301
781,00	0,000012	0,000013	0,000010	0,000134	0,000050	0,000024	0,000061	0,000191	0,000294
782,08	0,000011	0,000015	0,000010	0,000130	0,000048	0,000024	0,000056	0,000181	0,000286
783,04	0,000010	0,000018	0,000010	0,000130	0,000047	0,000025	0,000052	0,000173	0,000277
784,00	0,000010	0,000020	0,000011	0,000128	0,000045	0,000025	0,000049	0,000163	0,000271

785,08	0,000009	0,000021	0,000012	0,000128	0,000043	0,000026	0,000045	0,000153	0,000262
786,04	0,000009	0,000021	0,000013	0,000130	0,000042	0,000028	0,000043	0,000146	0,000256
787,00	0,000008	0,000021	0,000014	0,000129	0,000043	0,000028	0,000040	0,000138	0,000247
788,08	0,000010	0,000021	0,000014	0,000130	0,000044	0,000032	0,000038	0,000129	0,000239
789,04	0,000010	0,000021	0,000015	0,000129	0,000045	0,000033	0,000037	0,000123	0,000232
790,00	0,000010	0,000021	0,000016	0,000129	0,000046	0,000034	0,000035	0,000116	0,000224
791,08	0,000010	0,000022	0,000016	0,000129	0,000047	0,000033	0,000033	0,000110	0,000216
792,04	0,000009	0,000022	0,000016	0,000132	0,000048	0,000036	0,000032	0,000104	0,000210
793,00	0,000009	0,000022	0,000016	0,000132	0,000048	0,000036	0,000031	0,000099	0,000203
794,08	0,000009	0,000023	0,000016	0,000133	0,000051	0,000035	0,000029	0,000095	0,000197
795,04	0,000008	0,000024	0,000016	0,000135	0,000054	0,000037	0,000028	0,000090	0,000190
796,00	0,000008	0,000024	0,000016	0,000135	0,000057	0,000037	0,000027	0,000086	0,000183
797,08	0,000008	0,000025	0,000016	0,000140	0,000060	0,000036	0,000026	0,000083	0,000178
798,04	0,000007	0,000025	0,000018	0,000142	0,000064	0,000036	0,000025	0,000080	0,000172
799,00	0,000007	0,000025	0,000020	0,000144	0,000068	0,000036	0,000025	0,000078	0,000165
800,00	0,000007	0,000026	0,000022	0,000145	0,000069	0,000036	0,000025	0,000075	0,000161
801,03	0,000007	0,000025	0,000022	0,000140	0,000069	0,000036	0,000025	0,000074	0,000158
802,11	0,000006	0,000025	0,000022	0,000140	0,000072	0,000036	0,000024	0,000073	0,000155
803,07	0,000006	0,000025	0,000022	0,000143	0,000071	0,000036	0,000024	0,000072	0,000152
804,03	0,000006	0,000025	0,000023	0,000143	0,000070	0,000037	0,000024	0,000072	0,000149
805,11	0,000006	0,000025	0,000023	0,000143	0,000069	0,000038	0,000024	0,000072	0,000146
806,07	0,000006	0,000025	0,000023	0,000145	0,000067	0,000038	0,000024	0,000072	0,000142
807,03	0,000006	0,000025	0,000024	0,000147	0,000065	0,000038	0,000023	0,000072	0,000138
808,11	0,000006	0,000025	0,000024	0,000149	0,000064	0,000039	0,000023	0,000070	0,000134
809,07	0,000006	0,000025	0,000025	0,000151	0,000062	0,000039	0,000023	0,000069	0,000131
810,03	0,000006	0,000025	0,000025	0,000153	0,000060	0,000039	0,000023	0,000068	0,000127
811,11	0,000006	0,000025	0,000026	0,000156	0,000060	0,000040	0,000023	0,000067	0,000124
812,07	0,000006	0,000025	0,000026	0,000156	0,000059	0,000040	0,000023	0,000067	0,000120
813,03	0,000006	0,000025	0,000027	0,000157	0,000059	0,000041	0,000024	0,000066	0,000116
814,11	0,000006	0,000026	0,000027	0,000157	0,000061	0,000042	0,000024	0,000065	0,000113

815,07	0,000006	0,000026	0,000028	0,000158	0,000063	0,000042	0,000024	0,000064	0,000110
816,03	0,000006	0,000026	0,000028	0,000158	0,000064	0,000043	0,000025	0,000062	0,000107
817,11	0,000006	0,000026	0,000028	0,000159	0,000065	0,000044	0,000025	0,000060	0,000105
818,07	0,000006	0,000026	0,000029	0,000159	0,000066	0,000045	0,000025	0,000059	0,000103
819,03	0,000006	0,000027	0,000029	0,000160	0,000067	0,000045	0,000025	0,000057	0,000101
820,11	0,000006	0,000027	0,000030	0,000161	0,000069	0,000046	0,000025	0,000056	0,000099
821,07	0,000006	0,000027	0,000030	0,000161	0,000070	0,000047	0,000025	0,000055	0,000097
822,03	0,000006	0,000027	0,000031	0,000163	0,000070	0,000048	0,000025	0,000054	0,000095
823,11	0,000006	0,000028	0,000031	0,000163	0,000071	0,000049	0,000025	0,000055	0,000093
824,07	0,000006	0,000028	0,000032	0,000164	0,000071	0,000050	0,000026	0,000055	0,000091
825,03	0,000006	0,000028	0,000032	0,000165	0,000071	0,000051	0,000026	0,000056	0,000090
826,11	0,000006	0,000028	0,000033	0,000166	0,000072	0,000052	0,000027	0,000056	0,000088
827,07	0,000006	0,000028	0,000033	0,000167	0,000072	0,000054	0,000027	0,000057	0,000086
828,03	0,000006	0,000028	0,000034	0,000168	0,000073	0,000055	0,000029	0,000059	0,000084
829,11	0,000006	0,000029	0,000034	0,000171	0,000073	0,000056	0,000030	0,000063	0,000083
830,07	0,000006	0,000029	0,000035	0,000174	0,000074	0,000057	0,000030	0,000065	0,000081
831,03	0,000006	0,000029	0,000035	0,000176	0,000075	0,000059	0,000031	0,000066	0,000079
832,11	0,000006	0,000029	0,000036	0,000178	0,000075	0,000060	0,000032	0,000068	0,000077
833,07	0,000006	0,000029	0,000036	0,000180	0,000076	0,000061	0,000032	0,000069	0,000075
834,03	0,000006	0,000029	0,000037	0,000182	0,000077	0,000063	0,000032	0,000071	0,000073
835,11	0,000006	0,000030	0,000037	0,000184	0,000078	0,000065	0,000033	0,000073	0,000071
836,07	0,000006	0,000030	0,000038	0,000186	0,000078	0,000067	0,000033	0,000073	0,000070
837,03	0,000006	0,000030	0,000039	0,000187	0,000079	0,000069	0,000034	0,000072	0,000068
838,11	0,000006	0,000030	0,000039	0,000190	0,000080	0,000071	0,000034	0,000071	0,000067
839,07	0,000006	0,000031	0,000040	0,000191	0,000081	0,000072	0,000034	0,000070	0,000066
840,03	0,000006	0,000031	0,000040	0,000193	0,000081	0,000075	0,000035	0,000069	0,000064
841,11	0,000006	0,000031	0,000041	0,000195	0,000082	0,000077	0,000036	0,000068	0,000063
842,07	0,000006	0,000031	0,000041	0,000196	0,000083	0,000079	0,000036	0,000067	0,000062
843,03	0,000006	0,000031	0,000042	0,000198	0,000084	0,000081	0,000037	0,000066	0,000061
844,11	0,000006	0,000032	0,000043	0,000200	0,000085	0,000083	0,000037	0,000066	0,000060

845,07	0,000006	0,000032	0,000044	0,000202	0,000086	0,000084	0,000038	0,000066	0,000059
846,03	0,000006	0,000032	0,000045	0,000204	0,000087	0,000086	0,000038	0,000065	0,000058
847,11	0,000006	0,000032	0,000045	0,000205	0,000088	0,000088	0,000039	0,000065	0,000057
848,07	0,000006	0,000033	0,000046	0,000208	0,000089	0,000090	0,000039	0,000065	0,000057
849,03	0,000006	0,000033	0,000047	0,000209	0,000090	0,000092	0,000040	0,000064	0,000056
850,11	0,000006	0,000033	0,000047	0,000211	0,000091	0,000094	0,000040	0,000064	0,000056
851,07	0,000007	0,000033	0,000048	0,000213	0,000092	0,000095	0,000041	0,000064	0,000056
852,03	0,000007	0,000033	0,000048	0,000214	0,000093	0,000097	0,000042	0,000064	0,000055
853,11	0,000007	0,000034	0,000049	0,000217	0,000094	0,000099	0,000044	0,000063	0,000055
854,07	0,000007	0,000034	0,000049	0,000219	0,000095	0,000101	0,000045	0,000063	0,000055
855,03	0,000007	0,000034	0,000050	0,000221	0,000096	0,000103	0,000046	0,000063	0,000055
856,11	0,000007	0,000035	0,000051	0,000224	0,000097	0,000105	0,000047	0,000063	0,000055
857,07	0,000007	0,000035	0,000051	0,000227	0,000098	0,000107	0,000048	0,000063	0,000055
858,03	0,000007	0,000036	0,000052	0,000229	0,000099	0,000109	0,000049	0,000064	0,000055
859,11	0,000007	0,000036	0,000052	0,000231	0,000100	0,000111	0,000050	0,000064	0,000055
860,07	0,000007	0,000037	0,000053	0,000234	0,000101	0,000114	0,000051	0,000064	0,000055
861,03	0,000007	0,000037	0,000053	0,000237	0,000102	0,000116	0,000052	0,000065	0,000056
862,11	0,000007	0,000037	0,000053	0,000238	0,000103	0,000118	0,000053	0,000065	0,000056
863,07	0,000007	0,000037	0,000054	0,000241	0,000103	0,000120	0,000053	0,000065	0,000056
864,03	0,000007	0,000037	0,000054	0,000243	0,000104	0,000123	0,000054	0,000065	0,000057
865,11	0,000007	0,000038	0,000055	0,000244	0,000105	0,000125	0,000055	0,000066	0,000057
866,07	0,000007	0,000038	0,000055	0,000247	0,000106	0,000127	0,000056	0,000066	0,000057
867,03	0,000007	0,000038	0,000055	0,000249	0,000106	0,000129	0,000057	0,000066	0,000058
868,11	0,000007	0,000038	0,000056	0,000251	0,000108	0,000132	0,000058	0,000066	0,000058
869,07	0,000007	0,000038	0,000056	0,000253	0,000109	0,000134	0,000061	0,000066	0,000059
870,03	0,000007	0,000038	0,000057	0,000256	0,000109	0,000136	0,000063	0,000067	0,000059
871,11	0,000008	0,000039	0,000057	0,000259	0,000110	0,000138	0,000064	0,000067	0,000059
872,07	0,000008	0,000039	0,000057	0,000261	0,000111	0,000140	0,000066	0,000067	0,000060
873,03	0,000007	0,000039	0,000058	0,000263	0,000111	0,000143	0,000067	0,000067	0,000060
874,11	0,000007	0,000039	0,000058	0,000264	0,000112	0,000145	0,000068	0,000068	0,000060

875,07	0,000007	0,000039	0,000059	0,000267	0,000113	0,000147	0,000069	0,000068	0,000061
876,03	0,000007	0,000039	0,000059	0,000269	0,000114	0,000149	0,000069	0,000068	0,000061
877,11	0,000007	0,000039	0,000059	0,000271	0,000114	0,000151	0,000070	0,000069	0,000062
878,07	0,000007	0,000039	0,000060	0,000273	0,000116	0,000153	0,000071	0,000069	0,000062
879,03	0,000007	0,000040	0,000060	0,000275	0,000115	0,000156	0,000072	0,000070	0,000062
880,11	0,000007	0,000040	0,000061	0,000277	0,000117	0,000158	0,000073	0,000071	0,000063

ANEXO E: DATOS HNC

	2000/350	2000/400	2000/450	2840/350	2840/400	2840/450	3600/350	3600/400	3600/450
Crank angle (deg)	Unburnt Hydrocarbon (g/kgfuel)	Unburnt Hydrocarbon (g/kgfuel)	Unburnt Hydrocarbon (g/kgfuel)	Unburnt Hydrocarbon (g/kgfuel)	Unburnt Hydrocarbon (g/kgfuel)	Unburnt Hydrocarbon (g/kgfuel)	Unburnt Hydrocarbon (g/kgfuel)	Unburnt Hydrocarbon (g/kgfuel)	Unburnt Hydrocarbon (g/kgfuel)
415,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
416,02	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
417,05	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
418,01	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
419,09	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
420,00	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	14,5577	0,0000
421,08	10,0699	53,8463	93,1818	10,0301	46,1998	83,9728	8,6359	45,4053	73,3815
422,01	18,8309	96,9468	183,5253	17,6080	87,3499	155,0991	15,1320	77,2444	137,2867
423,03	26,4614	134,7357	243,4139	24,5218	119,5508	222,8906	23,9469	110,4418	189,0604
424,04	38,0951	165,6893	293,0270	32,2101	145,1587	271,4435	31,9170	135,0733	235,2564
425,01	47,3243	188,9960	333,9750	40,2579	166,1911	309,9850	41,4570	159,0760	274,9123
426,01	56,9129	210,8866	365,8617	48,1535	186,7921	342,0077	49,3109	181,5098	310,1918
427,02	65,2456	231,2005	422,2594	56,6671	213,5277	400,6119	58,0514	208,9014	369,0086
428,05	87,2447	291,1768	484,3276	75,9301	267,1969	461,5836	78,7248	262,4064	441,3806
429,04	141,5859	351,0885	528,7513	135,4965	329,6797	510,3344	137,6594	330,2189	490,3403
430,02	190,9303	394,4368	560,8615	189,8305	378,4975	546,6220	195,8868	382,1259	534,1914
431,01	239,1490	427,3948	587,3971	235,7259	412,9783	573,1927	246,3376	424,5740	564,1279
432,00	278,7675	460,3893	616,7685	265,5854	442,2820	598,7666	275,9296	456,3715	590,0935

433,01	307,9973	484,6648	639,0126	292,6365	467,4434	623,7287	305,9627	480,6522	612,4049
434,04	337,5430	509,4383	659,9227	315,1603	489,9716	645,9858	327,6179	504,2743	635,1064
435,01	361,7074	528,4154	679,0746	335,7404	512,8209	661,8079	345,7069	523,9936	654,5726
436,04	377,5576	548,6884	692,9072	358,6790	534,3960	678,2070	366,3967	543,4224	667,9507
437,04	394,1705	572,6601	706,4743	380,4870	552,6069	694,5676	385,3544	561,9671	682,3715
438,02	415,5285	586,2781	718,5064	398,2874	571,3198	709,7886	403,9116	576,3028	696,5174
439,03	442,6736	621,2871	751,6870	431,0824	605,8781	746,7362	433,0028	614,0789	731,2668
440,00	484,8138	660,1140	790,1204	469,9800	650,2096	783,2654	473,9358	655,6210	772,9847
441,04	523,0219	698,4103	820,9271	506,5966	687,7338	817,8282	508,6001	696,0078	807,4225
442,04	560,8557	735,0296	848,6121	547,2703	725,6872	848,9038	547,7324	731,2881	836,1781
443,00	594,4745	764,4849	871,6458	583,4893	756,8338	878,0448	587,2339	764,6498	865,2264
444,02	627,5875	798,3176	894,1207	621,5790	790,0907	902,3122	620,4566	798,1916	892,7257
445,04	662,4286	827,9414	913,6493	657,5484	819,9098	922,3298	662,3545	830,7310	915,2207
446,03	696,4619	854,3780	933,4343	691,1054	849,1161	942,1019	698,3693	857,6009	936,1659
447,01	729,1100	877,0816	948,2694	723,7993	879,0208	956,0142	730,6167	885,4051	949,7777
448,00	757,0387	897,0676	957,5733	755,0580	898,3193	963,9134	762,3830	905,1134	958,3413
449,01	781,4911	912,4421	964,3551	778,8203	913,3349	969,3554	791,4057	919,4147	962,5707
450,01	804,0817	925,0991	968,2756	799,1554	924,0499	972,0198	811,6942	932,4334	964,7355
451,06	822,2027	936,1541	971,8473	818,0663	932,5311	974,2453	828,8239	941,3824	966,0280
452,10	839,7418	944,8590	973,8643	834,6791	938,8238	975,7073	843,3840	948,6667	966,7846
453,00	854,0703	951,2711	975,1965	847,7353	943,8023	976,8234	858,6283	954,8655	967,1787
454,00	869,1669	957,2488	975,9659	858,9953	947,6608	977,6749	870,6108	959,8712	967,3977
455,01	881,5920	962,2805	976,6059	869,0984	951,2146	978,3120	880,8359	963,6941	967,5232
456,01	892,1229	965,8464	976,9935	878,8320	954,2290	978,8916	891,7225	967,3132	967,6815
457,02	901,6093	968,0525	977,3614	888,7943	956,8434	979,2023	899,5969	969,7279	967,9341
458,03	909,8256	970,2722	977,6516	897,8566	958,7218	979,4584	907,1190	971,6587	967,9632
459,04	917,3277	971,5521	977,8106	906,2477	960,2973	979,7213	914,5500	973,2382	968,1818
460,00	925,0652	972,7570	978,0323	913,8788	961,5301	979,8677	920,6440	974,5133	968,2016
461,08	931,9725	973,3988	978,0488	920,7842	962,5170	979,9243	926,3142	975,3897	968,4135
462,04	936,0425	974,0505	977,9532	927,8680	963,4120	979,9448	930,9668	976,1710	968,4521

463,00	940,4785	974,3484	977,7953	933,1528	964,1443	979,9540	935,7202	976,5923	968,5223
464,08	945,1658	974,7156	977,6958	937,6112	964,7410	979,9621	940,0218	976,8964	968,5803
465,04	948,2928	974,9336	977,7111	941,7661	965,1873	979,9688	944,0420	977,0640	968,7814
466,00	951,1248	975,2573	977,8279	945,0349	965,5496	979,9742	947,2728	977,1953	968,7971
467,08	953,4524	975,7329	978,0188	947,5744	965,8088	979,9794	949,8342	977,2735	968,7969
468,04	955,0447	975,9272	978,2003	949,4747	965,9477	980,0852	952,2648	977,3722	968,7955
469,00	956,7178	976,1050	978,3967	951,3907	966,0602	980,0839	954,1802	977,3942	968,7935
470,02	957,7939	976,2487	978,5777	952,7827	966,1002	980,0801	956,0829	977,4074	968,7907
471,01	958,7897	976,3527	978,6921	953,7536	966,0988	980,0738	957,3790	977,4091	968,7871
472,08	959,7802	976,4495	978,7647	954,3966	966,0912	980,0689	958,6402	977,4097	968,7854
473,09	960,9288	976,5273	978,7920	955,0726	966,0815	980,0616	959,7781	977,4065	968,7802
474,05	961,5734	976,5705	978,8419	955,4735	966,0705	980,0474	961,0638	977,4017	968,7746
475,03	962,4771	976,6102	978,8367	955,9441	966,0523	980,0371	961,7626	977,3934	968,7652
476,04	963,1265	976,6428	978,8232	956,1949	966,0367	980,0224	962,3999	977,3842	968,7543
477,00	963,4567	976,6986	978,8080	956,6525	966,0147	980,0065	963,1214	977,3681	968,7386
478,01	963,9556	976,7545	978,8054	956,9116	965,9982	979,9920	963,6712	977,3636	968,7312
479,05	964,3018	976,8024	978,7958	957,1213	965,9813	979,9794	964,1507	977,3561	968,7226
480,06	964,5786	976,8226	978,7779	957,3983	965,9650	979,9609	964,4110	977,3370	968,7032
481,04	964,9303	976,8463	978,7501	957,5683	965,9356	979,9401	964,5942	977,3109	968,6795
482,02	965,3812	976,8481	978,7185	957,7302	965,9008	979,9103	964,7010	977,2833	968,6503
483,03	965,5688	976,8525	978,7018	957,9387	965,8715	979,8906	964,8113	977,2593	968,6283
484,02	965,7492	976,8748	978,6826	958,0449	965,8495	979,8696	964,8686	977,2324	968,6028
485,00	965,8574	976,8710	978,6735	958,1662	965,8327	979,8513	964,9145	977,2145	968,5805
486,05	965,9598	976,8807	978,6660	958,2957	965,8434	979,8575	964,9692	977,1845	968,5744
487,01	966,1234	976,8825	978,6519	958,4035	965,8426	979,8506	964,9978	977,1548	968,5389
488,05	966,1897	976,8992	978,6587	958,5158	965,8609	979,8776	965,0264	977,1477	968,5368
489,06	966,2373	976,9123	978,6457	958,5871	965,8839	979,8935	965,0460	977,1236	968,5218
490,05	966,2995	976,9509	978,6607	958,6594	965,9069	979,9361	965,0572	977,1445	968,5222
491,07	966,3620	976,9503	978,6557	958,7010	965,9291	979,9517	965,0516	977,1213	968,5201
492,05	966,4047	976,9535	978,6626	958,7651	965,9293	979,9801	965,0361	977,1055	968,5363

493,06	966,4658	976,9563	978,6656	958,7863	965,9501	979,9916	965,0545	977,1297	968,5229
494,08	966,5011	976,9706	978,6592	958,8003	965,9433	980,0092	965,0572	977,1382	968,5203
495,01	966,5216	976,9827	978,6920	958,8210	965,9757	980,0214	965,0666	977,1491	968,5454
496,05	966,5228	976,9832	978,6735	958,8165	965,9703	980,0264	965,0524	977,1741	968,5342
497,07	966,5475	976,9864	978,6900	958,8381	965,9814	980,0220	965,0721	977,1579	968,5619
498,06	966,5495	977,0152	978,6819	958,8450	965,9817	980,0123	965,0703	977,1562	968,5592
499,05	966,5661	976,9952	978,6908	958,8478	965,9855	980,0148	965,0667	977,1578	968,5549
500,11	966,5242	976,9697	978,6336	958,8414	965,9758	980,0013	965,0468	977,1201	968,5222
501,04	966,5207	976,9306	978,6050	958,8149	965,9472	979,9727	965,0070	977,1109	968,4971
502,12	966,4877	976,8852	978,5571	958,7954	965,9172	979,9424	964,9754	977,0792	968,4545
503,08	966,4812	976,8817	978,5390	958,8014	965,9230	979,9382	964,9606	977,0494	968,4407
504,04	966,4475	976,8424	978,4859	958,7681	965,8883	979,9003	964,9293	976,9997	968,4012
505,12	966,4193	976,7993	978,4240	958,7530	965,8595	979,8777	964,8861	976,9513	968,3607
506,08	966,3889	976,7605	978,3665	958,7318	965,8285	979,8539	964,8528	976,9123	968,3185
507,04	966,3442	976,7048	978,2622	958,7023	965,7915	979,8120	964,8036	976,8705	968,2793
508,12	966,3127	976,6497	978,1588	958,6874	965,7496	979,7812	964,7640	976,8483	968,2360
509,08	966,3647	976,5764	978,0458	958,6532	965,7237	979,7376	964,7229	976,7956	968,2110
510,04	966,3443	976,5197	977,8998	958,6432	965,7133	979,7214	964,7079	976,7927	968,2195
511,12	966,2945	976,4400	977,7250	958,6233	965,6890	979,6943	964,6628	976,7681	968,1909
512,08	966,2687	976,3795	977,5267	958,6190	965,6838	979,6806	964,6547	976,7627	968,2026
513,04	966,2478	976,3002	977,2588	958,5890	965,6368	979,6461	964,6284	976,7682	968,1948
514,12	966,2398	976,2198	977,0658	958,5744	965,6236	979,6339	964,6090	976,7580	968,2161
515,08	966,2623	976,1640	976,8607	958,5640	965,6119	979,6054	964,5584	976,7353	968,2485
516,04	966,2688	976,1458	976,6983	958,5410	965,5829	979,5821	964,5316	976,7393	968,2392
517,12	966,2725	976,1078	976,5829	958,5126	965,5562	979,5262	964,5103	976,7111	968,2348
518,08	966,3120	976,1271	976,5366	958,4929	965,5256	979,5164	964,4545	976,6999	968,2246
519,04	966,3541	976,1843	976,6145	958,4724	965,5061	979,5005	964,4478	976,6792	968,2116
520,12	966,4068	976,2816	976,7574	958,4587	965,4881	979,4561	964,3934	976,7056	968,2195
521,08	966,4538	976,4071	976,9905	958,4364	965,4592	979,4357	964,3611	976,6969	968,2151
522,04	966,4896	976,5177	977,3341	958,4199	965,4339	979,4142	964,3428	976,6784	968,2247

523,12	966,5632	976,6612	977,6645	958,3920	965,4411	979,4079	964,3490	976,7035	968,2528
524,08	966,5514	976,7266	977,9908	958,4054	965,4153	979,3868	964,2881	976,7069	968,2485
525,03	966,5256	976,7643	978,2024	958,3960	965,3996	979,3584	964,2692	976,6920	968,2218
526,10	966,5191	976,7859	978,3084	958,3726	965,3754	979,3168	964,2394	976,7142	968,1980
527,09	966,4768	976,7553	978,3241	958,3588	965,3580	979,2911	964,2309	976,6806	968,1628
528,04	966,4677	976,7709	978,3441	958,3658	965,3836	979,3346	964,1917	976,6906	968,1910
529,00	966,4248	976,7300	978,3179	958,3478	965,3444	979,3255	964,1299	976,6443	968,1530
530,03	966,4000	976,6879	978,2804	958,3398	965,3417	979,2909	964,1028	976,6489	968,1055
531,07	966,3713	976,6296	978,2138	958,3175	965,2998	979,2523	964,0555	976,5930	968,0453
532,06	966,3247	976,6268	978,2166	958,3309	965,3338	979,2257	964,0179	976,5425	968,0022
533,03	966,3180	976,5968	978,1805	958,2972	965,2946	979,2357	964,0109	976,5335	967,9757
534,05	966,2868	976,5530	978,1315	958,2816	965,2719	979,2056	963,9473	976,4656	967,9160
535,04	966,2487	976,5127	978,0820	958,2578	965,2375	979,1732	963,9046	976,4110	967,8618
536,01	966,2006	976,4521	978,0215	958,2152	965,1895	979,1224	963,8134	976,3432	967,8065
537,06	966,1540	976,4164	977,9885	958,1932	965,1494	979,0992	963,7698	976,2919	967,7770
538,03	966,2136	976,4120	977,9832	958,1889	965,2102	979,1559	963,8937	976,2964	967,8100
539,01	966,2662	976,5088	978,0984	958,2372	965,2267	979,1763	963,9207	976,3647	967,8909
540,01	966,2724	976,5299	978,1430	958,2392	965,2446	979,1817	963,9516	976,3949	967,9064
541,01	966,2596	976,5206	978,1296	958,2419	965,2311	979,1700	963,9440	976,4036	967,8845
542,05	966,2450	976,4957	978,1106	958,2452	965,2264	979,1703	963,9580	976,4088	967,8808
543,03	966,2112	976,4639	978,0715	958,2227	965,2036	979,1453	963,9235	976,3890	967,8514
544,04	966,1731	976,4218	978,0345	958,1921	965,1660	979,1106	963,9193	976,3440	967,8055
545,01	966,1647	976,4232	978,0371	958,1723	965,1453	979,0891	963,9008	976,3367	967,8158
546,03	966,1671	976,4303	978,0521	958,1424	965,1150	979,0586	963,9053	976,3457	967,8269
547,02	966,1858	976,4567	978,0860	958,1166	965,0750	979,0203	963,9019	976,3516	967,8390
548,01	966,2044	976,4772	978,1134	958,0894	965,0525	979,0024	963,9005	976,3518	967,8364
549,04	966,1950	976,4719	978,1117	958,0610	965,0130	978,9620	963,8809	976,3380	967,8183
550,03	966,1762	976,4521	978,0854	958,0248	964,9815	978,9224	963,8439	976,3148	967,7968
551,06	966,1588	976,4350	978,0699	958,0007	964,9378	978,8785	963,8311	976,2864	967,7921
552,00	966,1250	976,3962	978,0428	957,9655	964,9209	980,8573	966,2793	976,3108	967,7829

703,06	967,5542	977,9104	979,6552	959,5728	966,8434	980,8573	966,2793	978,3294	969,6076
704,02	967,5542	977,9104	979,6552	959,5728	966,8434	980,8573	966,2793	978,3294	969,6076
705,00	967,5517	977,9102	979,6550	959,5726	966,8430	980,8568	966,2786	978,3292	969,6073
706,01	967,5358	977,8951	979,6393	959,5617	966,8305	980,8446	966,2697	978,3210	969,5996
707,09	967,5044	977,8613	979,6148	959,5388	966,8143	980,8301	966,2613	978,3131	969,5898
708,05	967,4306	977,7968	979,5543	959,4870	966,7690	980,7918	966,2482	978,3008	969,5799
709,01	967,3266	977,7009	979,4718	959,4022	966,6944	980,7217	966,2314	978,2808	969,5602
710,09	967,1717	977,5343	979,3495	959,2760	966,5790	980,6169	966,1970	978,2552	969,5276
711,05	966,9153	977,3177	979,1472	959,0881	966,4165	980,4627	966,1547	978,2130	969,4948
712,01	966,5873	977,0107	978,8843	958,8226	966,1870	980,2537	966,1130	978,1621	969,4476
713,09	966,0224	976,4246	978,5041	958,5018	965,8593	979,9614	966,0460	978,1095	969,3961
714,05	964,9318	975,5299	977,7576	957,8107	965,2602	979,5617	965,9530	978,0343	969,3195
715,00	963,5419	974,1688	976,7783	956,7082	964,4630	978,7994	965,8427	977,9566	969,2323
716,08	961,2197	971,9077	975,1879	954,6606	963,0060	977,5771	965,7258	977,8367	969,1036
717,04	958,1525	969,0748	972,6993	952,5746	960,8555	975,7449	965,5562	977,6966	968,9933
718,12	953,3770	964,6898	969,5934	949,1194	957,8162	973,1360	965,3937	977,5430	968,8215
719,08	947,5920	959,4054	965,3580	944,1876	953,7072	969,5645	965,1491	977,3408	968,6624
720,04	940,1934	952,6376	959,0119	938,4593	948,3549	964,9072	964,5303	977,0891	968,4342
721,12	929,2744	942,7299	951,5689	931,2923	941,6135	958,9833	963,8574	976,6732	968,1652
722,08	917,1611	931,6889	942,2792	921,6075	933,2155	951,6376	962,6681	975,9619	967,7489
723,04	901,9410	917,9868	928,9549	910,1253	924,7634	944,2284	960,9248	974,9767	967,0751
724,12	881,1779	899,1015	914,4253	896,4091	912,7046	933,7092	959,0497	973,8719	966,1582
725,08	859,5844	879,4482	897,3226	883,0647	897,6407	921,0642	955,9574	971,9787	965,1670
726,04	833,5814	855,7163	873,5550	864,9979	881,6050	906,3232	952,6567	969,9020	963,4493
727,12	802,3933	826,9828	850,6120	845,2879	863,0810	889,6974	947,7276	966,6691	961,6898
728,08	771,1176	797,9063	824,4322	823,2395	842,7043	871,2945	941,6783	962,6289	959,0013
729,04	737,2881	766,1107	791,7855	798,8608	819,9291	850,8376	935,9544	958,6137	955,6277
730,12	696,9820	728,1593	760,1709	772,3319	795,0084	828,4260	927,3263	953,1542	952,3104
731,08	657,7311	691,4928	725,2399	743,3016	772,6048	808,3374	917,2835	946,1300	947,5394
732,04	617,3089	653,7569	684,2195	717,5725	744,2257	782,4216	908,1711	938,1674	941,9322

733,12	569,3380	609,8530	644,8879	684,2935	713,4416	753,5940	895,6723	930,8265	936,7860
734,08	525,5089	570,2263	605,1451	650,2330	681,9466	723,6500	882,1192	920,7526	929,6971
735,04	480,6778	530,3287	560,3306	614,2816	648,5700	691,2376	870,2684	911,8222	921,8135
736,12	429,6745	485,1008	519,2258	577,2394	614,5745	658,4352	854,5108	899,7750	915,0776
737,08	384,7381	444,9527	480,2711	539,6118	579,5422	624,6134	841,0311	887,0444	906,0233
738,04	341,5099	405,2559	436,4446	500,8975	549,4185	595,6297	823,2590	876,1460	898,5171
739,12	296,0462	361,8213	398,7357	461,7326	512,5795	559,7466	804,2539	861,7843	888,5764
740,00	260,8543	328,1118	362,5210	429,0036	476,3064	524,5292	788,6209	848,8122	879,7365
741,04	225,2793	291,6847	323,2957	391,2152	439,7358	489,0278	767,7778	831,7319	869,1912
742,00	197,6065	259,8525	290,8838	354,7145	402,9164	452,0147	745,2349	814,6422	857,7551
743,08	170,0915	225,7237	259,8729	318,5798	366,0775	414,6342	726,2047	800,0139	848,2724
744,04	149,3897	199,0052	227,4313	285,1619	330,9963	378,1380	701,2930	781,1439	835,8426
745,00	131,6397	175,7468	201,5032	253,7861	297,6023	343,4583	675,6609	764,8661	823,0091
746,08	113,9283	152,1028	177,1925	224,7692	266,5454	310,7659	654,6260	743,7978	812,3968
747,04	100,9579	134,3412	153,4168	198,4447	238,1924	280,4453	628,0573	722,6739	798,5291
748,00	89,5195	118,0622	133,9881	177,7711	211,3747	252,0972	600,0128	705,5475	784,6277
749,08	78,6936	102,4120	116,7712	154,8921	190,5661	230,9865	577,0481	683,7959	773,3125
750,04	70,1266	90,1496	99,3217	134,4632	167,6254	206,6755	547,5603	660,9953	759,0731
751,00	62,7114	79,8896	86,5797	116,6418	146,8333	185,3677	523,9088	642,6457	747,4451
752,08	55,3237	69,9031	75,7690	101,2410	128,2193	164,9282	494,2374	619,0461	732,9522
753,04	49,5283	62,3519	65,6225	88,1975	112,1471	147,4554	464,4410	595,4605	718,2157
754,00	44,3554	55,8599	58,1087	77,0713	98,0225	131,3021	440,8678	576,3786	706,4039
755,08	39,0117	49,4089	51,7709	67,4256	86,1451	117,8004	412,2300	552,4504	691,4129
756,04	34,5450	44,1339	45,5966	60,3972	77,5365	107,3687	384,4621	533,0104	676,6638
757,00	30,5860	39,5411	40,9729	53,2147	68,8227	96,9090	363,4033	508,5630	664,8919
758,08	26,3662	34,9368	36,9907	46,8384	60,9901	87,4832	338,2533	484,8806	650,4509
759,04	22,9812	31,2751	33,0588	41,4572	54,2882	79,3766	319,1681	466,1741	638,4965
760,00	20,0472	27,9318	30,0153	37,0506	48,9492	72,3320	296,8744	443,5418	623,8083
761,08	16,9815	24,3401	27,0492	33,2907	44,4446	66,0003	276,4510	421,5939	609,1878
762,04	14,6319	21,4874	23,9884	29,9732	40,5350	60,2499	261,2604	404,7343	597,5026

763,00	12,5686	18,9202	21,4734	27,6931	37,2953	55,3794	243,5579	383,7511	583,1363
764,08	10,5199	16,2882	19,1392	25,0966	34,6380	51,6697	226,9559	368,0680	568,6495
765,04	9,0544	14,3611	16,8513	22,8867	31,9516	47,7714	214,1562	349,5556	556,9085
766,00	7,7356	12,5765	14,9279	20,9205	29,6206	44,4512	199,0911	332,3213	542,2935
767,08	6,5308	10,8465	13,2477	19,1496	27,5130	41,2177	185,1878	319,2041	530,7785
768,04	5,6666	9,5242	11,5963	17,4650	25,5846	38,5054	174,7015	304,1669	516,4258
769,00	4,8510	8,2502	10,1703	15,9137	23,8507	35,9266	162,6467	289,4674	502,2896
770,08	4,1051	7,0112	8,9725	14,4702	22,2575	33,7084	153,7568	278,5834	491,0701
771,04	3,6038	6,1429	7,8940	13,3745	21,0544	31,9637	143,6729	265,5912	477,4394
772,00	3,1915	5,4445	7,0634	12,1902	19,7037	30,1098	134,3883	255,6076	463,7028
773,08	2,8165	4,8192	6,3862	11,1144	18,4287	28,3570	127,6485	243,9908	452,9545
774,04	2,5488	4,3494	5,6944	10,1853	17,3004	26,7698	120,1014	232,7400	439,8681
775,00	2,3361	3,9734	5,1766	9,2985	16,2076	25,3193	113,0793	224,7255	427,0576
776,08	2,1402	3,6387	4,7550	8,4552	15,1995	23,9652	107,9179	214,7336	417,1544
777,04	1,9939	3,3814	4,3022	7,6442	14,2482	22,7182	102,0672	205,6578	405,2044
778,00	1,8689	3,1529	3,9655	6,9573	13,4220	21,6250	97,9442	198,7780	395,4502
779,08	1,7399	2,9422	3,7043	6,4271	12,7556	20,7103	93,0683	190,5039	383,8726
780,04	1,6371	2,7890	3,4473	5,8992	11,9564	19,7163	88,6883	182,8038	372,5167
781,00	1,5448	2,6602	3,2738	5,4488	11,1817	18,8197	85,4200	176,6136	363,7070
782,08	1,4530	2,5359	3,1240	5,0399	10,4761	17,8984	81,6112	168,8871	353,1547
783,04	1,3788	2,4324	2,9877	4,6566	9,8378	17,0322	78,0787	163,1244	342,6234
784,00	1,3099	2,3359	2,8797	4,2976	9,2828	16,2048	75,3998	156,0104	334,2902
785,08	1,2354	2,2371	2,7810	3,9628	8,7661	15,4158	72,2341	149,1168	324,1932
786,04	1,1701	2,1560	2,6795	3,6972	8,2812	14,6591	69,8390	143,9777	316,1839
787,00	1,1111	2,0811	2,5989	3,4003	7,8949	14,1185	67,1252	137,5801	306,3742
788,08	1,0511	2,0030	2,5248	3,1233	7,4506	13,4691	64,5247	131,5109	296,8054
789,04	1,0037	1,9393	2,4437	2,8565	7,0168	12,8651	62,6258	126,8835	289,1787
790,00	0,9603	1,8810	2,3751	2,6107	6,5865	12,3096	60,3893	121,2951	280,0235
791,08	0,9162	1,8207	2,3135	2,4158	6,1528	11,7964	58,2849	117,0498	270,8400
792,04	0,8807	1,7679	2,2515	2,2760	5,7098	11,3181	56,6776	112,0825	263,7523

793,00	0,8476	1,7208	2,1987	2,1643	5,3107	10,8522	54,7815	107,1753	255,1040
794,08	0,8136	1,6709	2,1475	2,0808	5,0043	10,4187	52,9900	103,4492	248,2502
795,04	0,7864	1,6297	2,0912	1,9932	4,6660	10,0066	51,6465	98,9720	239,8575
796,00	0,7612	1,5910	2,0460	1,9186	4,3627	9,6763	50,0386	94,6805	231,8085
797,08	0,7363	1,5513	2,0058	1,8545	4,0853	9,2899	48,7780	91,4660	225,5035
798,04	0,7187	1,5187	1,9640	1,7945	3,8322	8,9129	47,2711	87,6566	217,6237
799,00	0,7063	1,4883	1,9291	1,7421	3,5976	8,5480	45,8160	84,6581	210,3157
800,00	0,6981	1,4596	1,8968	1,7011	3,4144	8,2285	44,7435	81,3832	204,8303
801,03	0,6923	1,3944	1,8322	1,6463	3,1223	7,8107	43,4828	78,0210	198,3325
802,11	0,6893	1,3491	1,7852	1,6107	2,9605	7,3885	42,2498	74,6308	191,5316
803,07	0,6883	1,3213	1,7469	1,5808	2,8048	7,0341	41,2948	71,3741	186,0613
804,03	0,6880	1,3014	1,7120	1,5598	2,6893	6,7514	40,1205	68,9122	179,4270
805,11	0,6878	1,2854	1,6878	1,5367	2,5915	6,5254	39,0272	66,0825	173,1864
806,07	0,6876	1,2761	1,6680	1,5158	2,5051	6,3336	38,2059	63,9341	168,3941
807,03	0,6874	1,2695	1,6508	1,4969	2,4337	6,1706	37,1598	61,3410	162,3956
808,11	0,6873	1,2643	1,6383	1,4787	2,3753	6,0256	36,1930	58,9732	156,8842
809,07	0,6872	1,2609	1,6280	1,4605	2,3264	5,9124	35,4584	57,1451	152,5366
810,03	0,6871	1,2581	1,6204	1,4411	2,2915	5,7888	34,5697	54,9567	147,3091
811,11	0,6870	1,2553	1,6145	1,4211	2,2537	5,6759	33,9025	52,8880	143,2900
812,07	0,6869	1,2532	1,6091	1,4062	2,2197	5,5709	33,1201	51,2673	138,3304
813,03	0,6869	1,2513	1,6034	1,3911	2,1886	5,4735	32,3470	49,3416	133,5045
814,11	0,6868	1,2491	1,5996	1,3781	2,1595	5,3805	31,7436	47,4811	129,7630
815,07	0,6868	1,2473	1,5964	1,3656	2,1326	5,2898	31,0006	46,0798	125,2708
816,03	0,6868	1,2454	1,5930	1,3544	2,1072	5,2166	30,2531	44,3611	120,9015
817,11	0,6867	1,2432	1,5902	1,3440	2,0835	5,1326	29,7216	43,0007	117,5037
818,07	0,6867	1,2413	1,5870	1,3335	2,0651	5,0505	29,1018	41,4212	113,4124
819,03	0,6867	1,2397	1,5836	1,3233	2,0441	4,9702	28,6156	39,8974	110,2295
820,11	0,6867	1,2378	1,5803	1,3151	2,0238	4,8927	28,0274	38,7147	106,2898
821,07	0,6867	1,2358	1,5768	1,3065	2,0030	4,8197	27,4408	37,2789	102,3116
822,03	0,6867	1,2340	1,5746	1,2986	1,9842	4,7456	26,9735	35,8793	99,1640

823,11	0,6867	1,2323	1,5728	1,2914	1,9678	4,6724	26,4558	34,7943	95,3436
824,07	0,6867	1,2308	1,5702	1,2850	1,9532	4,6144	25,9592	33,4519	91,6524
825,03	0,6868	1,2295	1,5675	1,2793	1,9422	4,5487	25,5642	32,3967	88,7318
826,11	0,6868	1,2276	1,5656	1,2740	1,9304	4,4863	25,0800	31,1142	85,1289
827,07	0,6868	1,2260	1,5643	1,2698	1,9207	4,4274	24,7026	29,9073	81,5922
828,03	0,6868	1,2247	1,5622	1,2654	1,9128	4,3711	24,2295	28,9765	78,7907
829,11	0,6869	1,2234	1,5602	1,2616	1,9062	4,3160	23,7699	27,8491	75,3662
830,07	0,6869	1,2223	1,5579	1,2583	1,9011	4,2629	23,4095	26,7873	72,6565
831,03	0,6869	1,2210	1,5551	1,2552	1,8970	4,2127	22,9636	25,9655	69,3747
832,11	0,6870	1,2193	1,5526	1,2523	1,8940	4,1733	22,5224	24,9759	66,1167
833,07	0,6870	1,2178	1,5502	1,2496	1,8917	4,1287	22,1670	24,2170	63,5968
834,03	0,6870	1,2163	1,5476	1,2474	1,8894	4,0884	21,7344	23,2911	60,6068
835,11	0,6871	1,2151	1,5451	1,2456	1,8872	4,0509	21,3045	22,4055	57,7047
836,07	0,6871	1,2138	1,5428	1,2435	1,8853	4,0172	20,9620	21,6991	55,4649
837,03	0,6871	1,2125	1,5401	1,2416	1,8837	3,9859	20,5354	20,8882	52,7326
838,11	0,6872	1,2113	1,5379	1,2399	1,8825	3,9571	20,2061	20,0929	50,6069
839,07	0,6872	1,2102	1,5355	1,2382	1,8816	3,9348	19,7920	19,4952	47,9922
840,03	0,6872	1,2092	1,5331	1,2368	1,8808	3,9096	19,3908	18,7964	45,4798
841,11	0,6873	1,2077	1,5308	1,2354	1,8797	3,8851	19,0842	18,1419	43,4777
842,07	0,6873	1,2064	1,5281	1,2343	1,8789	3,8640	18,7071	17,6571	41,1292
843,03	0,6873	1,2053	1,5252	1,2331	1,8781	3,8462	18,3577	17,0835	38,8614
844,11	0,6874	1,2041	1,5227	1,2320	1,8773	3,8312	18,0763	16,6442	37,1807
845,07	0,6874	1,2028	1,5202	1,2308	1,8765	3,8181	17,7438	16,1325	35,1978
846,03	0,6874	1,2016	1,5179	1,2296	1,8756	3,8061	17,4892	15,6432	33,7259
847,11	0,6875	1,1999	1,5160	1,2286	1,8748	3,7978	17,1788	15,2771	31,9950
848,07	0,6875	1,1985	1,5136	1,2275	1,8741	3,7882	16,8787	14,8419	30,3957
849,03	0,6875	1,1974	1,5109	1,2265	1,8732	3,7792	16,6421	14,4329	29,1868
850,11	0,6876	1,1962	1,5090	1,2256	1,8725	3,7701	16,3469	14,1233	27,7842
851,07	0,6876	1,1953	1,5072	1,2246	1,8717	3,7606	16,0474	13,7597	26,4689
852,03	0,6876	1,1942	1,5051	1,2236	1,8709	3,7527	15,8059	13,4842	25,5045

853,11	0,6877	1,1929	1,5033	1,2225	1,8702	3,7456	15,5071	13,1596	24,4189
854,07	0,6877	1,1918	1,5013	1,2215	1,8695	3,7399	15,2638	12,8545	23,3987
855,03	0,6878	1,1906	1,4989	1,2206	1,8689	3,7336	14,9647	12,6244	22,6611
856,11	0,6878	1,1892	1,4971	1,2197	1,8683	3,7277	14,6713	12,3527	21,8072
857,07	0,6878	1,1879	1,4953	1,2188	1,8676	3,7221	14,4414	12,0991	21,1736
858,03	0,6879	1,1867	1,4932	1,2181	1,8669	3,7168	14,1593	11,9101	20,4211
859,11	0,6879	1,1853	1,4914	1,2173	1,8663	3,7116	13,8789	11,6934	19,7452
860,07	0,6879	1,1841	1,4899	1,2165	1,8656	3,7070	13,6558	11,5335	19,2340
861,03	0,6879	1,1830	1,4883	1,2159	1,8649	3,7028	13,3825	11,3441	18,6489
862,11	0,6879	1,1817	1,4867	1,2152	1,8643	3,6998	13,1163	11,1676	18,1016
863,07	0,6879	1,1806	1,4851	1,2146	1,8638	3,6963	12,9059	11,0344	17,6875
864,03	0,6879	1,1797	1,4832	1,2139	1,8632	3,6929	12,6447	10,8786	17,2099
865,11	0,6880	1,1786	1,4819	1,2134	1,8626	3,6888	12,4374	10,7325	16,8438
866,07	0,6880	1,1773	1,4803	1,2128	1,8620	3,6849	12,1828	10,6228	16,4301
867,03	0,6880	1,1764	1,4785	1,2122	1,8614	3,6809	11,9282	10,4897	16,0584
868,11	0,6880	1,1756	1,4771	1,2117	1,8608	3,6773	11,7253	10,3666	15,7739
869,07	0,6880	1,1751	1,4757	1,2111	1,8602	3,6740	11,4727	10,2728	15,4555
870,03	0,6880	1,1746	1,4742	1,2106	1,8596	3,6714	11,2169	10,1663	15,1668
871,11	0,6880	1,1739	1,4731	1,2100	1,8591	3,6683	11,0160	10,0861	14,9553
872,07	0,6880	1,1732	1,4719	1,2096	1,8584	3,6662	10,7689	9,9940	14,7160
873,03	0,6880	1,1725	1,4704	1,2092	1,8578	3,6644	10,5758	9,9085	14,5414
874,11	0,6880	1,1718	1,4693	1,2087	1,8571	3,6626	10,3449	9,8446	14,3415
875,07	0,6880	1,1712	1,4681	1,2083	1,8564	3,6608	10,1316	9,7702	14,1563
876,03	0,6880	1,1707	1,4672	1,2079	1,8558	3,6590	9,9703	9,7005	14,0112
877,11	0,6880	1,1701	1,4664	1,2074	1,8552	3,6575	9,7803	9,6459	13,8543
878,07	0,6880	1,1695	1,4657	1,2070	1,8546	3,6556	9,6001	9,5810	13,7209
879,03	0,6880	1,1689	1,4649	1,2066	1,8541	3,6536	9,4628	9,5329	13,6181
880,11	0,6880	1,1683	1,4642	1,2064	1,8536	3,6520	9,3314	9,4884	13,5160