

**ESTUDIO NUMÉRICO DE LA ESTRUCTURA DE LLAMA DE
PREMEZCLA Y EXTINCIÓN DE LLAMA DE COMBUSTIBLES
GASEOSOS**

MARIANA CAMACHO PORTILLO

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA EN ENERGÍA
BUCARAMANGA
2016**

**ESTUDIO NUMÉRICO DE LA ESTRUCTURA DE LLAMA DE
PREMEZCLA Y EXTINCIÓN DE LLAMA DE COMBUSTIBLES
GASEOSOS**

MARIANA CAMACHO PORTILLO

**Proyecto de grado para optar al título de
Ingeniera en Energía**

Director:

M.Sc. Carlos Alirio Díaz González

Co-Director:

PhD Leonardo Esteban Pacheco Sandoval

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
INGENIERÍA EN ENERGÍA
BUCARAMANGA
2016**

Nota de aceptación

Firma Director de proyecto de grado

Firma Co-Director de proyecto de grado

Firma calificador

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a esa energía suprema que, sin darle un nombre específico, sé que existe y se alinea para llenarme de cosas bonitas y positivas en la vida.

A mis padres: mi ejemplo, mi guía y mi apoyo. Los amo infinitamente, sin ellos mi sueño de ser ingeniera no sería hoy posible.

A mis hermanos, por ser mi alegría y mi compañía diaria.

A Jose por las muchas horas de su compañía en Skype, su apoyo moral y su amor incondicional.

A Carlos Díaz por ser el mejor director de trabajo de grado que podría tener, sus conocimientos y su habilidad para explicar hicieron de este proyecto una realidad.

A mi co-director Leonardo Pacheco, por convertirse en mi mentor y amigo.

A mis compañeros de carrera que estuvieron junto a mí semestre tras semestre trabajando por este mismo objetivo.

A Germán Oliveros, Yecid Muñoz, Cesar Acevedo, Luis Eduardo y Carlos Rey, por transmitirme sus conocimientos, asesorarme y guiarme durante mi proceso de estudio.

A María Eugenia y Marvín, por hacer que la facultad funcione y facilitarme estos 5 años de carrera.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	2
PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA.....	3
OBJETIVO DEL PROYECTO	3
Objetivos específicos	3
1. MARCO TEÓRICO.....	4
1.1. Combustión	4
1.2. Llamas laminares de premezcla.....	7
1.2.1. Estructura y mecanismo de la llama	7
1.2.2. Velocidad de deflagración laminar	8
1.2.3. Estabilidad de una llama de premezcla.....	10
1.3. Intercambiabilidad de gases combustibles	11
1.3.1. Propiedades de combustión asociadas a la intercambiabilidad de una mezcla de gases	14
1.4. Herramientas computacionales para el estudio de fenómenos de combustión	18
1.4.1. EES: Engineering Equation Solver.....	18
1.4.2. CHEMKIN PRO	18
2. METODOLOGÍA	20
2.1. Metodología de simulación.....	20
2.2. Panorama de los gases combustibles en Colombia	20
2.2.1. Biogás.....	20
2.2.2. Gas Licuado de Petróleo	22
2.2.3. Gas Natural	23
2.3. Ecuación estequiométrica	27
2.4. Parametrización del factor de aireación n en los balances de combustión	34
2.5. Mecanismos Cinético-Químicos para aplicaciones de combustión	35
2.6. Modelo de simulación en CHEMKIN PRO	37
2.6.1. Análisis de extinción de llama	37
2.6.2. Modelo de llama opuesta en CHEMKIN PRO.....	38
3. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE ESTRUCTURA Y LÍMITES DE EXTINCIÓN DE LLAMAS DE PREMEZCLA PARA DIFERENTES COMBUSTIBLES GASEOSOS DE USO NACIONAL	41
3.1. Transporte, usos, propiedades y análisis cromatográfico de los gases combustibles nacionales	41
3.1.1. Gas Licuado de Petróleo	41
3.1.2. Gas Natural	44
3.2. Parámetros de simulación para el modelo de Extinción de Llama de Premezcla de Flujo Opuesto.....	51
3.3. Simulación de los fenómenos de combustión de llama de premezcla	55
3.3.1. Estructura de llama.....	56
3.3.2. Límites de extinción.....	80
4. CONCLUSIONES	99
RECOMENDACIONES	100
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101
ANEXOS.....	103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Triángulo de la combustión.....	4
Figura 2. Estructura de una llama de premezcla parcial.....	8
Figura 4. Propagación de una llama de premezcla laminar unidimensional.	9
Figura 5. Distribución de la velocidad de deflagración a lo largo del frente de llama.	9
Figura 3. Secuencia en el desprendimiento de llama de premezcla laminar	11
Figura 6. Altura del cono azul.....	15
Figura 7. Número de proyectos de generación de Biogás en Colombia inscritos ante SGI&C - FNCER	21
Figura 8. Capacidad instalada de generación energía a partir de Biogás en Colombia inscritos ante SGI&C - FNCER.....	21
Figura 9. Ventas totales de cilindros por departamento, en número de cilindros/mes en el año 2012.	23
Figura 10. Capacidad instalada por energético en el Sistema Interconectado Nacional. Fuente: UPME	24
Figura 11. Distribución de las cuencas sedimentarias en el territorio colombiano.	26
Figura 12. Configuración del sistema de simulación: Entrada de combustible, entrada de gas comburente, combustión y salida de productos.....	37
Figura 13. Geometría de la llama de difusión de flujo opuesto simétrico. La línea discontinua representa el plano de estancamiento; la región sombreada sugiere la llama.....	39
Figura 14. Geometría de la llama plana de difusión de flujo opuesto. La línea discontinua representa la línea de estancamiento; la región sombreada sugiere la llama.....	39
Figura 15. Producción de GLP por fuente de suministro, en BPD.....	41
Figura 16. Fuentes de producción e infraestructura de transporte de GLP en Colombia.	42
Figura 17. Composición GLP por fuente de suministro: Refinería Barrancabermeja, Refinería Cartagena, Pozo Apiay y Pozo Cusiana.	43
Figura 18. Infraestructura de transporte del gas natural en Colombia por empresas.	45
Figura 19. Porcentaje de oferta de gas natural por cuenca en Colombia.	47
Figura 20. Ventana de configuración de parámetros de la simulación en CHEMKIN PRO: Pestaña Propiedades físicas del Reactor; subpestaña Modelo de Flujo Opuesto.	52
Figura 21. Ventana de configuración de parámetros de la simulación en CHEMKIN PRO: Pestaña Propiedades físicas del Reactor; subpestaña Básico.	53
Figura 22. Ventana de configuración de parámetros de la simulación en CHEMKIN PRO: Pestaña Propiedades del mallado.....	54
Figura 23. Configuración flujos de entrada. Inlet: Combustible/Comburente, velocidad y temperatura de entrada. Pestaña Datos de las propiedades del flujo.	54
Figura 24. Configuración flujos de entrada. Inlet: Combustible/Comburente. Pestaña: Propiedades específicas de las especies.....	55
Figura 25. Tasa de liberación neta de calor en $[J/cm^3*s]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para todos los combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	56
Figura 26. Tasa de liberación neta de calor en $[J/cm^3*s]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para todos los combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	56
Figura 27. Perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para todos los combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	58
Figura 28. Perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para todos los combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	58
Figura 29. Fracción molar [X] de O_2 en la reacción de combustión para todos los combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	60
Figura 30. Fracción molar [X] de O_2 en la reacción de combustión para todos los combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	60

Figura 31. Fracción molar [X] de CO ₂ en la reacción de combustión para todos los combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	61
Figura 32. Fracción molar [X] de CO ₂ en la reacción de combustión para todos los combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	61
Figura 33. Tasa de liberación neta de calor en [J/cm ³ *s] a partir de reacciones en fase gaseosa para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	62
Figura 34. Tasa de liberación neta de calor en [J/cm ³ *s] a partir de reacciones en fase gaseosa para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	62
Figura 35. Perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	63
Figura 36. Perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	63
Figura 37. Fracción molar [X] de O ₂ en la reacción de combustión para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	63
Figura 38. Fracción molar [X] de O ₂ en la reacción de combustión para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	64
Figura 39. Fracción molar [X] de CO ₂ en la reacción de combustión para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	64
Figura 40. Fracción molar [X] de CO ₂ en la reacción de combustión para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	64
Figura 41. Tasa de liberación neta de calor en [J/cm ³ *s] a partir de reacciones en fase gaseosa para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	65
Figura 42. Tasa de liberación neta de calor en [J/cm ³ *s] a partir de reacciones en fase gaseosa para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	66
Figura 43. Perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	66
Figura 44. Perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	66
Figura 45. Fracción molar [X] para O ₂ en la reacción de combustión para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	67
Figura 46. Fracción molar [X] para O ₂ en la reacción de combustión para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	67
Figura 47. Fracción molar [X] para CO ₂ en la reacción de combustión para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	67
Figura 48. Fracción molar [X] para CO ₂ en la reacción de combustión para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	68
Figura 49. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en [J/cm ³ *s] a partir de reacciones en fase gaseosa para el Biogás a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	68
Figura 50. Comparación del perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para el Biogás a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	69
Figura 51. Comparación de la fracción molar [X] de O ₂ y CO ₂ en la reacción de combustión para el Biogás a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	69
Figura 52. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en [J/cm ³ *s] a partir de reacciones en fase gaseosa para GLP Apiay a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	69
Figura 53. Comparación del perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para GLP Apiay a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	70
Figura 54. Comparación de la fracción molar [X] de O ₂ y CO ₂ en la reacción de combustión para GLP Apiay a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	70
Figura 55. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en [J/cm ³ *s] a partir de reacciones en fase gaseosa para GLP Barranca a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	70
Figura 56. Comparación del perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para GLP Barranca a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	71
Figura 57. Comparación de la fracción molar [X] de O ₂ y CO ₂ en la reacción de combustión para GLP Barranca a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	71

Figura 58. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\text{s}]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para GLP Cartagena a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	71
Figura 59. Comparación del perfil de temperatura $[\text{K}]$ en la reacción de combustión para GLP Cartagena a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	72
Figura 60. Comparación de la fracción molar $[\text{X}]$ de O_2 y CO_2 en la reacción de combustión para GLP Cartagena a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	72
Figura 61. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\text{s}]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para GLP Cusiana a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s	72
Figura 62. Comparación del perfil de temperatura $[\text{K}]$ en la reacción de combustión para GLP Cusiana a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	73
Figura 63. Comparación de la fracción molar $[\text{X}]$ de O_2 y CO_2 en la reacción de combustión para GLP Cusiana a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s	73
Figura 64. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\text{s}]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para GN Caguán-Putumayo a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s	73
Figura 65. Comparación del perfil de temperatura $[\text{K}]$ en la reacción de combustión para GN Caguán-Putumayo a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s	74
Figura 66. Comparación de la fracción molar $[\text{X}]$ de O_2 y CO_2 en la reacción de combustión para GN Caguán-Putumayo a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	74
Figura 67. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\text{s}]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para GN Catatumbo a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	74
Figura 68. Comparación del perfil de temperatura $[\text{K}]$ en la reacción de combustión para GN Catatumbo a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s	75
Figura 69. Comparación de la fracción molar $[\text{X}]$ de O_2 y CO_2 en la reacción de combustión para GN Catatumbo a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s	75
Figura 70. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\text{s}]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para GN Cordillera Oriental a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s	75
Figura 71. Comparación del perfil de temperatura $[\text{K}]$ en la reacción de combustión para GN Cordillera Oriental a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	76
Figura 72. Comparación de la fracción molar $[\text{X}]$ de O_2 y CO_2 en la reacción de combustión para GN Cordillera Oriental a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	76
Figura 73. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\text{s}]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para GN La Guajira a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	76
Figura 74. Comparación del perfil de temperatura $[\text{K}]$ en la reacción de combustión para GN La Guajira a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s	77
Figura 75. Comparación de la fracción molar $[\text{X}]$ de O_2 y CO_2 en la reacción de combustión para GN La Guajira a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s	77
Figura 76. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\text{s}]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para GN Llanos Orientales a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s	77
Figura 77. Comparación del perfil de temperatura $[\text{K}]$ en la reacción de combustión para GN Llanos Orientales a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s	78
Figura 78. Comparación de la fracción molar $[\text{X}]$ de O_2 y CO_2 en la reacción de combustión para GN Llanos Orientales a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	78
Figura 79. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\text{s}]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para GN VIM a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s	78
Figura 80. Comparación del perfil de temperatura $[\text{K}]$ en la reacción de combustión para GN VIM a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	79
Figura 81. Comparación de la fracción molar $[\text{X}]$ de O_2 y CO_2 en la reacción de combustión para GN VIM a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s	79
Figura 82. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\text{s}]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para GN VMM a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s	79
Figura 83. Comparación del perfil de temperatura $[\text{K}]$ en la reacción de combustión para GN VMM a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s.....	80
Figura 84. Comparación de la fracción molar $[\text{X}]$ de O_2 y CO_2 en la reacción de combustión para GN VMM a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s	80

Figura 85. Zona de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción para todos los gases combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	82
Figura 86. Zona de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción para todos los gases combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	82
Figura 87. Zona de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	83
Figura 88. Zona de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	83
Figura 89. Zona de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	84
Figura 90. Zona de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	85
Figura 91. Límites de extinción del Biogás para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	86
Figura 92. Límites de extinción del Biogás para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	86
Figura 93. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del Biogás a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s.....	87
Figura 94. Límites de extinción del GLP Apiay para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	87
Figura 95. Límites de extinción del GLP Apiay para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	88
Figura 96. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GLP Apiay a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s	88
Figura 97. Límites de extinción del GLP Barranca para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s	88
Figura 98. Límites de extinción del GLP Barranca para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s	89
Figura 99. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GLP Barranca a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s.....	89
Figura 100. Límites de extinción del GLP Cartagena para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s	89
Figura 101. Límites de extinción del GLP Cartagena para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s	90
Figura 102. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GLP Cartagena a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s.....	90
Figura 103. Límites de extinción del GLP Cusiana para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s	90
Figura 104. Límites de extinción del GLP Cusiana para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s	91
Figura 105. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GLP Cusiana a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s	91
Figura 106. Límites de extinción del GN Caguán-Putumayo para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s	92
Figura 107. Límites de extinción del GN Caguán-Putumayo para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s	92
Figura 108. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GN Caguán-Putumayo a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s	92
Figura 109. Límites de extinción del GN Catatumbo para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s	93
Figura 110. Límites de extinción del GN Catatumbo para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s	93
Figura 111. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GN Catatumbo a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s.....	93

Figura 112. Límites de extinción del GN Cordillera Oriental para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s	94
Figura 113. Límites de extinción del GN Cordillera Oriental para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s	94
Figura 114. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GN Cordillera Oriental a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s	94
Figura 115. Límites de extinción del GN La Guajira para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s	95
Figura 116. Límites de extinción del GN La Guajira para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s	95
Figura 117. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GN La Guajira a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s.....	95
Figura 118. Límites de extinción del GN Llanos Orientales para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s	96
Figura 119. Límites de extinción del GN Llanos Orientales para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s	96
Figura 120. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GN Llanos Orientales a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s	96
Figura 121. Límites de extinción del GN VIM para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	97
Figura 122. Límites de extinción del GN VIM para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	97
Figura 123. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GN VIM a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s.....	97
Figura 124. Límites de extinción del GN VMM para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s.....	98
Figura 125. Límites de extinción del GN VMM para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s.....	98
Figura 126 . Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GN VMM a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s	98

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Lista de las unidades térmicas en Colombia que utilizan gas natural como combustible. Fuente: UPME	25
Tabla 2. Pozos que conforman las cuencas productoras de gas natural en Colombia	26
Tabla 3. Lista de empresas transportadoras de gas natural, cantidad de producto transportado y extensión de gasoductos.....	45
Tabla 4. Uso final del gas natural en la costa caribe y el interior del país.	46
Tabla 5. Cromatografía gas natural de la cuenca Cagúan- Putumayo.....	47
Tabla 6. Cromatografía gas natural de la cuenca Catatumbo	48
Tabla 7. Cromatografía gas natural de la cuenca Cordillera Oriental.....	49
Tabla 8. Cromatografía gas natural de la cuenca La Guajira	49
Tabla 9. Cromatografía gas natural de la cuenca Llanos Orientales.....	50
Tabla 10. Cromatografía gas natural de la cuenca Valle Inferior del Magdalena (VIM)	50
Tabla 11. Cromatografía gas natural de la cuenca Valle Medio del Magdalena (VMM)	51
Tabla 12. Tasa de liberación máxima de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\text{s}]_a$ a partir de reacciones en fase gaseosa para todos los combustibles estudiados	57

RESUMEN

En Colombia se utilizan diversos gases combustibles para suplir la demanda energética del mercado, los GLP, los Gases Naturales y el biogás son los principales gases utilizados para la generación de energía eléctrica, en sistemas combustibles industriales, sistemas de cocción y sistemas térmicos. La oferta de este energético proviene en el país de los GLP de las refinerías de Barrancabermeja y Cartagena, los GLP de los pozos Apiay y Cusiana y los gases naturales de las cuencas Caguán-Putumayo, Catatumbo, Cordillera Oriental, La Guajira, Llanos Orientales, Valle Inferior del Magdalena y Valle Medio del Magdalena; mientras que el biogás es producido a partir de diferentes fuentes orgánicas como desechos urbanos y/o residuos de cultivos.

La distribución y venta de los gases combustibles se hace a través de ductos y cilindros. La geografía influye directamente en la repartición del energético, siendo los puntos de venta principales las grandes urbes y los centros poblados de mayor cercanía a los puntos productores y/o de tratamiento.

Los GLP se componen principalmente de propano y butano, y no hay diferencias considerables entre las composiciones de los cuatro gases estudiados. Ahora, las composiciones de los gases naturales si difieren significativamente y dichas combinaciones diferentes influyen en los estudios de estructura y estabilidad de llama. Por otro lado, se asume una composición genérica para el biogás de 60% CH₄ y 40% CO₂.

En este trabajo de grado se realizaron los balances estequiométricos para cada gas combustible y se sometieron a la simulación bajo el modelo de *llama opuesta* en el software de cinética química CHEMKIN PRO. A partir de estas simulaciones se obtuvieron los resultados de tasa de liberación de calor, perfiles de temperatura, formación y extinción de especies químicas y, límites de estabilidad y extinción de llama.

INTRODUCCIÓN

Diferentes gases combustibles como el gas natural, propano, biogas, gas de síntesis, aire propanado y el gas de alto horno, son utilizados en diferentes aplicaciones de combustión industriales a nivel Nacional; la posibilidad de predecir la intercambiabilidad de un gas combustible por otro gas o una mezcla de gases permite estimar la variabilidad del comportamiento de la combustión, luego de sustituir el gas para el cual se ajustó el quemador en originalmente. Ahora bien, el estudio de la estructura de llama y los límites de extinción de llamas de premezcla permite determinar y establecer parámetros de intercambiabilidad para diferentes gases combustibles en sistemas industriales con aplicaciones de combustión. Así se evita que se presenten reacciones de combustión inestable y poco higiénica.

En este trabajo se establecerán los gases combustibles de mayor uso a nivel Nacional y se desarrollará el estudio de la estructura de llama y los límites de extinción de llamas de premezcla con el fin de determinar la intercambiabilidad de estos gases combustibles en sistemas de combustión convencionales como quemadores atmosféricos, quemadores industriales o cámaras de combustión en hornos o calderas.

PLANTEAMIENTO DE PROBLEMA

La oferta de gases combustibles en Colombia depende de diversos factores como las reservas del recurso, los costos involucrados en el proceso productivo, la disponibilidad de plantas de tratamiento y la facilidad de transporte y distribución. Las variables mencionadas permiten o no, que este energético permanezca con una composición y características constantes para el usuario final, y por ende los sistemas de combustión sean eficientes y puedan mantenerse con una misma configuración.

En otras palabras, la volatilidad del mercado de los gases combustibles conlleva a que la calidad del energético varíe para el usuario final: en cuando a composición y características. Consecuentemente, el usuario debe adaptar y/o modificar los equipos para obtener una combustión estable y eficiente cada vez que tiene un *gas nuevo*. La finalidad de este trabajo de grado es estudiar la estructura y los límites de extinción de llamas de diferentes gases combustibles de uso en Colombia, para así, determinar que gases pueden ser intercambiados por otros bajo parámetros de combustión específicos, sin afectar la estabilidad de un sistema de combustión.

OBJETIVO DEL PROYECTO

Determinar la estructura y los límites de extinción de llamas de premezcla de diferentes combustibles gaseosos de uso Nacional.

Objetivos específicos

- ✓ Establecer el estado actual de las características y el uso de los gases combustibles a nivel nacional.
- ✓ Establecer los parámetros de simulación para determinar la estructura y estabilidad de llama de premezcla.
- ✓ Simular los fenómenos de combustión de llama de premezcla en lo relacionado con estructura y estabilidad de llama.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Combustión

La combustión es un conjunto de reacciones de oxidación en la que los elementos combustibles reaccionan con el Oxígeno, liberando calor y formando productos de combustión. El calor liberado proviene de la energía química almacenada en las moléculas de los combustibles. [1]

El efecto luminoso que en algunos tipos de combustión se presenta es explicado por la excitación de átomos y moléculas debido a las altas temperaturas. El volumen de gases en el que ocurren las reacciones de oxidación con efecto luminoso se denomina llama [1]. Es pertinente aclarar que no todas las combustiones en la naturaleza van acompañadas del fenómeno de llama, dependiendo de las temperaturas que se alcanzan en la zona de combustión es posible no tener efecto lumínico, así, por ejemplo, en la combustión catalítica del gas natural no se presenta llama, pero si se presentan reacciones de oxidación.

Ahora bien, la combustión tiene lugar cuando hay la coexistencia de tres factores: Combustible, Comburente y Energía de Activación. Estos tres componentes se representan en el denominado triángulo de combustión.

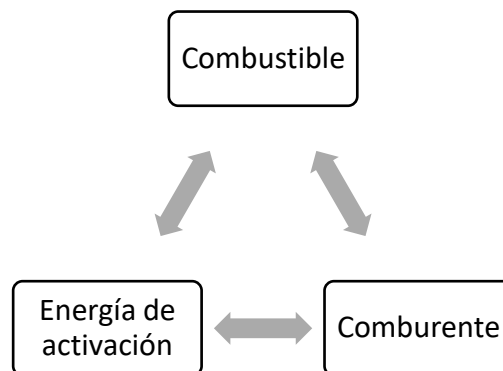


Figura 1. Triángulo de la combustión.

El combustible es cualquier material capaz de liberar energía cuando se oxida de forma violenta con desprendimiento de calor. Supone la liberación de una energía de su forma potencial a una forma utilizable, dejando como residuo calor, dióxido de carbono y algún otro compuesto químico. La mayoría de los combustibles al margen de que sean sólidos, líquidos o gaseosos, están compuestos básicamente por carbono (C) e hidrógeno (H); además de estos componentes principales tienen otros como azufre (S), humedad (H₂O) y cenizas. En este proyecto se trabajan con gases combustibles, los cuales pueden ser agrupados por familias:

- Primera familia o town gas: Incluyen el gas producido del carbón y otros gases manufacturados (mezclas de hidrógeno, metano y monóxido de carbono)

- Segunda familia o gases naturales: Están incluidos los diferentes gases naturales, aquellos cuyo constituyente es metano, y gases manufacturados con la intención de ser sustitutos del mismo.
- Tercera familia o gases licuados de petróleo: Hidrocarburos gaseosos, generalmente suministrados en tanque en su forma líquida, y cuyos constituyentes básicos son el propano y el butano.

Por otro lado, un agente oxidante o comburente es un compuesto químico que oxida a otra sustancia en reacciones electroquímicas o de reducción-oxidación. En estas reacciones, el oxígeno actúa como comburente y es el agente que se reduce. Ahora bien, un combustible en estrecho contacto con el oxígeno no es suficiente para inicial la combustión. La energía de activación es el elemento desencadenante de la reacción de combustión; el combustible debe llevarse por encima de su temperatura de ignición para iniciar la combustión, en los quemadores habitualmente suele obtenerse mediante una chispa eléctrica entre dos electrodos, en las calderas individuales de gas se obtiene por llama piloto, tren de chispas, entre otros.

Combustión completa

Hace referencia a la oxidación total de todos los elementos que constituyen el combustible. Donde para los combustibles hidrocarburos:

Carbono → CO_2

Hidrógeno → H_2O

Azufre → SO_2

Nitrógeno → N_2

Oxígeno → *Participa como oxidante*

El Nitrógeno se considera como masa inerte, si bien a las altas temperaturas de los humos pueden formarse óxidos de nitrógeno en pequeñas proporciones (del orden de 0,01%).

Combustión incompleta

Los componentes del combustible no se oxidan totalmente por lo que aparecen los denominados inquemados, los más importantes son CO y H_2 ; otros posibles inquemados son carbono, restos de combustible, etc. La combustión incompleta puede ser causada por la insuficiencia de oxígeno o por la disociación. Esta última

sucede cuando el oxígeno es atraído con mayor fuerza hacia el hidrógeno que hacia el carbono; por consiguiente, el hidrógeno en el combustible normalmente se quema por completo, formando H_2O , aun cuando haya menos oxígeno del necesario para la combustión completa. No obstante, una parte del carbono termina como CO o como simples partículas C (hollín) en los productos

Combustión estequiometría o teórica

Es la Combustión Completa realizada con la cantidad estricta de oxígeno; es decir, el aire empleado en la combustión es el mínimo necesario para contener la cantidad de oxígeno correspondiente a la oxidación completa de todos los componentes del combustible.

Aire en la combustión

Debido a la presencia significativa del oxígeno en el aire, este último es utilizado normalmente como comburente para llevar a cabo estas reacciones. Se habla de aire teórico como la cantidad de aire seco, medida en condiciones normales ($T_a=0^\circ C$ y $P=1\text{ atm}$), mínima necesaria para la combustión completa y estequiométrica de la unidad de combustible. La cantidad de aire teórico es un parámetro característico para cada composición del combustible. Sin embargo, la mayor parte de las combustiones no transcurren en condiciones ideales (completa y estequiométrica), sino que la cantidad de aire real utilizado puede ser mayor (exceso de aire) o menor (deficiencia de aire) que la cantidad teórica.

Para caracterizar la proporción de oxígeno se define el parámetro coeficiente de exceso de aire ***n***:

$$n = \frac{\text{Cantidad de aire real}}{\text{Cantidad de aire teórico}} \quad (1)$$

Donde,

n = 1 *Combustión estequiométrica*

n < 1 *Defecto de aire, se dice que la mezcla es rica*

n > 1 *Exceso de aire, se dice que la mezcla es pobre*

1.2. Llamas laminares de premezcla

La llama es una región delgada en la que tienen lugar el precalentado, la ignición y combustión. La reacción entre un combustible y un oxidante puede ocurrir de distintas maneras las cuales dependen de la velocidad de propagación del frente de llama [2]. Se distinguen tres regímenes:

- Oxidación lenta: En la cual la liberación de calor por unidad de tiempo es muy baja, y no se aprecia la característica principal de la llama: luminosidad.
- Deflagración: El frente de llama o zona de reacción se propaga a una velocidad inferior a la velocidad del sonido. Este es el modo común de combustión.
- Detonación: El frente de llama se propaga a una velocidad superior a la del sonido. Es el modo de combustión de las explosiones.

Ahora bien, las llamas se pueden clasificar según el tipo de movimiento de los fluidos que intervienen, en llamas laminares y turbulentas. También se diferencian las llamas de premezcla y las llamas de difusión. En la llama de premezcla, la mezcla de los dos fluidos se realiza parcial o totalmente antes de alcanzar la cámara de combustión mientras que en la llama de difusión el combustible y el comburente se mezclan justo en el momento de la reacción.

En este trabajo de grado se estudiará la estructura y los límites de extinción de las llamas laminares de premezcla. Estas llamas también se pueden observar como llamas de propagación en tubos o como llamas esféricas propagándose desde una fuente de ignición. La llama divide una región de mezcla reactante fría de la zona de gases de combustión calientes.

Si la mezcla no quemada es laminar y la aerodinámica del campo de flujo en general lo permite, la llama se propaga como un frente liso, no turbulento. La llama ideal es plana y adiabática. Siendo así, se propaga hacia la mezcla fresca con una velocidad de quemado (relativa al gas no quemado) que solo depende de las propiedades de mezcla reciente: tipo de combustible, fracción de mezcla, temperatura, presión, etc. [2]

1.2.1. Estructura y mecanismo de la llama

Una llama de premezcla está constituida por una zona primaria de combustión en el frente de llama y una zona secundaria de combustión generada por la difusión del oxígeno de los alrededores, el cual reacciona con los elementos combustibles que salen del frente de llama [3]. En otras palabras, la zona de reacción o frente de llama es la región donde ocurren las reacciones químicas de oxidación, la cual constituye la zona primaria de combustión en la que ingresa la premezcla de aire y

gas precalentada por la transferencia de energía por conducción y difusión molecular desde el frente de llama. Los elementos combustibles que no oxidan o se oxidan parcialmente fluyen a la zona externa donde como resultado de la difusión molecular del oxígeno se oxidan, formándose una segunda zona de combustión. [3] En la figura 2 se muestra esquemáticamente la estructura de una llama de premezcla parcial.

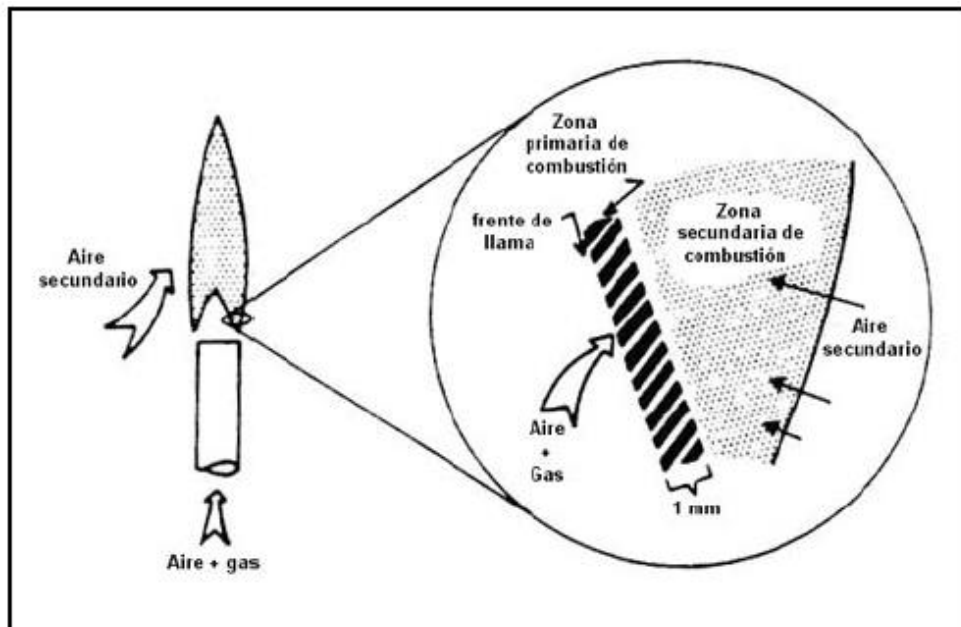


Figura 2. Estructura de una llama de premezcla parcial.

1.2.2. Velocidad de deflagración laminar

La velocidad de deflagración o velocidad de quemado se define como la velocidad a la que se desplaza el frente de llama o zona de reacción hacia la zona de gases sin quemar (gases de premezcla) en una llama plana y estable, sin pérdidas de calor [5]. También se entiende como la tasa de la rapidez con que un combustible libera la energía térmica que se almacena en sus enlaces. Es una propiedad característica para toda mezcla combustible-comburente que permite predecir el comportamiento de la combustión y así realizar diseños más eficientes y confiables de los dispositivos que utilizan estas mezclas determinadas. [5]

A continuación, se presenta una llama de premezcla laminar unidimensional a partir de la cual se puede definir la velocidad de deflagración. La velocidad de deflagración laminar es también una propiedad que permite estudiar la estructura y la estabilidad de las llamas de premezcla, además de que puede ser utilizada para validar mecanismos de reacción, estudiar la combustión turbulenta en llamas de premezcla y el retraso a la ignición. [6]

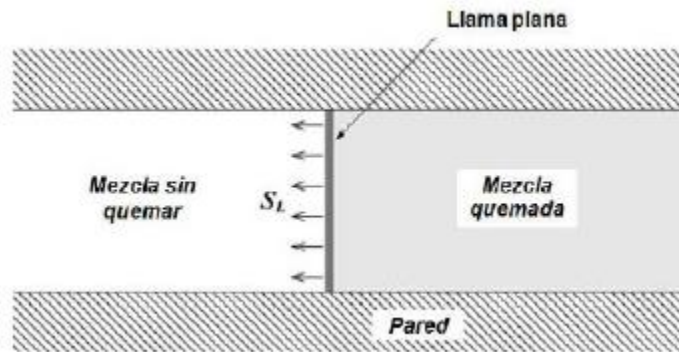


Figura 3. Propagación de una llama de premezcla laminar unidimensional.

En cada punto del frente de llama la combustión se transmite perpendicularmente, estableciendo un campo de velocidad de deflagración distribuido a lo largo del frente de llama [7]. En la figura 5 se muestra el comportamiento de la velocidad de deflagración con respecto a la distancia al eje de la llama, en la zona cercana al puerto su magnitud es muy baja, luego hay un trayecto largo en que permanece constante y en la parte superior es muy alta [8].

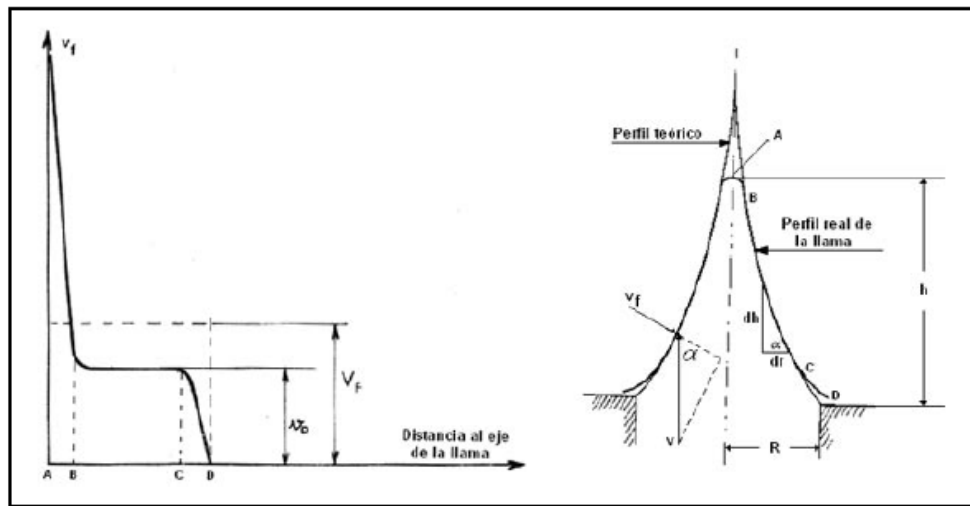


Figura 4. Distribución de la velocidad de deflagración a lo largo del frente de llama.

Donde V_f es la velocidad de deflagración promedio, v_o es la velocidad de deflagración en la zona en que esta es constante, v_f es la velocidad local de la deflagración en un punto determinado del frente de llama, V es la velocidad de un hilo de corriente de la premezcla, α es el ángulo entre la velocidad de deflagración y la velocidad de la corriente. R es radio del puerto donde se desarrolla la llama y h es la altura de cono azul.

Hay factores que afectan la velocidad de deflagración como la naturaleza del combustible, el régimen de la premezcla, el factor de aireación y la temperatura de

la premezcla. La velocidad de deflagración aumenta cuando la temperatura de premezcla aumenta:

$$V_f = V_{fo} \left(\frac{T}{T_o} \right)^{1.74} \quad (2)$$

Donde V_f es la velocidad de deflagración a una temperatura T y V_{fo} es la velocidad de deflagración a una temperatura T_o .

Si se asume que en todo punto del frente de llama existe equilibrio entre la velocidad local de deflagración y la componente perpendicular de la velocidad de la corriente de premezcla se establece:

$$v_f = \frac{v_m}{\text{sen } \alpha} \quad (3)$$

Donde v_f es la velocidad local de deflagración en un punto determinado del frente de llama en cm/s , v_m es la velocidad de un hilo de corriente de la premezcla en cm/s , y α es el ángulo entre la velocidad de deflagración y la velocidad de la corriente.

1.2.3. Estabilidad de una llama de premezcla

De la estabilidad de una llama de premezcla depende una operación segura y eficiente en los sistemas de combustión donde se aplican este tipo de llamas. Una condición de inestabilidad ocurre cuando uno de los siguientes fenómenos se presenta:

Desprendimiento de llama o blow off

Debido a que se pierde el equilibrio en el frente de llama entre la velocidad de deflagración laminar local y la componente perpendicular de la velocidad de la corriente de la mezcla aire-gas, resultando esta mayor, la llama se desprende parcial o totalmente de su base, pudiendo evolucionar a una condición de llama área, enfriamiento y posterior apagado [4]. En la figura 3 se expone una representación esquemática de la secuencia descrita.

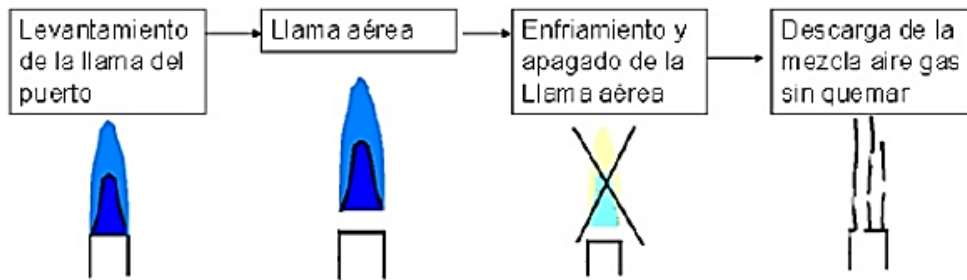


Figura 5. Secuencia en el desprendimiento de llama de premezcla laminar

Retrollama o flash back

Este fenómeno ocurre cuando en el frente de llama el equilibrio se rompe, al ser la velocidad de deflagración local mayor que la componente perpendicular de la velocidad flujo aire y gas, el frente de llama viaja por el interior del mezclador, pudiéndose llegar a prender fuego en el inyector al establecerse en el orificio de descarga del gas combustible una llama de difusión. Suele suceder cuando se presentan alteraciones bruscas en el caudal de la corriente de aire y gas que circula por el mezclador, es un fenómeno típico cuando se utiliza hidrógeno o mezclas de este con hidrocarburo, debido a la alta velocidad de deflagración [4].

1.3. Intercambiabilidad de gases combustibles

La intercambiabilidad es la habilidad de sustituir un combustible gaseoso por otro, en una aplicación de combustión, sin que se presente un cambio sensible en la seguridad operacional, la eficiencia, el desempeño o el incremento de las emisiones contaminantes. También se entiende como un gas puede ser sustituido por otro perteneciente a la misma familia, sin alterar las condiciones óptimas de operación del equipo, garantizando la seguridad del usuario y manteniendo las emisiones de gases contaminantes dentro del rango permisible. Todo esto debe ser posible sin la necesidad de hacer ajustes en el diseño del equipo de combustión.

Se admite generalmente que la intercambiabilidad puede estar limitada al uso térmico clásico. Pero la experiencia ha demostrado que, en general dos gases son intercambiables, lo son en otros usos y pocos casos necesitan de un estudio particular [9]. Sin embargo, este tipo de estudios se realizan con el fin de predecir de forma rápida y efectiva el desempeño de los equipos de combustión, debido a que los quemadores presentan una alta sensibilidad a la composición del gas y son menos tolerantes a las fluctuaciones de la composición, luego de que el equipo ha sido calibrado para funcionar con un tipo de gas combustible.

Se dice que dos gases son intercambiables cuando, distribuidos bajo la misma presión, en la misma red, alimentando los mismos quemadores y sin cambios de regulación producen los mismos resultados de combustión: flujo calorífico, posición

y comportamiento de la llama. Siendo la combustión, por naturaleza, una reacción química, no puede existir una intercambiabilidad absoluta [10].

Todos los estudios de intercambiabilidad conocidos hasta la fecha, han tenido su fundamentación en estudios empíricos, asociados a un gran componente experimental. Dichos ensayos partían de la premisa de conseguir un desempeño satisfactorio en los artefactos de gas, representados por sus quemadores. Los cuatro parámetros empleados fueron:

- Potencia térmica constante.
- Estabilidad de llama (desprendimiento y retroceso)
- Emisiones de monóxido de carbono.
- Hollín (punta amarilla + superficie fría)

Los estudios de intercambiabilidad de gases conocidos pueden agruparse en dos categorías: Métodos Norteamericanos y Métodos Europeos. Ambos grupos basan sus criterios en las propiedades físico-químicas del gas asociadas al cálculo de magnitudes llamadas índices de intercambiabilidad; sin embargo, el método europeo adicionalmente, considera varios criterios de diseño asociados al quemador. Esto permite una mejor caracterización y en consecuencia un rango más ajustado y preciso de intercambiabilidad.

Por otro lado, se pueden clasificar los métodos de intercambiabilidad por grupos dependiendo de los parámetros involucrados en la estimación de la intercambiabilidad de los gases. Los grupos se agrupan de la siguiente manera:

- Grupo 1 o Métodos de índices simples: Dentro de este grupo se encuentran los índices de Wobbe, Knoy, Willien, Shuster y el índice C de la Asociación Americana de Gas (AGA).
- Grupo 2 o Métodos de índices múltiples: Como modelos empíricos, los métodos de índices múltiples también tienen limitaciones basadas en el diseño del quemador y los gases combustibles evaluados en el desarrollo de su deducción. Incluyen los índices de la AGA y Weaver.
- Grupo 3 o Métodos con diagramas o gráficos: En este grupo se encuentran los métodos planteados por Delbourg, Girbery y Priggs, Dutton, Grumer, Holmqvist y Van der Linden.
- Grupo 4 u otros: Método de Sommers—Ruhrdas

La noción de intercambiabilidad involucra aspectos tales como: composición de los gases, condiciones de alimentación de los aparatos, características del proceso de combustión, flexibilidad de los aparatos para el uso de diferentes gases, los ajustes

que se deben realizar y la severidad de los criterios para juzgar el buen funcionamiento de los aparatos.

Ahora, el principal índice para definir la intercambiabilidad entre gases es el índice de Wobbe, el cuál asegura que dos o más gases son intercambiables si poseen igual número de Wobbe. Este número caracteriza un quemador desde el punto de vista de sus condiciones de operación y expresa la capacidad de un gas para entregar calor a un quemador.

Este índice es una función del poder calorífico superior volumétrico del gas y de su densidad relativa:

$$W_s = \frac{PCS}{\sqrt{d}} \quad (4)$$

Donde:

W_s es el índice de Wobbe superior, PCS es el poder calorífico superior y d es la densidad relativa del gas. Se puede notar que si existe un índice de Wobbe superior también hay un índice de Wobbe inferior.

$$W_i = \frac{PCI}{\sqrt{d}} \quad (5)$$

Donde:

W_i es el índice de Wobbe inferior, PCI es el poder calorífico inferior y d es la densidad relativa del gas. Al intercambiar un gas 1 por un gas 2 variará el caudal energético Φ (y por tanto la potencia) del quemador en la misma proporción que la de sus índices de Wobbe respectivos:

$$\phi_2 = \frac{W_2}{W_1} \phi_1 \quad (6)$$

El índice de Wobbe correlaciona mejor que el mero poder calorífico del combustible el comportamiento de la llama al intercambiar dos gases combustibles. Particularmente para gases con composición similar, el índice de Wobbe es un buen indicativo del desempeño de los dos gases [10]. Sin embargo, el índice de Wobbe no es suficiente para determinar la intercambiabilidad de gases combustibles, se necesitan identificar otros factores como:

- ✓ La misma estabilidad de llama, con ausencia de desprendimiento de la llama y ausencia de retrollama.

- ✓ Identica calidad de combustión (relación de volúmenes de CO y CO₂ inferior al límite máximo admitido)
- ✓ El mismo rendimiento de combustión.
- ✓ El mismo volumen de aire seco necesario para la combustión o también llamado poder comburívoro y la misma temperatura de rocío en los humos.
- ✓ Mismo factor de aireación.

Finalmente, la intercambiabilidad cobra importancia en el ámbito nacional cuando surgen escenarios donde se cambian gases combustibles como el gas natural, el GLP o el biogás en sistemas de generación, cocción y calentamiento.

1.3.1. Propiedades de combustión asociadas a la intercambiabilidad de una mezcla de gases

Emisiones de monóxido de carbono: CO

La combustión incompleta del gas natural puede resultar en la presencia de monóxido de carbono en los gases de salida. La presencia de CO representa un problema para la salud y seguridad ya que es un gas extremadamente tóxico. El incremento de CO puede ser consecuencia del exceso de aire, ya que este exceso puede afectar el proceso de combustión y en consecuencia no todo el CO es completamente oxidado a CO₂.

Efecto de la altura y la presión sobre la intercambiabilidad

Elevación

La operación de los equipos a elevadas alturas puede verse afectada debido al efecto de la reducción de la presión atmosférica en las densidades de los gases. Los equipos son diseñados para trabajar con una tasa determinada de entrada de gases combustibles a condiciones del nivel del mar. La densidad de aire se reduce con la altitud, y con ello la concentración de oxígeno. Como efecto final a elevadas altitudes, se lleva menos oxígeno a la zona de combustión y por lo tanto menos gas puede ser quemado de forma completa en un tiempo dado, con lo cual el flujo de gas combustible debe ser restringido.

Altura de cono azul

Para un quemador atmosférico de inducción, se puede establecer una relación para aproximar la altura del cono de la llama en función de las características relacionadas con la composición del combustible. Esta altura se puede calcular a partir de la ley de Gouy dada por:

$$\frac{\Sigma}{\sigma} = \frac{U}{V} \quad (7)$$

Dónde Σ es el área del frente de llama, σ es la sección del orificio de formación de la llama, U es la velocidad media de flujo de la sección σ y V es la velocidad de deflagración laminar de la mezcla gaseosa.

Si el orificio sobre el cual se estabiliza la llama es de forma circular y si la velocidad del flujo es idéntica en todos los puntos de la sección σ , el frente de llama adopta la forma de cono donde la altura se deduce de la ley de Gouy.

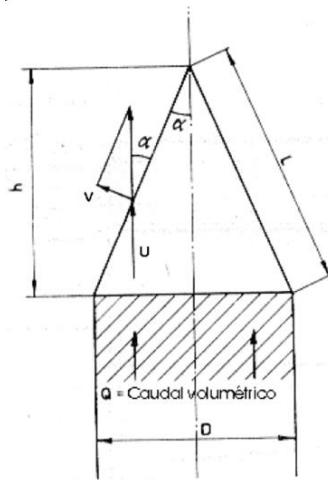


Figura 6. Altura del cono azul.

$$\text{Dado que } dh = \tan(\alpha) dr = \sqrt{\frac{1}{\cos^2(\alpha)} - 1} * dr,$$

de la condición de Gouy $V = U * \cos(\alpha)$ se tiene que:

$$dh = \sqrt{\frac{U^2}{V^2} - 1} * dr \quad (8)$$

y al resolver la ecuación diferencial se obtiene:

$$H = R \sqrt{\frac{U^2}{V^2} - 1} \quad (9)$$

Y si $\frac{U^2}{V^2} \gg 1$, entonces $H = R \frac{U}{V}$.

En un quemador de inducción de aire-gas:

$$U = \frac{q_g(1 + F)}{\sigma} \quad (10)$$

Dónde q_g es el caudal de la mezcla de gas y F la relación aire-gas de la mezcla. Finalmente, Delbourg propone que, debido a que q_g es inversamente proporcional a \sqrt{d} y R es proporcional a \sqrt{d} , siendo d la gravedad específica del gas, entonces la altura del cono azul es de la forma:

$$h = k_1 \frac{\frac{1}{\sqrt{d}} + k_2}{V} \quad (11)$$

En las tecnologías de combustibles gaseosos, la altura del cono azul ha sido utilizada como un criterio para examinar la intercambiabilidad de los gases de una misma familia, con el fin de predecir las emisiones de monóxido de carbono y la estabilidad de llama. Cuando dos gases de composición química diferente funcionan en un quemador atmosférico, no existirán problemas de intercambiabilidad si la altura del cono azul permanece sin alterar. Sin embargo, la altura del cono azul se ve afectada por las condiciones de presión atmosférica. Según el estudio realizado por Delbourg, para un quemador dado, las tres curvas límite de combustión incompleta, desprendimiento y retollama, dependen esencialmente de un parámetro relacionado con la altura del cono azul de la llama. Sin embargo, no se pudo relacionar la curva límite de puntas amarillas con el mismo parámetro.

Fenómeno de las puntas amarillas

Los quemadores están normalmente ajustados para producir una llama de color azul (llama de premezcla). Sin embargo, un cambio en el radio de equivalencia puede tornar la punta de la llama en amarilla, lo cual significa que la reacción no se llevó a cabo de manera completa en la zona de premezcla. El fenómeno de puntas amarillas también puede suceder debido a la formación de hollín en el frente primario de la llama. Las puntas amarillas no son por si solas una preocupación, siempre que el hollín formado en el frente primario sea quemado en el frente secundario de la llama.

La formación del hollín y las puntas amarillas es un proceso complejo relacionado con el radio de equivalencia. Un incremento en el radio de equivalencia incrementará la tendencia a las puntas amarillas. Sin embargo, ya que diferentes alcanos tienen tendencias diferentes a la formación de hollín, el radio de equivalencia por sí solo no es suficiente para describir las puntas amarillas. La composición del combustible también es un factor. Por lo anterior, la tendencia de las puntas amarillas ha sido determinada a partir de los parámetros empíricos que se mencionan en este artículo.

Potencia específica

La potencia específica de una llama se define como la relación entre el calor liberado en el frente de llama primario de combustión en la unidad de tiempo y el área superficial de la llama. Esta magnitud es una medida de concentración de calor en el frente de llama, y se expresa en kW/m². Para una mezcla estequiométrica viene dada por la expresión:

$$P_S = \frac{P_t}{A_S} \quad (12)$$

Dónde P_S es la potencia específica, P_t es la potencia total con base en el poder calorífico y A_S es el área superficial primaria. También puede ser calculada de la expresión:

$$P_S = V * H_{lm} \quad (13)$$

Dónde V es la velocidad de deflagración laminar y H_{lm} el poder calorífico inferior másico.

Temperatura de rocío

La combustión de hidrocarburos (C_nH_m) e hidrógeno produce vapor, el cual se encuentra en los productos de la combustión. La temperatura a la cual se inicia la condensación del vapor de agua en los productos de combustión se denomina temperatura de rocío. Cuando se conoce la combustión estequiométrica de un C_nH_m y el H_2 y la presión a la que ocurre, es posible determinar la temperatura o punto de rocío. En las reacciones de combustión, se debe evitar la condensación en los conductos de evacuación de humos, para prevenir el deterioro de los materiales constitutivos de estos por causa de la humedad.

Temperatura de ignición

Es la temperatura mínima que debe alcanzar la mezcla combustible-comburente para que se inicie la combustión y se auto-propague. Esta temperatura depende de la composición de la mezcla combustible-comburente, de la presión y de la presencia de sensibilizadores (sustancias que disminuyen el punto de ignición) o de inhibidores (sustancias que lo aumentan).

1.4. Herramientas computacionales para el estudio de fenómenos de combustión

Para el desarrollo de este proyecto se utilizan dos herramientas de software: EES y CHEMKIN PRO. EES es usado en los balances de reacción de combustión y en la parametrización del factor de aireación para cada combustible, mientras que CHEMKIN PRO es la herramienta utilizada para realizar las simulaciones de extinción de llama. Para la elaboración de este trabajo de grado se utilizaron: La licencia del software EES que se encuentra activa desde la facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Bucaramanga, a través del programa de Ingeniería en Energía y el cuerpo docente del programa; y por otro lado la licencia del software CHEMKIN fue facilitada por el Grupo de Investigación en Gas y Uso Racional de la Energía GASURE de la UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

1.4.1. EES: Engineering Equation Solver

EES es un programa general de resolución de ecuaciones que puede resolver numéricamente miles de ecuaciones algebraicas y diferenciales no lineales acopladas. El programa también puede utilizarse para resolver ecuaciones diferenciales e integrales, hacer optimización, proporcionar análisis de incertidumbre, realizar regresiones lineales y no lineales, convertir unidades, verificar la coherencia de la unidad y generar parcelas de calidad de publicación. Una característica importante de EES es la base de datos termodinámica de alta exactitud y propiedad de transporte que se proporciona para cientos de sustancias de una manera que permite que se utilice con la capacidad de resolución de ecuaciones [11].

1.4.2. CHEMKIN PRO

CHEMKIN PRO es una herramienta de software diseñada para resolver problemas complejos de cinética química. Es utilizado para estudios de combustión, procesamiento químico, microelectrónica, en la industria de la automoción y en la ciencia atmosférica. Inicialmente fue desarrollado por el Laboratorio Nacional Sandia pero actualmente está en manos de la compañía norteamericana Reaction Design. CHEMKIN PRO resuelve miles de combinaciones de reacción para desarrollar una comprensión global de un proceso en particular, lo que podría

implicar múltiples especies químicas, intervalos de concentración, y la temperatura del gas [12].

Este software de simulación de la cinética química permite realizar una investigación más eficiente en el tiempo de un nuevo proceso de potencial en comparación con la investigación directa de laboratorio. Un factor importante para el desarrollo y uso de CHEMKIN PRO es la reducción de contaminantes, tales como NO_x . A medida que estos contaminantes se han vuelto más controlados y regulados a nivel mundial, los desarrolladores han modificado la tecnología de simulación. Una limitación de CHEMKIN PRO es que asume que el recipiente de reacción tiene una relativamente simple geometría [12]. Por esa razón, un programa relacionado llamado KINetics se utiliza a menudo en conjunción con herramientas computacionales de dinámica de fluidos.

2. METODOLOGÍA

2.1. Metodología de simulación

Para el desarrollo del presente trabajo de grado se plantea la siguiente metodología:

- i. Realizar una revisión del panorama de los gases combustibles que son utilizados en Colombia con la finalidad de identificar sus usos finales, sus propiedades y sus fracciones molares.
- ii. Establecer la ecuación estequiométrica para cada gas o mezcla de gases combustibles y determinar la cantidad de aire teórico requerido en cada reacción de combustión.
- iii. Ejecutar parametrizaciones del factor de aireación n para cada gas o mezcla de gases combustibles, con el objetivo de calcular la variación de las fracciones molares de cada elemento o sustancia dentro de la reacción y establecer las cantidades exactas de reactivos.
- iv. Seleccionar los mecanismos de reacción que serán utilizados en la simulación dependiendo de la naturaleza de los elementos, las especies y la cantidad de reacciones que el/los mecanismos presenten.
- v. Establecer los parámetros de simulación que serán usados con los diferentes gases combustibles en el software CHEMKIN PRO en el modelo de *llama opuesta*.
- vi. Desarrollar las simulaciones de extinción de llama para cada factor de aireación n de cada combustible gaseoso a una velocidad de entrada de 80 cm/s . A partir de estas simulaciones obtener los datos requeridos para la construcción de las curvas presentadas como resultados.
- vii. Repetir el paso (iii) a una velocidad de entrada de 50 cm/s para cada gas o mezcla de gases combustibles.

2.2. Panorama de los gases combustibles en Colombia

2.2.1. Biogás

El Biogás o gas de síntesis es un gas combustible producto de las reacciones de biodegradación de la materia orgánica de forma natural o artificial en dispositivos específicos. Su composición específica y la cantidad de biogás que puede ser obtenido dependen directamente de las características del material que sufre dicho proceso de descomposición anaeróbica, usualmente los residuos orgánicos obtenidos en vertederos y los residuos de cultivos son aprovechados para la

producción de este gas combustible. En términos generales, el Biogás está compuesto entre 50 y 70% de metano, 40 y 30% de dióxido de carbono y algunas trazas poco significativas de compuestos orgánicos No-Metánicos.

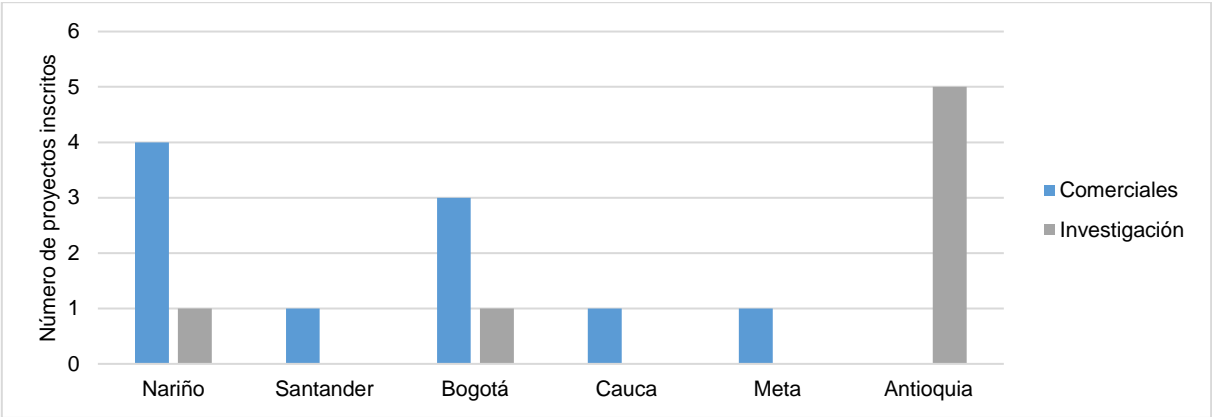


Figura 7. Número de proyectos de generación de Biogás en Colombia inscritos ante SGI&C - FNCER

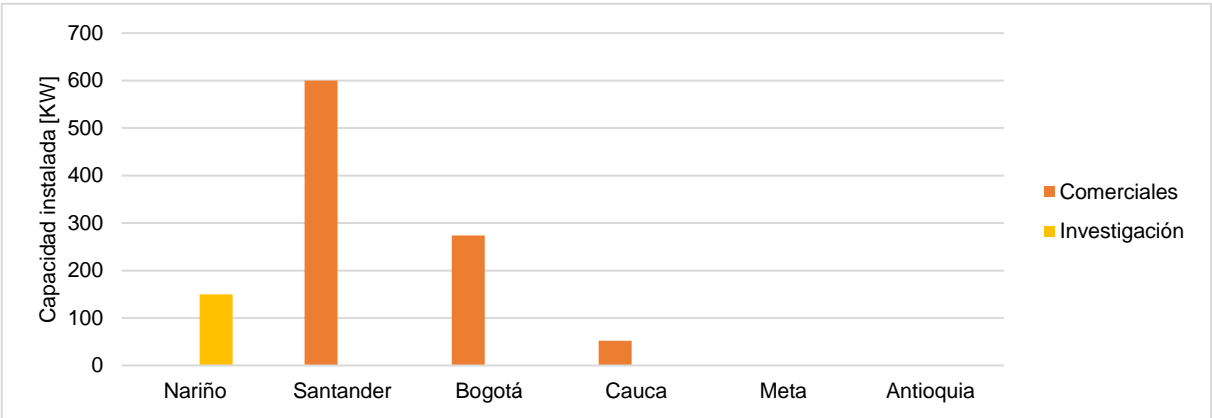


Figura 8. Capacidad instalada de generación energía a partir de Biogás en Colombia inscritos ante SGI&C - FNCER

Actualmente se encuentran registrados un total de 10 proyectos comerciales y 7 proyectos con fines de investigación y desarrollo ante el Sistema de Gestión de Información y Conocimiento en Fuentes No Convencionales de Energía Renovables en Colombia. En términos de capacidad registrada se cuentan con un total de 927 KW instalados para proyectos comerciales y solo 151 KW en proyectos de investigación y desarrollo. Cabe resaltar que la información aquí presentada hace referencia a los proyectos inscritos ante la seccional de la Unidad de Planeación Minero Energética Nacional, sin embargo, pueden existir otros proyectos tanto comerciales como de investigación y desarrollo que actualmente estén operando en el país.

Para el modelamiento de la estructura y los límites de estabilidad de llama para el biogás presentados más adelante, se decidió trabajar con una mezcla de 60% Metano y 40% Dióxido de carbono. ($0.6\text{CH}_4 + 0.4\text{CO}_2$).

2.2.2. Gas Licuado de Petróleo

El GLP o Gas Licuado de Petróleo es un combustible que proviene de la mezcla de dos hidrocarburos principales: el propano C_3H_8 , el butano C_4H_{10} y otros en menor proporción. Es obtenido de la refinación del crudo del petróleo o del proceso de separación del crudo o gas natural en los pozos de extracción. Los gases que componen el GLP son los productos que se desprenden a lo largo del proceso, quedando libres de azufre, plomo y con bajo contenido de carbono. Esta mezcla de hidrocarburos permanece gaseosa en condiciones ambientales, pero se convierte a un estado líquido cuando se somete a presiones moderadas, lo que facilita su transporte y no requiere de grandes infraestructuras ni complicadas redes para su distribución.

La oferta de GLP en Colombia ha estado principalmente cubierta por la producción nacional. Por más de 70 años Ecopetrol fue el único productor de GLP en el país, sin embargo, a principios de 2014 el 6% del GLP comercializado para el servicio público domiciliario provenía de productores diferentes a Ecopetrol, tales como: Canacol Energy Colombia S.A, InterOil Colombia E&P, Vetra E&E Colombia S.A, Pereco Colombia Limited, Petrominerales Colombia LTD y Termoyopal [13].

Aun así, Ecopetrol cubre el 94% de la oferta con los productos de las refinerías de Apiay, Barrancabermeja, Cartagena y Cusiana; por esta razón en este trabajo se tomarán las composiciones de los GLP procedentes de las refinerías de Ecopetrol para el estudio de estructura y estabilidad de llama.

La comercialización del GLP se realiza de dos maneras: ventas en cilindros y ventas a tanques estacionarios. La primera modalidad representa alrededor del 85% del total del consumo, mientras que el 15% restante hace referencia a tanques estacionarios: 7% en el sector industrial, 7% en el sector comercial y 1% en el sector residencial. La figura 9 se muestran los datos resumidos por el Sistema Único de Información a finales del año 2012, donde se evidencia que los centros de mayor consumo de cilindros de GLP se concentran en los departamentos más poblados como Antioquía y Cundinamarca, y aquellos al sur del país donde el gas natural aún no había sido masificado como Nariño y Valle del Cauca. Ahora bien, las ciudades de mayor consumo en su orden son Bogotá (167486), Medellín (113393) y Pasto (79977) [13].

Entre otros factores, las estadísticas relacionadas con la comercialización de GLP en los últimos años evidencia el cambio que ha sufrido el sector principalmente tras la masificación del gas natural. Por ejemplo, la disminución acumulada del consumo en un 27% entre 2002 y 2013, la pérdida de cerca de 4 millones de usuarios, la

dispersión del mercado y frente a estas condiciones, un incremento en las ventas de cilindros a través de expendios. [13]

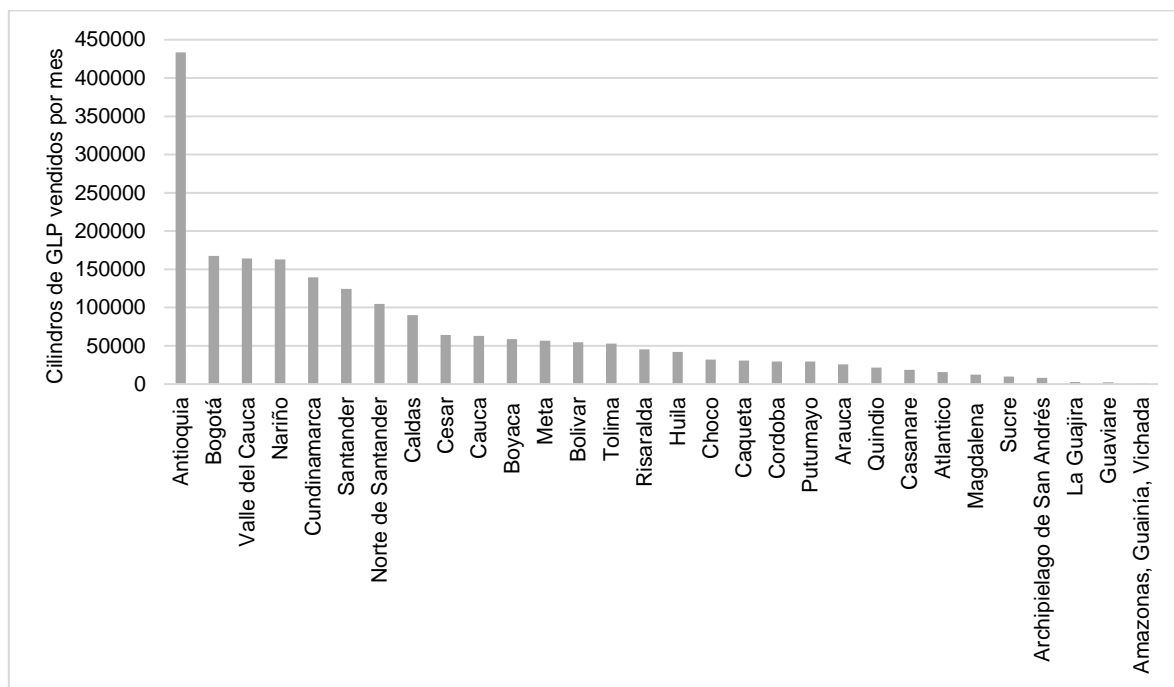


Figura 9. Ventas totales de cilindros por departamento, en número de cilindros/mes en el año 2012.

2.2.3. Gas Natural

El Gas Natural es una mezcla de hidrocarburos gaseosos ligeros que se extrae, bien sea de yacimientos independientes (gas libre), o junto a yacimientos petrolíferos o de carbón (gas asociado a otros hidrocarburos gases y líquidos peligrosos). [15] Su composición varía según el yacimiento de donde provenga, sin embargo, su principal especie química es el metano CH_4 al 79 – 97%. Otras especies como el etano, propano, butano, nitrógeno, impurezas y trazas de hidrocarburos más pesados constituyen el porcentaje restante de su composición.

En la canasta energética nacional el gas natural es uno de los principales energéticos utilizados por el sector industrial, y dentro de la estructura de consumo de 2015 este sector ocupó el segundo lugar, con una participación de 28%, precedido por el sector eléctrico. En ese mismo año, este fue uno de los sectores que mostró tasas de decrecimiento, pasando en promedio de 275 GBTUD en 2014 a 263 GBTUD, lo que representa una disminución del 4%.

Por otro lado, el servicio de gas natural cubre a más de 7.9 millones de hogares y mantiene un consumo promedio relativamente estable por hogar que se aproxima a los 17 m^3 mensuales, en las diferentes zonas del país. Ahora, por años se consideró que la demanda de gas natural en el sector comercial o terciario crecía a

tasas muy parecidas a las del sector residencial. Sin embargo, durante 2015 el consumo de gas natural en este sector presentó una disminución de 14.7% con respecto al 2014. [16]

El Sistema Interconectado Nacional registro una capacidad instalada de 16,488 MW a enero de 2016, de las cuales el 70.45 % corresponde a centrales hidroeléctricas. El país cuenta con energía firme de respaldo tanto por unidades de generación hidráulica como de generación térmica que son propulsadas por combustibles fósiles como el gas natural, carbón mineral y el derivado del petróleo como se puede observar en la figura 10. De los 4,871.9 MW térmicos instalados, el gas natural cubre 1,931.5 MW distribuidos en 16 unidades las cuales están enlistadas en la Tabla 1. La mayor contribución está en el departamento del Atlántico donde se concentra cerca del 65% de las unidades de generación térmica a gas, seguido por el departamento de Santander con cerca del 25% y el restante 10% se concentra en los departamentos de Bolívar, Casanare y Tolima.

La alta relevancia del gas natural como energético en los diferentes sectores de consumo de Colombia conlleva a adaptar los múltiples sistemas combustibles como generadores eléctricos, hornos, calderas y sistemas de cocción, a las características particulares de este energético; dichas características dependen de la composición específica del gas natural utilizado, la cual varía según la cuenca de donde provenga y más específicamente según de la formación de la que proviene.

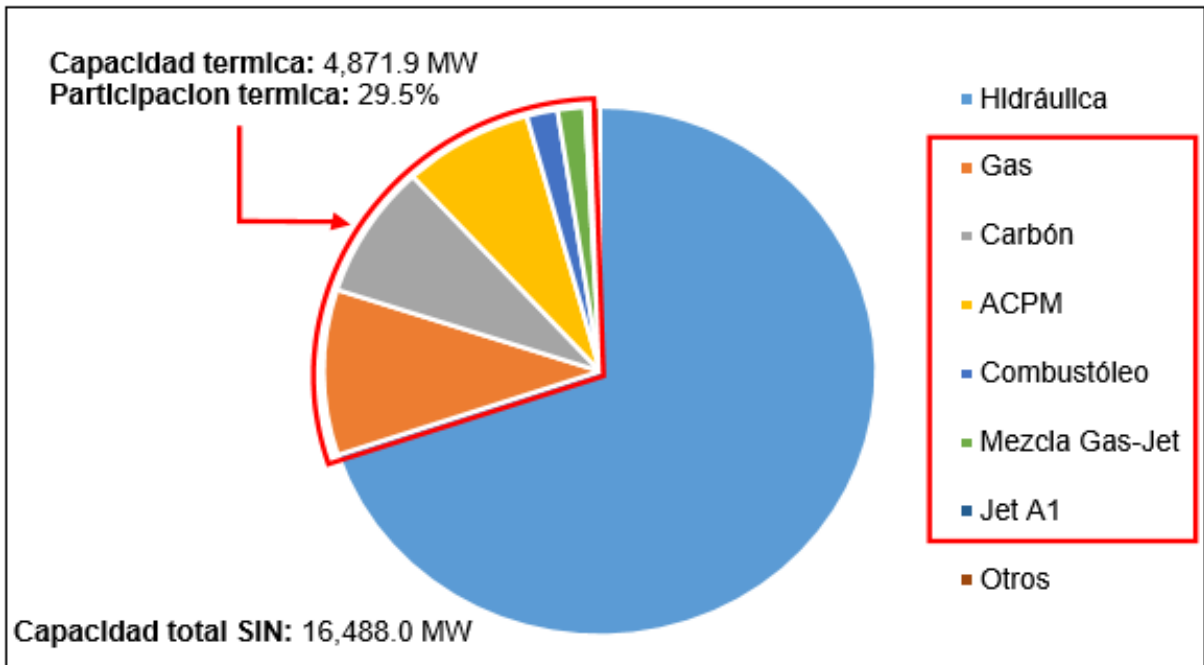


Figura 10. Capacidad instalada por energético en el Sistema Interconectado Nacional. Fuente: UPME

Tabla 1. Lista de las unidades térmicas en Colombia que utilizan gas natural como combustible. Fuente: UPME

Unidad Térmica	Ubicación	Capacidad [MW]
Tebsa	Atlántico	791
Flores 4b	Atlántico	450
Termocentro	Santander	264
Merilectrica 1	Santander	167
Proelectrica 1	Bolívar	45
Proelectrica 2	Bolívar	45
Termoyopal 2	Casanare	30
Barranca 3	Santander	24
Cimarrón	Casanare	20
El Morro 1	Casanare	19.9
El Morro 2	Casanare	19.9
Termoyopal 1	Casanare	19.9
Barranca 1	Santander	12
Barranca 2	Santander	12
Purificación	Tolima	8
Termopiedras	Tolima	3.8
Total		1931.5

En la figura 11 se observa la distribución de las 23 cuencas sedimentarias de hidrocarburos en Colombia [16]. De estas 23 cuencas, 11 son cuencas productoras, esto quiere decir que tienen potencial de hidrocarburos y además se encuentran produciendo [17].

Existen 8 cuencas de hidrocarburos con reservas de gas natural, 7 de estas cuencas abastecen la demanda de este combustible en el territorio nacional: cuenca Caguán-Putumayo (anteriormente cuenca Putumayo), cuenca Catatumbo, cuenca Cordillera Oriental, cuenca La Guajira, cuenca Llanos Orientales, cuenca Valle Inferior del Magdalena, cuenca Valle Medio del Magdalena. La Tabla 2 resume los campos de producción que hacen parte de cada una de las cuencas sedimentarios que a 2016 aportan gas natural a la oferta nacional.

Antes de la propuesta realizada por la Agencia Nacional de Hidrocarburos para la definición de los límites de las cuencas sedimentarias de Colombia, los campos que hoy conforman la cuenca Cordillera Oriental hacían parte de la cuenca Llanos Orientales.

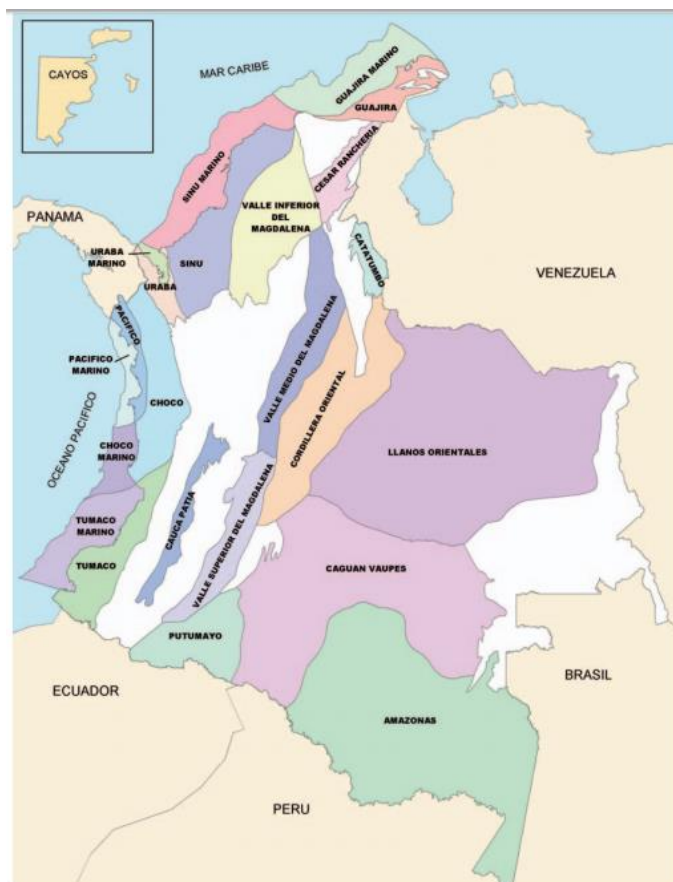


Figura 11. Distribución de las cuencas sedimentarias en el territorio colombiano.

Tabla 2. Pozos que conforman las cuencas productoras de gas natural en Colombia

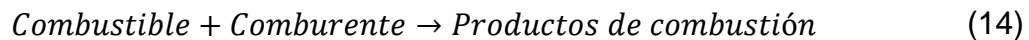
CUENCA	CAMPOS DE GAS
Caguán-Putumayo	Costacayo, Guayuyaco, Juanambu y Moqueta.
Catatumbo	Cerrito, Oriyapa, Sardinata y Tibú.
Cordillera Oriental	Gibraltar, Guaduas y Palagua.
Guajira	Ballena y Chucupa.
Llanos Orientales	Apiay, Calona, Campo Rico, Carmentea, Centauro, Cupiagua, Cusiana, Florencia, Kananaskis, La Casona, La Estancia, La Punta, Pauto Sur, Ramiriqui, Santo Domingo Centro, Santo Domingo Juape, Santo Domingo Norte, Vigía y Vigía Sur.
Valle Inferior del Magdalena	Arianna, Bonga, Bullerengue, Caña Flecha, Cicucco, Clarinete, El Difícil, Katana, La Creciente, Mamey, Nelson, Palmer y Pedernalito.
Valle Medio del Magdalena	Caramelo, Compae, Corazón, Corazón 9, Corazón Wet, Corazón West C, La Gira Infanta, La Salina, Liebre, Lisama, Llanito, Opón, Payoa, Payoa West, Provincia, Puli, Toposi, Toqui Toqui y Yarigui Cantagallo.
Valle Superior del Magdalena	Arayan, Dine Terciario, La Cañada Norte, La Hocha, Mana, Matachin Norte y Sur, Río Opia, Santa Clara

2.3. Ecuación estequiométrica

Como se ha mencionado anteriormente, el proceso de combustión es una reacción química y como tal, puede ser expresada a partir de una ecuación de reacción. Las ecuaciones químicas se balancean con base en el principio de la conservación de la masa (o el balance de masa): *La masa total de cada elemento se conserva durante una reacción química.* [18]

Una ecuación química es una relación que muestra las cantidades relativas de reactivos y productos involucradas en una reacción, así mismo indica el estado de agregación de las sustancias involucradas y condiciones (temperatura, presión, catalizadores) bajo las cuales se efectúa la reacción. [19] Ahora bien, la estequiometría es la rama de la química que estudia las relaciones cuantitativas entre las sustancias que intervienen en una reacción.

En términos generales, la reacción de combustión se resume de la siguiente manera:



Para una reacción química se debe tener en cuenta que:

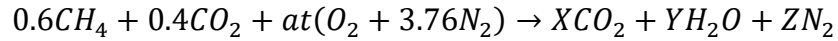
- Los componentes iniciales en una reacción de combustión (combustible y comburente) también son conocidos como reactantes.
- Los números delante de los componentes, compuestos y/o elementos son denominados coeficientes estequiométricos. En la práctica representan el número de moles del componente.

La reacción estequiométrica o teórica tiene lugar cuando ocurre una combustión completa, sin exceso de aire (oxígeno). Es decir, una reacción con la cantidad mínima de comburente capaz de producir una combustión completa. Por consiguiente, no debe aparecer oxígeno sobrante en los productos de la reacción.

Si la reacción teórica es la reacción de combustión total, pasando todo el C a CO_2 y H a H_2O independiente del proceso de combustión posterior, se habla entonces de que la reacción cuenta con la cantidad de aire teórico o estequiométrico para esa reacción, la cuál es la cantidad mínima de aire que proporciona el oxígeno necesario para que se produzca una composición completa.

Para el desarrollo de este trabajo se establecieron las ecuaciones estequiométricas para cada gas combustible propuesto y de esta manera se obtuvo la cantidad de aire teórico. A continuación, se presentan las ecuaciones de reacción para cada mezcla de gases.

1) Para el Biogas (60% CH₄ + 40% CO₂) se tiene la ecuación estequiométrica:



$$C: 0.57 + 0.38 = X$$

$$X = 1$$

$$H: 0.6(4) = 2Y$$

$$Y = 1.2$$

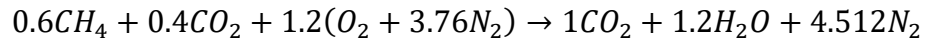
$$O: 0.4(2) + 2at = 2X + Y$$

$$at = 1.2$$

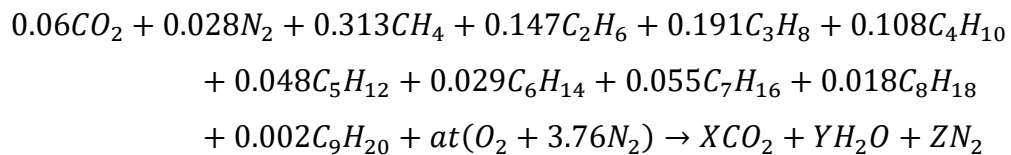
$$N: at * 3.76(2) = 2Z$$

$$Z = 4.512$$

Realizado el balance de ecuaciones, se tiene que para el Biogas la ecuación estequiométrica resultante es:



2) Para el Gas Natural de la cuenca Caguán-Putumayo (6% CO₂ + 2.8% N₂ + 31.3% CH₄ + 14.7% C₂H₆ + 19.1% C₃H₈ + 10.8% C₄H₁₀ + 4.8% C₅H₁₂ + 2.9% C₆H₁₄ + 5.5% C₇H₁₆ + 1.8% C₈H₁₈ + 0.2% C₉H₂₀) se tiene la ecuación estequiométrica:



$$C: 0.06 + 0.313 + 0.147(2) + 0.191(3) + 0.108(4) + 0.048(5) + 0.029(6) \\ + 0.055(7) + 0.018(8) + 0.002(9) = X$$

$$H: 0.313(4) + 0.147(6) + 0.191(8) + 0.108(10) + 0.048(12) + 0.029(14) \\ + 0.055(16) + 0.018(18) + 0.002(20) = 2Y$$

$$O: 0.06(2) + 2at = 2X + Y$$

$$N: 0.028(2) + at * 3.76(2) = 2Z$$

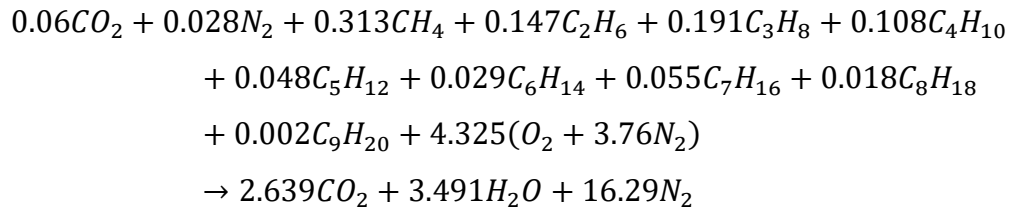
$$X = 2.639$$

$$at = 4.325$$

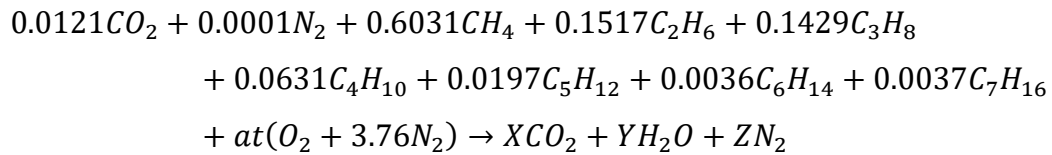
$$Y = 3.491$$

$$Z = 16.29$$

Realizado el balance de ecuaciones, se tiene que para el Gas Natural de la cuenca Caguán-Putumayo la ecuación estequiométrica resultante es:



- 3) Para el Gas Natural de la cuenca Catatumbo (1.21% CO₂ + 0.01% N₂ + 60.31% CH₄ + 15.17% C₂H₆ + 14.29% C₃H₈ + 6.31% C₄H₁₀ + 1.97% C₅H₁₂ + 0.36% C₆H₁₄ + 0.37% C₇H₁₆) se tiene la ecuación estequiométrica:



$$\begin{aligned}
\mathbf{C}: &0.0121 + 0.6031 + 0.1517(2) + 0.1429(3) + 0.0631(4) + 0.0197(5) \\
&\quad + 0.0036(6) + 0.0037(7) = X
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{H}: &0.6031(4) + 0.1517(6) + 0.1429(8) + 0.0631(10) + 0.0197(12) \\
&\quad + 0.0036(14) + 0.0037(16) = 2Y
\end{aligned}$$

$$\mathbf{O}: 0.0121(2) + 2at = 2X + Y$$

$$\mathbf{N}: 0.0001(2) + at * 3.76(2) = 2Z$$

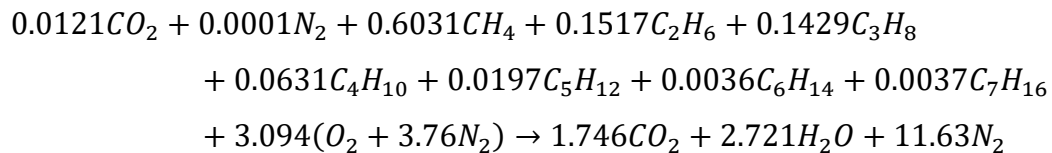
$$X = 1.746$$

$$at = 3.094$$

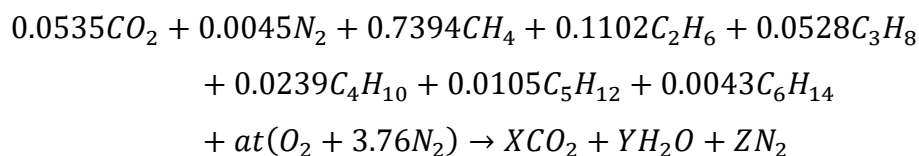
$$Y = 2.721$$

$$Z = 11.63$$

Realizado el balance de ecuaciones, se tiene que para el Gas Natural de la cuenca Catatumbo la ecuación estequiométrica resultante es:



- 4) Para el Gas Natural de la cuenca Cordillera Oriental (5.35% CO₂ + 0.45% N₂ + 73.94% CH₄ + 11.02% C₂H₆ + 5.28% C₃H₈ + 2.39% C₄H₁₀ + 1.05% C₅H₁₂ + 0.43% C₆H₁₄) se tiene la ecuación estequiométrica:



$$C: 0.0535 + 0.7394 + 0.1102(2) + 0.0528(3) + 0.0249(4) + 0.0105(5) \\ + 0.0043(6) = X$$

$$H: 0.7394(4) + 0.1102(6) + 0.0528(8) + 0.0249(10) + 0.0105(12) \\ + 0.0043(14) = 2Y$$

$$O: 0.0535(2) + 2at = 2X + Y$$

$$N: 0.0045(2) + at * 3.76(2) = 2Z$$

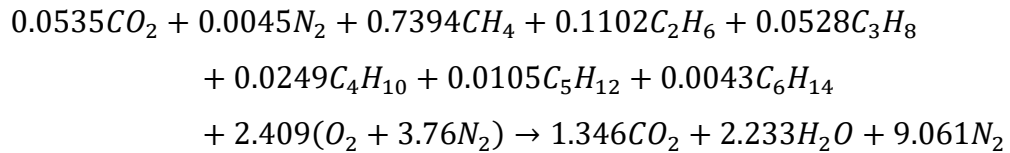
$$X = 1.346$$

$$at = 2.409$$

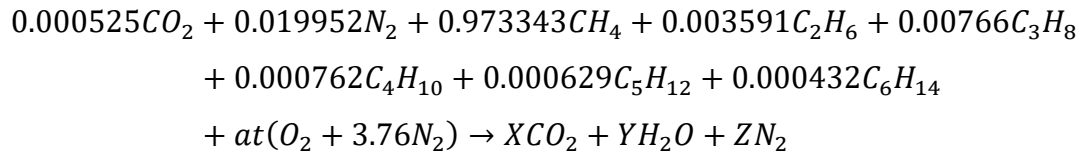
$$Y = 2.233$$

$$Z = 9.061$$

Realizado el balance de ecuaciones, se tiene que para el Gas Natural de la cuenca Cordillera Oriental la ecuación estequiométrica resultante es:



- 5) Para el Gas Natural de la cuenca La Guajira (0.0525% CO₂ + 1.9952% N₂ + 97.3343% CH₄ + 0.3591% C₂H₆ + 0.766% C₃H₈ + 0.0762% C₄H₁₀ + 0.0629% C₅H₁₂ + 0.0432% C₆H₁₄) se tiene la ecuación estequiométrica:



$$C: 0.000525 + 0.973343 + 0.003591(2) + 0.00766(3) + 0.000762(4) \\ + 0.000629(5) + 0.000432(6) = X$$

$$H: 0.7394(4) + 0.1102(6) + 0.0528(8) + 0.0249(10) + 0.0105(12) \\ + 0.000432(14) = 2Y$$

$$O: 0.000525(2) + 2at = 2X + Y$$

$$N: 0.019952(2) + at * 3.76(2) = 2Z$$

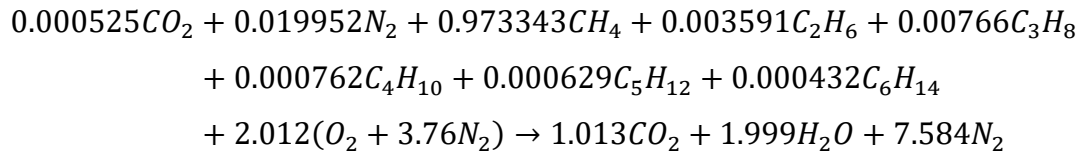
$$X = 1.013$$

$$at = 2.012$$

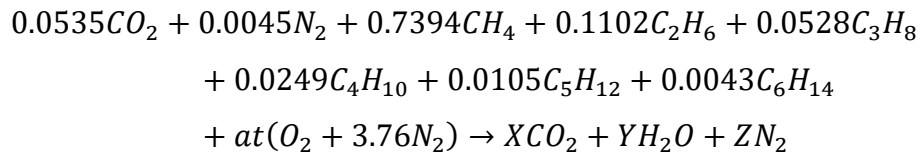
$$Y = 1.999$$

$$Z = 7.584$$

Realizado el balance de ecuaciones, se tiene que para el Gas Natural de la cuenca La Guajira la ecuación estequiométrica resultante es:



- 6) Para el Gas Natural de la cuenca Llanos Orientales (5.35% CO₂ + 0.45% N₂ + 73.94% CH₄ + 11.02% C₂H₆ + 5.28% C₃H₈ + 2.49% C₄H₁₀ + 1.05% C₅H₁₂ + 0.43% C₆H₁₄) se tiene la ecuación estequiométrica:



$$C: 0.0535 + 0.7394 + 0.1102(2) + 0.0528(3) + 0.0249(4) + 0.0105(5) \\ + 0.0043(6) = X$$

$$H: 0.7394(4) + 0.1102(6) + 0.0528(8) + 0.0249(10) + 0.0105(12) \\ + 0.0043(14) = 2Y$$

$$O: 0.0535(2) + 2at = 2X + Y$$

$$N: 0.0045(2) + at * 3.76(2) = 2Z$$

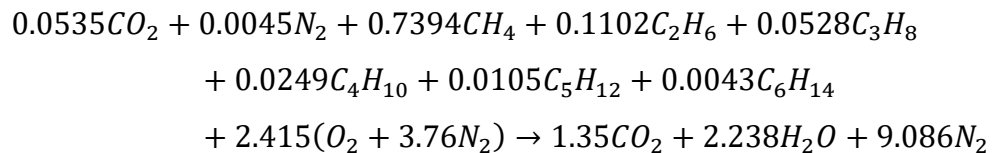
$$X = 1.35$$

$$at = 2.415$$

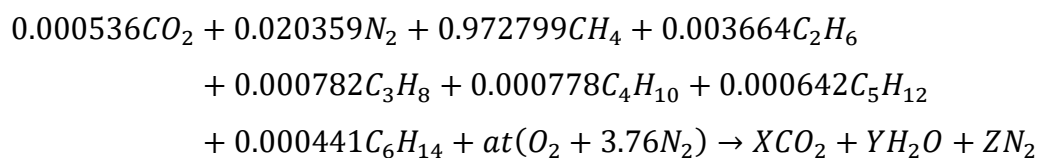
$$Y = 2.238$$

$$Z = 9.086$$

Realizado el balance de ecuaciones, se tiene que para el Gas Natural de la cuenca Llanos Orientales la ecuación estequiométrica resultante es:



- 7) Para el Gas Natural de la cuenca Valle Inferior Magdalena (0.0536% CO₂ + 2.0359% N₂ + 97.2799% CH₄ + 0.3664% C₂H₆ + 0.0782% C₃H₈ + 0.778% C₄H₁₀ + 0.0642% C₅H₁₂ + 0.0441% C₆H₁₄) se tiene la ecuación estequiométrica:



$$C: 0.000536 + 0.972799 + 0.003664(2) + 0.000782(3) + 0.000778(4) \\ + 0.000642(5) + 0.000441(6) = X$$

$$H: 0.972799(4) + 0.003664(6) + 0.000782(8) + 0.000778(10) \\ + 0.000642(12) + 0.000441(14) = 2Y$$

$$O: 0.000536(2) + 2at = 2X + Y$$

$$N: 0.020359(2) + at * 3.76(2) = 2Z$$

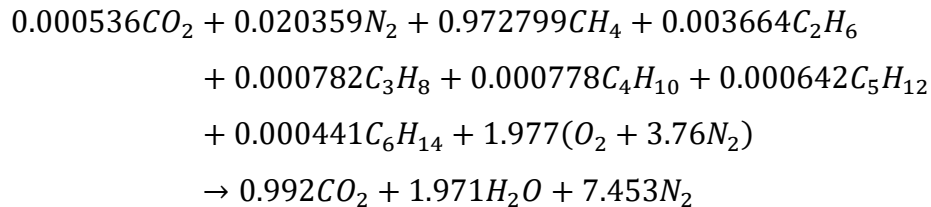
$$X = 0.992$$

$$at = 1.977$$

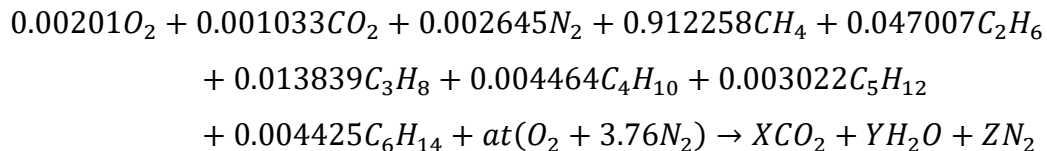
$$Y = 1.971$$

$$Z = 7.453$$

Realizado el balance de ecuaciones, se tiene que para el Gas Natural de la cuenca Valle Inferior Magdalena la ecuación estequiométrica resultante es:



- 8) Para el Gas Natural de la cuenca Valle Medio Magdalena (0.201% O₂ + 1.033% CO₂ + 0.2645% N₂ + 91.2258% CH₄ + 4.7007% C₂H₆ + 1.3839% C₃H₈ + 0.4464% C₄H₁₀ + 0.3022% C₅H₁₂ + 0.4425% C₆H₁₄) se tiene la ecuación estequiométrica:



$$C: 0.001033 + 0.912258 + 0.047007(2) + 0.013839(3) + 0.004464(4) \\ + 0.003022(5) + 0.004425(6) = X$$

$$H: 0.912258(4) + 0.047007(6) + 0.013839(8) + 0.004464(10) \\ + 0.003022(12) + 0.004425(14) = 2Y$$

$$O: 0.00201(2) + 0.001033(2) + 2at = 2X + Y$$

$$N: 0.002645(2) + at * 3.76(2) = 2Z$$

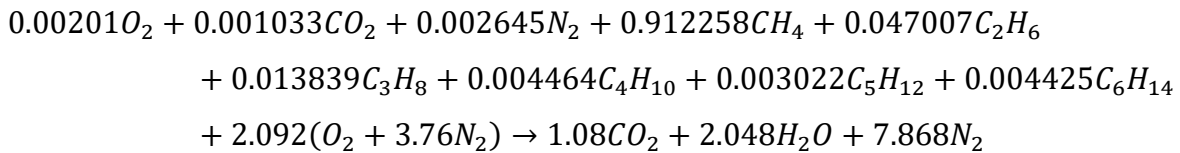
$$X = 1.08$$

$$at = 2.092$$

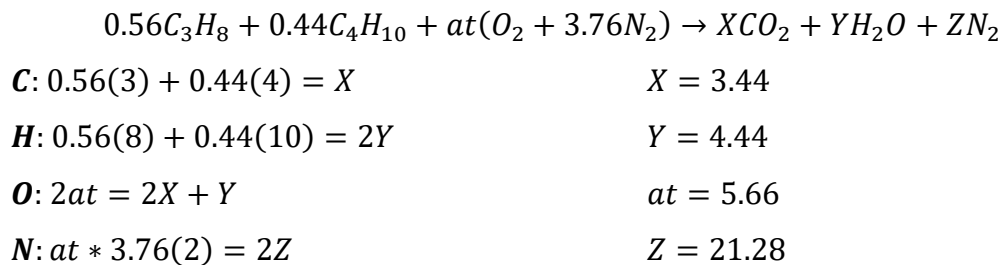
$$Y = 2.048$$

$$Z = 7.868$$

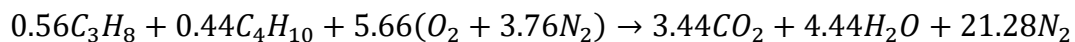
Realizado el balance de ecuaciones, se tiene que para el Gas Natural de la cuenca Valle Medio Magdalena la ecuación estequiométrica resultante es:



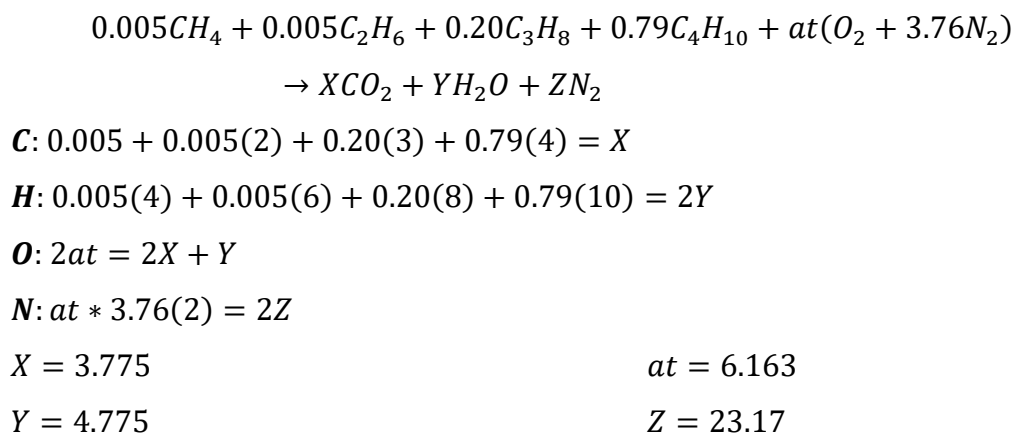
9) Para el Gas Licuado de Petróleo de Apiay (56% C₃H₈ + 44% C₄H₁₀) se tiene la ecuación estequiométrica:



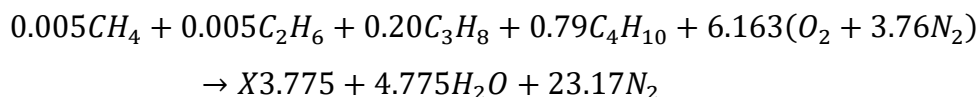
Realizado el balance de ecuaciones, se tiene que para el Gas Licuado de Petróleo de Apiay la ecuación estequiométrica resultante es:



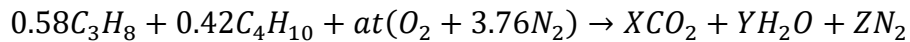
10) Para el Gas Licuado de Petróleo de Barrancabermeja (0.5% CH₄ + 0.5% C₂H₆ + 20% C₃H₈ + 79% C₄H₁₀) se tiene la ecuación estequiométrica:



Realizado el balance de ecuaciones, se tiene que para el Gas Licuado de Petróleo de Barrancabermeja la ecuación estequiométrica resultante es:



- 11) Para el Gas Licuado de Petróleo de Cartagena (58% C₃H₈ + 42% C₄H₁₀) se tiene la ecuación estequiométrica:



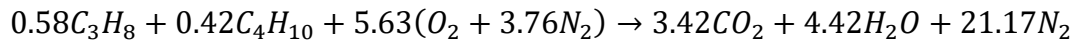
$$C: 0.58(3) + 0.42(4) = X \quad X = 3.42$$

$$H: 0.58(8) + 0.42(10) = 2Y \quad Y = 4.42$$

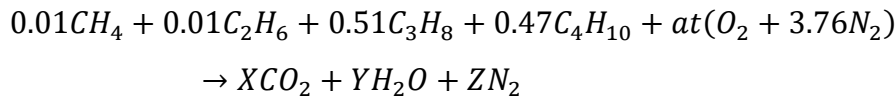
$$O: 2at = 2X + Y \quad at = 5.63$$

$$N: at * 3.76(2) = 2Z \quad Z = 21.17$$

Realizado el balance de ecuaciones, se tiene que para el Gas Licuado de Petróleo de Cartagena la ecuación estequiométrica resultante es:



- 12) Para el Gas Licuado de Petróleo de Cusiana (1% CH₄ + 1% C₂H₆ + 51% C₃H₈ + 47% C₄H₁₀) se tiene la ecuación estequiométrica:



$$C: 0.01 + 0.01(2) + 0.51(3) + 0.47(4) = X$$

$$H: 0.01(4) + 0.01(6) + 0.51(8) + 0.47(10) = 2Y$$

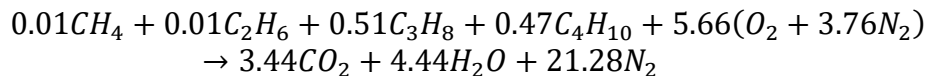
$$O: 2at = 2X + Y$$

$$N: at * 3.76(2) = 2Z$$

$$X = 3.44 \quad at = 5.66$$

$$Y = 4.44 \quad Z = 21.28$$

Realizado el balance de ecuaciones, se tiene que para el Gas Licuado de Petróleo de Barrancabermeja la ecuación estequiométrica resultante es:



2.4. Parametrización del factor de aireación n en los balances de combustión

En una reacción de combustión se habla de una mezcla rica cuando el factor de aireación es menor a 1, esto significa que la mezcla no cuenta con la cantidad de comburente teórico para realizar una combustión completa. De modo contrario, cuando el factor de aireación es mayor a 1 se habla de una mezcla pobre donde hay exceso de comburente.

Inicialmente se parametrizo la mezcla de gas-aire para factores de aireación entre 0.7 y 2 con un paso de 0.1105 entre cada n tomado, es decir:

✓ 0.7	✓ 1.242	✓ 1.783
✓ 0.8083	✓ 1.35	✓ 1.892
✓ 0.9167	✓ 1.458	✓ 2
✓ 1.025	✓ 1.567	
✓ 1.133	✓ 1.675	

Para cada n se normalizo las fracciones molares de cada especie en la mezcla y se procedió a hacer las simulaciones bajo los parámetros especificados en la sección 3.2.

Una vez construidas las curvas de límites de extinción de llama se pudo observar que el modelo utilizado en CHEMKIN presentaba problemas para las mezclas con aireaciones menores a la estequiométrica, es decir para n menores a 1. Se llegó a esta conclusión debido a que las curvas no presentaban coherencia con los resultados esperados. Debido a lo anterior, se decidió solo tener en cuenta y presentar como resultados:

- Curvas de las mezclas de gases combustibles para los factores de aireación a partir de 1.025.
- Soluciones de las simulaciones que se obtuvieron a una temperatura de entrada de 296 K. A velocidades de 50 y 80 cm/s respectivamente.

En los Anexos se adjuntan las tablas de las parametrizaciones y normalizaciones realizadas para cada mezcla de gas combustible estudiado.

2.5. Mecanismos Cinético-Químicos para aplicaciones de combustión

GRI-Mech 3.0

GRI-Mech 3.0 es un mecanismo de reacción química optimizado y detallado, diseñado para modelar la combustión de gas natural incluyendo la formación de NO. Es un producto de las investigaciones computacionales y experimentales patrocinadas por el *Gas Research Institute* y llevadas a cabo por la Universidad de California en Berkeley, la Universidad de Stanford, la Universidad de Texas en Austin, y SRI Internacional.

Basicamente GRI-Mech es una lista de reacciones químicas y expresiones constantes de velocidad asociadas. Compila 325 reacciones químicas elementales para 5 elementos, expresiones de coeficientes asociados y parámetros termoquímicos para las 53 especies involucradas en ellos. Por otro lado, la termoquímica GRI-Mech se basa en bases de datos estándar, incluyendo los archivos NASA-Lewis y Technion.

Debido a las características de las especies involucradas, el mecanismo GRI-Mech es utilizado en este trabajo para la simulación de la combustión de Metano puro, Biogás y los gases naturales de las cuencas Cordillera Oriental, La Guajira, Llanos Orientales, Valle Inferior del Magdalena y Valle Superior del Magdalena. A continuación, se presenta la lista de elementos y especies implicadas en la base de datos de este mecanismo.

Elementos: O, H, C, N, AR.

Espécies: H₂, H, O, O₂, OH, H₂O, HO₂, H₂O₂, C, CH, CH₂, CH₂(S), CH₃, CH₄, CO, CO₂, HCO, CH₂O, CH₂OH, CH₃O, CH₃OH, C₂H, C₂H₂, C₂H₃, C₂H₄, C₂H₅, C₂H₆, HCCO, CH₂CO, HCCOH, N, NH, NH₂, NH₃, NNH, NO, NO₂, N₂O, HNO, CN, HCN, H₂CN, HCNN, HCNO, HOCN, HNCO, NCO, N₂, AR, C₃H₇, 3H₈, CH₂CHO, CH₃CHO.

Mecanismo UCSD

Este mecanismo cinético-químico fue desarrollado por el Grupo de Investigación sobre Combustión de la Universidad de California en San Diego, Estados Unidos; de ahí su nombre. Para el desarrollo de este trabajo se utilizó en las simulaciones de combustión para los GLP y los gases naturales que tuvieran trazas de propano y butano.

La química detallada publicada en este mecanismo está diseñada para enfocarse en las condiciones relacionadas con las llamas, la ignición a alta temperatura y las detonaciones. Se derivó comenzando con sistemas químicos simples y luego procediendo gradualmente a sistemas más complejos. En este enfoque, el número de especies y reacciones se mantiene al mínimo necesario para describir los sistemas y fenómenos abordados, minimizando así tanto como sea posible las incertidumbres en los parámetros de velocidad empleados.

Por lo tanto, la filosofía difiere de la que subyace a otras bases de datos, muchas de las cuales buscan integridad intentando incluir todas las etapas elementales potencialmente relevantes. Mientras que este mecanismo demuestra que los parámetros de velocidad de un número relativamente pequeño de pasos elementales son de importancia crucial para las predicciones y que los efectos acumulativos de las pequeñas contribuciones de un gran número de pasos rara vez son muy significativos. El mecanismo UCSD trabaja con 6 elementos y 57 especies listadas a continuación.

Este mecanismo cinético-químico se implementa en este proyecto en las simulaciones de los GLP y en los gases naturales de las cuencas Caguán-Putumayo y Catatumbo.

Elementos: N, AR, HE, H, O, C.

Espécies: N₂, AR, HE, H, O₂, OH, O, H₂, H₂O, HO₂, H₂O₂, CO, CO₂, HCO, CH₃, CH₄, CH₂O, T-CH₂, S-CH₂, C₂H₄, CH₃O, C₂H₅, C₂H₆, CH, C₂H₂, 2H₄OOH, OC₂H₃OOH, C₂H₃, CH₂CHO, C₂H₄O, HCCO, CH₂CO, C₂H, CH₂OH, CH₃OH, CH₃CHO, CH₃CO, C₂H₅OH, CH₂CH₂OH, CH₃CHOH, CH₃CH₂O, C₃H₄, C₃H₃, C₃H₅, C₃H₆, C₃H₈, I-C₃H₇, N-C₃H₇, C₃H₆OOH, OC₃H₅OOH, C₄H₁₀, PC₄H₉, SC₄H₉, C₄H₈, SC₄H₉O₂, C₄H₈OOH₁₋₃, NC₄KET₁₃.

2.6. Modelo de simulación en CHEMKIN PRO

2.6.1. Análisis de extinción de llama

Los estudios de extinción de llamas son fundamentales para la caracterización de llamas y el análisis de respuesta. Además, estos estudios también proporcionan datos para la validación de los mecanismos de reacción. En un experimento de extinción de llama típico, se suministra una mezcla de combustible y aire premezclada desde una boquilla y un gas inerte u otro. En el estudio aquí realizado se simulan los casos de los gases combustibles Metano puro, Biogás y las diferentes mezclas de gases naturales y GLP anteriormente expuestas.

El modelo de simulación utilizado es el de *Extinción de Llama de Premezcla de Flujo Opuesto* y la configuración del sistema se presenta en la figura 9. El sistema cuenta con dos boquillas independientes las cuales suministran el combustible y el gas inerte al reactor de flujo opuesto, finalmente hay una salida de los productos de combustión.

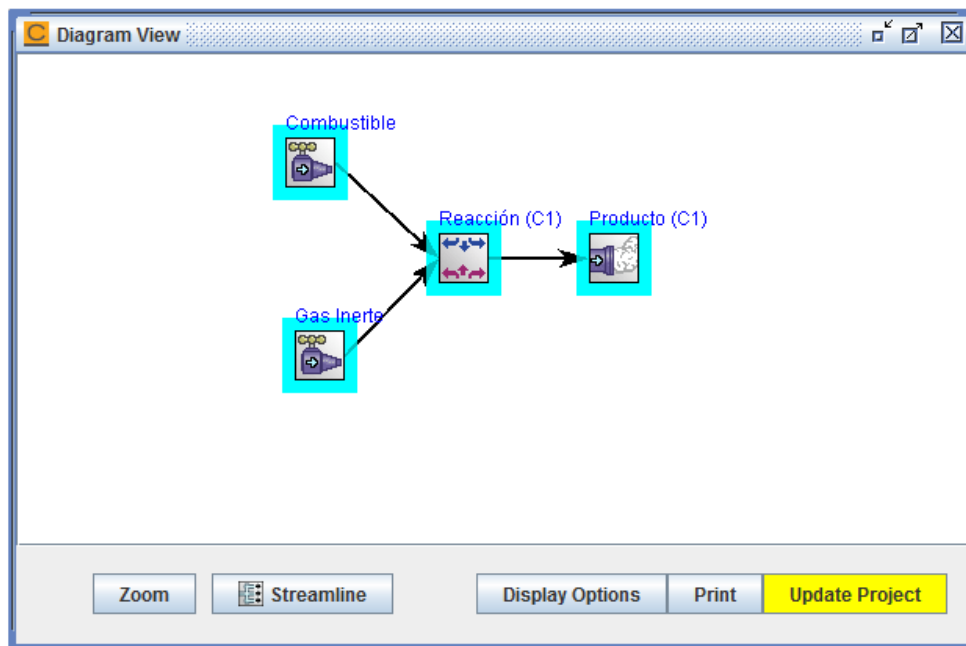


Figura 12. Configuración del sistema de simulación: Entrada de combustible, entrada de gas comburente, combustión y salida de productos.

El análisis de extinción se realiza utilizando continuaciones sucesivas de control de llama. El *control de llama* se logra mediante el uso de condiciones de contorno interno sobre la temperatura. En las simulaciones desarrolladas se utiliza el método de control de temperatura de *un punto*. El método de control de *un punto* es más apropiado cuando se suministra desde una boquilla la premezcla de gas combustible-oxidante y desde la otra boquilla un gas inerte, para este caso se trabaja el nitrógeno N_2 como gas inerte [20].

Por otra parte, cuando el combustible y el oxidante se suministran desde cada boquilla separadamente (es decir, una llama de difusión), el control de *dos puntos* puede considerarse más como *control de llama*. Matemáticamente, sin embargo, el problema está bien planteado con cualquiera de las técnicas, aunque para la llama de premezcla el software CHEMKIN PRO recomienda el método seleccionado.

Al configurar el análisis de extinción en el software CHEMKIN PRO, es importante tener en cuenta que, con un control de temperatura de *un punto*, la condición límite interna en la temperatura se establece para $0 < x < x_{flame}$, donde x es la coordenada espacial y x_{flame} es la ubicación de la llama (temperatura máxima). Las entradas se etiquetan como *Combustible* y *Oxidante*, la entrada de combustible se trata como entrada 1 y se encuentra en $x = 0$. El simulador reporta la velocidad de deformación de extinción suponiendo que la entrada de Combustible (o aire-combustible premezclado) se encuentra en $x = 0$.

2.6.2. Modelo de llama opuesta en CHEMKIN PRO

El modelo de comportamiento de llama de flujo opuesto resulta de choques de corrientes separadas de combustible y oxidante o de dos corrientes de premezcla, o de una corriente premezclada que choca contra una superficie sólida. Las ecuaciones del modelo utilizadas en las simulaciones se basan en la transformación de similitud que reduce la naturaleza del flujo tridimensional, a una dependencia axial unidimensional. Para este modelo de llama opuesta se considera una solución en estado estacionario para llamas de difusión planas o axisimétricas entre dos boquillas opuestas, el modelo permite el estudio detallado de la química de la llama y su estructura [21].

El flujo bidimensional o tridimensional se reduce matemáticamente a una dimensión sumiendo que y – o la velocidad radial varía linealmente en la dirección radial y , lo que conduce a una simplificación en la que las propiedades del fluido son funciones de la distancia axial solamente. El modelo unidimensional predice los perfiles de especies, temperatura y velocidad en el flujo de núcleo entre las boquillas (despreciando los efectos de los bordes).

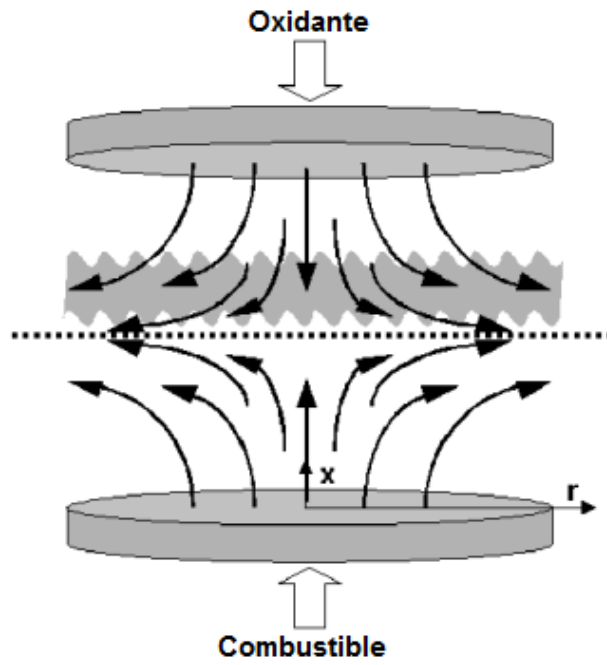


Figura 13. Geometría de la llama de difusión de flujo opuesto simétrico. La línea discontinua representa el plano de estancamiento; la región sombreada sugiere la llama.

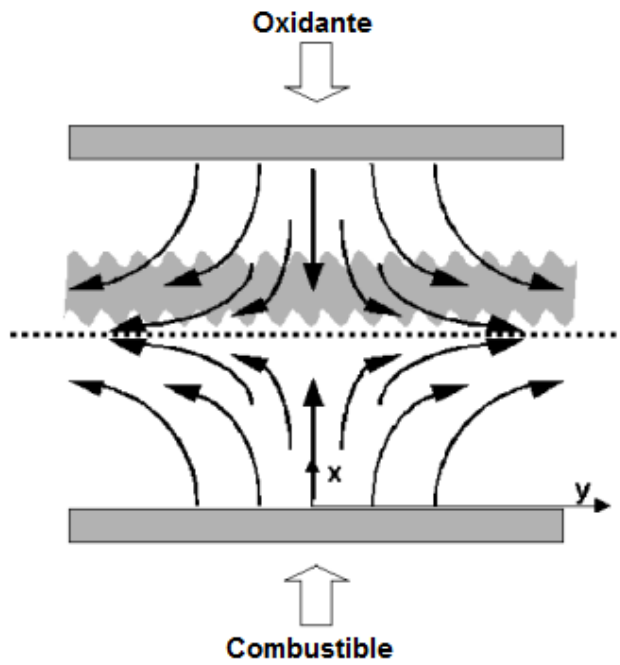


Figura 14. Geometría de la llama plana de difusión de flujo opuesto. La línea discontinua representa la línea de estancamiento; la región sombreada sugiere la llama.

La geometría axisimétrica consiste en dos boquillas concéntricas, circulares, dirigidas una hacia la otra como se muestra en la figura 13. Esta configuración produce un campo de flujo simétrico al plano de estancamiento entre las toberas. La geometría plana consiste en dos boquillas lineales concéntricas dirigidas una hacia la otra como se expone en la figura 14. Por otro lado, la configuración presentada aquí produce un campo de flujo plano bidimensional con una línea de estancamiento entre las dos boquillas. La ubicación del plano de estancamiento (línea) depende del equilibrio de las dos corrientes [21].

Dado que la mayoría de los combustibles requieren más aire que combustible en masa, la llama por lo general se asienta en el lado del oxidante del plano de estancamiento; el combustible se difunde a través del plano de estancamiento para establecer la llama en una mezcla estequiométrica.

3. RESULTADOS DEL ESTUDIO DE ESTRUCTURA Y LÍMITES DE EXTINCIÓN DE LLAMAS DE PREMEZCLA PARA DIFERENTES COMBUSTIBLES GASEOSOS DE USO NACIONAL

3.1. Transporte, usos, propiedades y análisis cromatográfico de los gases combustibles nacionales

3.1.1. Gas Licuado de Petróleo

Como se mencionó en el apartado 2.2.2 Ecopetrol supe el 94% de la demanda de GPL en el país con la producción de las refinerías de Apiay, Barrancabermeja y Cartagena, y de los pozos Cusiana y Dina. Sin embargo, como se expone en la figura 15 en los últimos años pequeñas refinerías han entrado a aportar en el mercado nacional. De esta forma la producción de GPL ha venido diversificándose en productor y fuentes.

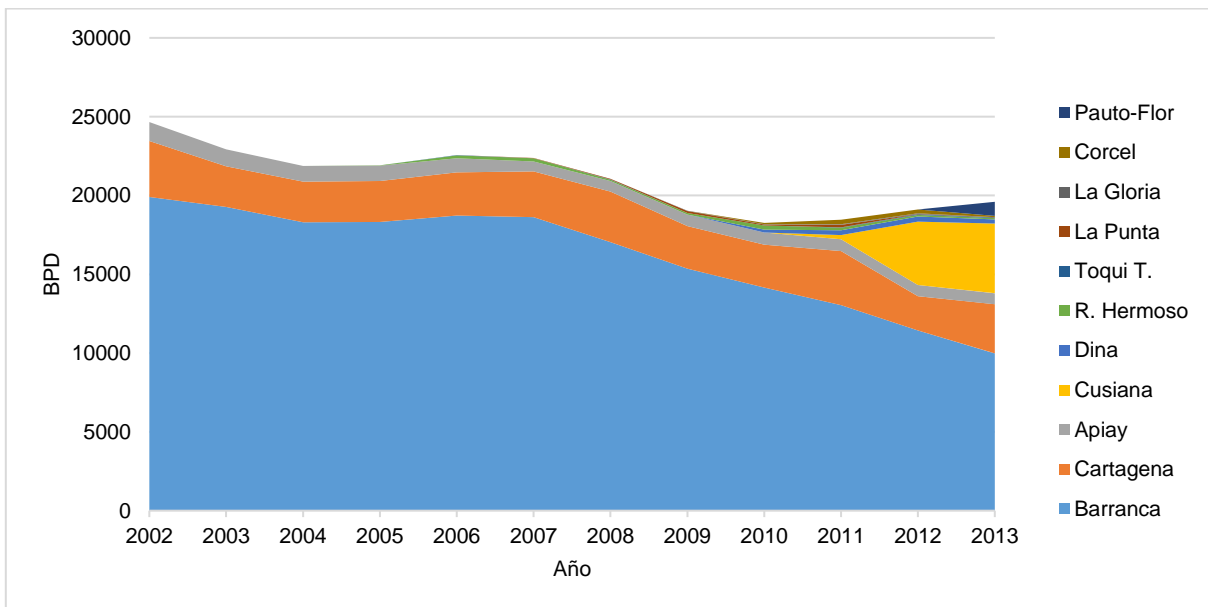


Figura 15. Producción de GPL por fuente de suministro, en BPD.

La disminución en la producción en un 19.2% en el periodo 2002-2013 fue consecuencia de la retracción de la refinería de Barrancabermeja, mientras que Cusiana ha incrementado su participación al pasar de 264 BPD a 4000 en 2012 [13]. La producción de la refinería de Cartagena se ha mantenido estable, disminuyéndose sin embargo el volumen disponible para el consumo interno, debido al aumento en las exportaciones.

Una vez producido el GPL ya sea por refinación o en campos de producción debe ser movilizad hacia los terminales o centros de abasto, los propanoductos son las líneas que conforman una red dedicada al transporte de GPL. Hoy en día solo se

cuenta con la línea que comunica la refinería de Barrancabermeja, Puerto Salgar en Magdalena Medio y el Terminal de Mansillas en Facatativá; esta red comprende 384.7 km y cuenta con una capacidad máxima 41.8 miles de barriles por día. Además, se utilizan los poliductos: *Salgar – Yumbo* transporta GLP hacia el Viejo Caldas y el occidente del país y *Galán – Bucaramanga* que transporta para atender la demanda del oriente colombiano [13].

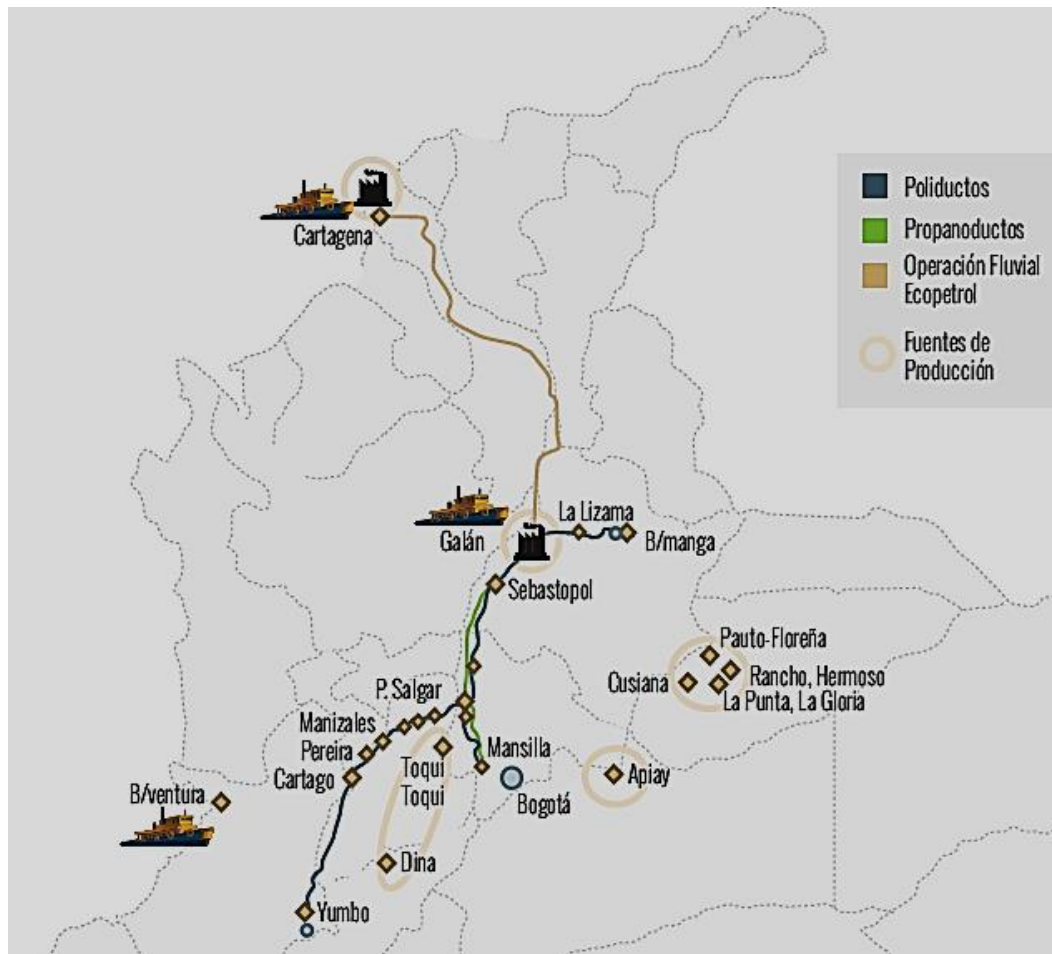


Figura 16. Fuentes de producción e infraestructura de transporte de GLP en Colombia.

El transporte fluvial por el río Magdalena se utiliza para llevar al interior del país el GLP importado o producido en la refinería de Cartagena o viceversa la disponibilidad de transporte está sujeta al nivel de navegabilidad del río. Se cuenta con una capacidad de transporte fluvial promedio de 14000 barriles mensuales. Ahora, los cambios en la producción de GLP en cada fuente de suministro han significado modificaciones en los sistemas de transporte. Por ejemplo, el propanoducto entre *Salgar – Mansilla* se utiliza cada vez menos, mientras que en la medida que aumenta la producción en Cusiana, el transporte se está haciendo por vía terrestre.

Además, estos cambios han influido en la calidad del producto comercializado en el mercado nacional. Específicamente se observa que Barrancabermeja dispone de mayor contenido de butano con un 79% en promedio de la producción de 2103, en tanto que el GLP de Cartagena tiene un promedio de 42%. La presencia de butanos oscila entre 40% y 50% para el GLP proveniente de Apiay y Cusiana. A continuación, en la figura 17, se presenta el análisis de composición particular para cada uno de estos GLP. Se debe resaltar que los GLP con alto contenido de butanos tienen una capacidad de vaporización menor a los GLP ricos en propanos, debido a que el punto de ebullición del butano es más cercano a los 273 K.

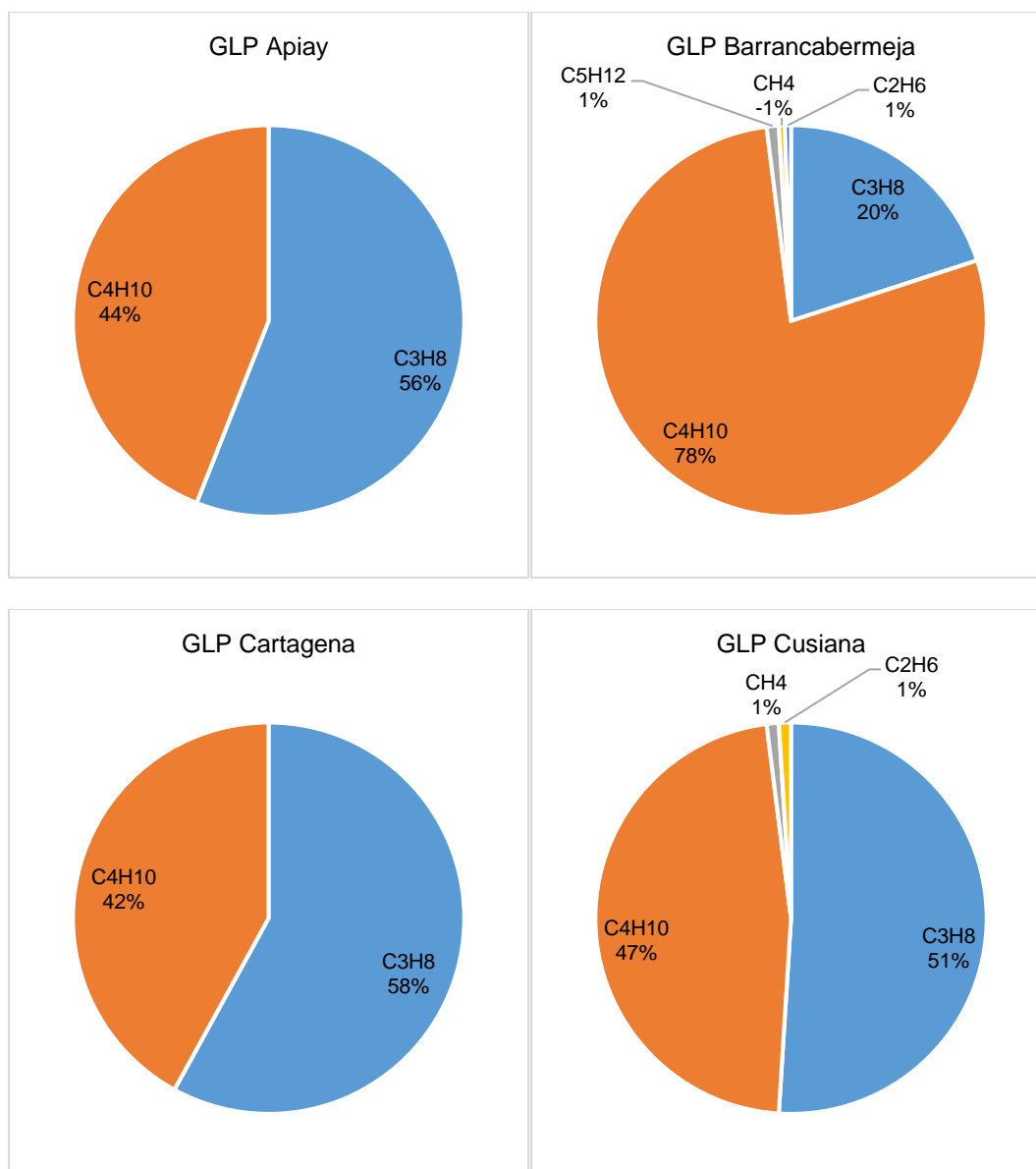


Figura 17. Composición GLP por fuente de suministro: Refinería Barrancabermeja, Refinería Cartagena, Pozo Apiay y Pozo Cusiana.

Durante el transporte y distribución, el GLP sufre cambios considerables que afectan la calidad del producto comercializado. Entonces, a pesar de realizar estudios de estructura y estabilidad de llama a partir de las composiciones de la producción directa de refinerías o pozos, es necesario aclarar que las posibilidades de que las composiciones de GLP varíen antes de llegar al usuario final. Puede ser que el GLP con menos mezclas sea el proveniente de Barrancabermeja que es transportado por poliducto hasta los terminales de Pereira, Manizales, Cartago y Yumbo. Igualmente, con el GLP de la refinería de Cartagena que abastece la costa atlántica y el archipiélago de San Andrés y Providencia [13].

Los usuarios de GLP se dividen en regulados y no regulados. Se consideran como usuarios no regulados aquellos con consumo superior a 100 MBTU/día o empresas de generación de energía eléctrica con GLP en áreas de servicio exclusivo, mientras que los consumidores de GLP en sectores residencial, comercial e industrial son catalogados como usuarios regulados.

3.1.2. Gas Natural

Además del estudio de estructura y estabilidad de llama para establecer si un gas natural es intercambiable por otro, es necesario conocer si geográficamente esto es posible. La variabilidad de este factor depende de los costos asociados al transporte y distribución. Por lo anterior, se hace necesario tener en cuenta el mapa de gasoductos nacional en el momento de establecer la intercambiabilidad de gases combustibles en Colombia.

El gas natural se transporta desde las zonas de producción hasta las zonas de consumo por medio del Sistema Nacional de Transporte (SNT). Según el decreto 1493 de 2003 del Ministerio de Minas y Energía, el SNT *Es el conjunto de gasoductos localizados en el territorio nacional, excluyendo conexiones y gasoductos dedicados, que vinculan los centros de producción de gas del país con las Puertas de Ciudad, Sistemas de Distribución, Usuarios No Regulados, Interconexiones Internacionales o Sistemas de Almacenamiento*. Actualmente son 7 las empresas transportadoras de gas a nivel nacional.

En el mapa presentado en la figura 18 se observa la red de gasoductos de Colombia, así mismo la participación de cada empresa transportadora en esta red se enlista en la tabla 3. En la última década se adicionaron 1247 km de nuevas redes de gasoductos al país. Entre los principales gasoductos que entraron en operación se encuentra *Gibraltar – Bucaramanga* de Promioriente, *Cali-Popayán* y *Sardinata – Cúcuta* de Progasur y *Ramal a Oriente* de Transmetano. Mientras que TGI y Promigas ampliaron su cubrimiento de redes regionales y construyeron *loops* en sus gasoductos troncales [22].

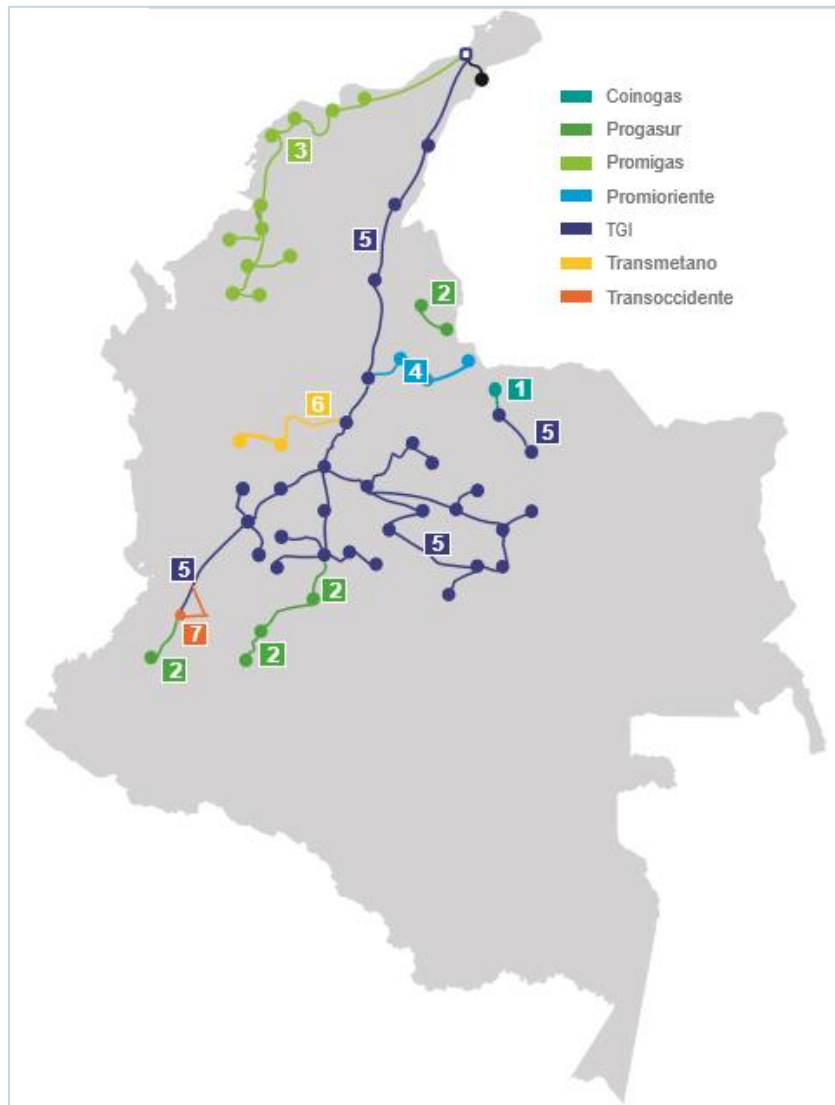


Figura 18. Infraestructura de transporte del gas natural en Colombia por empresas.

Tabla 3. Lista de empresas transportadoras de gas natural, cantidad de producto transportado y extensión de gasoductos

Empresa	Gas transportado [Mpcd]	Red de gasoductos [Km]
Coinogas	5	18
Progasur	19	380
Promigas	331	2367
Promioriente	52	333
TGI	526	3957
Transmetano	51	189
Trasoccidente	50	11

En abril de 2016, la CREG anuncio que a partir de julio de ese mismo año se dejaría en firme un nuevo modelo regulatorio que regirá para la expansión de las redes de gasoductos en el país. El sistema actual será complementado con dos nuevos esquemas: uno, de temporadas abiertas en las que terceros tendrán la oportunidad de construir los gasoductos si el transportador relacionado o incúmbete no se interesa, y, otro, de convocatorias: similar al que funciona para las redes de transmisión de energía, el cual se aplicará en proyectos de suma urgencia cuando se vea comprometida la confiabilidad del servicio [22].

Tabla 4. Uso final del gas natural en la costa caribe y el interior del país.

		Mpcd en 2015	Mmcd en 2015
Costa caribe	Eléctrico	188	5.324
	Otros sectores	193	5.465
	Industrial y comercial	92	2.605
	Residencial	28	0.793
	Petroquímico	16	0.453
	Refinerías y otros	37	1.048
	GNV	21	0.595
Interior del país	Eléctrico	117	3.313
	Otros sectores	503	14.243
	Industrial y comercial	205	5.805
	Residencial	96	2.718
	Petroquímico	1	0.028
	Refinerías y otros	138	3.908
	GNV	63	1.784
		1001	28.345

El año 2015 estuvo caracterizado por la fuerte incidencia del fenómeno de El Niño, donde el sector eléctrico lideró la demanda de gas natural en el país con 31% de participación. Hay que resaltar también que en el año 2015 se concluyeron las exportaciones de gas natural a Venezuela. Por otra parte, el consumo de gas natural presentó en la última década un crecimiento promedio anual de 5% como consecuencia de que el mercado no regulado creció en un 6%, el sector eléctrico y los grandes consumidores industriales son quienes componen el mercado no regulado. Mientras que el mercado regulado después de un crecimiento continuo en el periodo 2005-2014, presentó un decrecimiento del 9% principalmente por la reducción en el consumo del sector residencial del interior del país.

Por otro lado, las cuencas Llanos Orientales (73%), La Guajira (18%) y Valle del Magdalena (8%) contribuyen a cubrir casi la totalidad de la oferta de gas natural en el país, mientras que las cuencas Caguán-Putumayo y Catatumbo no presentan una participación relevante en el mercado.

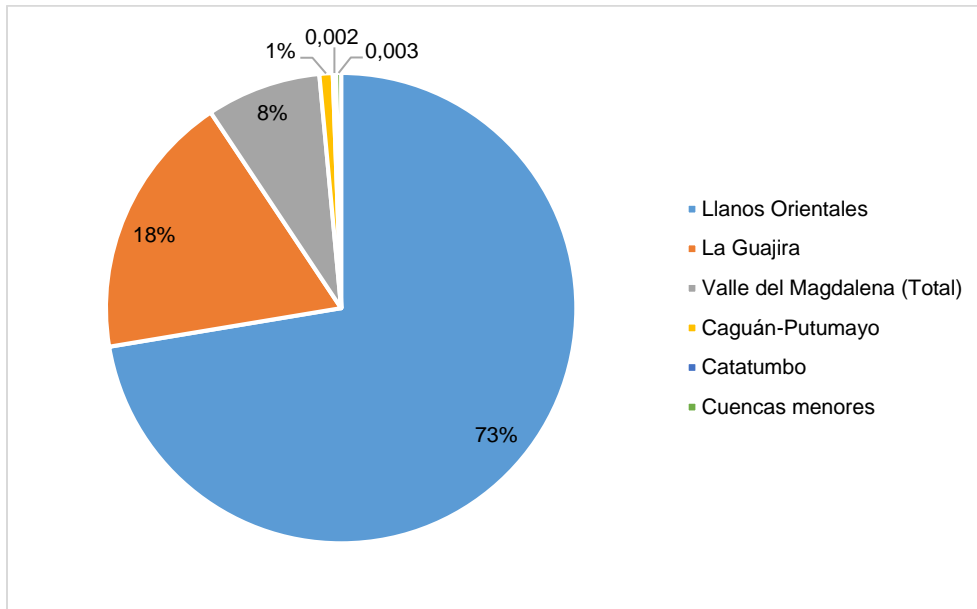


Figura 19. Porcentaje de oferta de gas natural por cuenca en Colombia.

A continuación, se presenta el análisis cromatográfico para cada gas natural procedentes de las cuencas nacionales.

1) Cuenca Caguán-Putumayo [23]

Tabla 5. Cromatografía gas natural de la cuenca Caguán- Putumayo

Cuenca Caguán-Putumayo	
Elemento	Comp. Molar [%]
CO₂	6.0
N₂	2.8
CH₄	31.3
C₂H₆	14.7
C₃H₈	19.1
iC₄H₁₀	2.8
nC₄H₁₀	8.0
iC₅H₁₂	2.3
nC₅H₁₂	2.4
C₆H₁₄	2.9
C₇H₁₆	5.5
C₈H₁₈	1.8
C₉H₂₀	0.2

Características físico-químicas del gas natural:

- Gravedad específica: 1.4304
- Capacidad calorífica neta: 1991 BTU*ft³
- Propiedades críticas: 633 psia y 994.15 K.

2) Cuenca Catatumbo [24]

Tabla 6. Cromatografía gas natural de la cuenca Catatumbo

Cuenca Catatumbo	
Elemento	Comp. Molar [%]
CO₂	1.21
N₂	0.01
CH₄	60.31
C₂H₆	15.17
C₃H₈	14.29
iC₄H₁₀	2.14
nC₄H₁₀	4.17
iC₅H₁₂	1.02
nC₅H₁₂	0.95
C₆H₁₄	0.36
C₇H₁₆	0.37

Características físico-químicas del gas natural:

- Densidad: 1.13 kg/m³
- Solubilidad: 496 stb/ft³
- Propiedades críticas: 657.73 psia y 851,66 K.
- Temperatura pseudo-reducida: 1.303

3) Cuenca Cordillera Oriental [25]

Características físico-químicas del gas natural:

- Densidad relativa: 0.744
- Peso molecular: 10.2266 Kg/Kmol
- Gravedad del gas real: 0.7785
- Poder calorífico neto: 1102.8 BTU/scf ó 1993.9 BTU/lb a condiciones de 288.71 K y 14.696 psia.
- Poder calorífico bruto: 1215.1 BTU/scf ó 22052.6 BTU/lb a condiciones de 288.71 K y 14.696 psia.

Tabla 7. Cromatografía gas natural de la cuenca Cordillera Oriental

Cuenca Cordillera Oriental	
Elemento	Comp. Molar [%]
CO₂	5.35
N₂	0.45
CH₄	73.94
C₂H₆	11.02
C₃H₈	5.28
iC₄H₁₀	1.1
nC₄H₁₀	1.29
iC₅H₁₂	0.6
nC₅H₁₂	0.45
C₆H₁₄	0.43

4) Cuenca La Guajira [26]

Tabla 8. Cromatografía gas natural de la cuenca La Guajira

Cuenca La Guajira	
Elemento	Comp. Molar [%]
N₂	1.9952
CO₂	0.0525
CH₄	97.3343
C₂H₆	0.3591
C₃H₈	0.766
iC₄H₁₀	0.0568
nC₄H₁₀	0.0194
iC₅H₁₂	0.0181
nC₅H₁₂	0.0448
C₆H₁₄	0.0432

Características físico-químicas del gas natural:

- Gravedad específica real de la mezcla, a condiciones estándar: 0.5644
- Densidad: 0.688084 Kg/m³
- Densidad relativa: 0.5675
- Poder calorífico bruto real: 996.7 BTU/pc (Pb y Tb) a 14.65 psia y 288.71 K.

5) Cuenca Llanos Orientales [26]

Tabla 9. Cromatografía gas natural de la cuenca Llanos Orientales

Cuenca Llanos Orientales	
Elemento	Comp. Molar [%]
CO₂	5.35
N₂	0.45
CH₄	73.94
C₂H₆	11.02
C₃H₈	5.28
C₄H₁₀	1.1
C₄H₁₀	1.39
C₅H₁₂	0.6
C₅H₁₂	0.45
C₆H₁₄	0.43

Características físico-químicas del gas natural:

- Densidad relativa: 0.744
- Peso molecular: 10.2266 Kg/Kmol.
- Gravedad de gas real: 0.7785
- Poder calorífico neto: 1102.8 BTU/scf ó 19932.9 BTU/lb a condiciones de 14.65 psia y 288.71 K.
- Poder calorífico bruto 1215.1 BTU/scf ó 22052.6 BTU/lb a condiciones de 14.65 psia y 288.71 K.

6) Cuenca Valle Inferior del Magdalena [27]

Tabla 10. Cromatografía gas natural de la cuenca Valle Inferior del Magdalena (VIM)

Cuenca VIM	
Elemento	Comp. Molar [%]
N₂	2.036
CO₂	0.054
CH₄	97.280
C₂H₆	0.366
C₃H₈	0.078
C₄H₁₀	0.058
C₄H₁₀	0.020
C₅H₁₂	0.018
C₅H₁₂	0.046
C₆H₁₄	0.044

Características físico-químicas del gas natural:

- Gravedad específica real de la mezcla a condiciones estándar: 0.5694
- Densidad: 0.694236 Kg/m³
Poder calorífico bruto real: 997.3 BTU/pc (Pb y Tb) a condiciones de 14.65 psia y 288.71 K.

7) Cuenca Valle Medio del Magdalena [28]

Tabla 11. Cromatografía gas natural de la cuenca Valle Medio del Magdalena (VMM)

Cuenca VMM	
Elemento.	Comp. Molar [%]
O ₂	0.201
N ₂	0.2645
CO ₂	1.033
CH ₄	91.2258
C ₂ H ₆	4.7007
C ₃ H ₈	1.3839
iC ₄ H ₁₀	0.3078
nC ₄ H ₁₀	0.1386
iC ₅ H ₁₂	0.1522
nC ₅ H ₁₂	0.15
C ₆ H ₁₄	0.4425

Características físico-químicas del gas natural:

- Gravedad específica: 0.62690
- Densidad: 0.04780 lb/gl ó 26.67 Kg/m³
- Peso molecular: 8.2147 kg/kmol
- Compresibilidad: 0.9288 v/v

3.2. Parámetros de simulación para el modelo de *Extinción de Llama de Premezcla de Flujo Opuesto*

Después de procesar exitosamente el mecanismo de reacción seleccionado para cada tipo de gas combustible, se puede alimentar y configurar el modelo de simulación. Los controles para el modelo nominal de llama de flujo opuesto se encuentran en la subpestaña *Basic* y *Opposed Flow Model* de la ficha *Physical Properties*. En este trabajo se establece presión en 1 atm mientras que los demás valores se mantienen con sus valores predeterminados:

- Temperatura máxima para el perfil inicial: 2200 K.
- Temperatura ambiente: 298 K.

- Multiplicador de la tasa de reacción del gas: 1

El intervalo de pasos para archivar el avance de las simulaciones establece la frecuencia de guardado de las soluciones. Este control puede ser útil para reiniciar un nuevo análisis de extinción a partir de una ejecución fallida o continuar desde una simulación anterior o si el punto de extinción (giro) no se alcanza dentro del valor inicial del número de pasos. Así mismo, dado que el análisis de extinción es intensivo desde el punto de vista computacional, puede reiniciarse una nueva ejecución (por ejemplo, para diferentes estequiometrias o diferente factor de aireación) de una solución intermedia de una ejecución anterior.

Las velocidades de las boquillas son limitadas para el método de control de *un punto*; en este caso, se elige la restricción de impulso, que da el plano de estancamiento aproximadamente en el centro del dominio de cálculo.

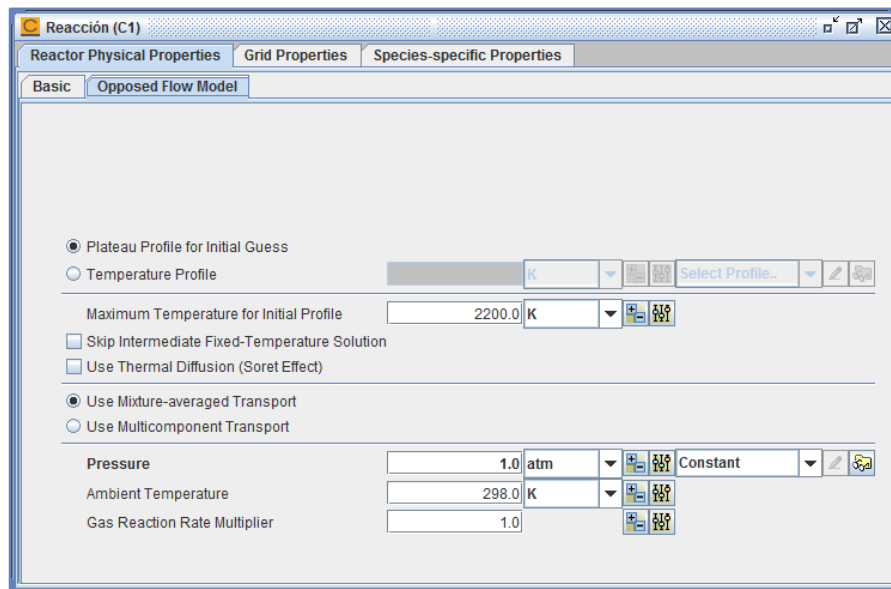


Figura 20. Ventana de configuración de parámetros de la simulación en CHEMKIN PRO: Pestaña *Propiedades físicas del Reactor*, subpestaña *Modelo de Flujo Opuesto*.

Las fracciones de temperatura máxima y mínima se ajustan a 0,9 y 0,5 mientras que se utilizan escalones de temperatura de 10 K. En cualquier momento durante los cálculos, si la temperatura máxima obtenida es inferior a la especificada por la temperatura mínima de la llama, la simulación se detiene declarando que se ha violado el criterio de existencia de la llama. El valor por defecto de este control es 1500 K. Este control es útil para evitar tomar demasiados pasos más allá del punto de extinción. Los parámetros de entrada *fracción de temperatura máxima*, *fracción de temperatura mínima* y *tamaño de paso de temperatura* controlan la ubicación y magnitud de la condición de límite interno en la temperatura.

El simulador calcula primero una llama nominal para los parámetros de entrada dados y posteriormente encuentra la ubicación donde se satisface que:

$$T = \text{Fracción de temperatura máxima} * (\text{Temperatura máxima actual} - \text{Temperatura de entrada})$$

En este punto la temperatura va disminuyendo sucesivamente hasta que alcanza la condición:

$$T = \text{Fracción de temperatura mínima} * (\text{Temperatura máxima actual} - \text{Temperatura de entrada})$$

A continuación, se selecciona una nueva ubicación utilizando la fracción de temperatura máxima. Este proceso se repite hasta que se alcanza el número deseado de pasos o hasta que la llama se extingue eficazmente según lo determinado por el control mínimo de temperatura de llama.

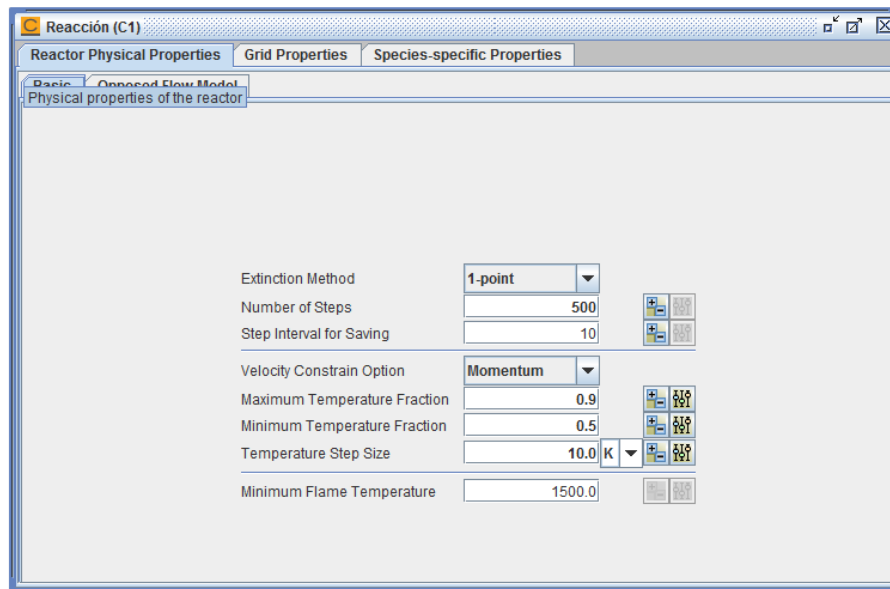


Figura 21. Ventana de configuración de parámetros de la simulación en CHEMKIN PRO: Pestaña *Propiedades físicas del Reactor*, subpestaña *Básico*.

En la ficha *Grid Properties* se establece la posición axial de finalización en 1,4 cm. Las opciones de control de malla adaptativa, tanto para el gradiente de solución como para la curvatura, se establecen en 0,1 mientras que el número máximo de puntos de rejilla permitido se establece en 500. El número de etapas de extinción es efectivamente el número de simulaciones de llama de flujo opuesto sucesivas que se llevarán a cabo en busca del punto de giro de extinción. Aunque su valor predeterminado es 100, para estas simulaciones el número de pasos se establece en 500, este valor depende no sólo del tamaño de paso de temperatura utilizado sino también de todos los otros controles de la ficha básica.

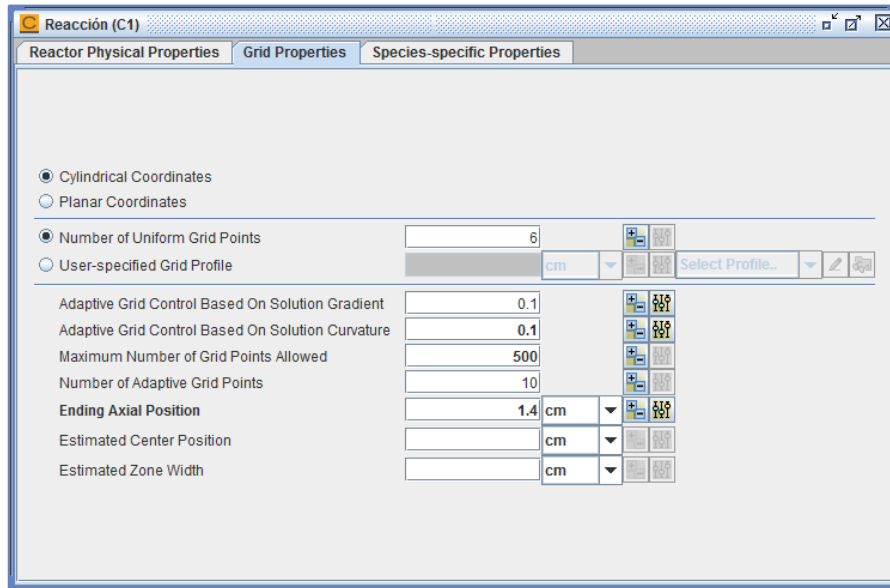


Figura 22. Ventana de configuración de parámetros de la simulación en CHEMKIN PRO: Pestaña *Propiedades del mado*

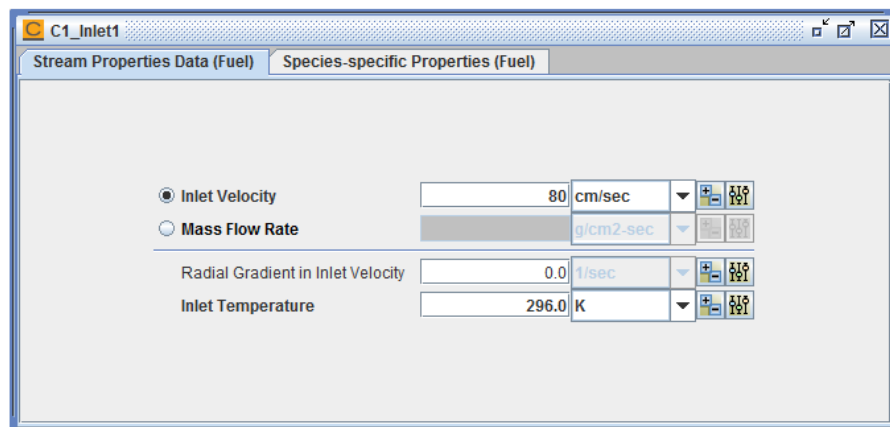


Figura 23. Configuración flujos de entrada. Inlet: Combustible/Comburente, velocidad y temperatura de entrada. Pestaña *Datos de las propiedades del flujo*.

La mezcla estequiométrica de gas-aire se asigna a la entrada 1 mientras que el nitrógeno puro N_2 se asigna a la entrada 2. La temperatura del gas de entrada para ambas se ajusta a 296 K. Las velocidades de entrada para ambas boquillas se fijan inicialmente en 80 cm/s; para las segundas simulaciones se fijan en 50 cm/s. Después se especifica la fracción molar de las especies de la mezcla gas combustible-aire en la entrada 1 o del gas inerte en la entrada 2 y finalmente se puede iniciar la simulación del sistema de combustión propuesto.

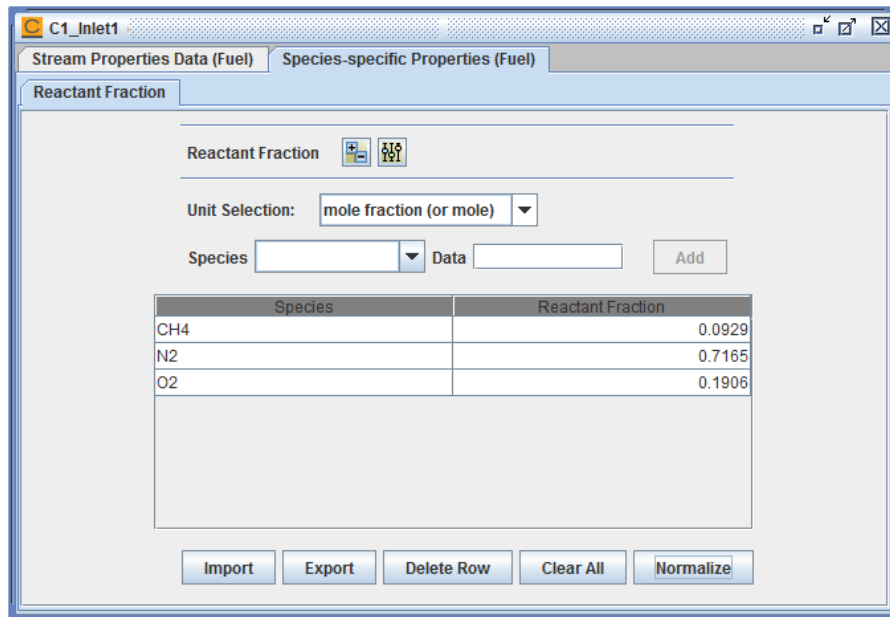


Figura 24. Configuración flujos de entrada. Inlet: Combustible/Comburente. Pestaña: *Propiedades específicas de las especies*.

3.3. Simulación de los fenómenos de combustión de llama de premezcla

En este apartado se presentan las gráficas que se obtuvieron como resultado de las simulaciones. Primero se muestran las gráficas referentes a la estructura de llama: Producción neta de calor a partir de reacciones en fase gaseosa, temperatura y fracciones molares para O_2 y CO_2 , a un factor de aireación común de $n = 1.025$.

Posteriormente las gráficas de límites de extinción de cada mezcla de gas combustible son expuestas.

3.3.1. Estructura de llama

Estructura de llama para todos los gases combustibles estudiados

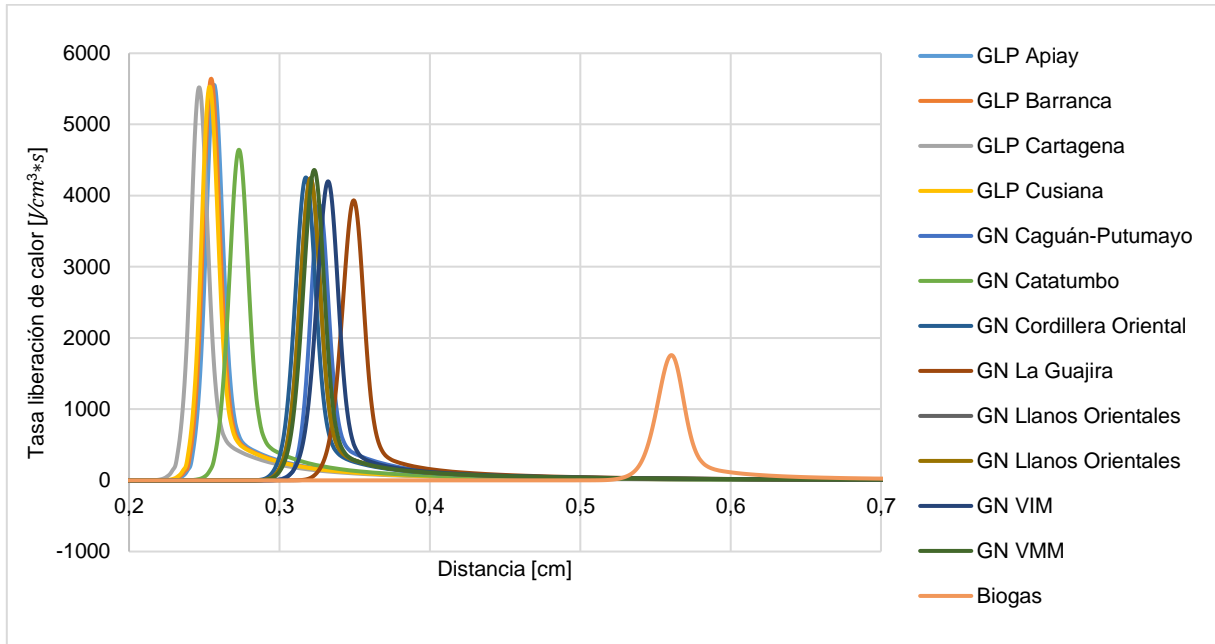


Figura 25. Tasa de liberación neta de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para todos los combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s

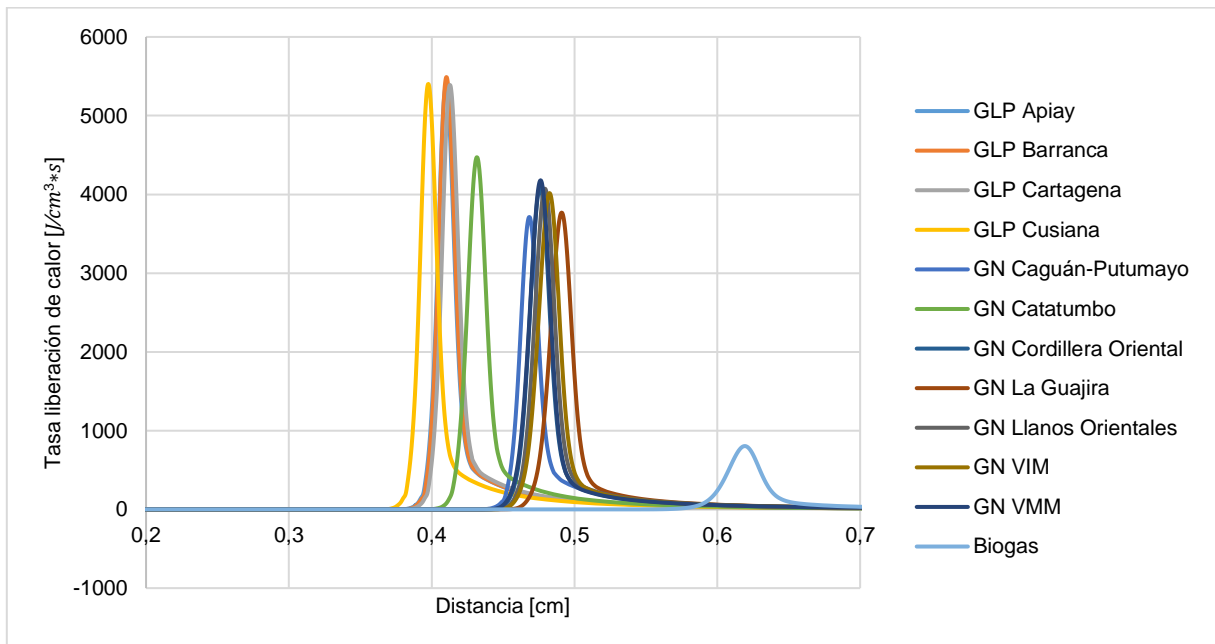


Figura 26. Tasa de liberación neta de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para todos los combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s

Tabla 12. Tasa de liberación máxima de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para todos los combustibles estudiados

	v= 50cm/s		v= 80cm/s	
	Max. calor liberado	Distancia	Max. calor liberado	Distancia
	$[\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}]$	cm	$[\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}]$	cm
GLP Apiay	5553.55	0.256	5367.95	0.410
GLP Barrancabermeja	5642.04	0.255	5489.53	0.410
GLP Cartagena	5521.52	0.247	5389.19	0.413
GLP Cusiana	5530.79	0.254	5402.48	0.398
GN Caguán-Putumayo	3864.83	0.327	3710.05	0.468
GN Catatumbo	4644.13	0.273	4470.33	0.431
GN Cordillera Oriental	4254.39	0.317	4085.85	0.476
GN La Guajira	3933.38	0.349	3768.77	0.491
GN Llanos Orientales	4242.97	0.321	4070.70	0.479
GN VIM	4199.44	0.333	4015.40	0.482
GN VMM	4360.31	0.323	4178.84	0.476
Biogás	1758.67	0.561	803.72	0.619

Las Figuras 25, 26 y la Tabla 12 compara la tasa de liberación de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}]$ para la totalidad de los gases combustibles estudiados a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s respectivamente. Todos los resultados presentados en este apartado hacen referencia a las simulaciones de combustión hechas en CHEMKIN PRO con un factor de aireación $n=1.025$. Como se observa, los gases combustibles con presencia de hidrocarburos más pesados como los GLP desarrollan primero la llama, mientras que los GN con alto contenido de metano se desarrollan después. Ahora, los GLP tienen tasas de liberación de calor superiores a los otros gases combustibles para ambas velocidades de entrada: 5500 $\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}$ a una velocidad de 50 cm/s y mayores a 5300 $\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}$ a 80 cm/s; mientras que los GN en promedio liberan entre 3800 y 4600 $\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}$ a 50 cm/s y, entre 3700 y 4400 $\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}$ a 80 cm/s.

Es importante resaltar que todos los gases combustibles desarrollan su llama más rápido para velocidades de entrada menores y así mismo la tasa de liberación de calor es mayor, mientras que, a una velocidad de entrada superior, la tasa de liberación disminuye y la llama se desarrolla más tarde. Para el caso del biogás debido a la alta presencia de CO_2 en su composición, la llama se desarrolla después que la de los otros gases combustibles y su tasa de liberación de calor está muy por debajo, siendo esta de 1758.67 $\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}$ a 50cm/ y de 803.72 $\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}$ a 80 cm/s de entrada. Al igual que en los casos de los GLP y GN, a una velocidad mayor la liberación de calor disminuye.

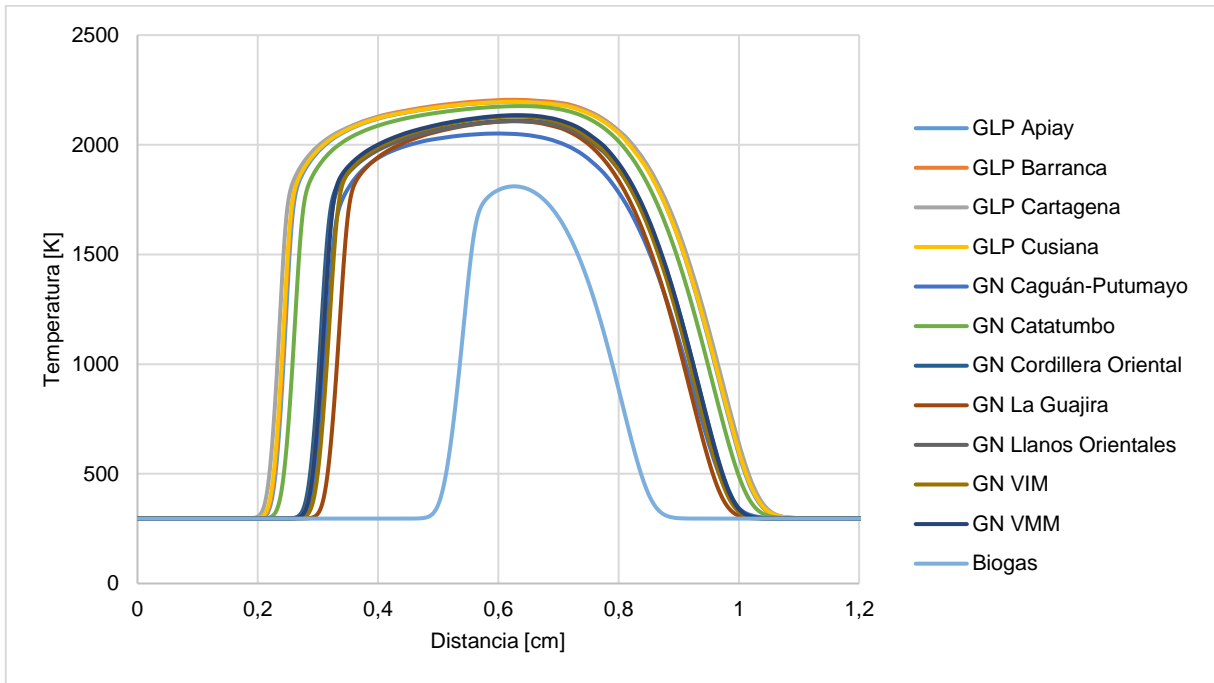


Figura 27. Perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para todos los combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s

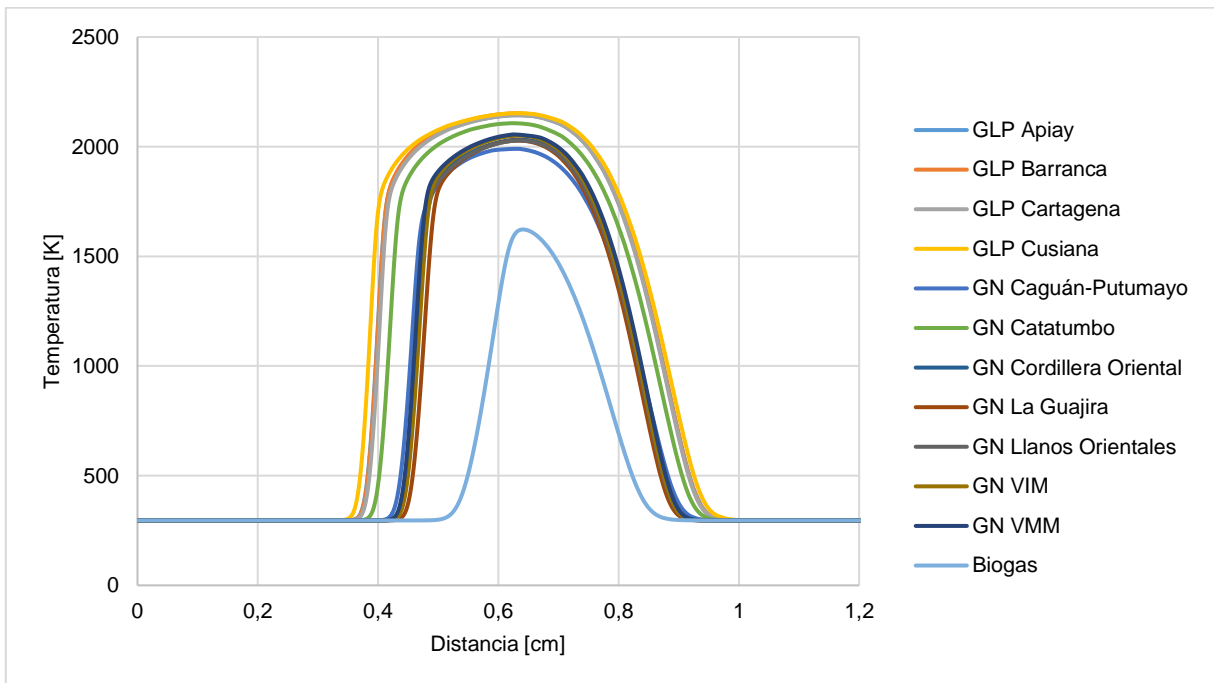


Figura 28. Perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para todos los combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s

En las figuras 27 y 28 se presentan los perfiles de temperatura [K] de todas las combustiones simuladas. Todos los resultados presentados en este apartado hacen referencia a las simulaciones de combustión hechas en CHEMKIN PRO con un factor de aireación $n=1.025$.

La primera gráfica expone el comportamiento de la temperatura a una velocidad de 50 cm/s y la segunda a una velocidad de 80 cm/s. En ambos casos se puede evidenciar que los GLP alcanzan rangos de temperatura de llama superiores a los GN y el biogás, siendo este último el gas combustible con menos temperatura de llama para las condiciones establecidas de combustión. Adicionalmente, las gráficas muestran que a una velocidad de 50 cm/s la temperatura de llama se alcanza más rápido y se mantiene durante más tiempo, pero, para la velocidad de 80 cm/s la temperatura de llama es alcanzada después el rango de permanencia es menor.

El biogás difiere en su comportamiento de los otros gases combustibles, ya que desarrolla su temperatura de llama después y no presenta estabilidad en el perfil de temperatura.

Las Figuras 29 y 30 presentan la tasa neta de formación de la especie O_2 en la combustión y las Figuras 31 y 32 la tasa de neta de formación de CO_2 para todos los gases combustibles a las velocidades de 50 y 80 cm/s.

En todas las gráficas se evidencia concordancia en el comportamiento de las especies, las fracciones de O_2 presente en las mezclas comienzan a disminuir drásticamente en el punto donde la liberación de calor y la formación de la llama ocurren, para luego extinguirse gradualmente. La formación de las especies depende de la velocidad de entrada del sistema de combustión, siendo esta más rápida a la velocidad de 50 cm/s que a 80 cm/s.

Paralelamente, el CO_2 se forma cuando las reacciones químicas involucradas en la combustión ocurren y la llama se desarrolla. Las tasas netas de formación están dadas por la diferencia entre, por una parte, la tasa de formación de valencias libres en las primeras reacciones y por otra, la velocidad de su eliminación en las reacciones finales de combustión.

Para el caso específico del biogás, la mezcla del gas combustible ya presenta CO_2 y por ende su tasa de formación difiere de la de los demás gases; alcanzando su mayor punto de formación cuando la llama alcanza su mayor temperatura, posteriormente la especie química muere al igual como sucede con todos los GLP y GN simulados.

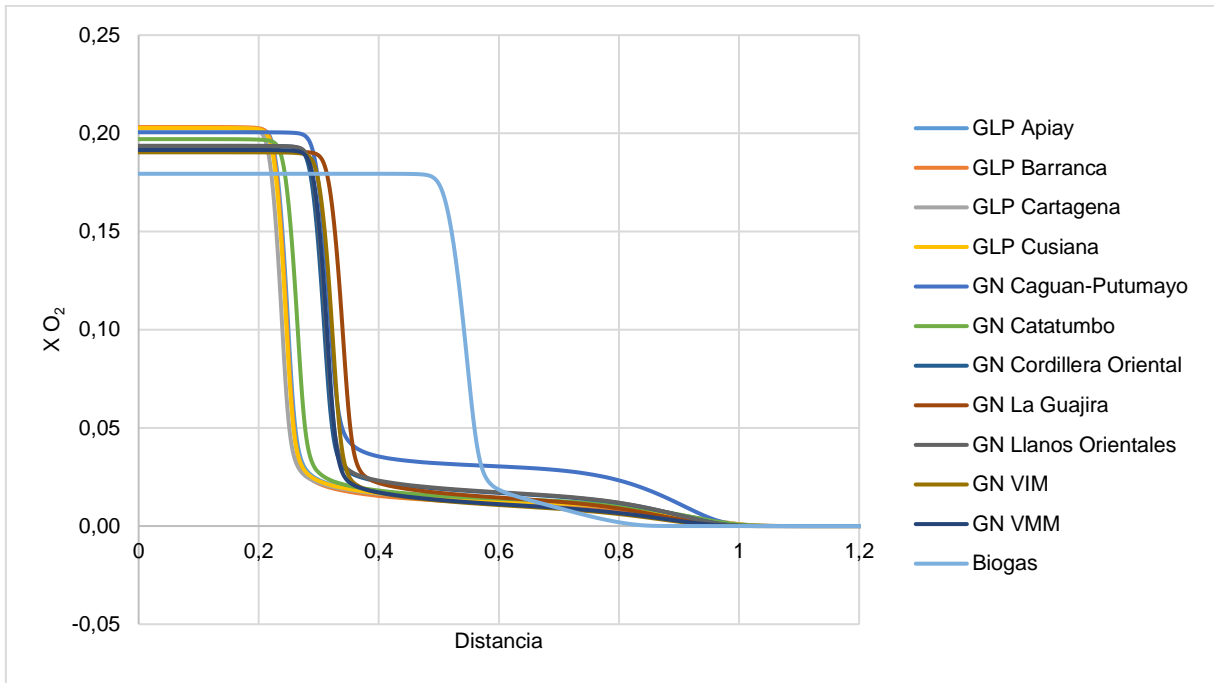


Figura 29. Fracción molar [X] de O_2 en la reacción de combustión para todos los combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s

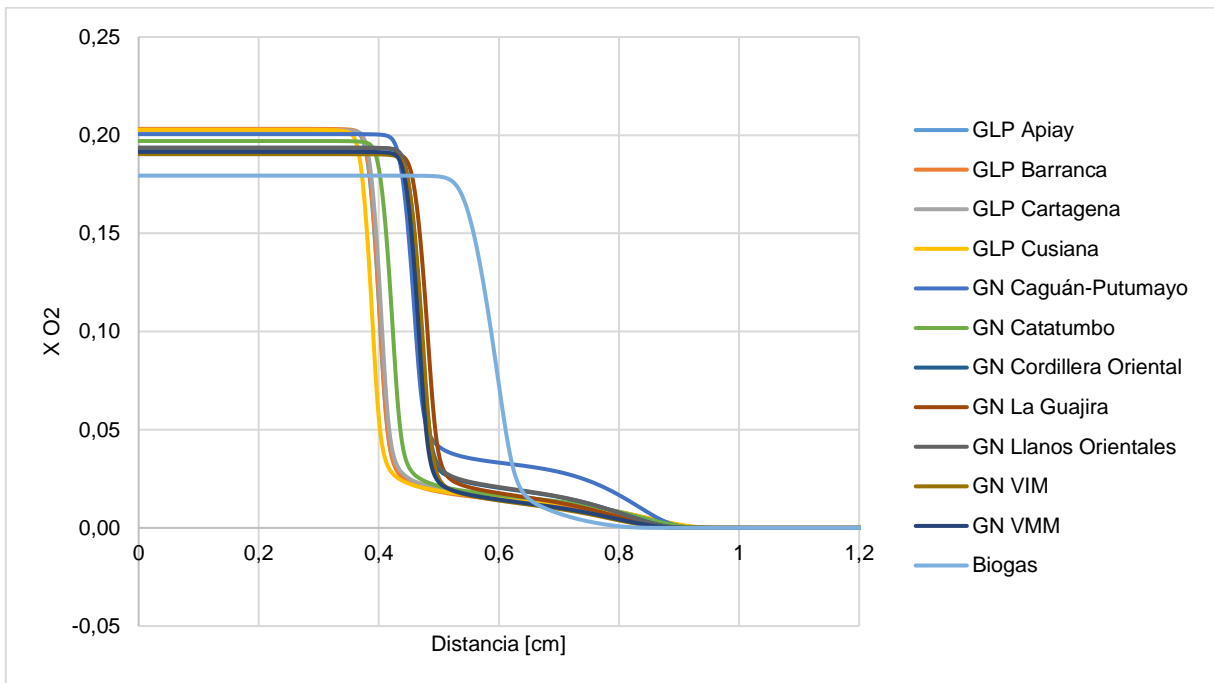


Figura 30. Fracción molar [X] de O_2 en la reacción de combustión para todos los combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s

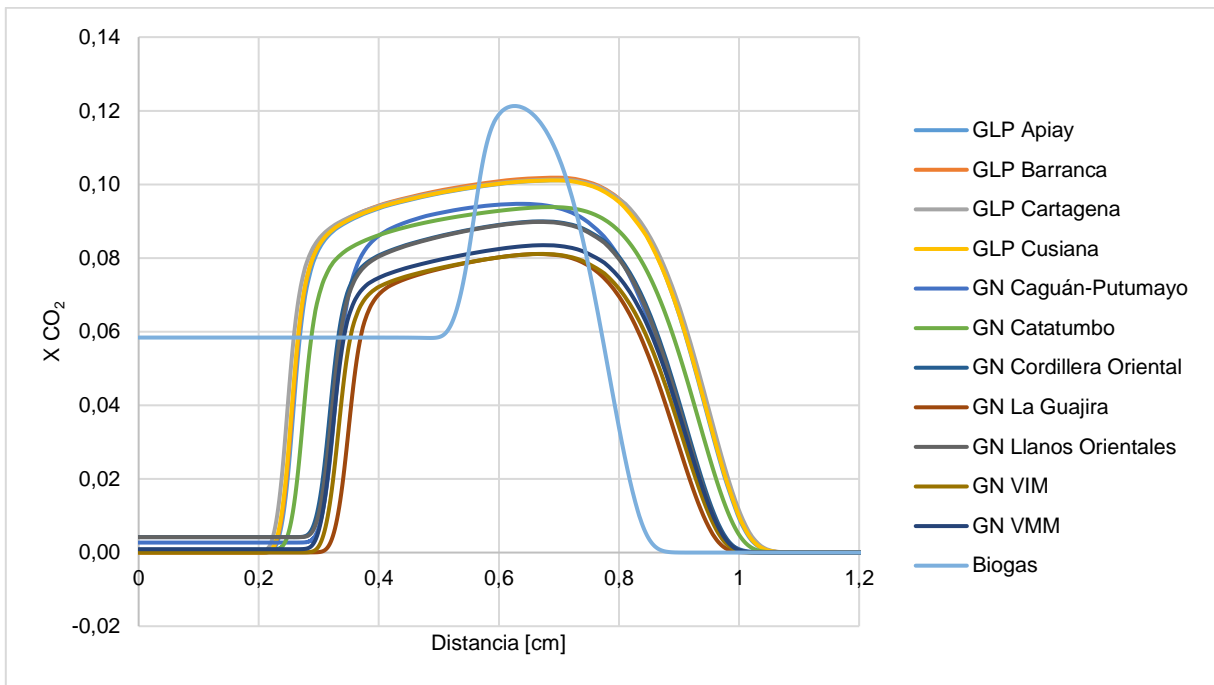


Figura 31. Fracción molar [X] de CO₂ en la reacción de combustión para todos los combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s

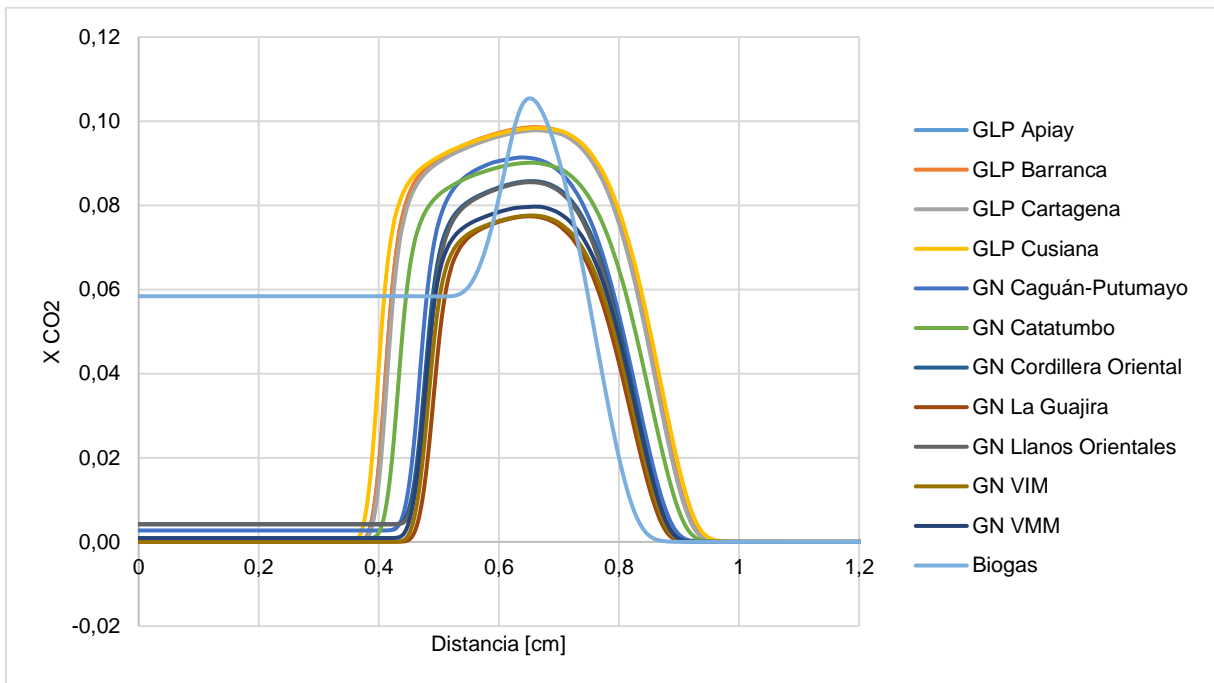


Figura 32. Fracción molar [X] de CO₂ en la reacción de combustión para todos los combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s

Estructura de llama para el conjunto de Gases Licuados de Petróleo

Desde la Figura 33 hasta la Figura 40 se expone: Las tasas de liberación neta de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}]$, los perfiles de temperatura $[\text{K}]$ de la llama y las tasas netas de formación de las especies O_2 y CO_2 para las velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s respectivamente, para el conjunto de Gases Licuados de Petróleo estudiados. Todos los resultados presentados en este apartado hacen referencia a las simulaciones de combustión hechas en CHEMKIN PRO con un factor de aireación $n=1.025$.

De esta manera se logra comparar a detalle el comportamiento de las reacciones para estos gases combustibles. Donde se puede evidenciar que la similitud entre las composiciones de los GLP es consecuente con las semejanzas entre el desarrollo y la estructura de las llamas de cada combustión, llevando a los cuatro gases a un estado de casi igualdad. Aun así, se identifica que el GLP Cartagena presenta un desarrollo en su combustión más pronto que los demás gases a una velocidad de entrada de 50 cm/s, mientras que a 80 cm/s sucede con el GLP Cusiana.

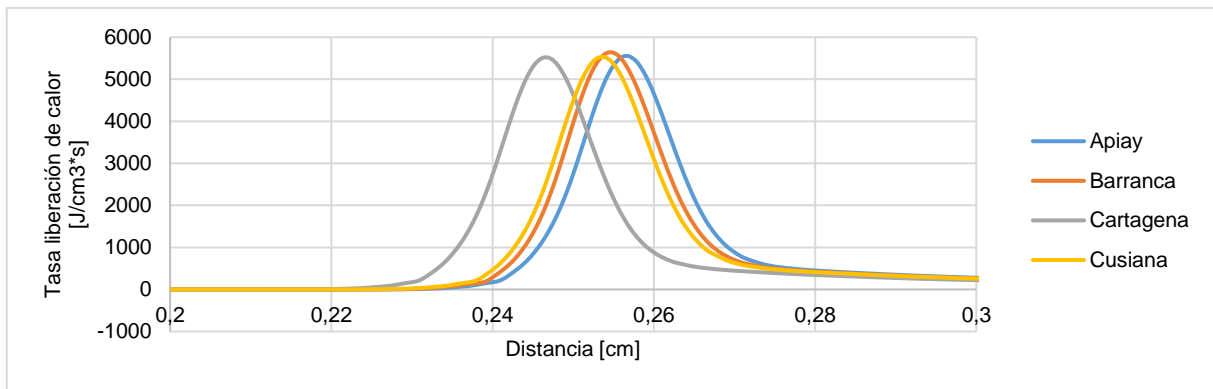


Figura 33. Tasa de liberación neta de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s

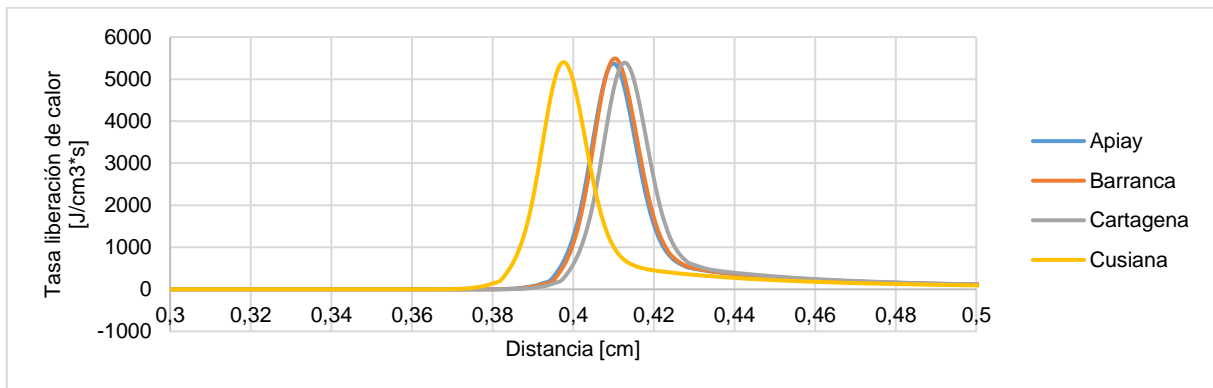


Figura 34. Tasa de liberación neta de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s

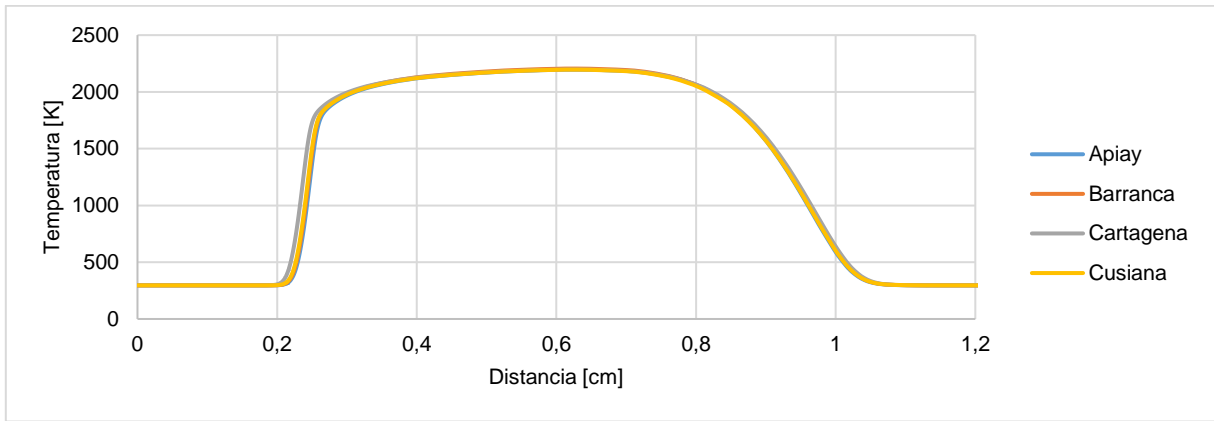


Figura 35. Perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s

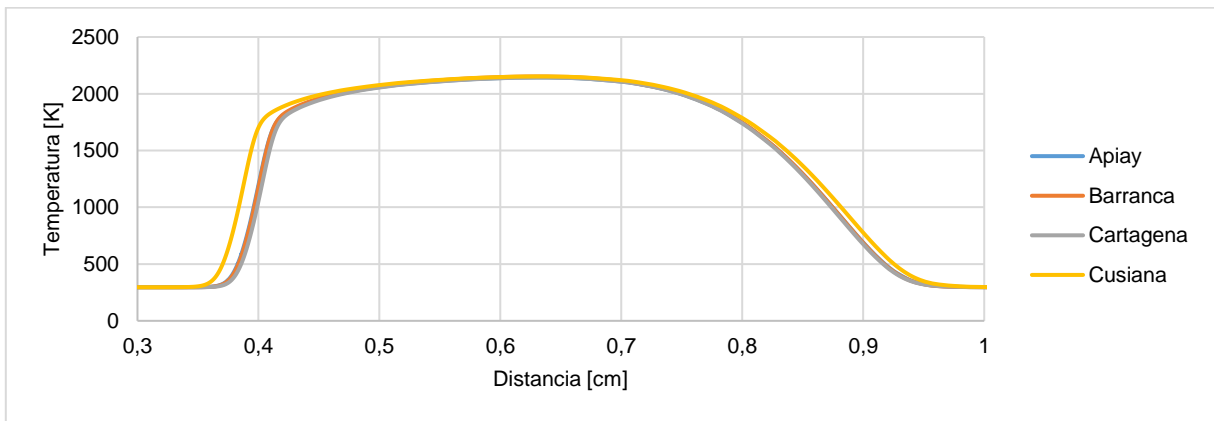


Figura 36. Perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s

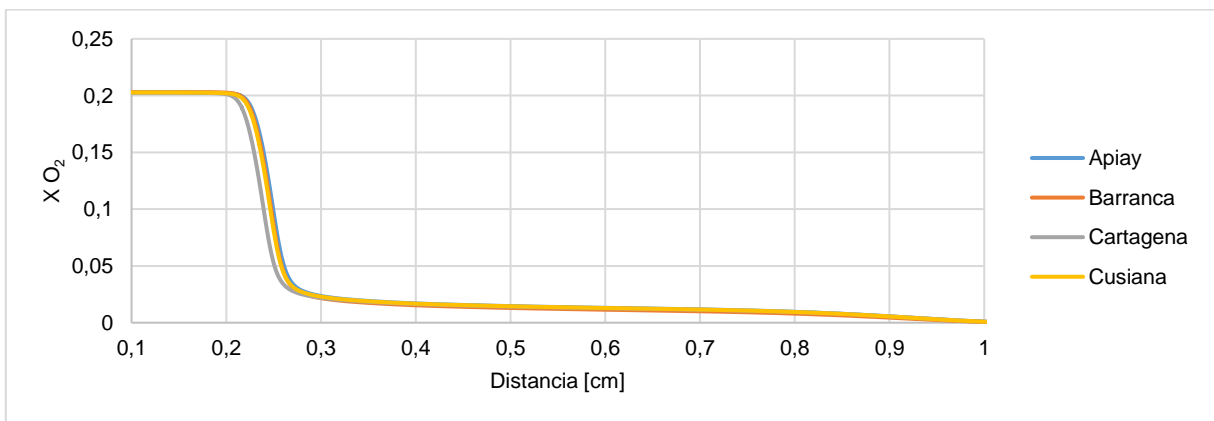


Figura 37. Fracción molar [X] de O_2 en la reacción de combustión para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s

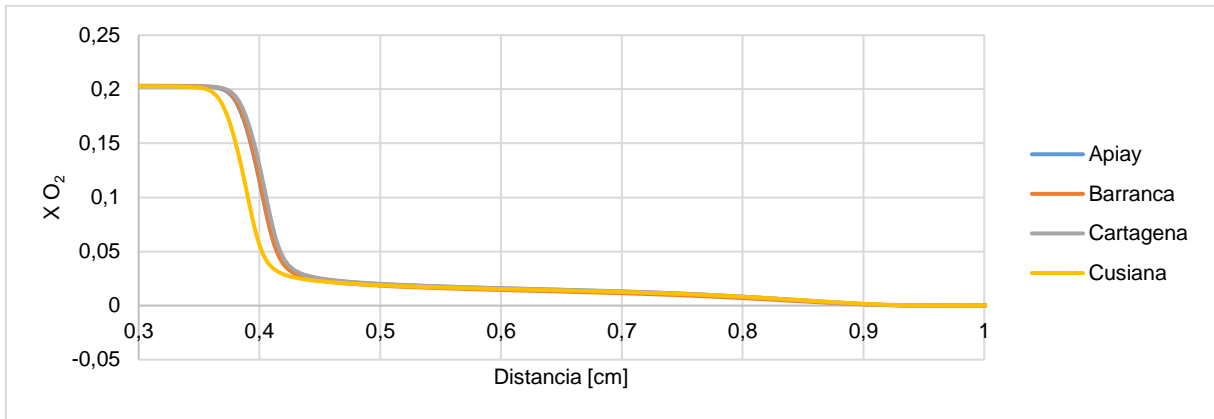


Figura 38. Fracción molar [X] de O₂ en la reacción de combustión para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s

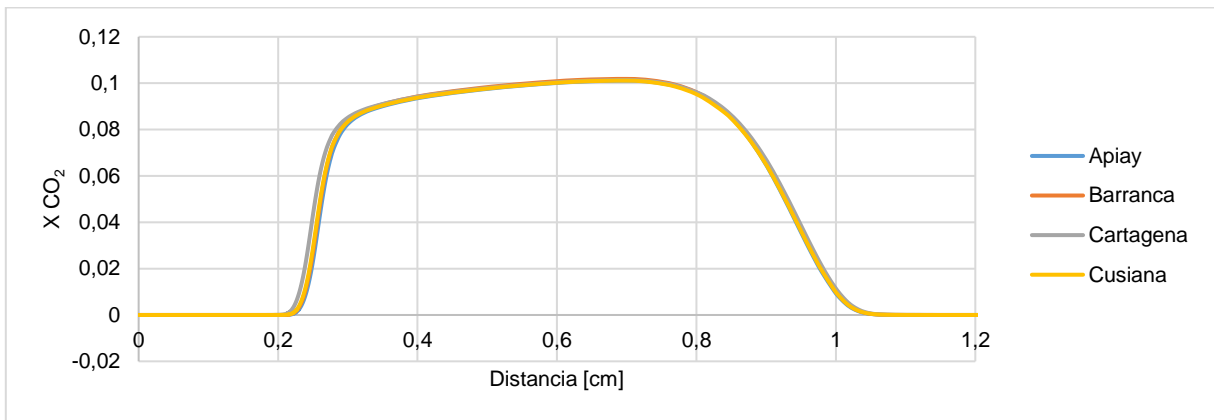


Figura 39. Fracción molar [X] de CO₂ en la reacción de combustión para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s

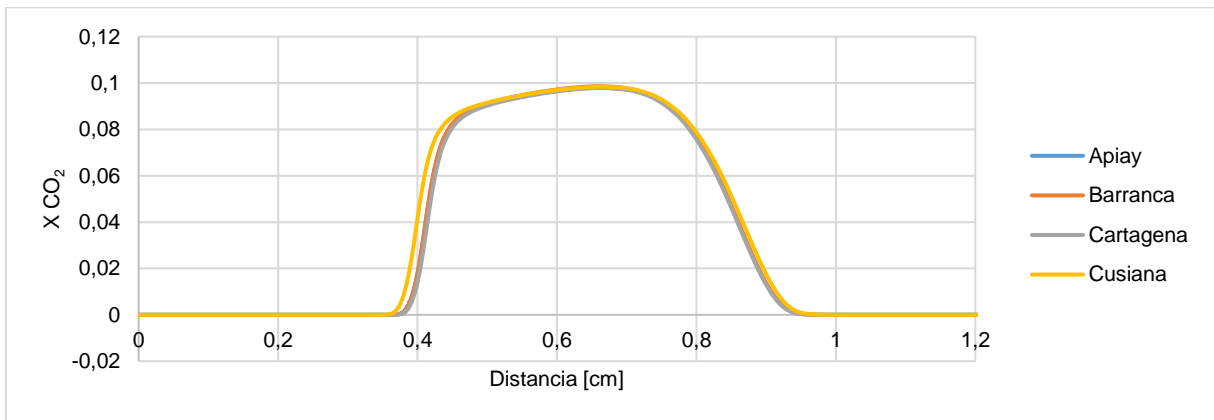


Figura 40. Fracción molar [X] de CO₂ en la reacción de combustión para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s

Estructura de llama para el conjunto de Gases Naturales

El conjunto de gráficas presentadas desde la Figura 41 hasta la Figura 48 exponen: Las tasas de liberación neta de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}]$, los perfiles de temperatura $[\text{K}]$ de la llama y las tasas netas de formación de las especies O_2 y CO_2 para las velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s respectivamente, para el conjunto de Gases Naturales estudiados. Todos los resultados presentados en este apartado hacen referencia a las simulaciones de combustión hechas en CHEMKIN PRO con un factor de aireación $n=1.025$.

Debido a que las fracciones molares que componen cada gas natural discrepan entre sí, se evidencian las diferencias entre las reacciones de combustión. Por ejemplo, además de presentar una mayor tasa de liberación de calor y una mayor temperatura de llama, el GN Catatumbo desarrolla la combustión más rápido que los otros gases naturales como consecuencia de la alta presencia de hidrocarburos como etano, propano y butano, además del 60% de metano en su composición. Igualmente, las especies O_2 y CO_2 se forman más rápido en la combustión de este gas.

Los GN Cordillera Oriental, Llanos Orientales, Valle Inferior y Valle Medio del Magdalena (73.94% - 73,94% - 95,33% y 91,23% de metano respectivamente) se comportan de manera similar a ambas velocidades de entrada, presentando la liberación de calor en el mismo rango y alcanzando un perfil de temperatura semejante. El GN Cagúan-Putumayo con solo un 31.3% de metano tiene una tasa de liberación de calor más baja que los otros gases naturales y la temperatura de llama es menor versus la temperatura de los otros gases naturales. Finalmente el GN Guajira con un 97.33% de metano, es el gas natural que más tarde reacciona, su perfil de temperatura y la tasa neta de la formación de sus especies es similar a la de los GN VIM y VMM.

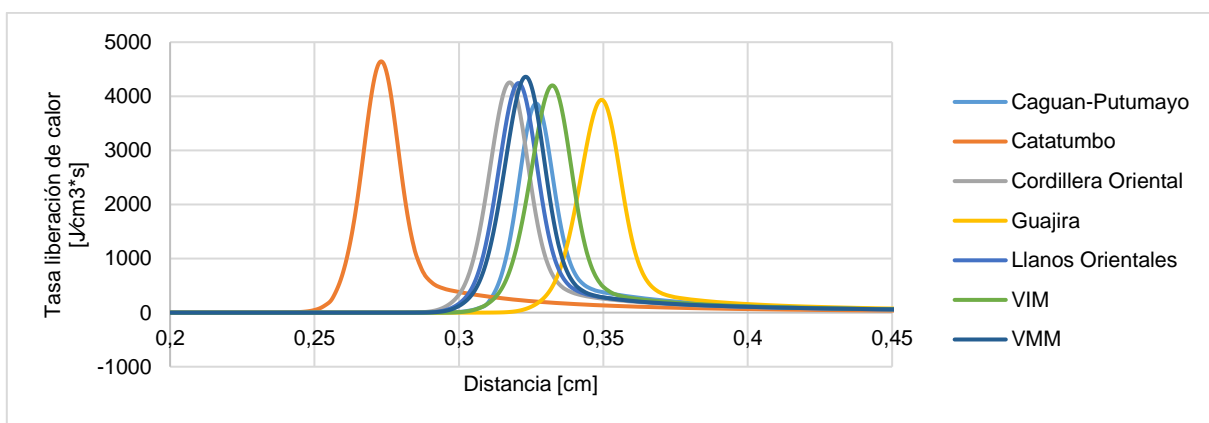


Figura 41. Tasa de liberación neta de calor en $[\text{J}/\text{cm}^3\cdot\text{s}]$ a partir de reacciones en fase gaseosa para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s

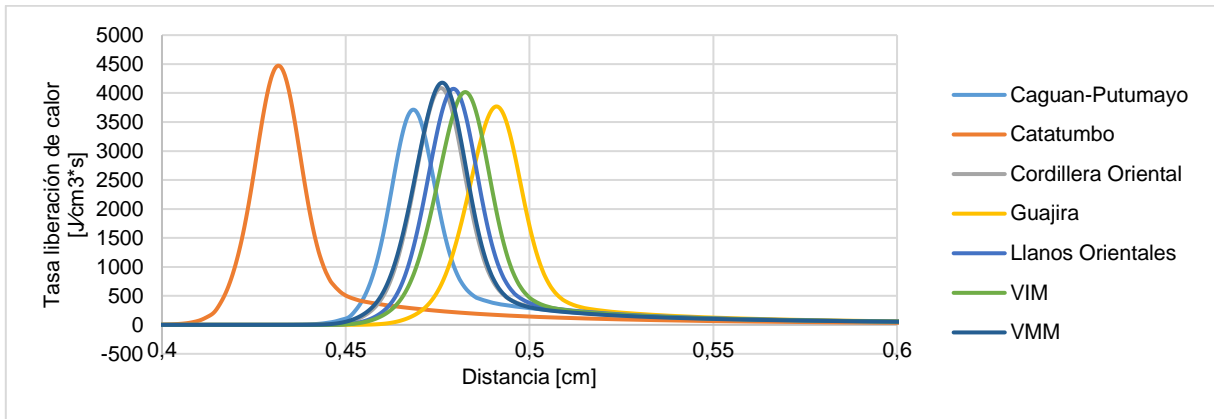


Figura 42. Tasa de liberación neta de calor en $\text{J/cm}^3\text{s}$ a partir de reacciones en fase gaseosa para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s

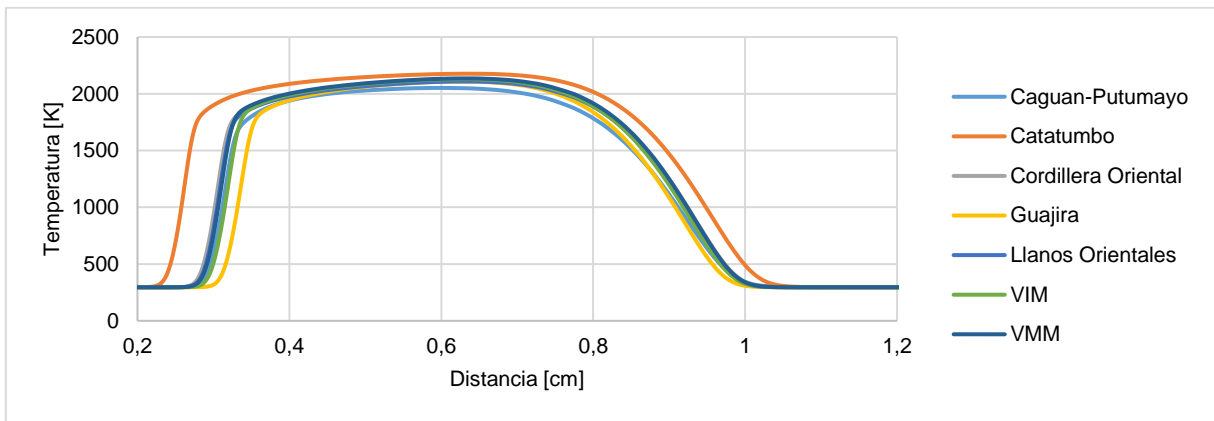


Figura 43. Perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s

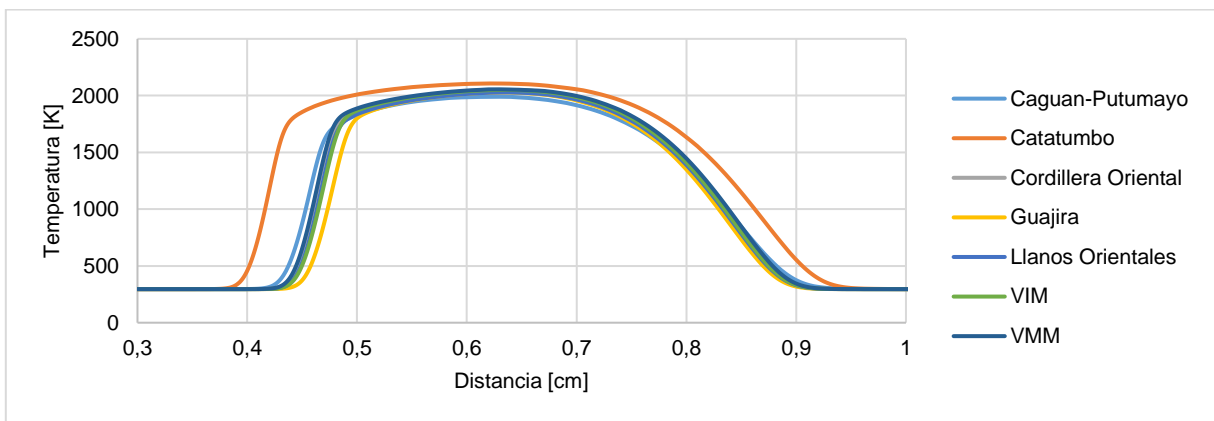


Figura 44. Perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s

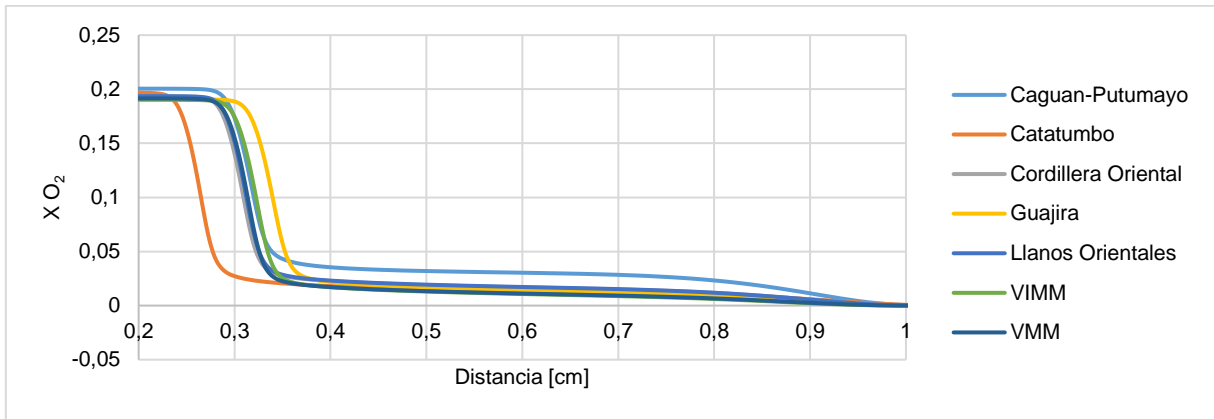


Figura 45. Fracción molar [X] para O_2 en la reacción de combustión para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s

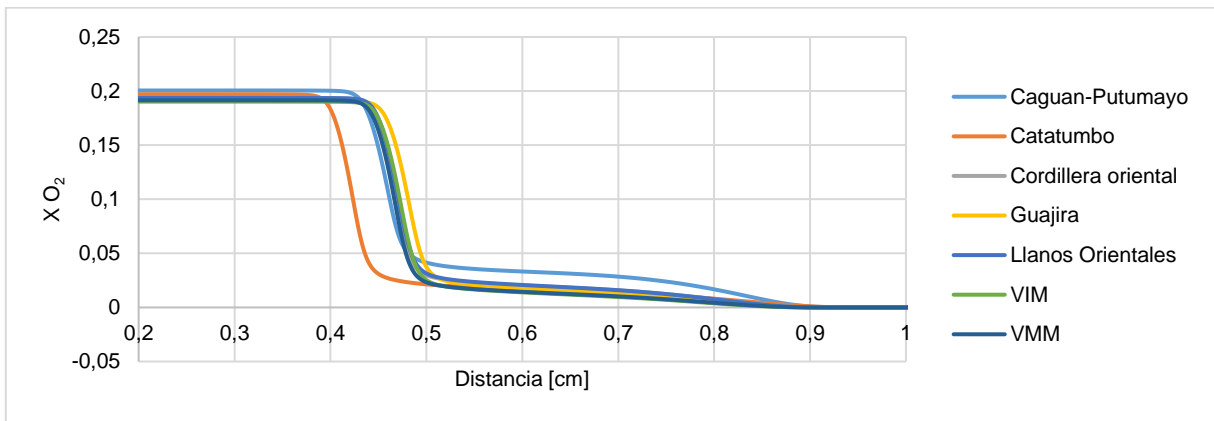


Figura 46. Fracción molar [X] para O_2 en la reacción de combustión para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s

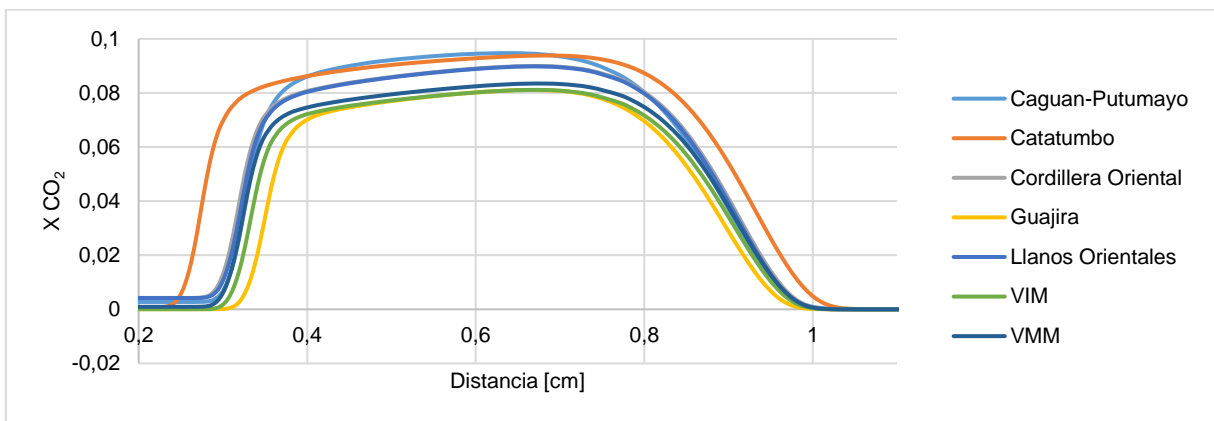


Figura 47. Fracción molar [X] para CO_2 en la reacción de combustión para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s

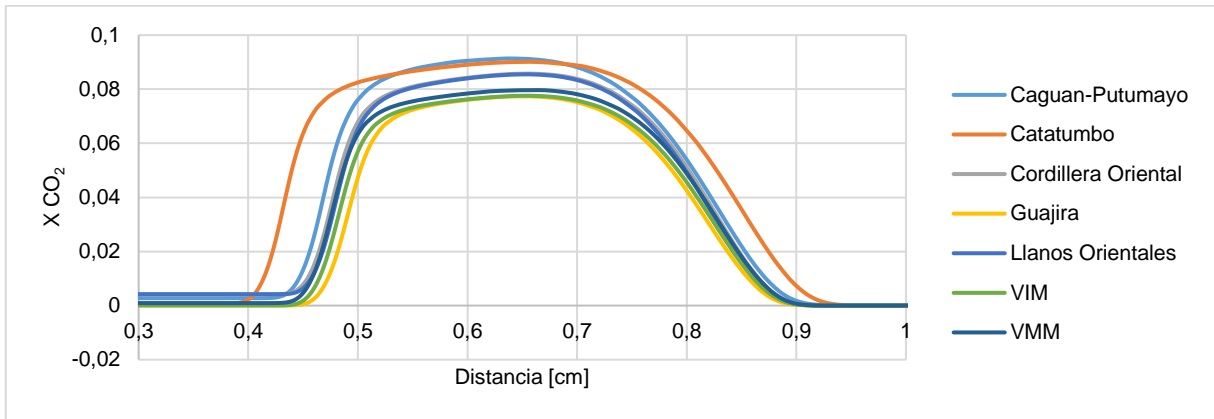


Figura 48. Fracción molar [X] para CO₂ en la reacción de combustión para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s

En seguida, se presentan los resultados particulares para cada gas combustible estudiado a un factor de aireación $n=1.025$: Biogás, GLP Apiay, GLP Barrancabermeja, GLP Cartagena, GLP Cusiana, GN Caguán-Putumayo, GN Catatumbo, GN Cordillera Oriental, GN La Guajira, GN Llanos Orientales, GN Valle Inferior del Magdalena y GN Valle Superior del Magdalena. Sin embargo, las observaciones acerca de estas gráficas se presentan anteriormente en el inicio de este apartado. Comparando el comportamiento de la tasa de liberación de calor, el perfil de temperatura y la tasa neta de formación de especies para las velocidades de entrada a 50 y 80 cm/s.

Estructura de llama para el Biogás

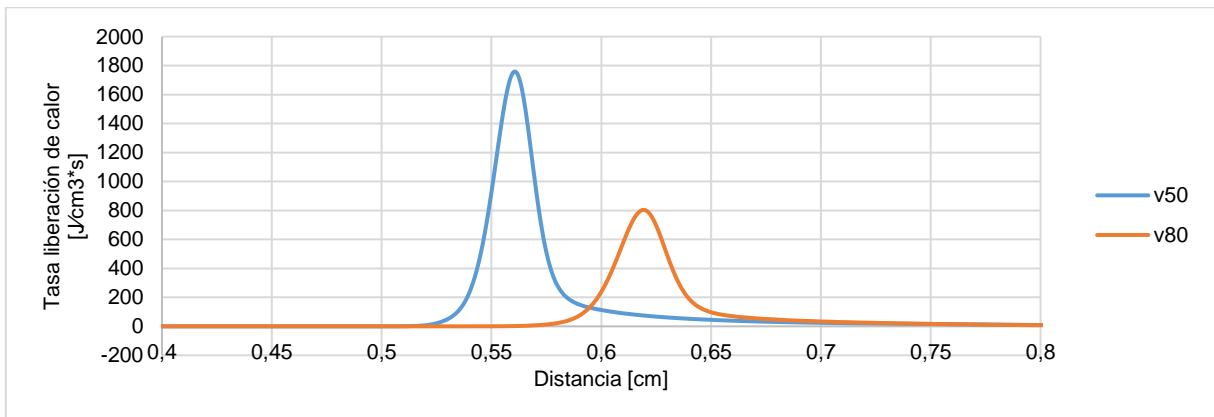


Figura 49. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en J/cm^3*s a partir de reacciones en fase gaseosa para el Biogás a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

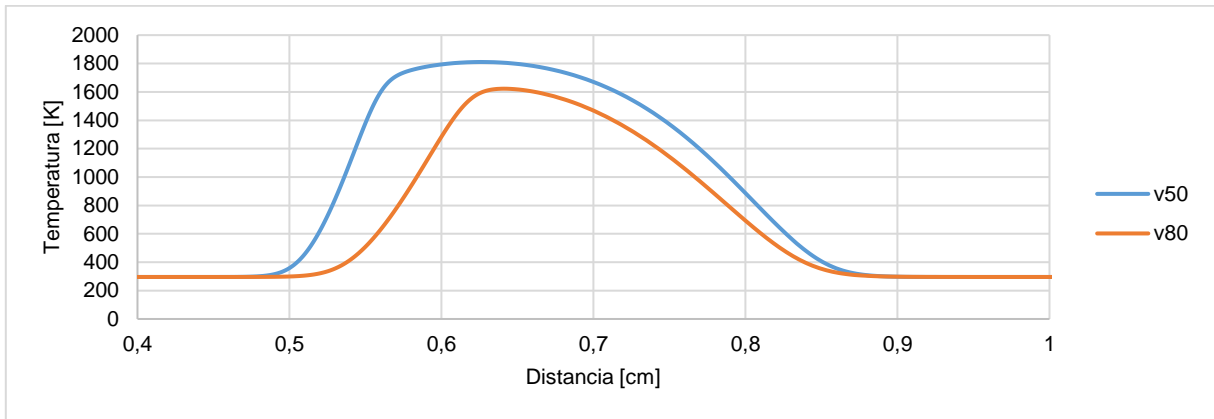


Figura 50. Comparación del perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para el Biogás a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

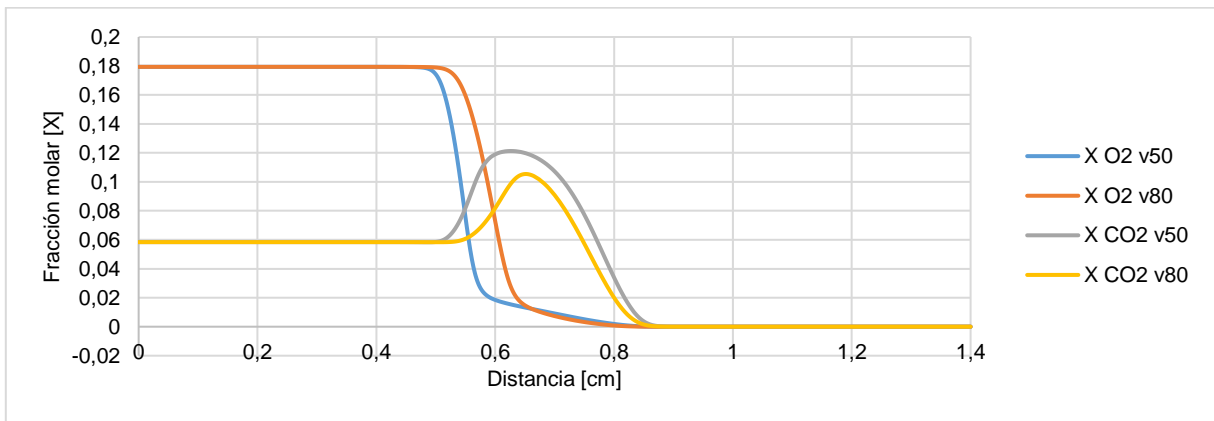


Figura 51. Comparación de la fracción molar [X] de O₂ y CO₂ en la reacción de combustión para el Biogás a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

Estructura de llama para GLP Apiay

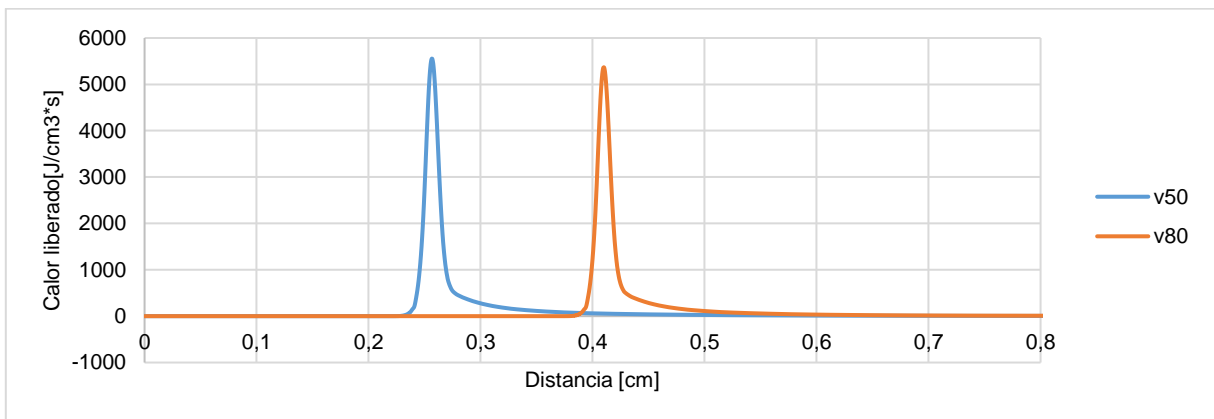


Figura 52. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en [J/cm³*s] a partir de reacciones en fase gaseosa para GLP Apiay a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

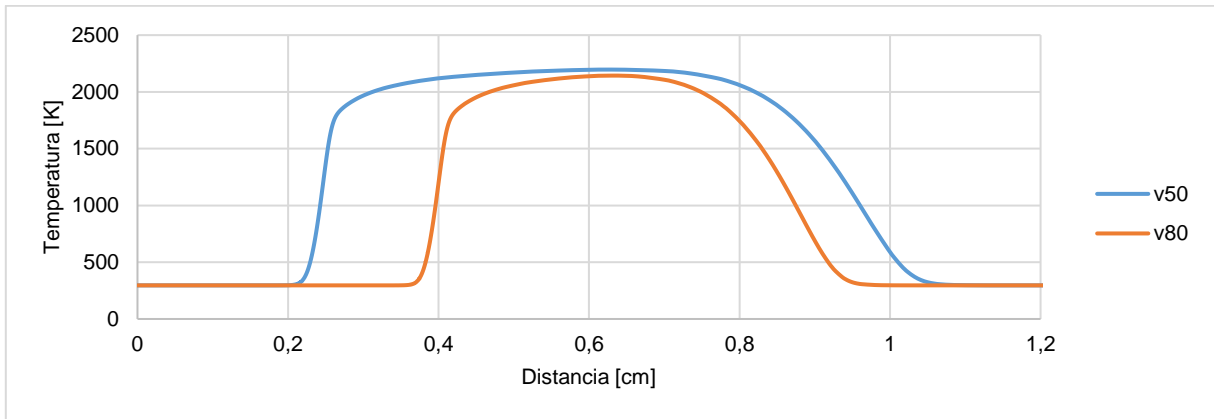


Figura 53. Comparación del perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para GLP Apiay a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

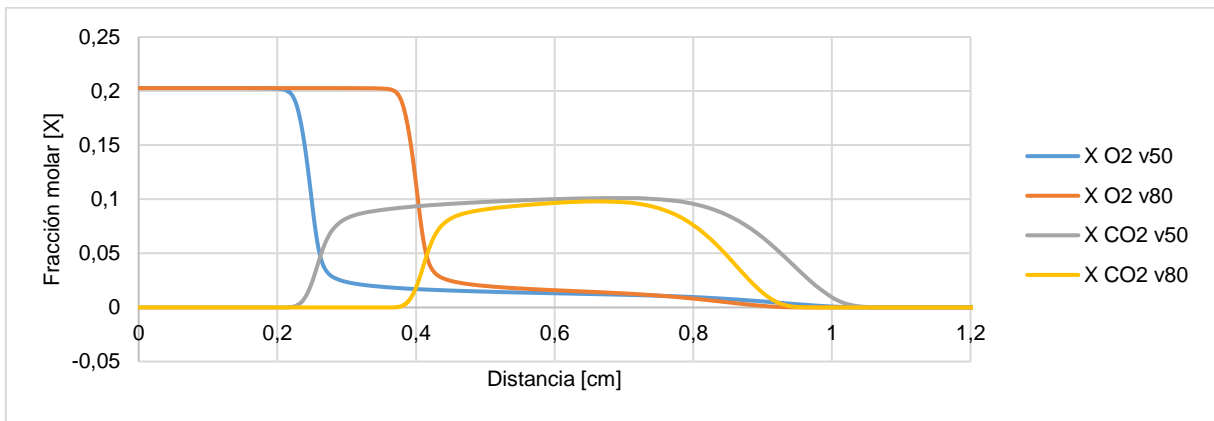


Figura 54. Comparación de la fracción molar [X] de O₂ y CO₂ en la reacción de combustión para GLP Apiay a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

Estructura de llama para GLP Barrancabermeja

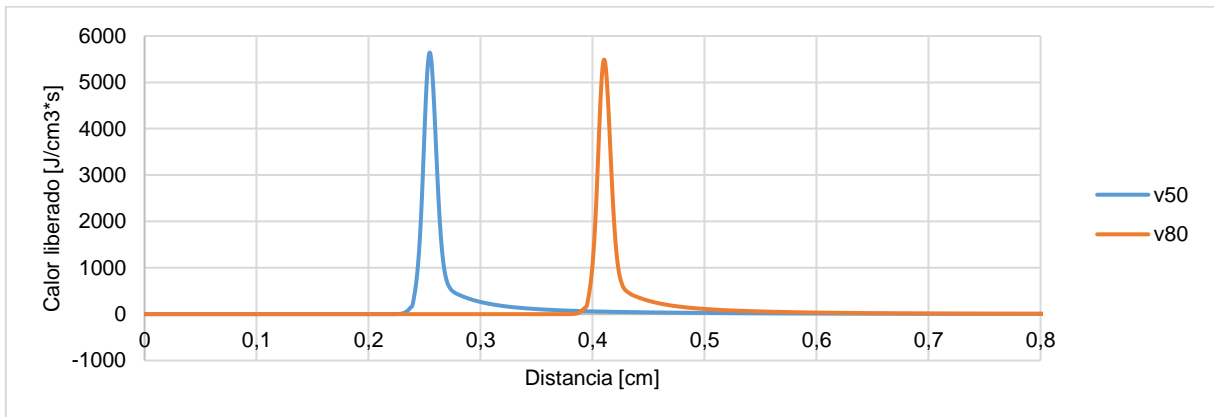


Figura 55. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en [J/cm³*s] a partir de reacciones en fase gaseosa para GLP Barranca a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

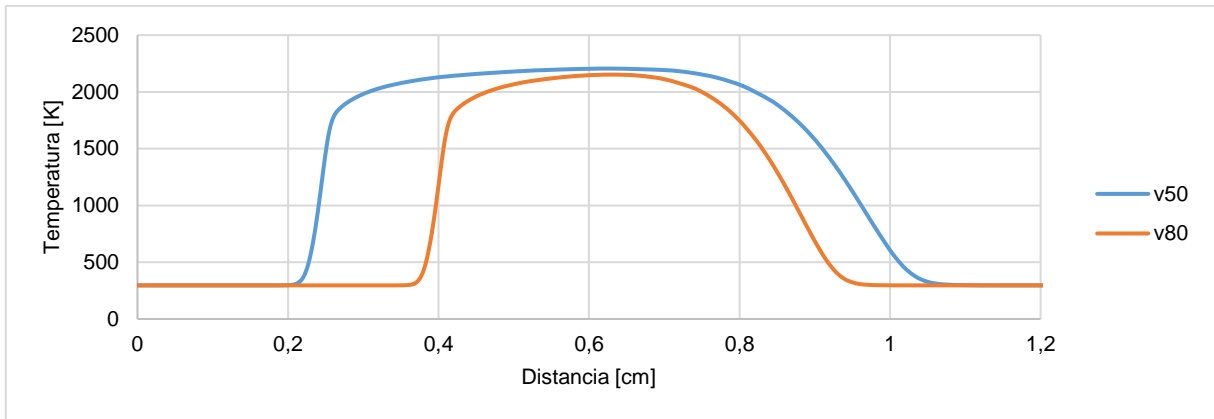


Figura 56. Comparación del perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para GLP Barranca a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

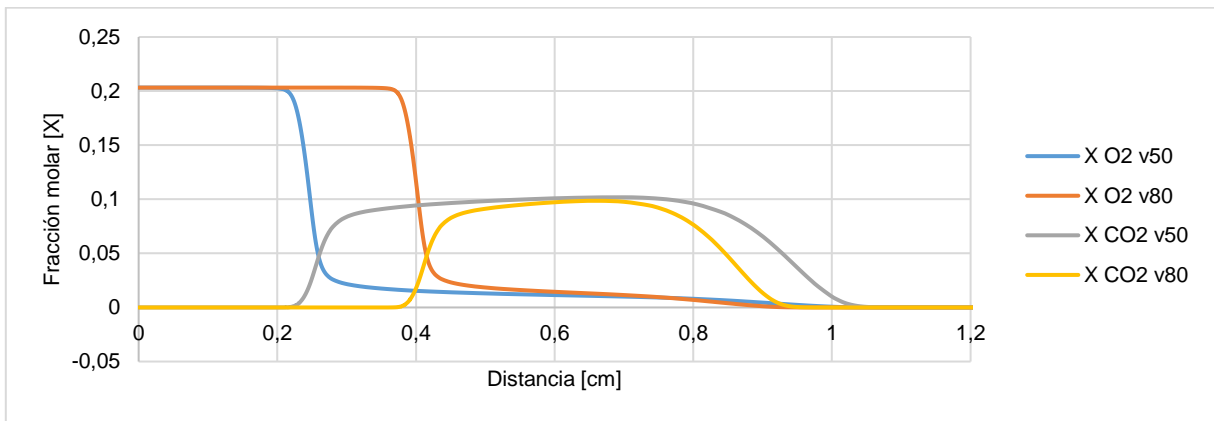


Figura 57. Comparación de la fracción molar [X] de O₂ y CO₂ en la reacción de combustión para GLP Barranca a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

Estructura de llama para GLP Cartagena

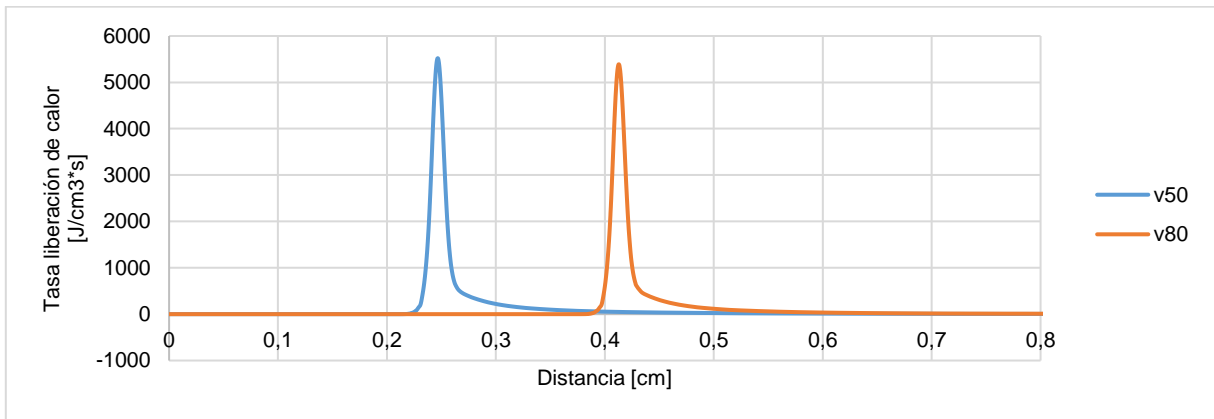


Figura 58. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en [J/cm³*s] a partir de reacciones en fase gaseosa para GLP Cartagena a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

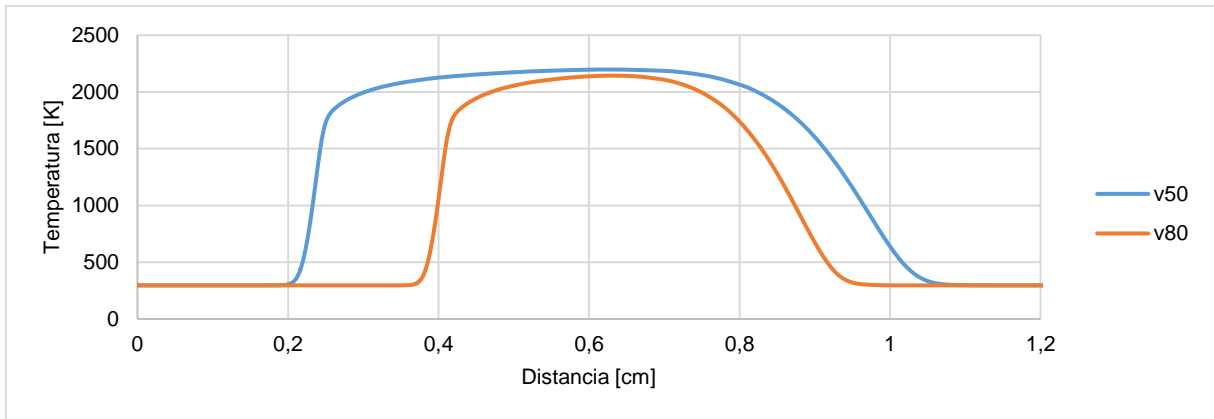


Figura 59. Comparación del perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para GLP Cartagena a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

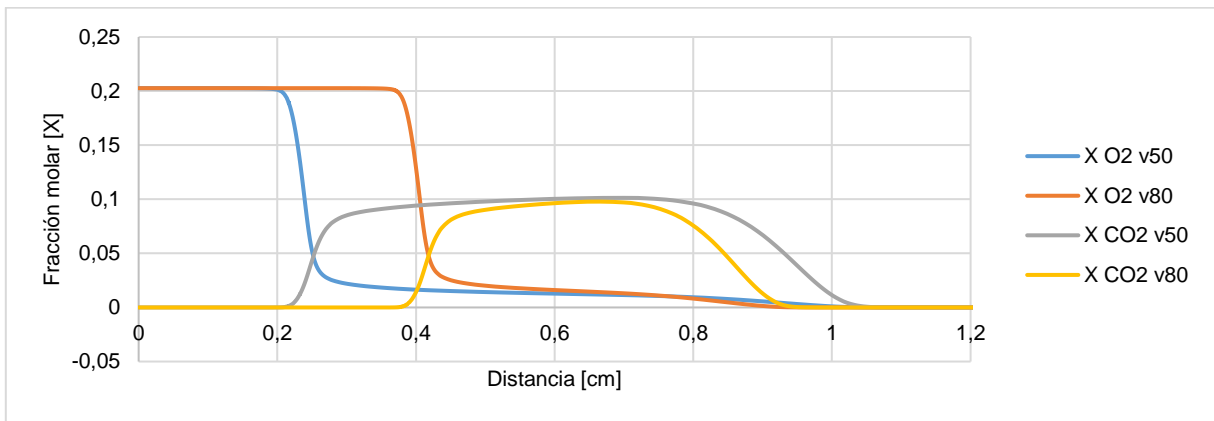


Figura 60. Comparación de la fracción molar [X] de O₂ y CO₂ en la reacción de combustión para GLP Cartagena a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

Estructura de llama para GLP Cusiana

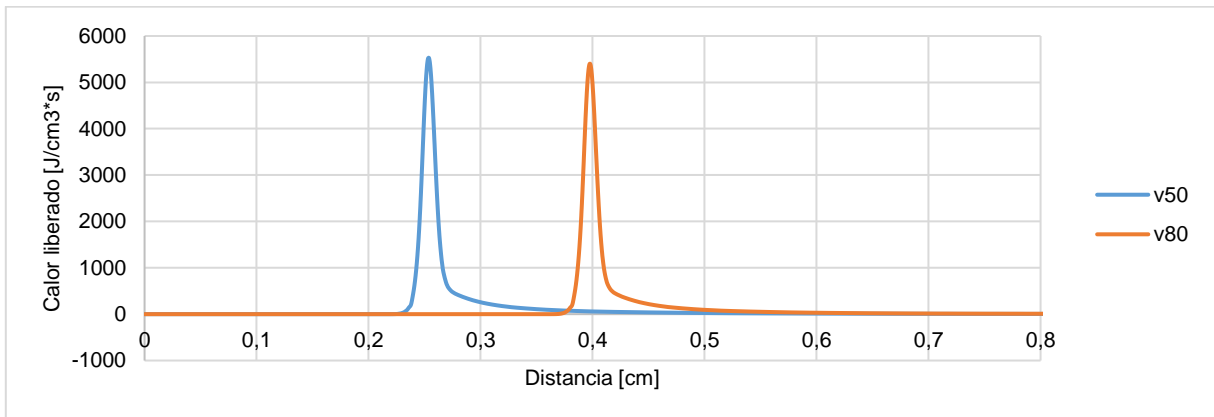


Figura 61. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en [J/cm³*s] a partir de reacciones en fase gaseosa para GLP Cusiana a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

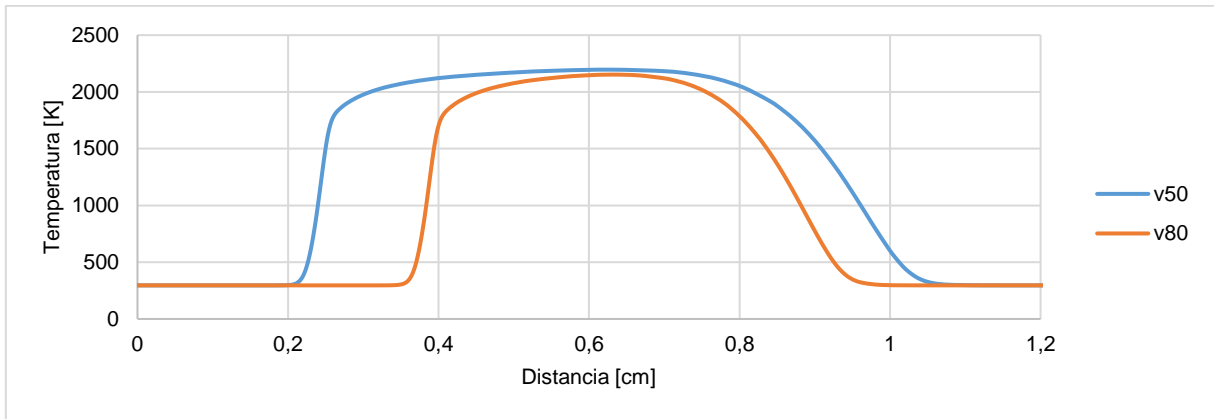


Figura 62. Comparación del perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para GLP Cusiana a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

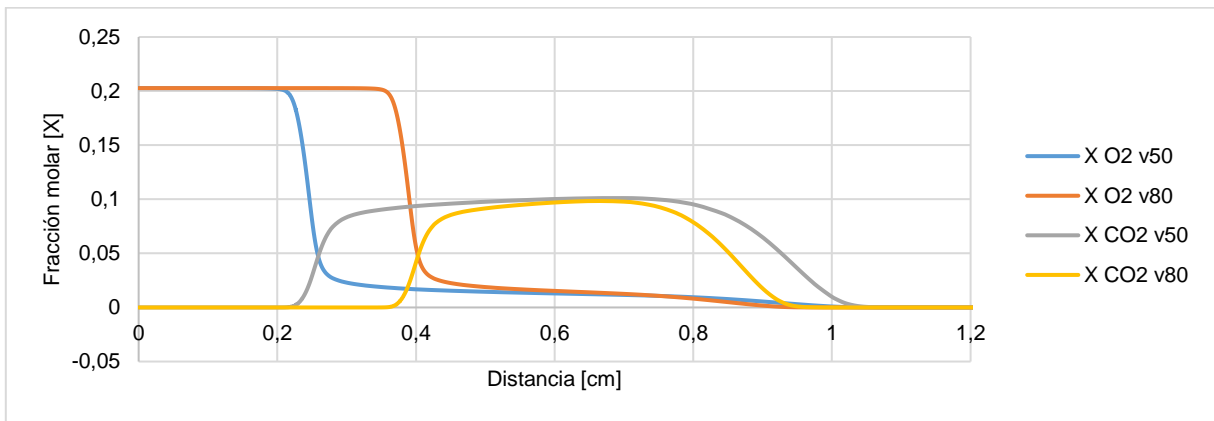


Figura 63. Comparación de la fracción molar [X] de O₂ y CO₂ en la reacción de combustión para GLP Cusiana a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

Estructura de llama para GN Caguán-Putumayo

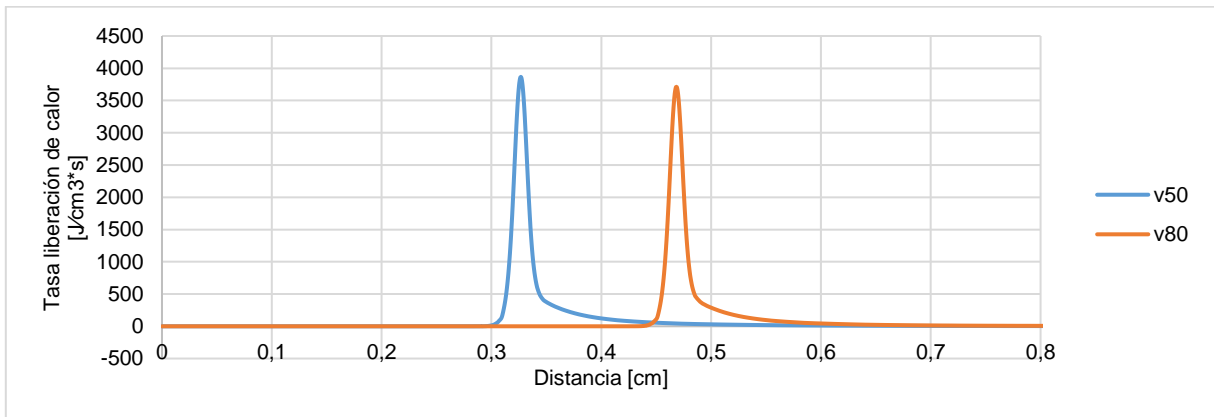


Figura 64. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en [J/cm³s] a partir de reacciones en fase gaseosa para GN Caguán-Putumayo a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

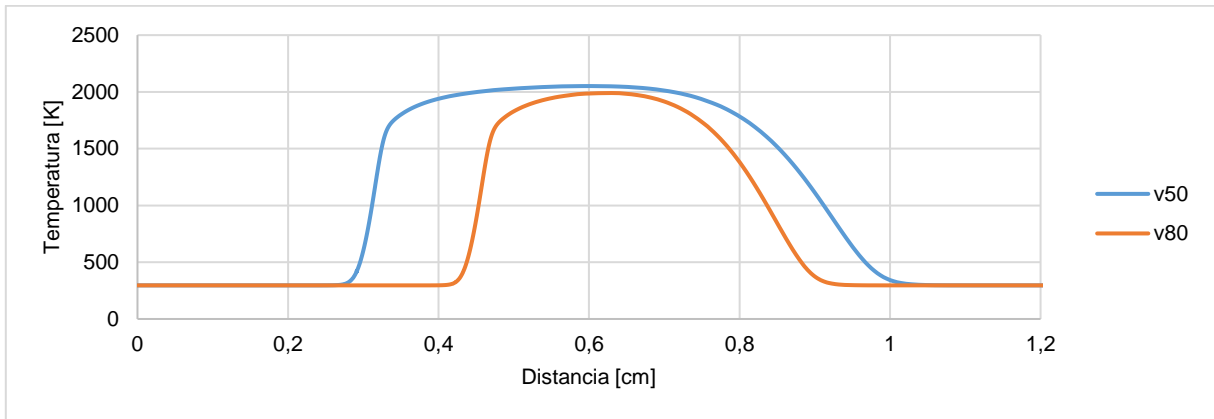


Figura 65. Comparación del perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para GN Caguán-Putumayo a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

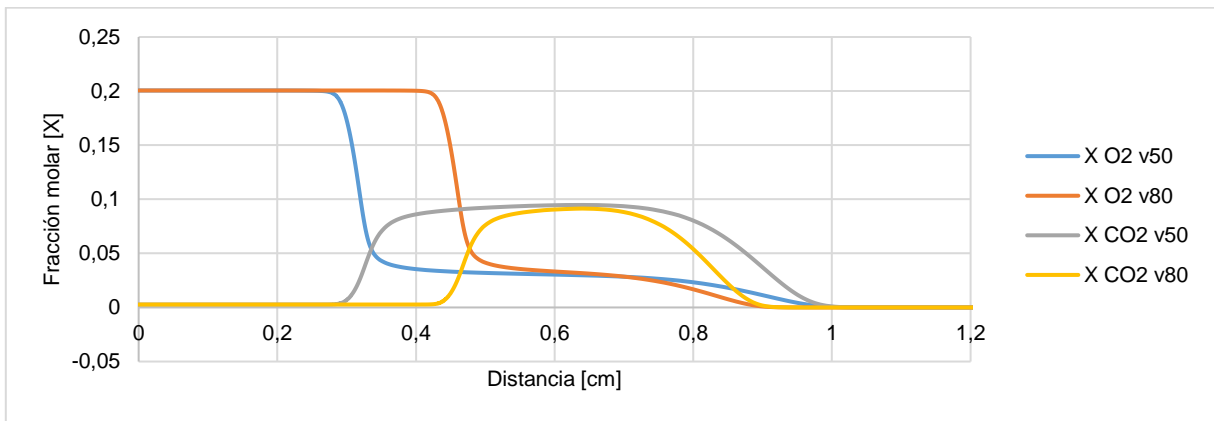


Figura 66. Comparación de la fracción molar [X] de O₂ y CO₂ en la reacción de combustión para GN Caguán-Putumayo a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

Estructura de llama para GN Catatumbo

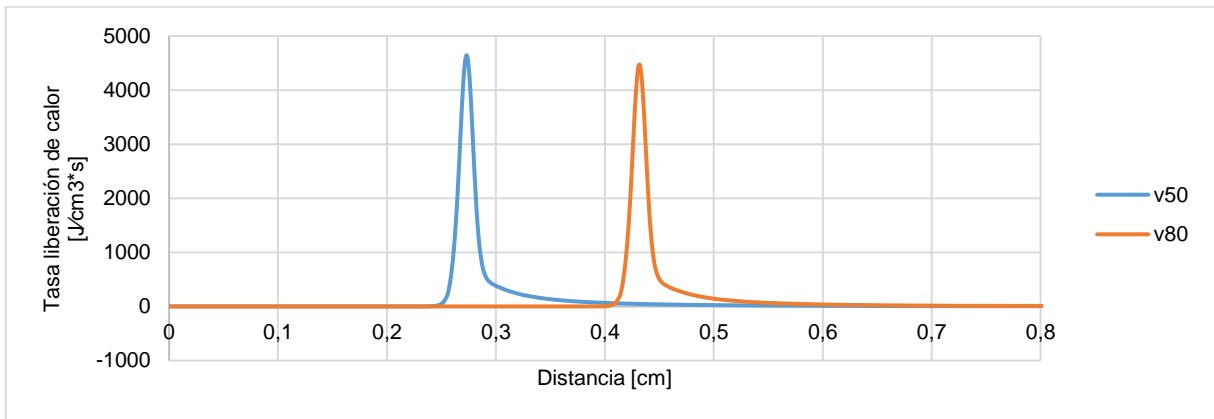


Figura 67. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en [J/cm³*s] a partir de reacciones en fase gaseosa para GN Catatumbo a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

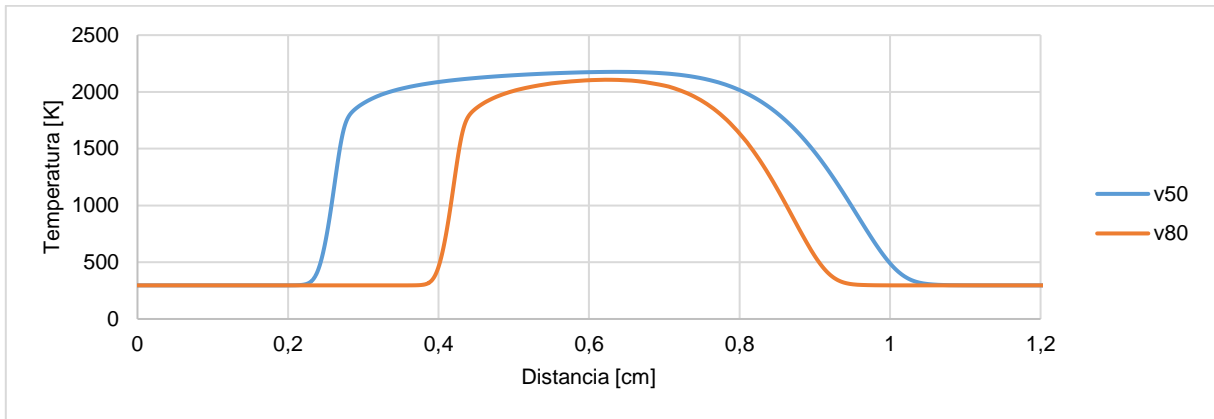


Figura 68. Comparación del perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para GN Catatumbo a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

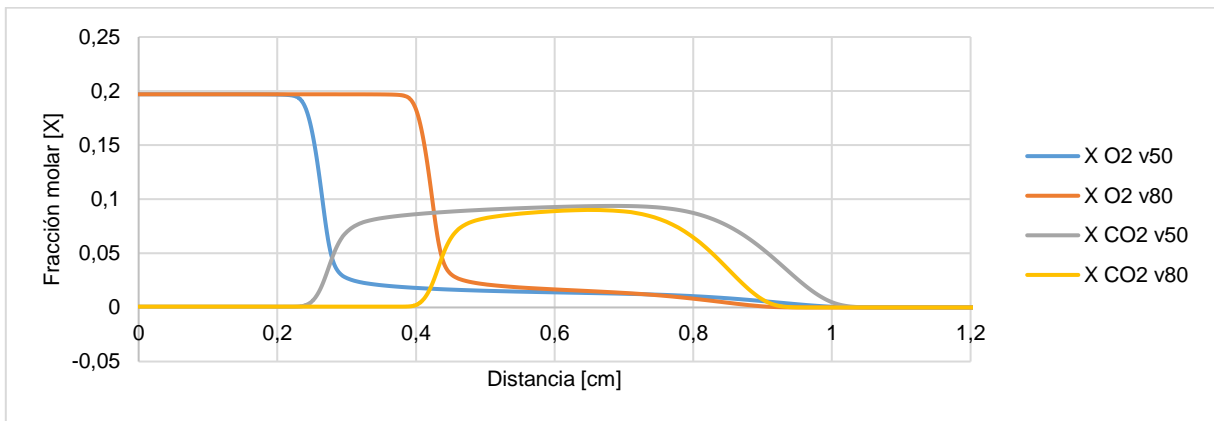


Figura 69. Comparación de la fracción molar [X] de O₂ y CO₂ en la reacción de combustión para GN Catatumbo a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

Estructura de llama para GN Cordillera Oriental

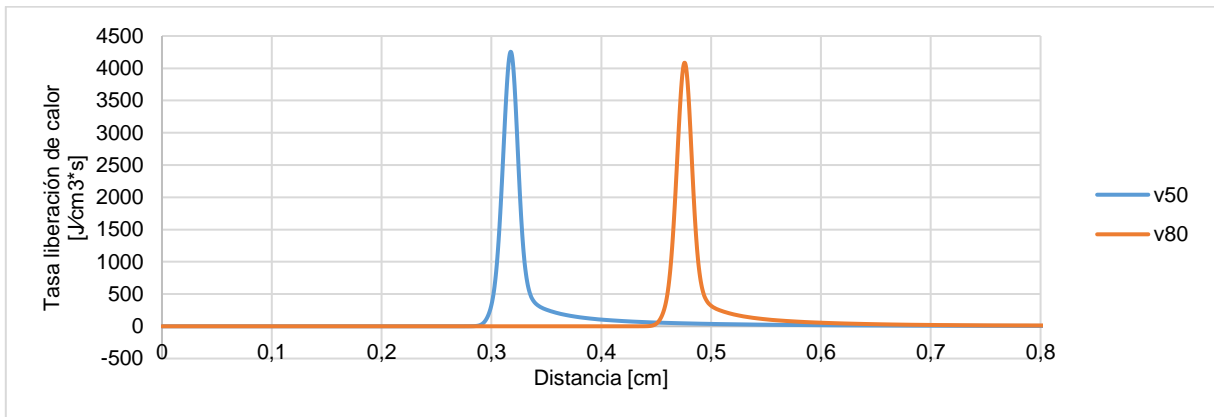


Figura 70. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en [J/cm³*s] a partir de reacciones en fase gaseosa para GN Cordillera Oriental a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

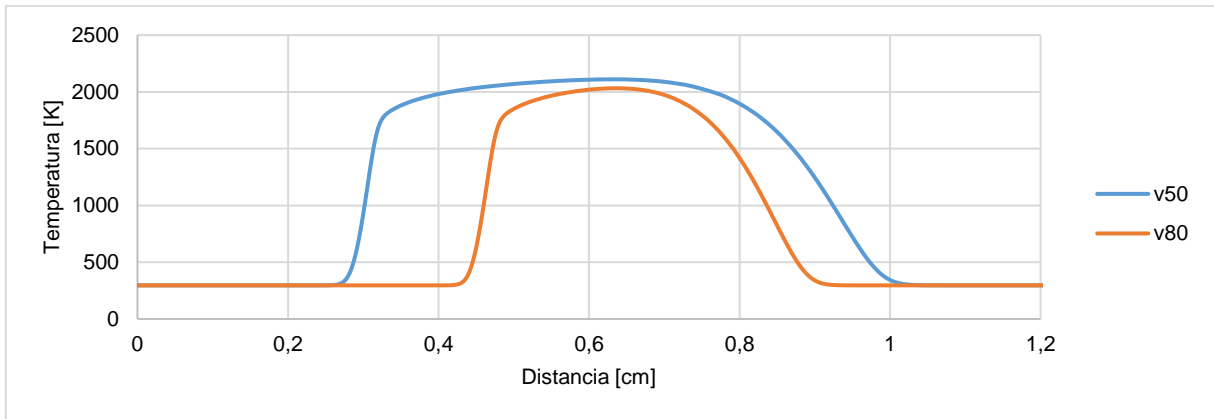


Figura 71. Comparación del perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para GN Cordillera Oriental a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

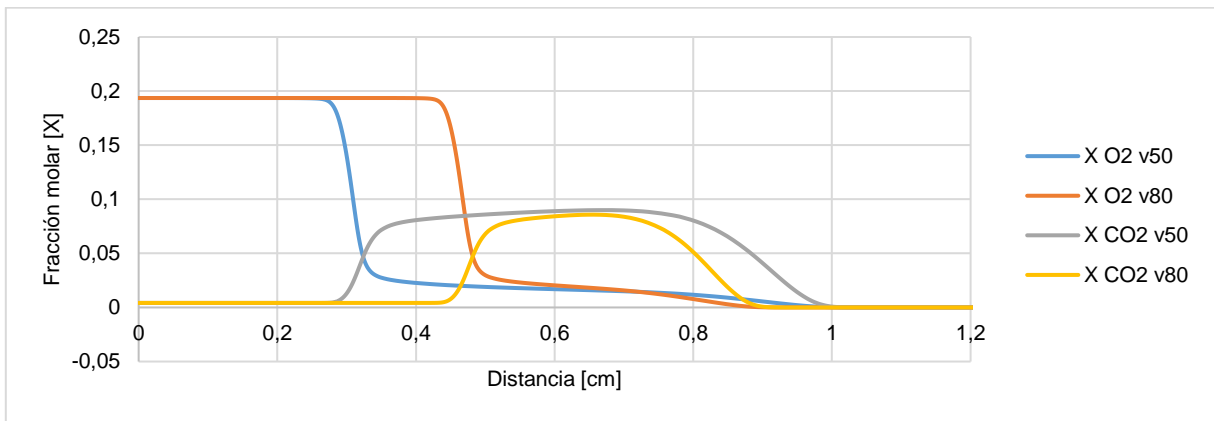


Figura 72. Comparación de la fracción molar [X] de O₂ y CO₂ en la reacción de combustión para GN Cordillera Oriental a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

Estructura de llama para GN La Guajira

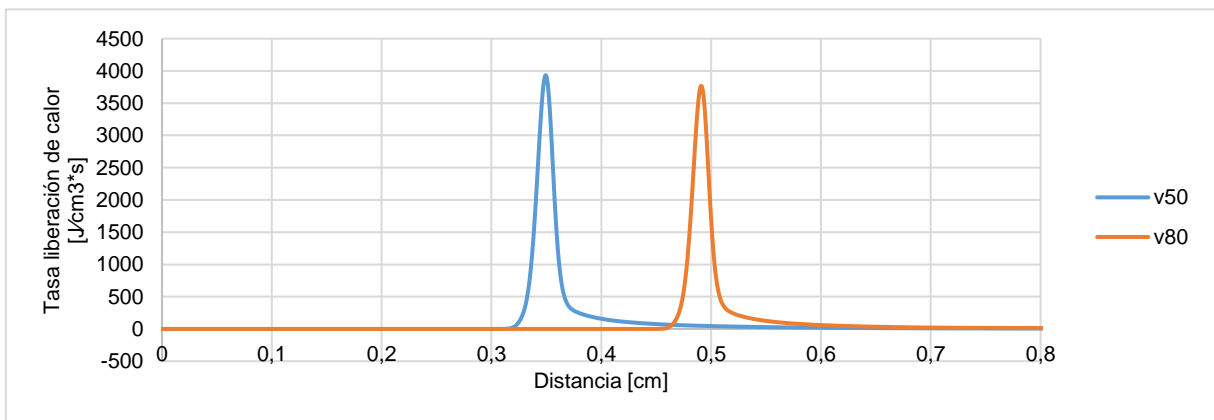


Figura 73. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en [J/cm³*s] a partir de reacciones en fase gaseosa para GN La Guajira a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

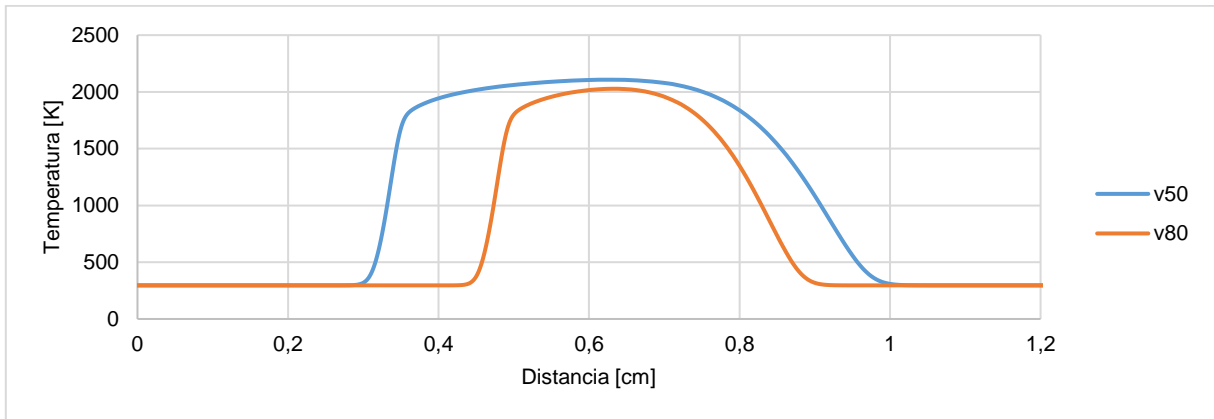


Figura 74. Comparación del perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para GN La Guajira a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

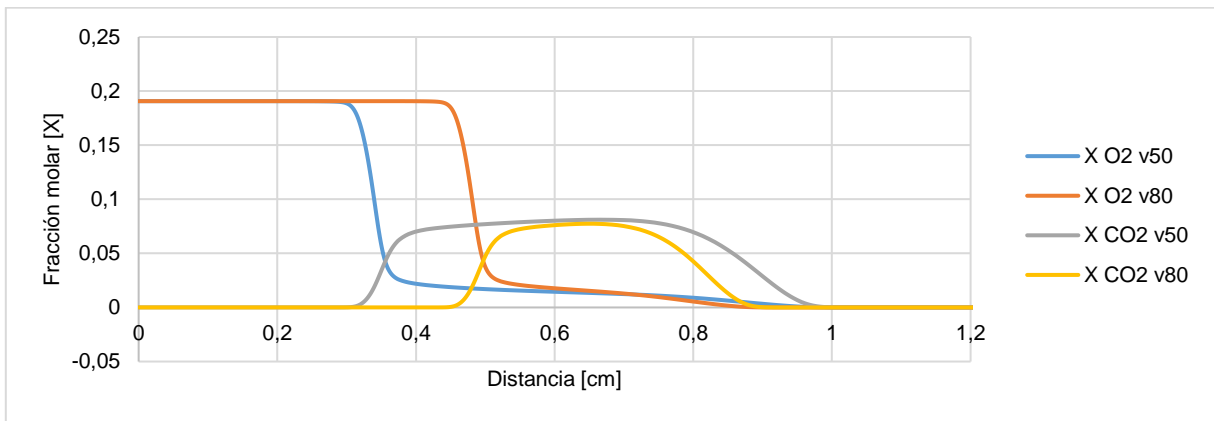


Figura 75. Comparación de la fracción molar [X] de O₂ y CO₂ en la reacción de combustión para GN La Guajira a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

Estructura de llama para GN Llanos Orientales

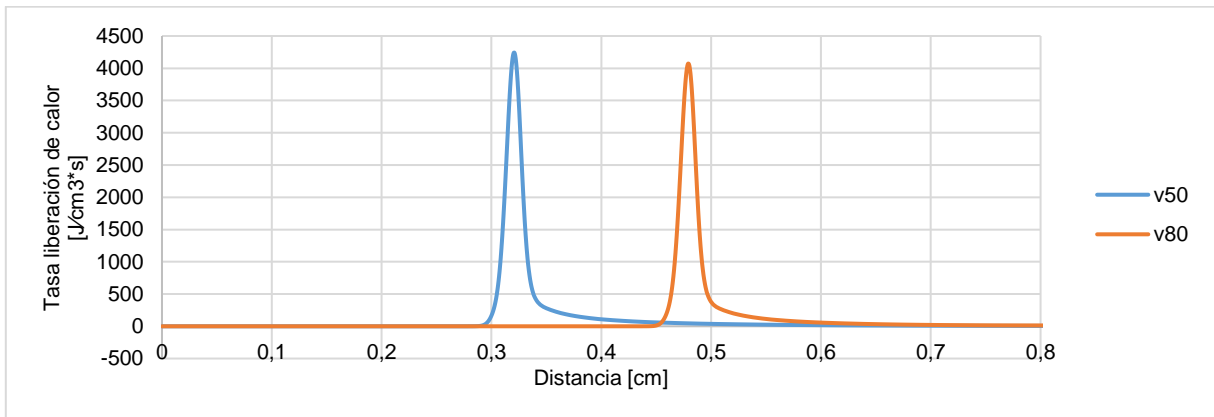


Figura 76. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en [J/cm³s] a partir de reacciones en fase gaseosa para GN Llanos Orientales a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

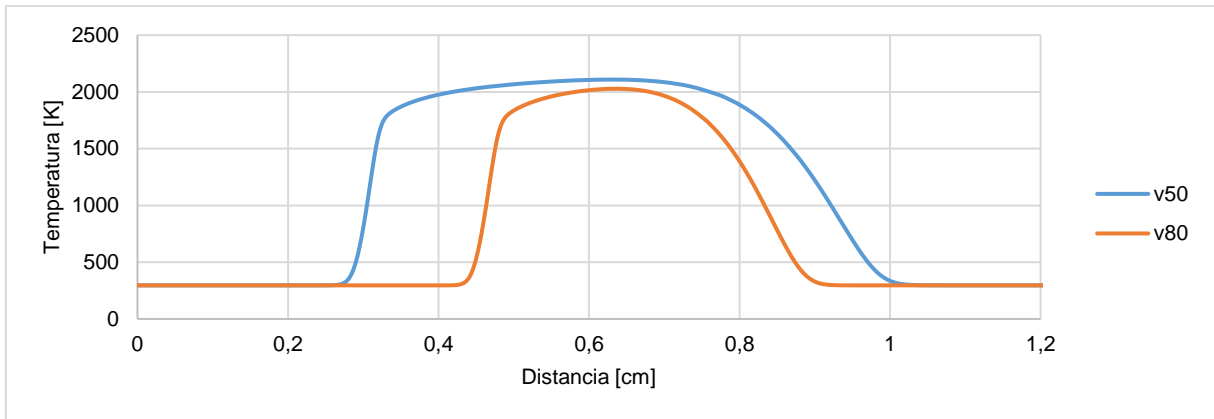


Figura 77. Comparación del perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para GN Llanos Orientales a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

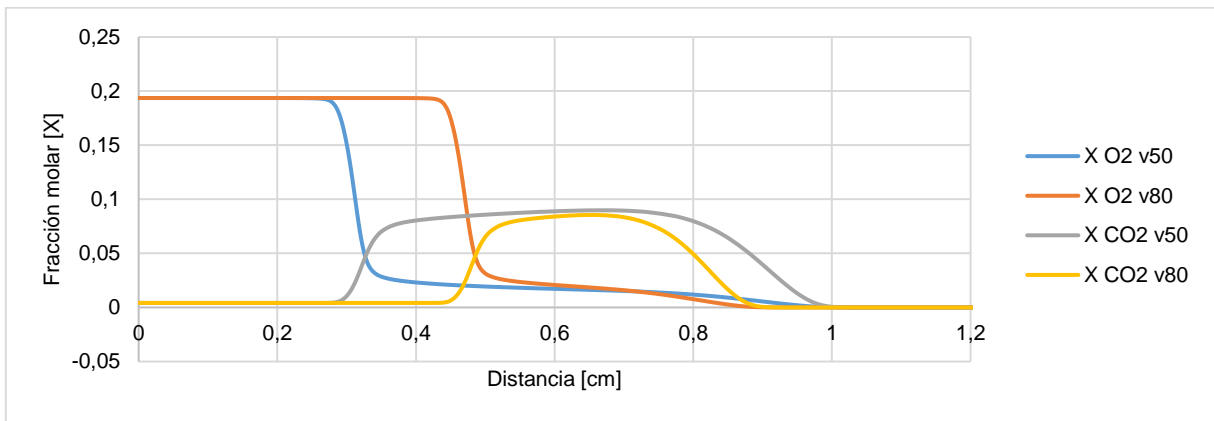


Figura 78. Comparación de la fracción molar [X] de O₂ y CO₂ en la reacción de combustión para GN Llanos Orientales a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

Estructura de llama para GN Valle Inferior del Magdalena (VIM)

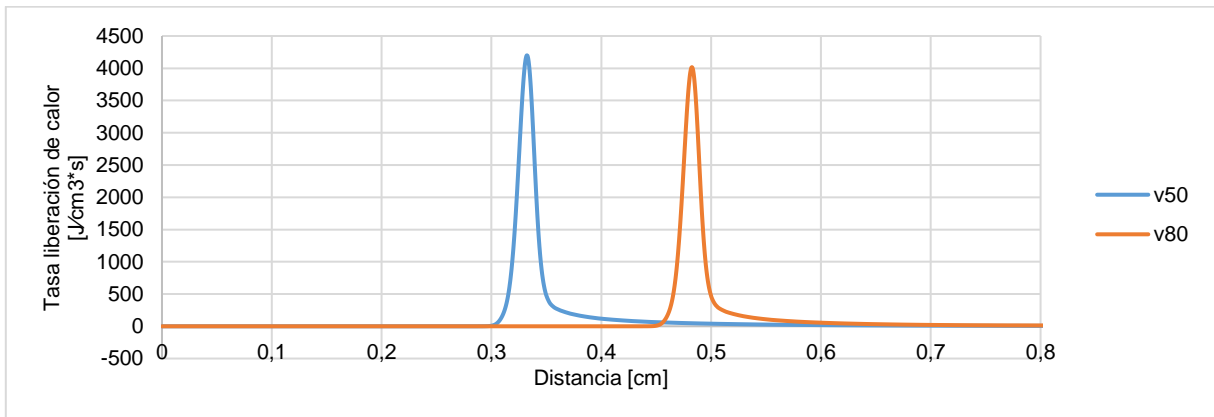


Figura 79. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en [J/cm³s] a partir de reacciones en fase gaseosa para GN VIM a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

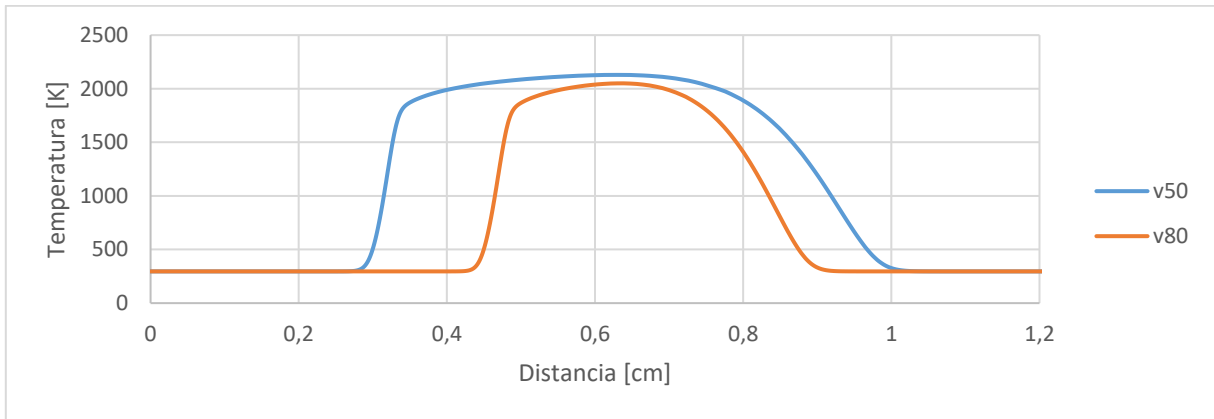


Figura 80. Comparación del perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para GN VIM a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

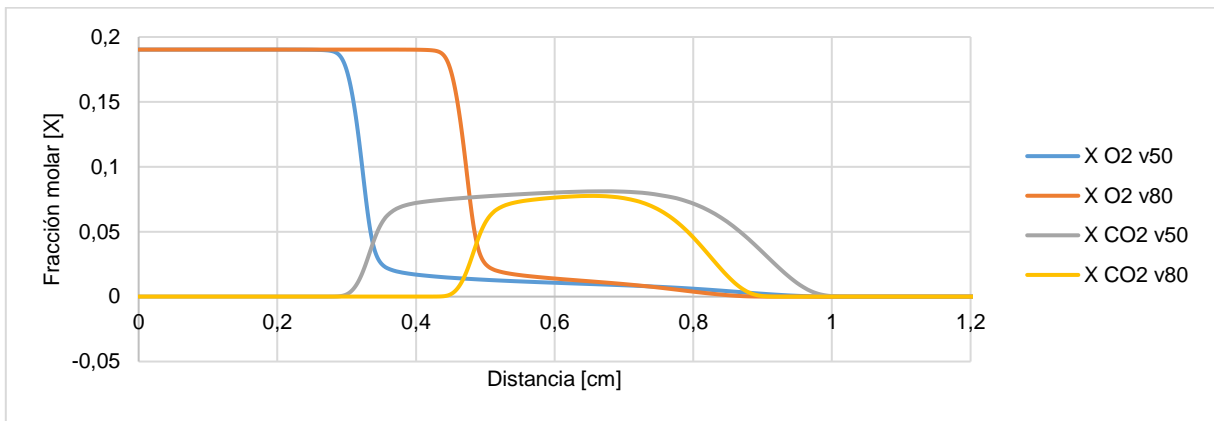


Figura 81. Comparación de la fracción molar [X] de O₂ y CO₂ en la reacción de combustión para GN VIM a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

Estructura de llama para GN Valle Medio del Magdalena (VMM)

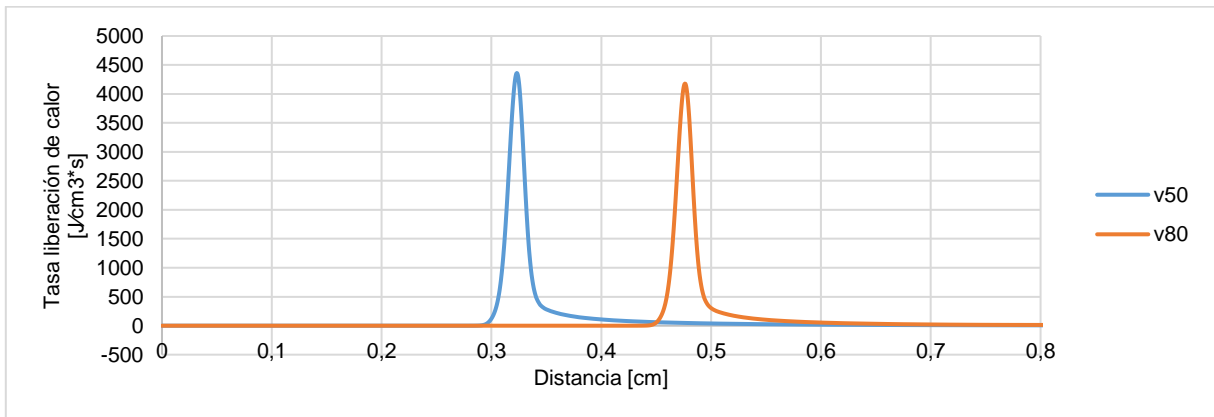


Figura 82. Comparación de la tasa de liberación neta de calor en [J/cm³*s] a partir de reacciones en fase gaseosa para GN VMM a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

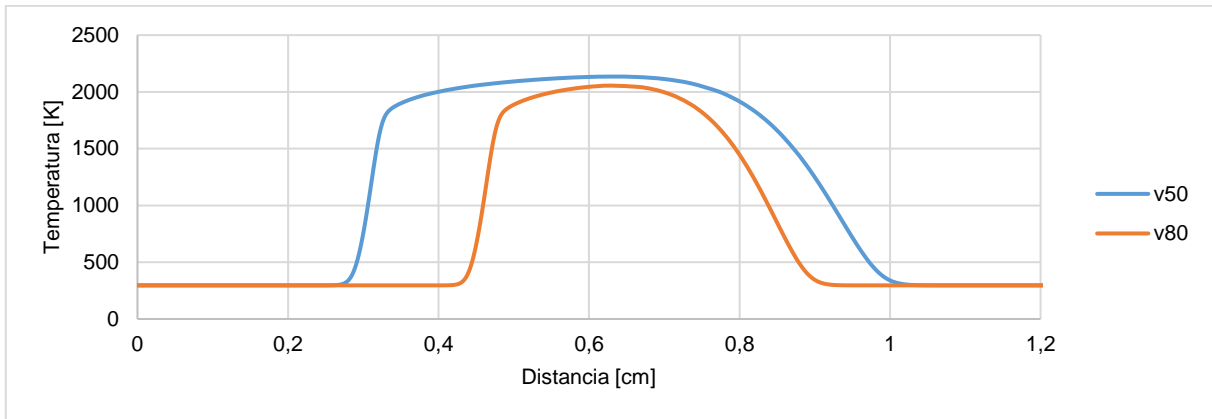


Figura 83. Comparación del perfil de temperatura [K] en la reacción de combustión para GN VMM a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

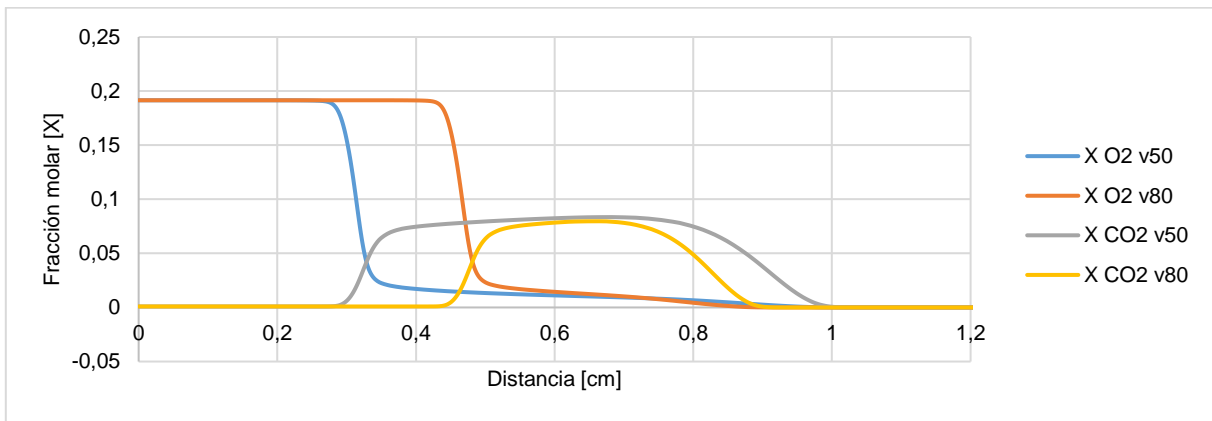


Figura 84. Comparación de la fracción molar [X] de O_2 y CO_2 en la reacción de combustión para GN VMM a diferentes velocidades de entrada: 50 y 80 cm/s

3.3.2. Límites de extinción

En este apartado se exponen los resultados de los límites de extinción y las regiones de intercambiabilidad de gases para cada gas combustible simulado.

En primer lugar, se presentan las zonas de intercambiabilidad de los gases combustibles de la siguiente manera: Cada gas tiene una curva *límite 1* al lado izquierdo de la gráfica que señala el punto de ignición del gas combustible, y una curva *límite 2* al lado derecho que indica la tasa de deformación por extinción de la llama. Ambas curvas *límite* se construyen a partir de las curvas de *temperatura [K]* versus *velocidad de deformación [1/s]* particulares de los gases, las cuales se presentan más adelante. Ahora, la zona intermedia entre ambas curvas *límite* o *frontera* simbolizan la zona de intercambiabilidad de cada gas, en otras palabras, la zona donde la combustión se lleva a cabo y la llama es estable.

A partir de estas zonas o regiones de intercambiabilidad, se puede determinar cuáles gases combustibles pueden ser intercambiados por otros bajo los parámetros de combustión especificados en las simulaciones realizadas, es decir:

- Temperatura ambiente: 298 K.
- Presión: 1 atm.
- Temperatura entrada para los gases combustibles: 296 K.
- Velocidad de entrada de la mezcla gases combustibles y comburente: 50 y 80 cm/s para cada caso.
- Velocidad de entrada del gas inerte: 50 y 80 cm/s para cada caso.

Se exponen las zonas de intercambiabilidad para el conjunto de todos los gases combustibles estudiados, luego para el conjunto de Gases Licuados de Petróleo, posteriormente para el conjunto de Gases Naturales y finalmente se comparan las zonas de intercambiabilidad para cada gas a diferentes velocidades de entrada. Adicionalmente, se presentan las curvas que predicen los puntos de ignición y extinción de llama para cada factor de aireación n modelado a las condiciones de simulación especificadas antes.

Si se fija la velocidad y se elige el valor de temperatura fijo en el lado del combustible, entonces una disminución de la temperatura fija da lugar a una disminución de la velocidad de deformación global. Mientras que, si se elige una temperatura fija del lado del oxidante, la temperatura fija da lugar a un aumento de la velocidad de deformación.

Límites de extinción para todos los gases combustibles estudiados

Los gráficos presentados en las Figuras 85 y 86 exhiben las zonas de intercambiabilidad de todos los gases combustibles para las velocidades 50 y 80 cm/s respectivamente.

En términos generales, se puede observar que la región estable de combustión es más amplia en los gases con alta presencia de metano y pocas trazas de hidrocarburos pesados, mientras que gases como los GLP y los GN Caguán-Putumayo y GN Catatumbo tienen una zona de intercambiabilidad más estrecha. Esto quiere decir que la estabilidad de llama para los gases con amplia zona de intercambiabilidad va a ser mayor en comparación. Este comportamiento es común en las dos distintas velocidades simuladas.

Es importante destacar que a la velocidad de 50 cm/s las reacciones involucradas en la combustión suceden a un rango mayor de tasas de aireación, quiere decir que a esta velocidad se da la combustión en mezclas con mayor presencia de aire y la estabilidad de llama se va a mantener. Mientras que la velocidad de 80 cm/s limita las reacciones a mezclas con cantidad de aire más cercano al estequiométrico.

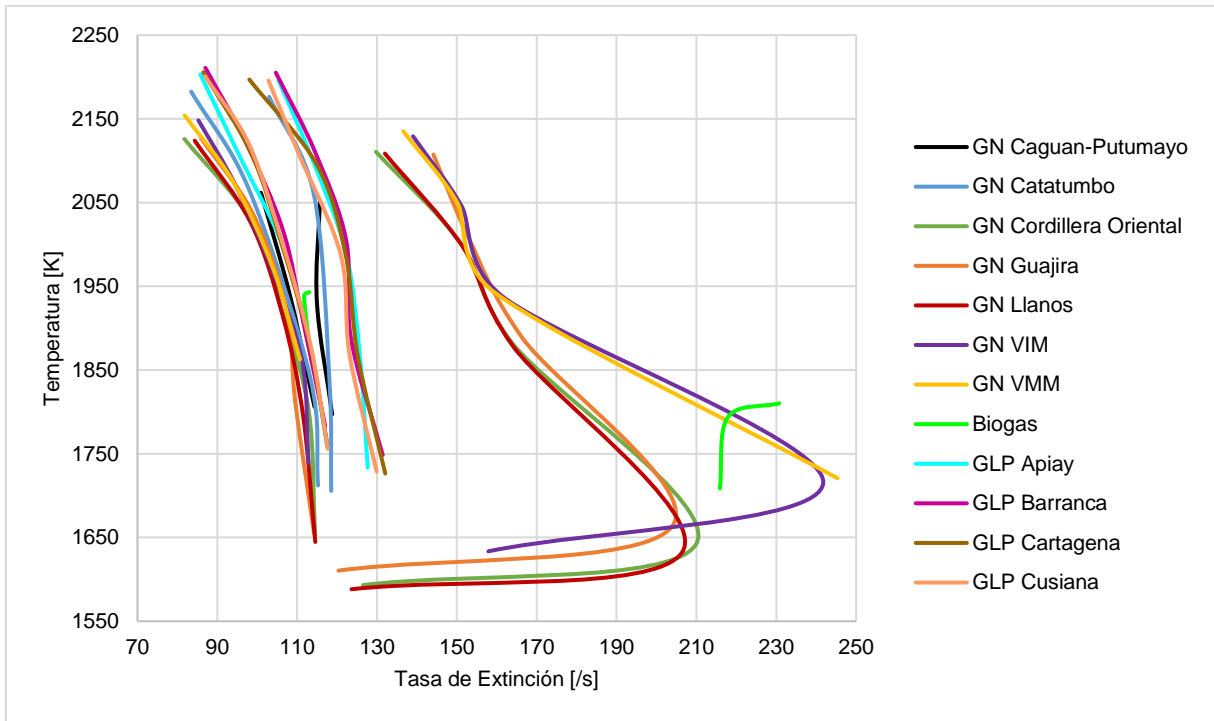


Figura 85. Zona de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción para todos los gases combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s

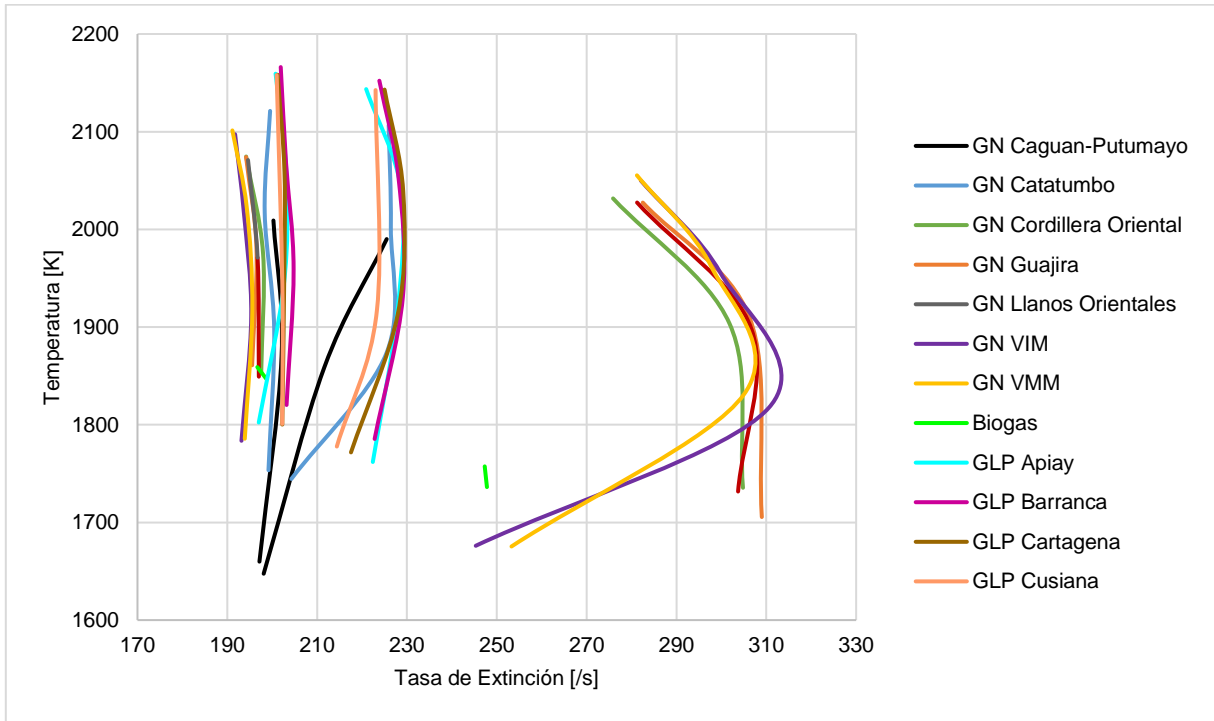


Figura 86. Zona de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción para todos los gases combustibles estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s

Límites de extinción para el conjunto de Gases Licuados de Petr6leo

Como se haba presentado en el apartado anterior, los GLP estudiados tienen un desarrollo de la combusti6n y una estructura de llama similar debido a la semejanza entre sus composiciones. De igual modo, los cuatro gases combustibles tienen puntos de ignici6n y l6mites de extincici6n de llama cercanos para los factores de aireaci6n $n=1.025 - 1.133 - 1.242 - 1.35$ y 1.458 a 50 cm/s y $n=1.025 - 1.133 - 1.242 - 1.35$ a 80 cm/s . A partir de las Figuras 87 y 88 se puede deducir que todos los GLP estudiados son intercambiables entre s6 y que los sistemas de combusti6n no se ver6n afectados.

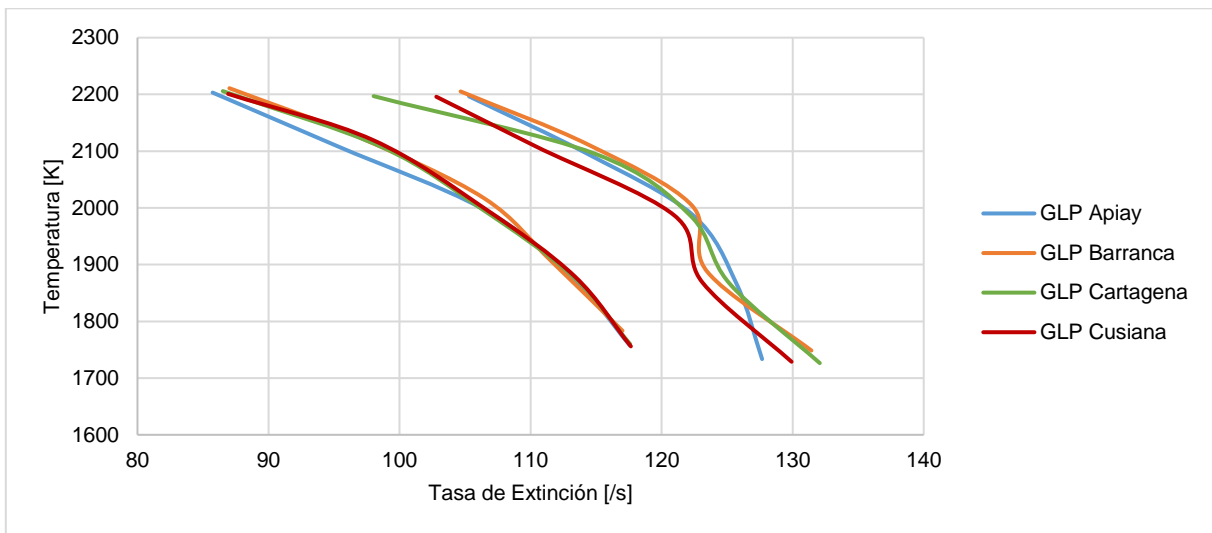


Figura 87. Zona de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s

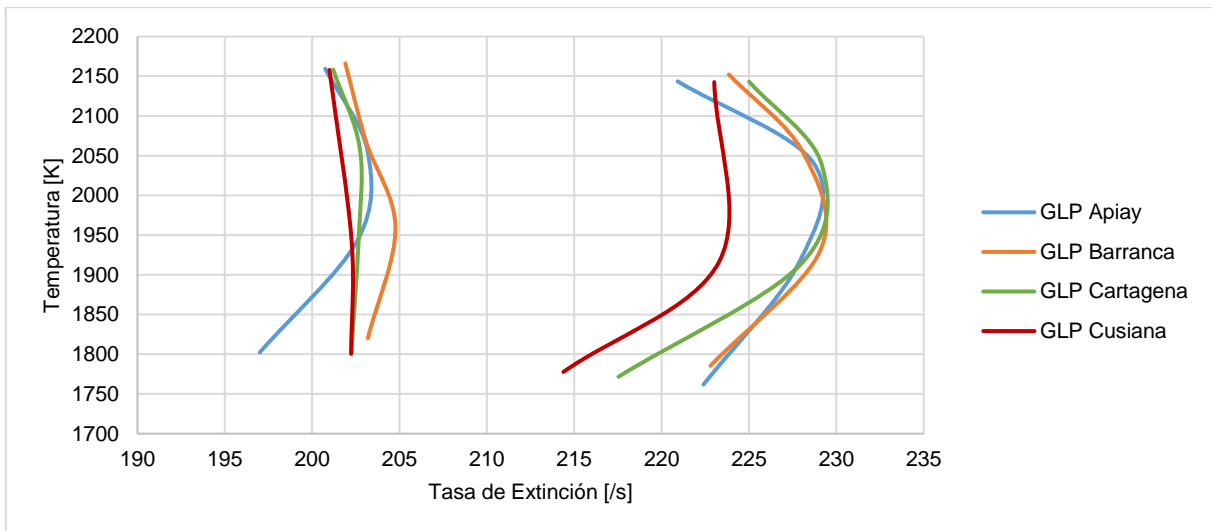


Figura 88. Zona de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción para el conjunto de GLP estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s

Límites de extinción para el conjunto de Gases Naturales

Las Figuras 89 y 90 presentan las zonas de intercambiabilidad para el conjunto de gases naturales simulados. Se evidencia la estrecha región de estabilidad para los gases con alto contenido de etano, butano y propano como el GN Caguán-Putumayo y el GN Catatumbo, mientras que los otros gases tienen una zona más amplia.

Se puede inferir que el GN Caguán-Putumayo puede ser intercambiado por el GN Catatumbo únicamente y viceversa; los gases: GN Cordillera Oriental, GN Guajira y GN Llanos Orientales se comportan de manera muy parecida y su región de intercambiabilidad es casi exacta y pueden ser intercambiados entre sí para una velocidad de 50 cm/s. Sin embargo, a una velocidad de 80 cm/s su región de intercambiabilidad es más amplia acercándose al rango de los GN Valle Inferior del Magdalena y Valle Medio del Magdalena. Estos últimos dos gases pueden ser intercambiados sin afectar la cinética de combustión a cualquiera de las dos velocidades propuestas y para todos los n simulados.

Es significativo el hecho de que el *límite 1* sea similar para todo el conjunto de GN a los diferentes factores de aireación y para las velocidades de 50 y 80 cm/s.

Las gráficas presentadas exponen de manera detallada dichas zonas de intercambiabilidad.

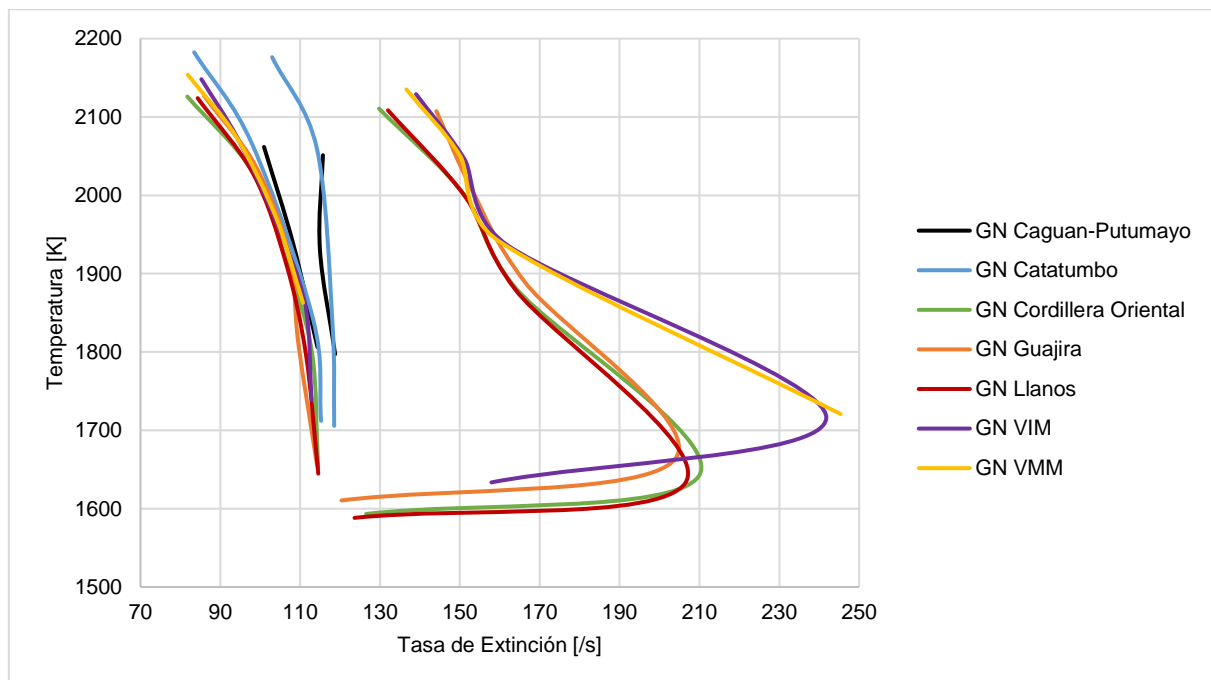


Figura 89. Zona de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 50 cm/s

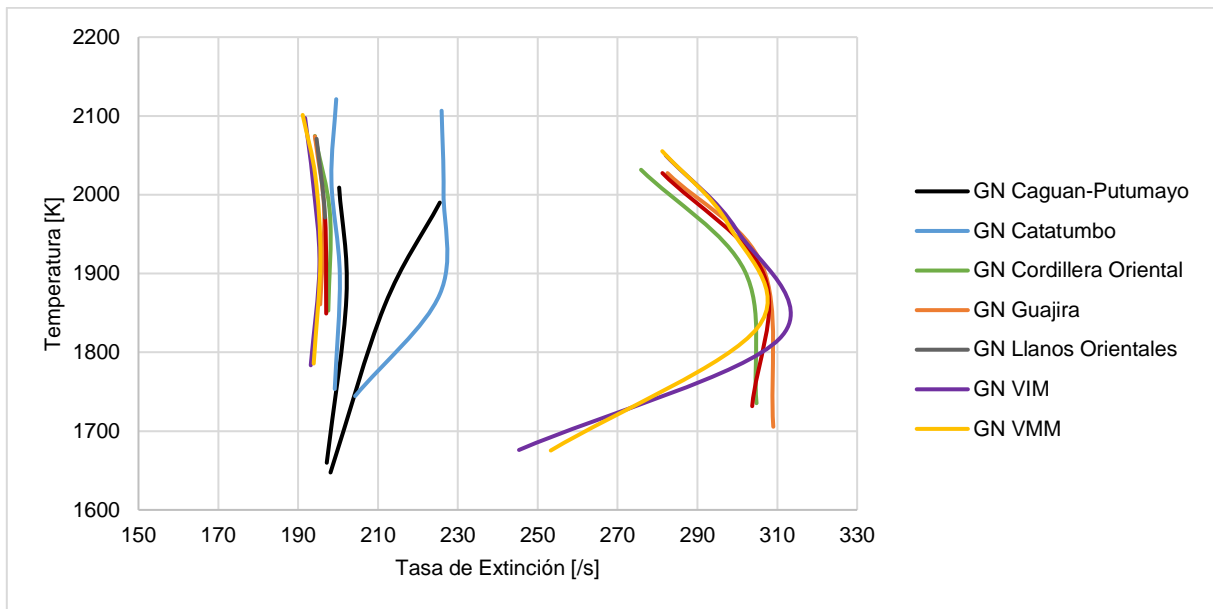


Figura 90. Zona de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción para el conjunto de GN estudiados a una velocidad de entrada de 80 cm/s

A continuación, se presentan tres gráficas por cada gas estudiado:

- i. Límites de extinción para cada gas combustible a una velocidad de entrada de 50 cm/s y diferentes factores de aireación.
- ii. Límites de extinción para cada gas combustible a una velocidad de entrada de 80 cm/s y diferentes factores de aireación.
- iii. Comparación de las zonas de intercambiabilidad de cada gas combustibles, para cada velocidad de entrada de reactivos propuesta.

Las gráficas tipo (i) y (ii) muestran las curvas resultantes de las simulaciones hechas para cada n , el inicio de cada curva representa el punto de ignición de la combustión y el final de la curva el punto de extinción. La mayor temperatura de llama se alcanza para factores de aireación cercanos o iguales al estequiométrico ($n=1$), de ahí en adelante la temperatura de la llama disminuye para mezclas más pobres. De la velocidad de entrada depende que la combustión suceda a mayor o menor presencia de comburente. Se puede identificar que a la velocidad de 50 cm/s la combustión puede ocurrir a un rango más amplio de tasas de aireación, mientras que para 80 cm/s la cantidad de comburente presente es menor y debe ser controlado.

Finalmente, las gráficas tipo (iii) comparan para un mismo gas combustible sus regiones de intercambiabilidad a 50 y 80cm/s. De manera general, a 50 cm/s la extinción de la llama sucede a tasas de extinción menores, pero para 80 cm/s dichas tasas de extinción aumenta y amplían la zona de intercambiabilidad.

Límites de extinción para el Biogás

El biogás (60% CH₄, 40% CO₂) es un combustible cuya llama presenta estabilidad únicamente para factores de aireación n igual o cercano al estequiométrico. La combustión con mezclas ricas o mezclas pobres no sucede. Además, es un gas que a altas velocidades va a presentar una rápida extinción debido al fenómeno de desprendimiento de llama. Es un gas que no podría satisfacer las características de un sistema de combustión configurado para los otros gases estudiados, sin embargo, los GN: Cordillera Oriental, Guajira, Llanos Orientales, Valle Inferior del Magdalena y Valle Superior del Magdalena si pueden sustituir el biogás.

Al comparar los resultados con la literatura, se confirma que a medida que la mezcla de gas-aire se enriquece, el valor para el gradiente crítico de desprendimiento aumenta. Además, el biogás tiene baja velocidad de deflagración debido al alto contenido de dióxido de carbono [29], por ende, la llama de esta combustión presenta alta inestabilidad por desprendimiento.

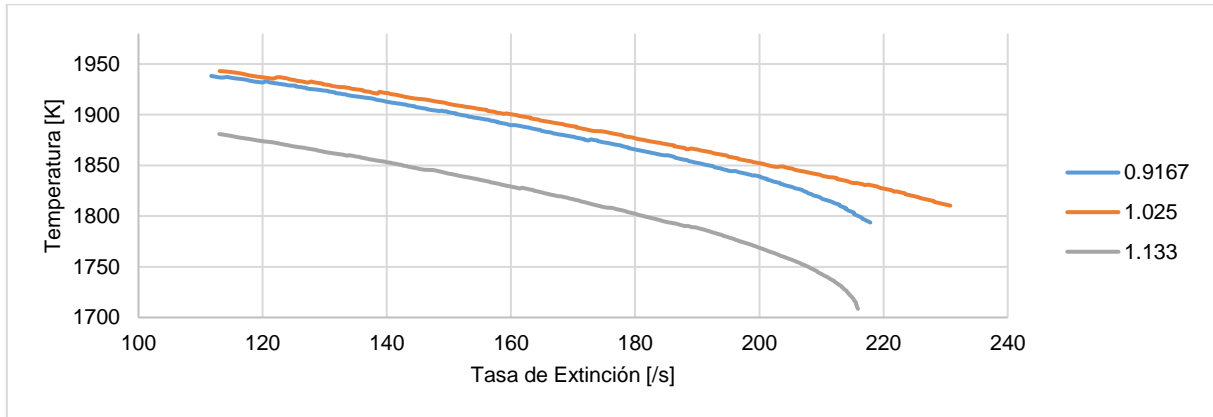


Figura 91. Límites de extinción del Biogás para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s

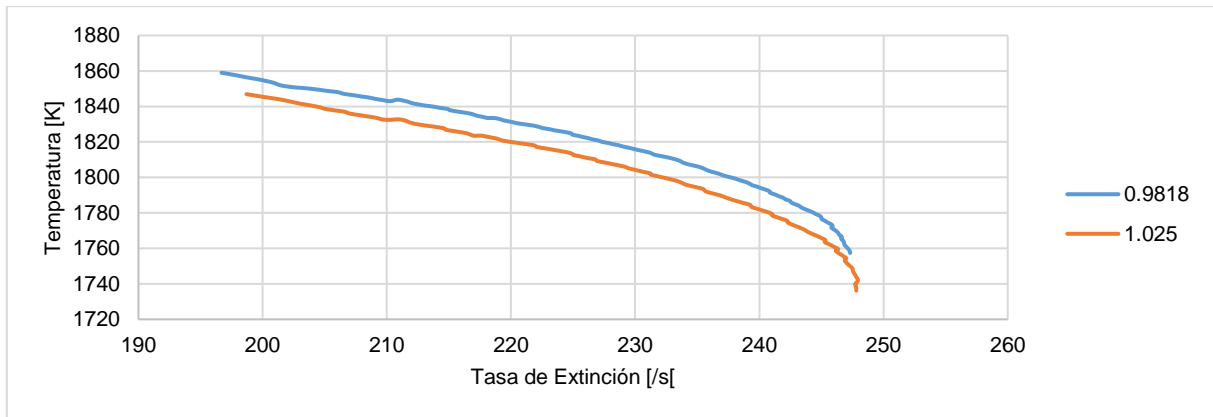


Figura 92. Límites de extinción del Biogás para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s

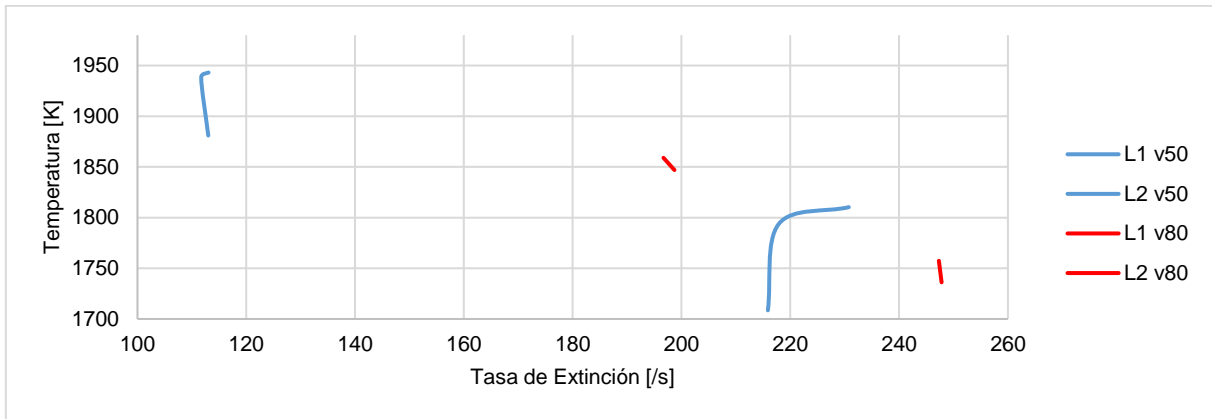


Figura 93. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del Biogás a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s

Los resultados para cada gas licuado de petróleo son presentados a continuación, se observa de manera general que los límites de extinción por retrollama y desprendimiento para 50 cm/s se encuentran entre 85 y 130 /s respectivamente, mientras que para una velocidad de 80 cm/s dichos límites aumentan alrededor de 190 y 230 /s.

La mayor temperatura de llama se alcanza para mezclas cercanas a la estequiométrica, a medida que la mezcla se empobrece la temperatura de llama disminuye. Se evidencia también que como consecuencia de la composición de los gases (mezcla de propano y butano), la zona de estabilidad de combustión y llama es reducida a velocidades menores, adicionalmente, a medida que aumenta la tasa de aireación en la mezcla, dicho rango de estabilidad se desplaza hacia la derecha, aumentando ambos límites: ignición y extinción de llama.

Límites de extinción para GLP Apiay

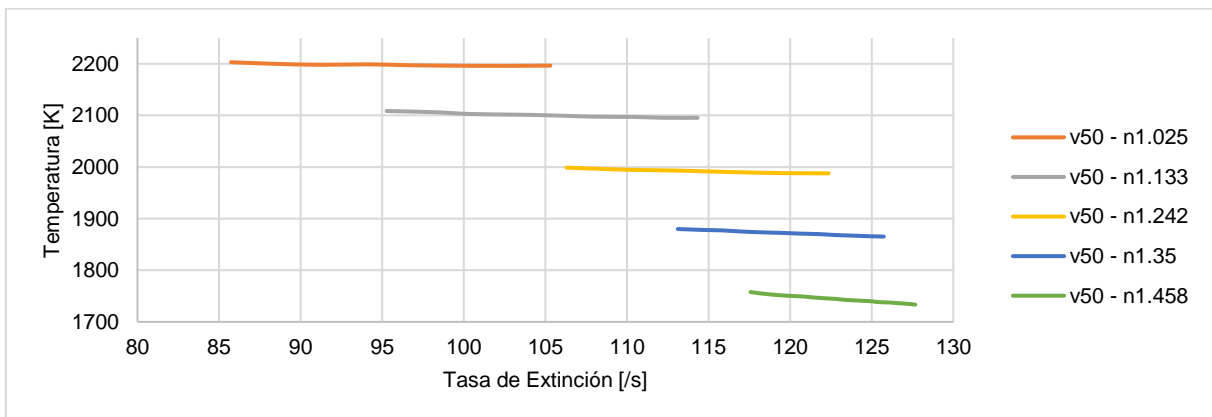


Figura 94. Límites de extinción del GLP Apiay para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s

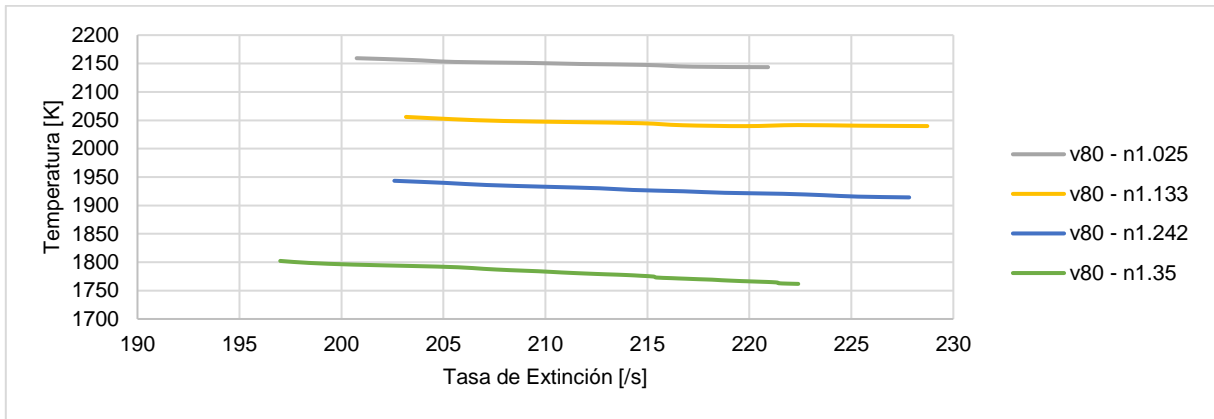


Figura 95. Límites de extinción del GLP Apiay para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s

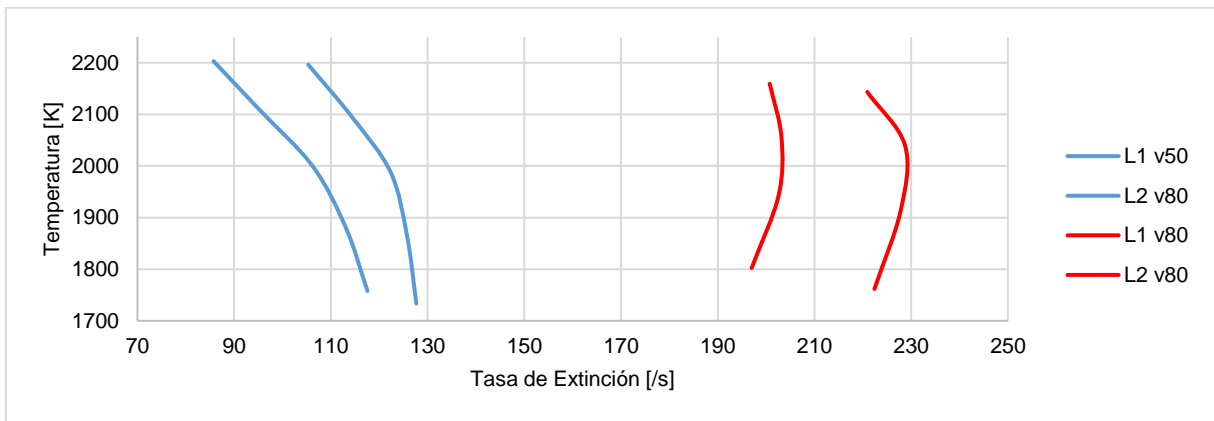


Figura 96. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GLP Apiay a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s

Límites de extinción para GLP Barrancabermeja

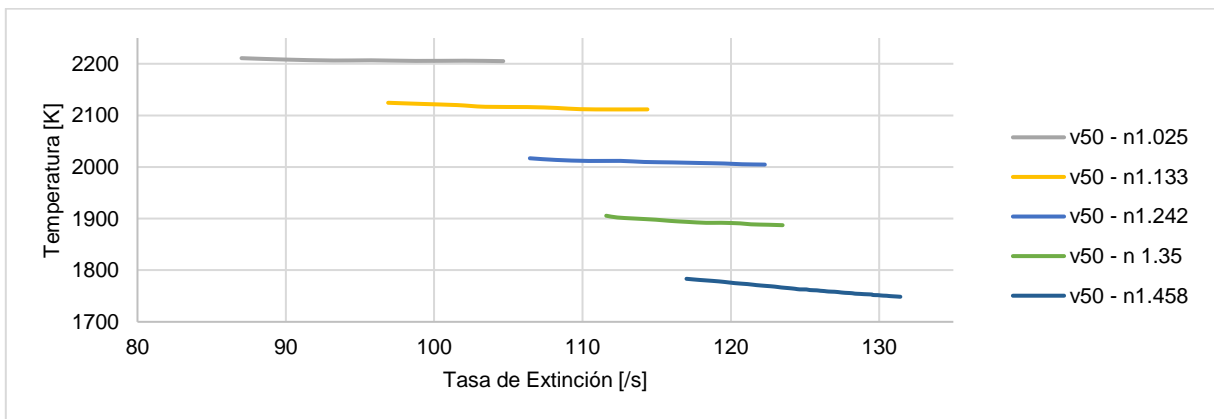


Figura 97. Límites de extinción del GLP Barranca para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s

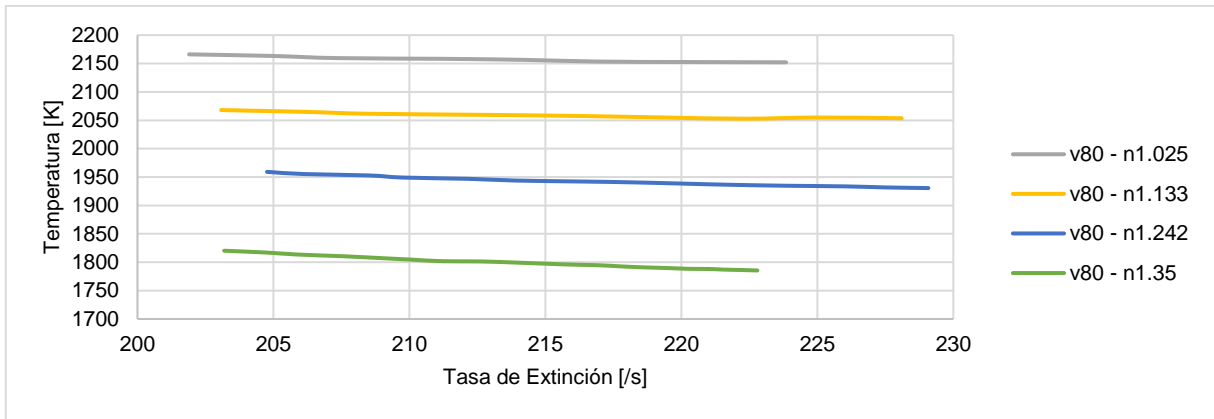


Figura 98. Límites de extinción del GLP Barranca para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s

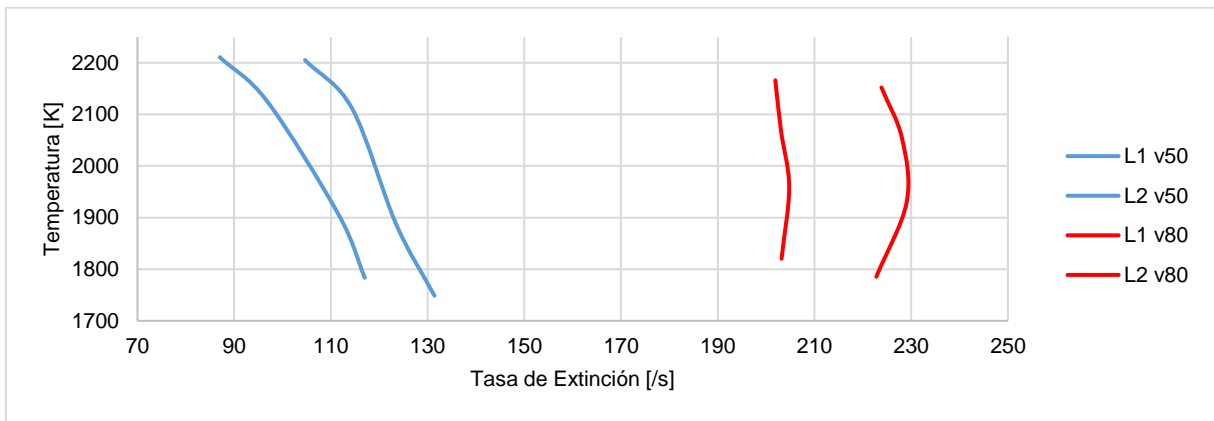


Figura 99. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GLP Barranca a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s

Límites de extinción para GLP Cartagena

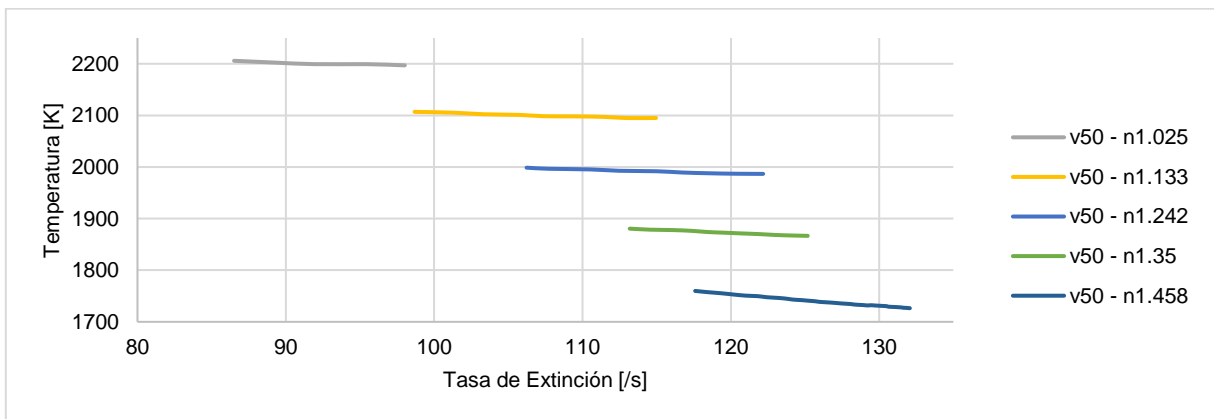


Figura 100. Límites de extinción del GLP Cartagena para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s

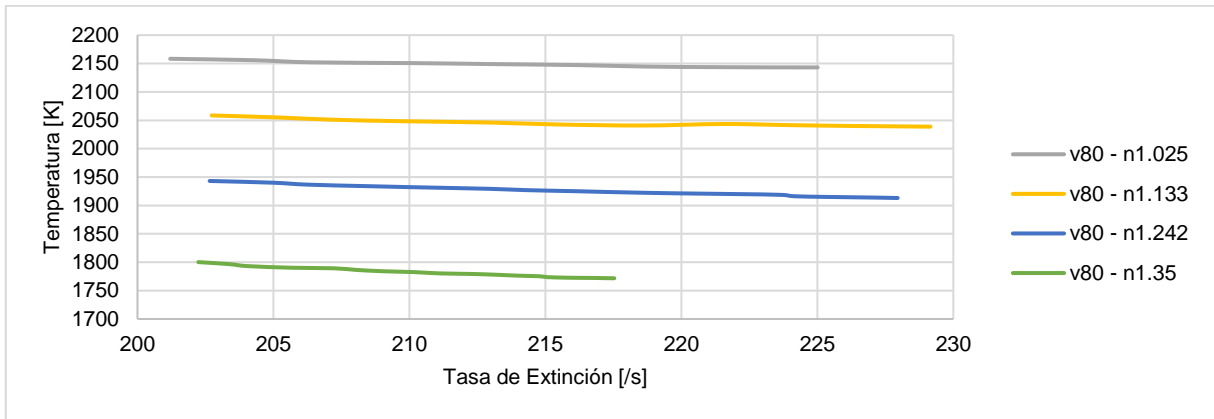


Figura 101. Límites de extinción del GLP Cartagena para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s

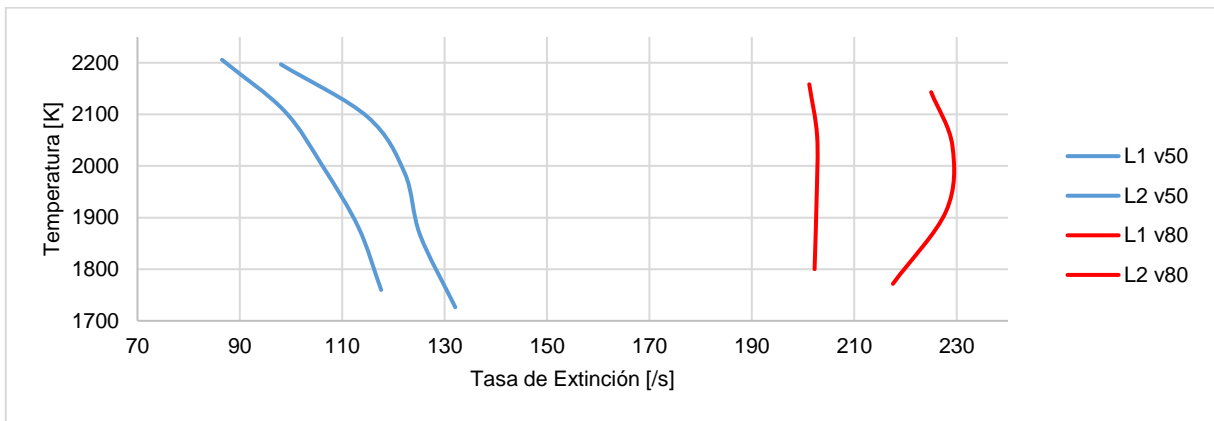


Figura 102. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GLP Cartagena a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s

Límites de extinción para GLP Cusiana

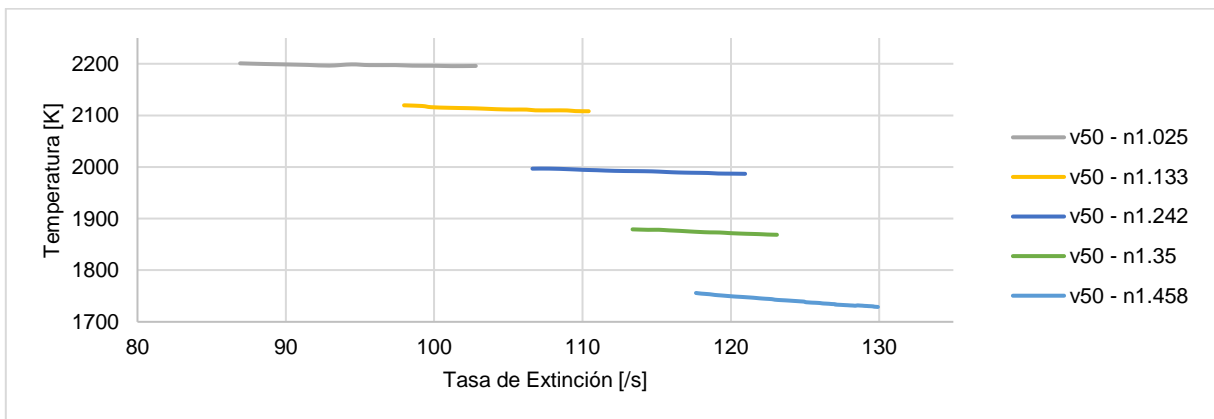


Figura 103. Límites de extinción del GLP Cusiana para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s

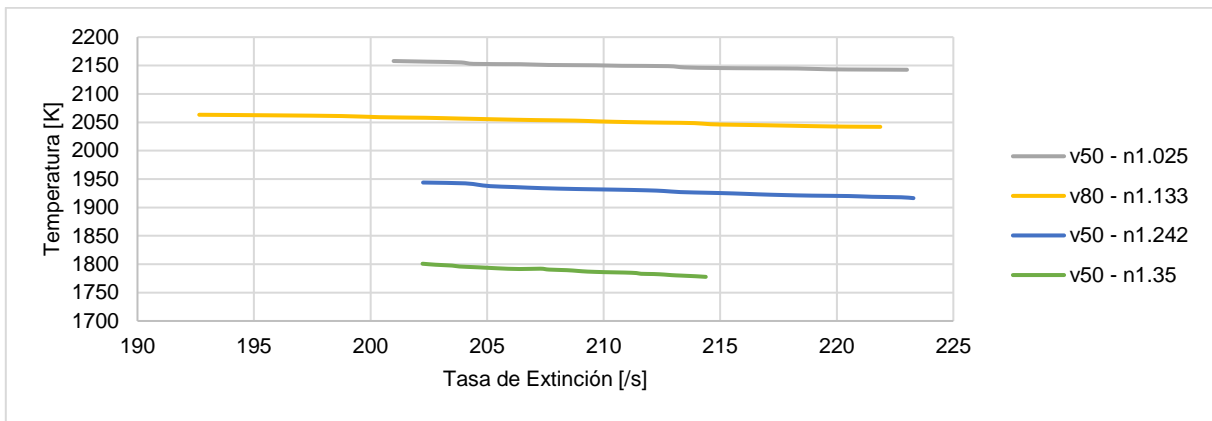


Figura 104. Límites de extinción del GLP Cusiana para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s

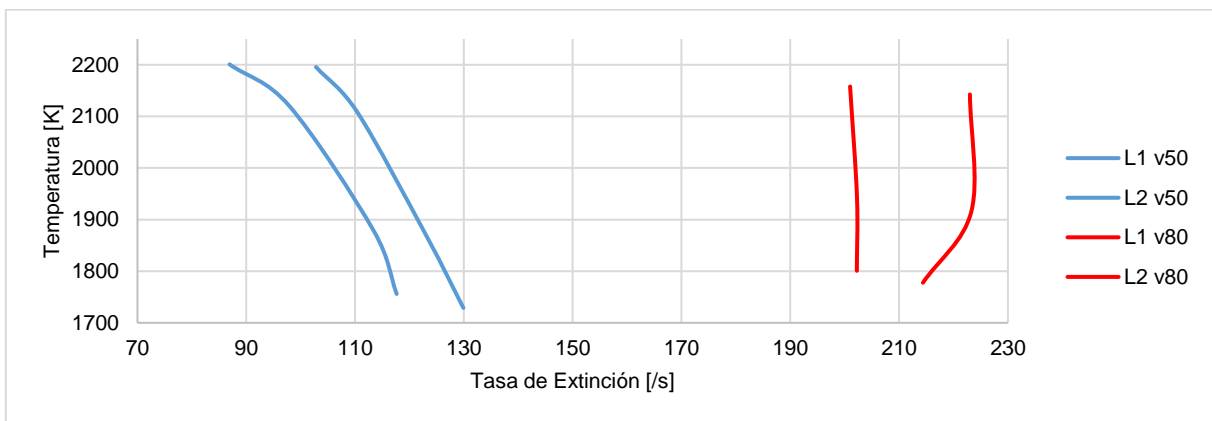


Figura 105. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GLP Cusiana a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s

Se presentan finalmente las figuras con los resultados de los límites de extinción para los gases naturales. Se identifican dos situaciones a partir de estas gráficas: los gases con trazas significativas de propano y butano (GN Caguán-Putumayo y GN Catatumbo) son más sensibles a presentar inestabilidad de llama a causa del desprendimiento y además, sus zonas de intercambiabilidad son restringidas acotando la posibilidad de ser gases intercambiables.

El segundo grupo de gases naturales con alto contenido de metano GN Cordillera Oriental, GN Guajira, GN Llanos Orientales, GN VIM y GN VMM), se caracterizan por presentar mayor estabilidad de llama y rangos más amplios para la intercambiabilidad. Son gases que tienen un comportamiento similar al metano puro. Sin embargo, las pequeñas cantidades de hidrocarburos pesados influyen notoriamente en la disminución de los rangos de estabilidad para mezclas con factores de aireación cercanos al estequiométrico.

Límites de extinción para GN Caguán-Putumayo

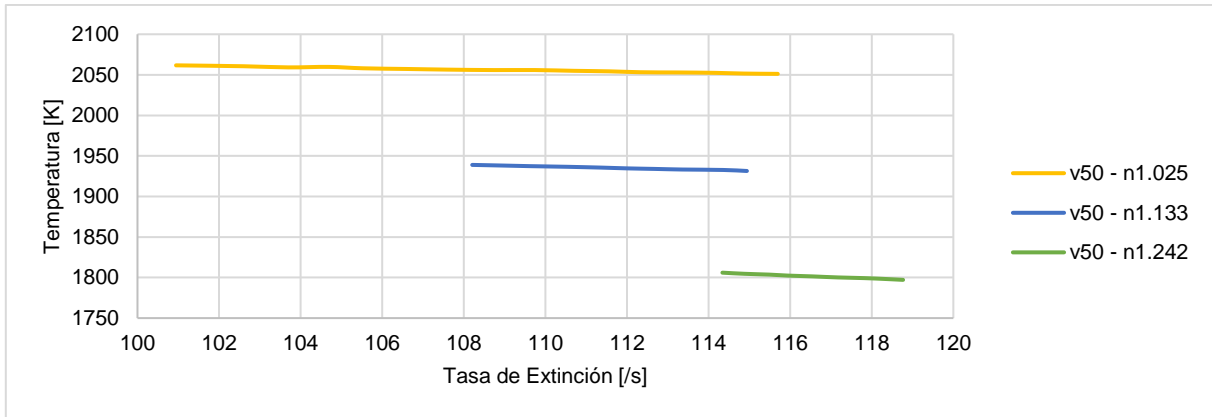


Figura 106. Límites de extinción del GN Caguán-Putumayo para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s

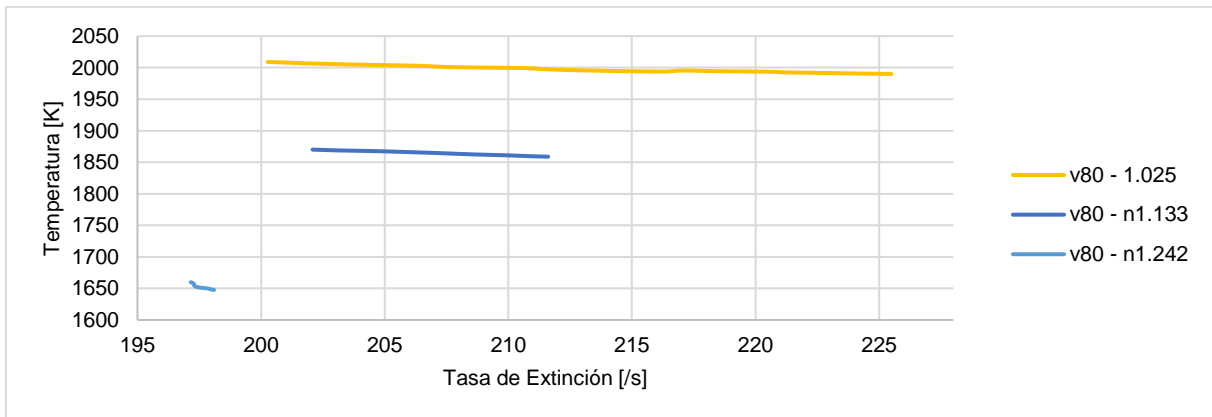


Figura 107. Límites de extinción del GN Caguán-Putumayo para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s

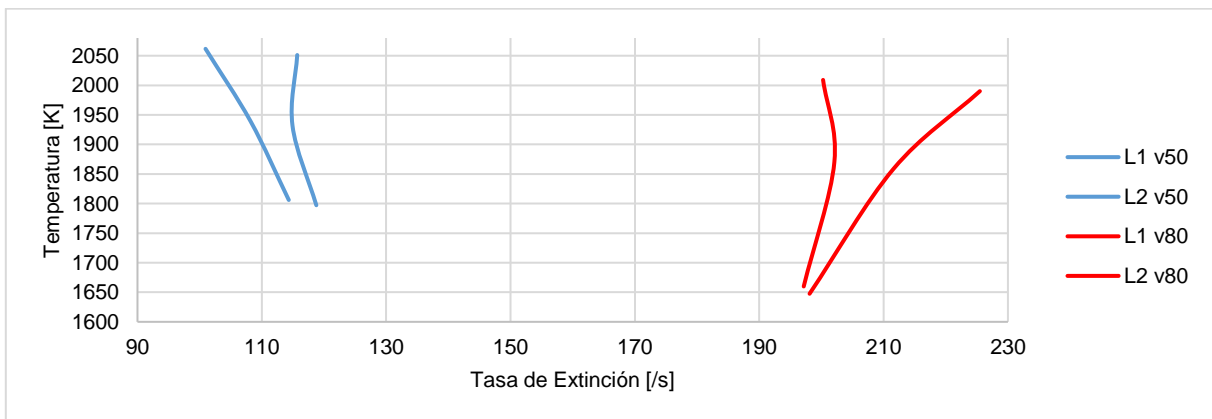


Figura 108. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GN Caguán-Putumayo a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s

Límites de extinción para GN Catatumbo

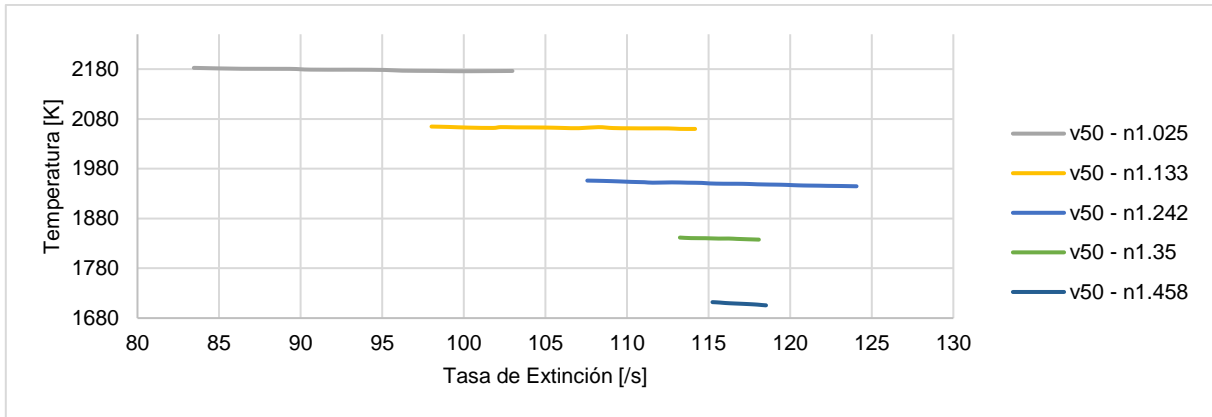


Figura 109. Límites de extinción del GN Catatumbo para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s

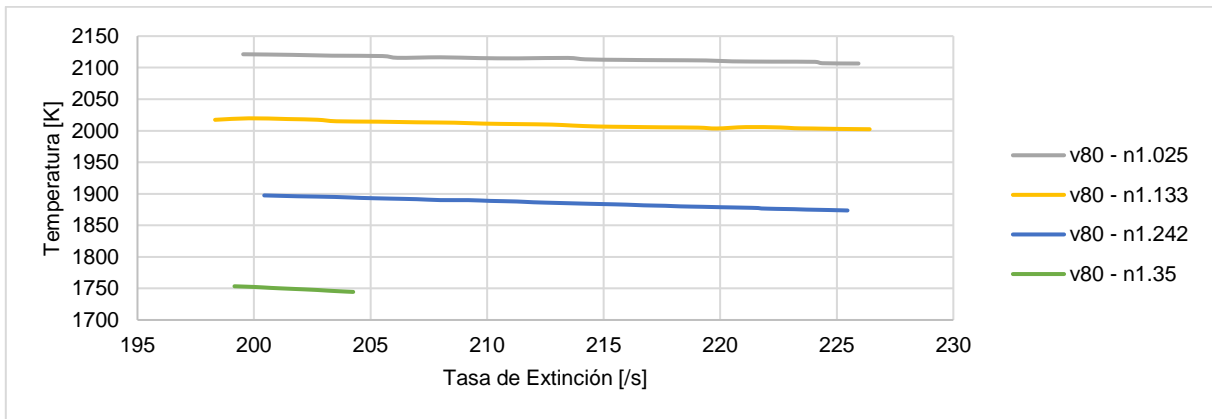


Figura 110. Límites de extinción del GN Catatumbo para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s

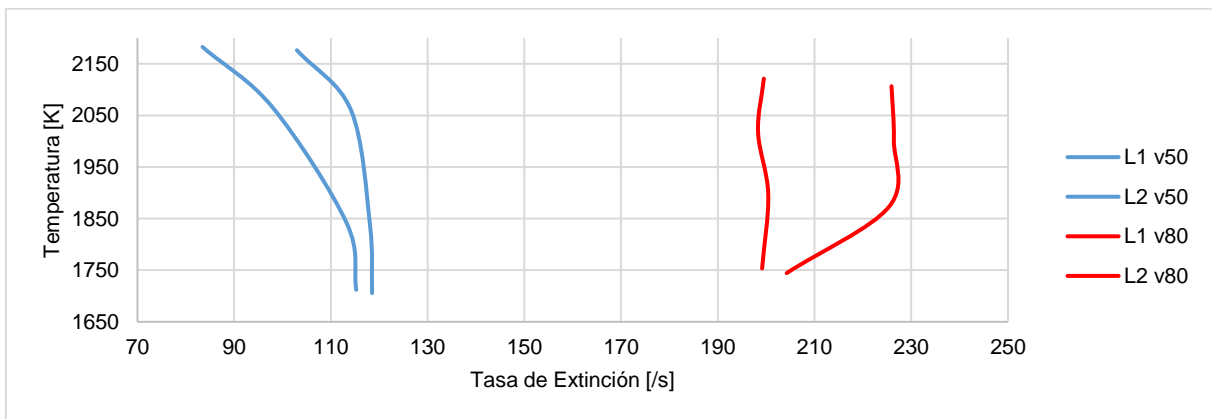


Figura 111. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GN Catatumbo a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s

Límites de extinción para GN Cordillera Oriental

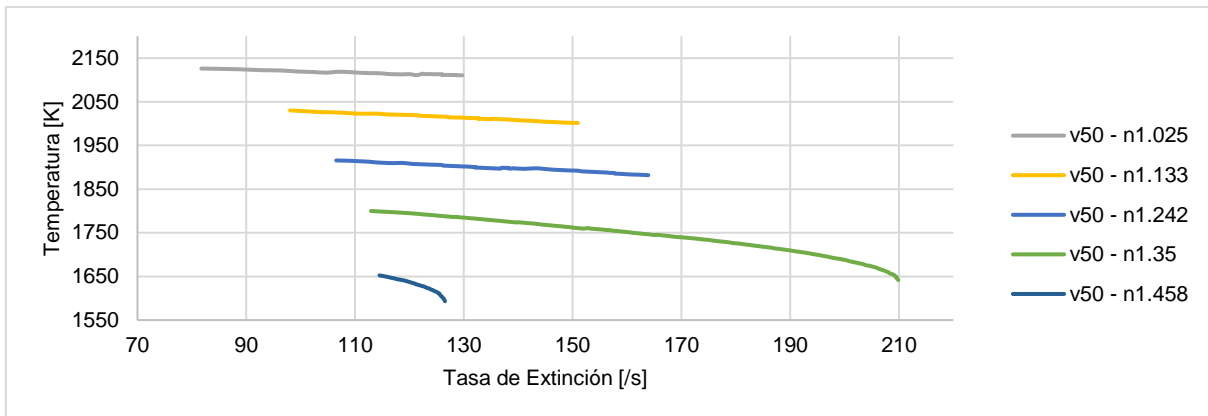


Figura 112. Límites de extinción del GN Cordillera Oriental para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s

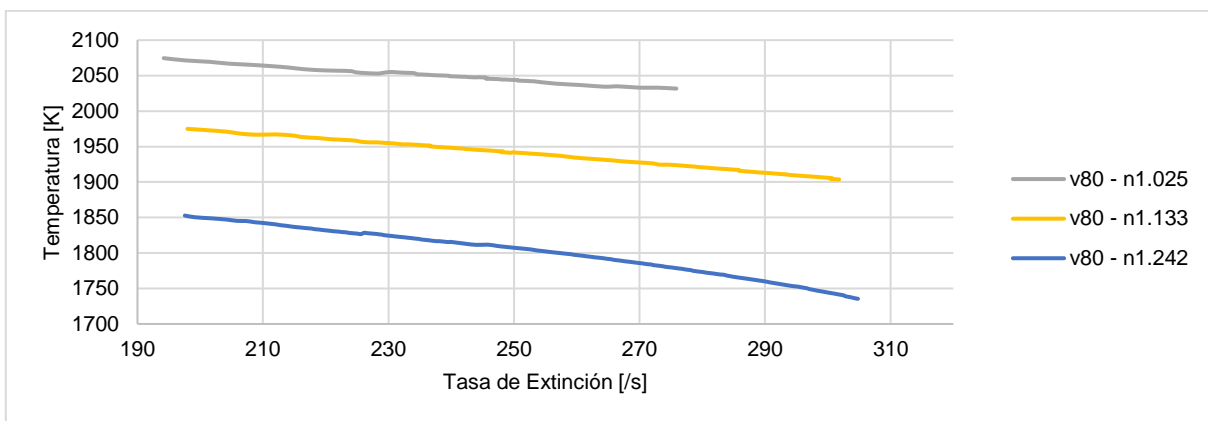


Figura 113. Límites de extinción del GN Cordillera Oriental para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s

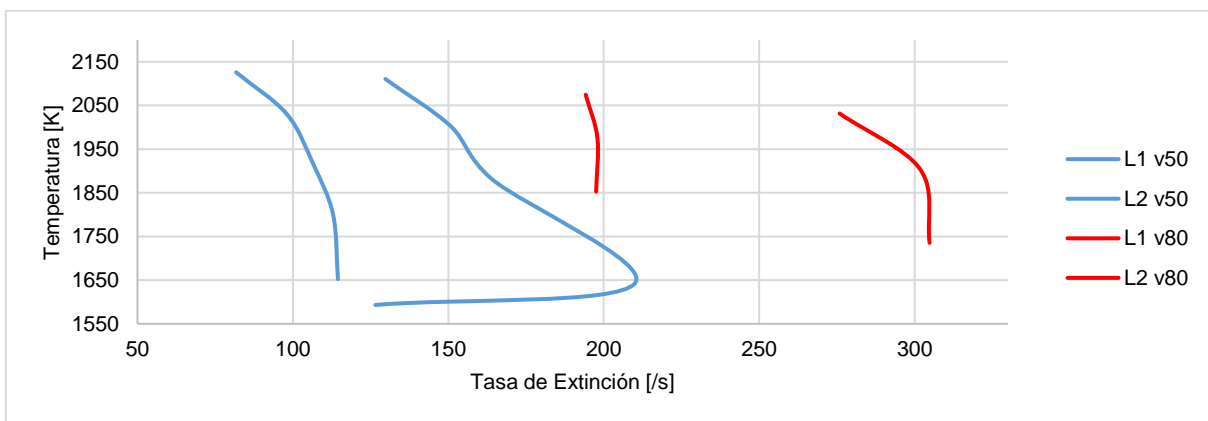


Figura 114. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GN Cordillera Oriental a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s

Límites de extinción para GN La Guajira

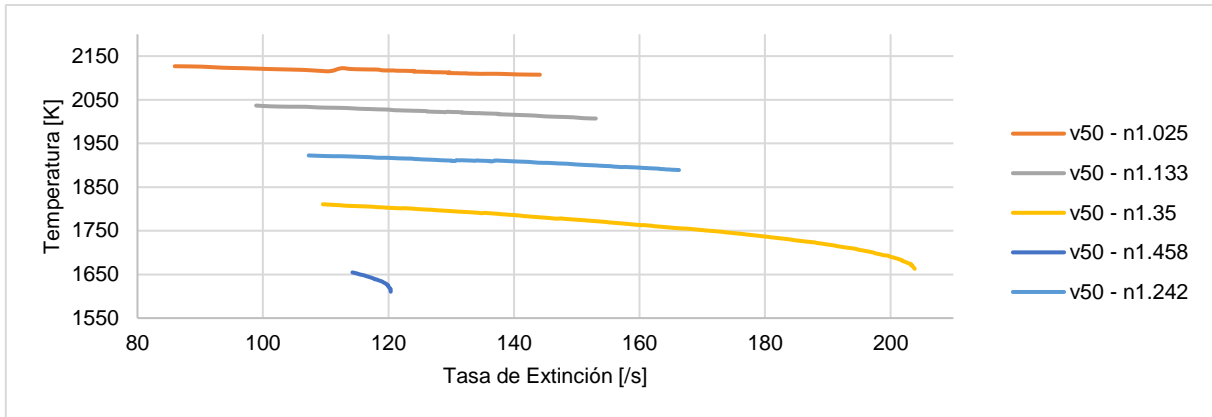


Figura 115. Límites de extinción del GN La Guajira para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s

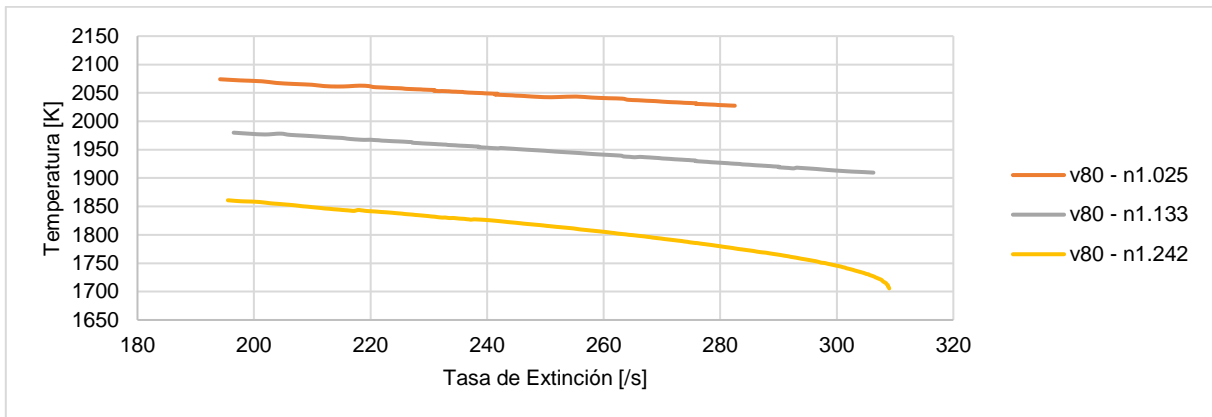


Figura 116. Límites de extinción del GN La Guajira para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s



Figura 117. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GN La Guajira a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s

Límites de extinción para GN Llanos Orientales

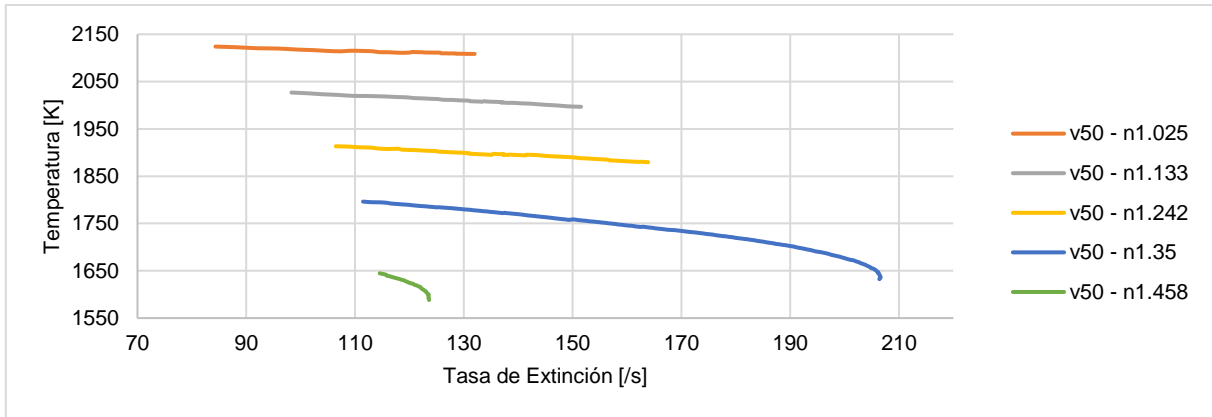


Figura 118. Límites de extinción del GN Llanos Orientales para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s

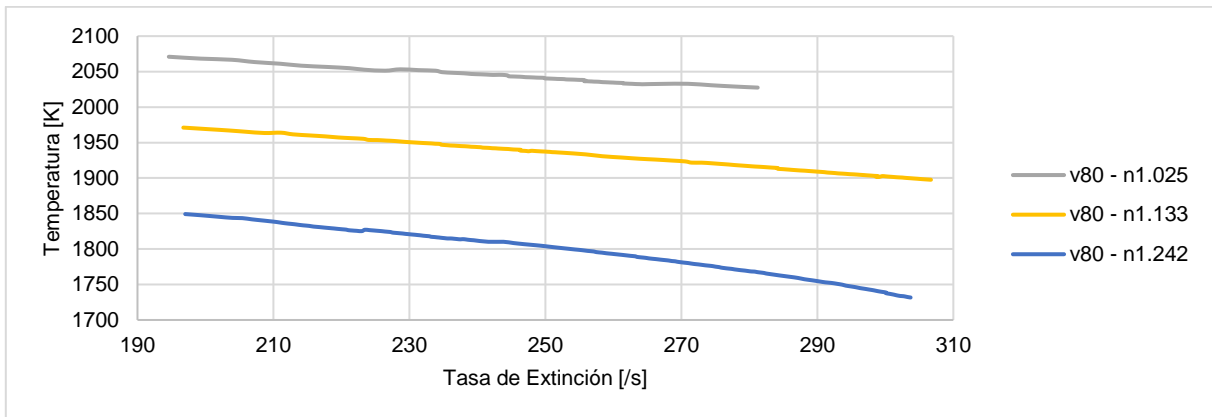


Figura 119. Límites de extinción del GN Llanos Orientales para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s

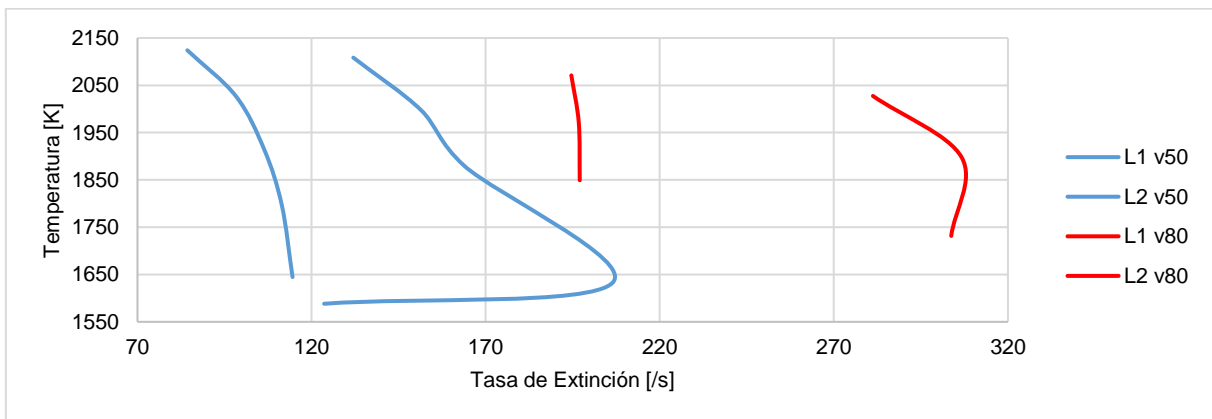


Figura 120. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GN Llanos Orientales a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s

Límites de extinción para GN Valle Inferior del Magdalena (VIM)

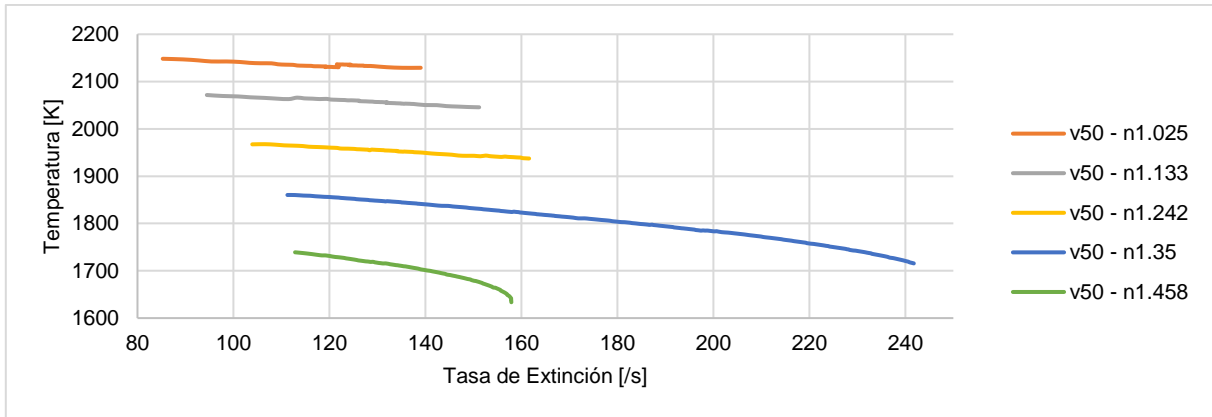


Figura 121. Límites de extinción del GN VIM para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s

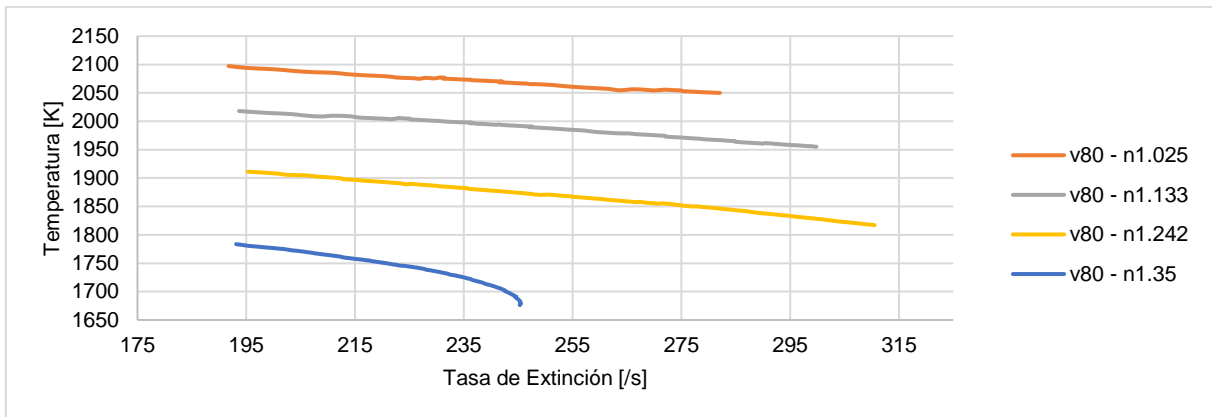


Figura 122. Límites de extinción del GN VIM para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s

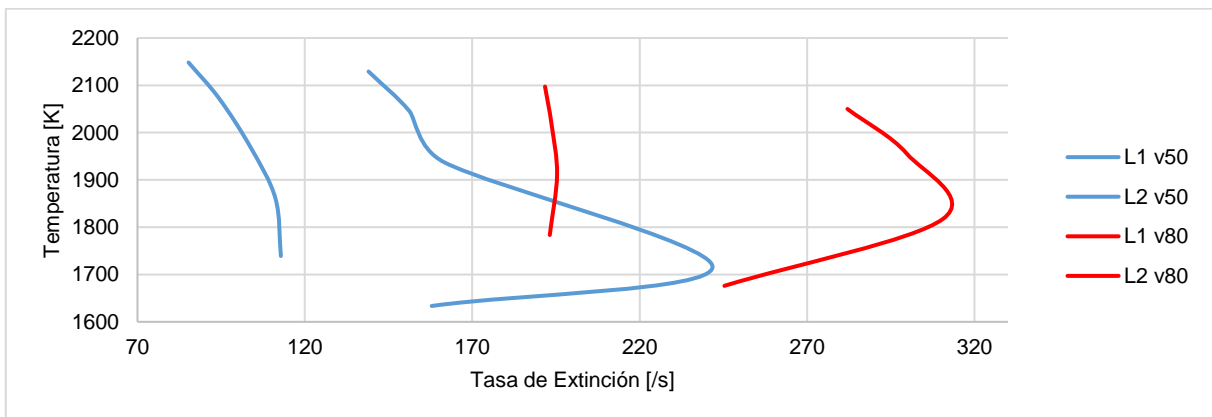


Figura 123. Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GN VIM a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s

Límites de extinción para GN Valle Medio del Magdalena (VMM)

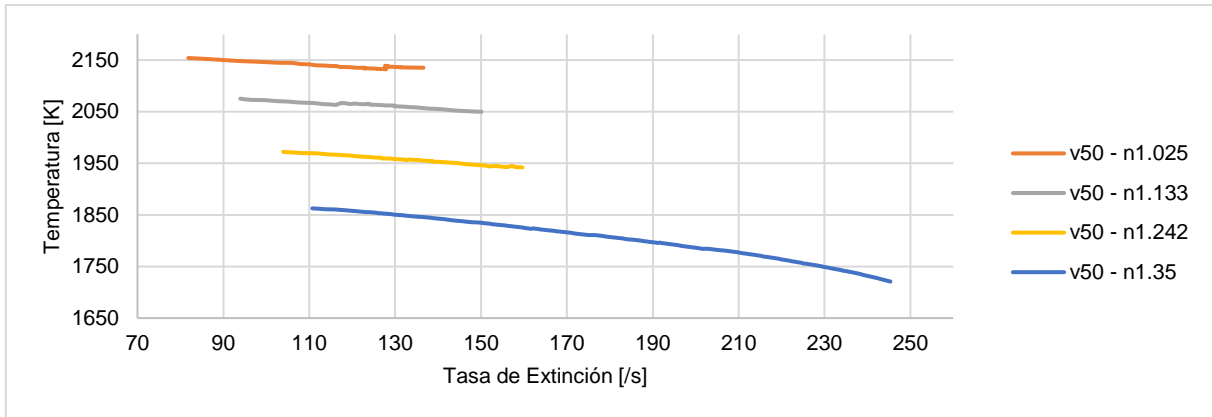


Figura 124. Límites de extinción del GN VMM para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 50 cm/s

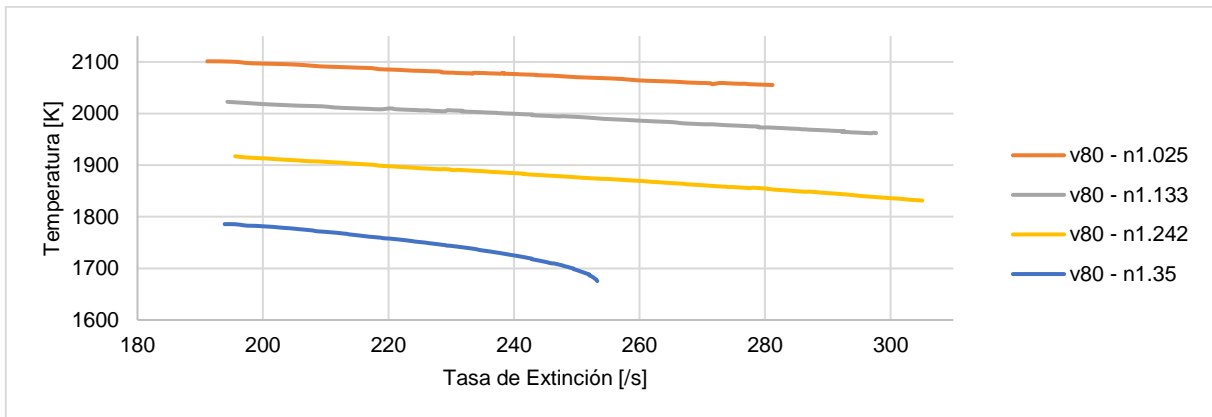


Figura 125. Límites de extinción del GN VMM para diferentes factores de aireación n a una velocidad de entrada de 80 cm/s

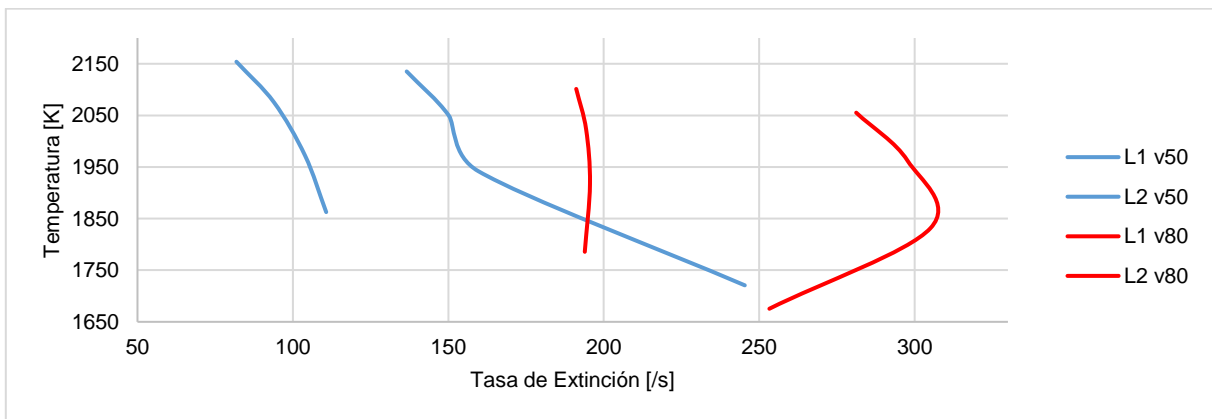


Figura 126 . Comparación entre las zonas de intercambiabilidad a partir de los límites de extinción del GN VMM a velocidades de entrada de 50 y 80 cm/s

4. CONCLUSIONES

1. A partir del estudio realizado se puede concluir que, bajo las condiciones de combustión especificadas, los gases combustibles con alta presencia de hidrocarburos pesados como propano y butano, tienden a desarrollar la *llama* más rápido que aquellas reacciones de combustión con gases más livianos y en distancias más cortas. Así mismo, estos gases más pesados alcanzan mayores tasas de liberación de calor, su perfil de temperatura es más amplio en comparación a los gases combustibles con mayor presencia de metano y la formación o extinción de especies también sucede más pronto.
2. Los límites de ignición y extinción de llama determinan las zonas de intercambiabilidad de gases combustibles. Se logró identificar que todos los gases licuados de petróleo son intercambiables entre sí, debido a que los rangos de estabilidad son similares a las dos velocidades estudiadas. Sin embargo, el GLP Cusiana tiene un límite superior de extinción a 80 cm/s por debajo a los otros GLP, esto es resultado de la presencia de trazas de CH_4 y C_2H_6 , además de las fracciones molares de C_3H_8 y C_4H_{10} (51% y 47% respectivamente).
3. Los gases naturales de las cuencas Caguán-Putumayo y Catatumbo presentan una región de estabilidad y extinción de llama similar, siendo estos dos gases intercambiables entre sí. A pesar de eso, no podrían reemplazar a otros ya que su zona de estabilidad es muy estrecha y sus límites de extinción están alrededor de 110 /s. Ahora bien, los gases naturales de las cuencas Cordillera Oriental, Guajira y Llanos Orientales pueden ser intercambiados entre sí a cualquiera de las dos velocidades de entrada propuestas: 50 y 80 cm/s. L

Los gases naturales del Valle Inferior del Magdalena y Valle Medio del Magdalena solo pueden ser intercambiados entre ellos tanto a 50 como 80 cm/s, estos dos gases pueden reemplazar cualquier otro gas referenciados debido a que sus límites de ignición y extinción de llama construyen una región de intercambiabilidad más amplia. A 80 cm/s los gases naturales de las cuencas Cordillera Oriental, Guajira y Llanos Orientales pueden intercambiar con estos, como consecuencia de que sus regiones de estabilidad de llama se amplían y coinciden con las de los gases VIM y VMM.

4. El biogás es un energético con un rango de estabilidad de llama limitado a su mezcla estequiométrica, es decir, la combustión con mezclas ricas o mezclas pobres no sucede. Además, es un gas que presenta una rápida extinción por fenómeno de desprendimiento a causa de la presencia de dióxido de carbono; por lo anterior, el biogás no puede entrar a reemplazar ningún otro gas combustible aquí estudiado.

RECOMENDACIONES

- A. Realizar futuras investigaciones orientadas a estudiar los límites de extinción y la estructura de llama a velocidades intermedias entre 50 y 80 cm/s, con la finalidad de analizar el comportamiento de los gases estudiados bajo otros parámetros de velocidades de entrada. De esta manera poder establecer si existe un patrón de comportamiento y/o desplazamiento de la zona de estabilidad de cada gas combustible.
- B. Estudiar los límites de extinción y la estructura de llama para diferentes mezclas entre los gases combustibles nacionales, como respuesta a la situación actual del país donde la composición del gas combustible que llega al consumidor final es el resultado de mezclas entre gases de diferentes cuencas.
- C. Desarrollar un estudio comparativo utilizando distintos mecanismos cinético-químicos en el modelo de *Llama Opuesta de Premezcla* en CHEMKIN PRO, con el objetivo de identificar los mecanismos óptimos que mejor describan el comportamiento de la combustión para los gases analizados.
- D. Simular bajo el modelo y los parámetros utilizados al gas metano y hacer un estudio de sensibilización del comportamiento del gas cuando hay pequeñas trazas de hidrocarburos como butanos y propanos en la mezcla. Para así determinar cómo se ven afectados los límites de extinción de llama como consecuencia de la variación de la composición.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AMELL A, Andrés; CADAVID S, Francisco y COPETE L, H. Proyecto Uso Eficiente y Racional de Energía en el marco del Programa de Producción más limpia del área metropolitana en el Valle de Aburrá.
- [2] Combustión - Unidad V: Teoría de Llamas, reacciones de combustión. [en línea] Universidad de Buenos Aires. Argentina. [citado 12 septiembre 2016]. Disponible en internet: <http://materias.fi.uba.ar/6730/Tomo1Unidad5a.pdf>
- [3] RENDÓN, Julio; CADAVID, Francisco; AMELL, Andrés. Simulación de la estructura de llama de un quemador de premezcla parcial metano/aire en flujo concéntrico. Grupo de ciencia y Tecnología del gas y uso racional de la energía. Universidad de Antioquia, Facultad de ingeniería. Medellín. 2008.
- [4] AMELL ARRIETA, Andrés. Fenómenos de combustión en Llamas de Premezcla. Grupo de ciencia y Tecnología del gas y uso racional de la energía. Universidad de Antioquia, Facultad de ingeniería. Medellín, 2009.
- [5] Carvajal, J, Estudio numérico-experimental de la velocidad de combustión laminar del biogás y de mezclas biogás-hidrógeno. Trabajo de grado. Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería. Medellín, 2010.
- [6] Burbano H, Pareja J, Amell A, Laminar burning velocities and flame stability analysis of H₂/CO/air mixtures with dilution of N₂ and CO₂, International Journal of Hydrogen Energy, 36 (2011), pp: 3232-3242
- [7] AMELL ARRIETA, Andrés; et al. Influencia de la altitud sobre la velocidad de deflagración del gas natural. Universidad de Antioquia. Revista facultad de Ingeniería N°32. pp 72-81. Diciembre, 2004.
- [8] Bradley, D. y Hundy, G. F. "Burning velocities of methane-air mixtures using hot-wire anemometers in closed-vessel explosions". En: 13 Symp (INT) on combustion. 1971. pp. 575-583.
- [9] BORRÁS BRUCART, E. Gas Natural: Características, distribución y aplicaciones industriales. Editores Técnicos Asociados, S. A., p. 19-22. Barcelona, 1987.
- [10] FLOREZ-ORREGO, D. Métodos para el estudio de la intercambiabilidad de una mezcla de Gas Natural y Gas Natural-Syngas en quemadores de premezcla de régimen laminar. Universidad de Antioquia, Facultad de ingeniería. Centro de Extensión Académica CESET. Medellín, 2008.
- [11] Engineering Equation Solver: Overview. [en línea] F-Chart Software. [citado 20 octubre 2016]. Disponible en internet: <http://www.fchart.com/ees/>
- [12] CHEMKIN: CHEMKIN PRO. [en línea] Reaction Design. [citado 20 Octubre 2016]. Disponible en internet: <http://www.reactiondesign.com/products/chemkin/chemkin-2/>
- [13] Cadena del Gas Licuado de Petróleo 2013. Unidad de Planeación Minero Energética, Ministerio de Minas y Energía. Colombia, 2013.
- [14] Gas Natural. [en línea] Wikipedia. [Citado 4 noviembre 2016]. Disponible en internet: https://es.wikipedia.org/wiki/Gas_natural

- [15] Balance de Gas Natural en Colombia 2016-2025. Unidad de Planeación Minero Energética. Colombia, 2016.
- [16] BARRERO, Darío; et al. Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. Agencia Nacional de Hidrocarburos. Bogotá, 2007.
- [17] RINCÓN MARTÍNEZ, Yully. Caracterización físico-química del gas natural de las cuencas sedimentarias colombianas. Semillero en Prospectiva Energética Colombia a 2050. Universidad Industrial de Santander.
- [18] CENGEL, Yunes A; BOLES, Michael. Termodinámica séptima edición. Editorial McGRAW-Hill/INTERAMERICANA EDITORES S.A. DE C.V. ISBN 978-0-07-352932-5
- [19] SÁNCHEZ Echeverría, Judith; CALDERÓN Beruecos, Zoila y GARCÍA Becerril; María. Química II: Libro de Texto.
- [20] CHEMKIN Tutorials Manual: Flame Extinction Analysis. Reaction Design. San Diego, 2013.
- [21] CHEMKIN Theory Manual: Flame Extinction Analysis. Reaction Design. San Diego, 2013.
- [22] Informe del sector Gas Natural 2016 – Cifras 2015: Colombia XVII Edición. Promigas. Colombia, 2016.
- [23] J. P. Franco Valencia and H. M. Guerrero Castillo. Evaluación de las redes hidráulicas para la optimización de producción en las troncales principales de las líneas de transferencia de los pozos productores del Campo Costayaco. Universidad Industrial de Santander, 2015.
- [24] E. Bolaños Rodríguez and I. D. Osma Ruiz. Optimización de la producción de la estación K-27 del Campo Tibú, mediante un sistema de evaluación de desempeño. Universidad Industrial de Santander, 2009
- [25] C. A. Pérez Balaguera. Mejoramiento de la eficiencia de las plantas de endulzamiento de gas en Cusiana. Universidad Industrial de Santander, 2013.
- [26] A. a Amell, C. a Bedoya, and B. Suárez. Efectos del cambio de composición química del gas natural sobre el comportamiento de turbinas a gas: Una aproximación al caso colombiano. Universidad Nacional de Colombia.
- [27] Composición gas La Creciente. Promigas. [En Línea]. [Citado 22 noviembre 2016] Disponible en internet: http://www.promigas.com/wps/wcm/connect/web_content/NeoPromigas/Clientes/Composici_oacute_n+gas/
- [28] D. A. González Acevedo y O. Y. Cruz Ruiz. Evaluación y Selección del Sistema de Medición Para el Recibo de Gas Opón en la Planta de Gas el Centro Perteneiente a la Superintendencia de Operaciones de Mares ECOPEPETROL S.A. Universidad Industrial de Santander, 2013.
- [29] DIAZ Gonzales, Carlos A; AMELL Arrieta, Andrés; y CARDONA Luís F. Estudio Experimental de la Estabilidad de Llama de Biogás en un Sistema de Premezcla. Grupo de ciencia y Tecnología del gas y uso racional de la energía. Universidad de Antioquia, Facultad de ingeniería. Medellín. 2008.

ANEXOS

ANEXO A. Parametrización de los factores de aireación y normalización de la composición para caga gas o mezcla de gases combustibles.

PARAMETRIZACIÓN n CUENCA CAGUÁN PUTUMAYO v=80cm/s																	
Componente	% en GN	GAS NATURAL							Aire								
		n	Mezcla	Molar	%	CO2	N2 GN	CH4	C2H6	C3H8	C4H10	Molar	%	O2	N2	N2 TOTAL	
CO2	6.0																
N2	2.8																
CH4	31.30																
C2H6	14.70																
C3H8	19.10																
C4H10	26.10																
	100.0	1.0															
	% en Aire																
O2																	
N2																	
	100.00%																

PARAMETRIZACIÓN n CUENCA CATATUMBO v=80cm/s																	
Componente	% en GN	GAS NATURAL							Aire								
		n	Mezcla	Molar	%	CO2	N2 GN	CH4	C2H6	C3H8	C4H10	Molar	%	O2	N2	N2 TOTAL	
CO2	1.21%																
N2	0.01%																
CH4	60.31%																
C2H6	15.17%																
C3H8	14.29%																
C4H10	9.01%																
	100.00%																
	% en Aire																
O2																	
N2																	
	100.00%																

PARAMETRIZACIÓN n CUENCA LA GUAJIRA v=80cm/s

Componente	% en GN	GAS NATURAL										Aire			
		n	Mezcla	Molar	%	CO2	N2 GN	CH4	C2H6	C3H8	Molar	%	O2	N2	N2 TOTAL
N2	1.995%	0.7	7.71	1	12.97%	0.007%	0.259%	12.624%	0.047%	0.034%	6.71	87.03%	18.28%	68.75%	69.005%
CO2	0.053%	0.8083	8.75	1	11.43%	0.006%	0.228%	11.128%	0.041%	0.030%	7.747	88.57%	18.61%	69.96%	70.189%
CH4	97.334%	0.9167	9.78	1	10.22%	0.005%	0.204%	9.948%	0.037%	0.026%	8.784	89.78%	18.86%	70.92%	71.122%
C2H6	0.359%	1.025	10.82	1	9.24%	0.005%	0.184%	8.996%	0.033%	0.024%	9.82	90.76%	19.07%	71.69%	71.875%
C3H8	0.259%	1.133	11.86	1	8.43%	0.004%	0.168%	8.207%	0.030%	0.022%	10.86	91.57%	19.24%	72.33%	72.499%
	100.000%	1.242	12.9	1	7.75%	0.004%	0.155%	7.545%	0.028%	0.020%	11.9	92.25%	19.38%	72.87%	73.023%
O2	21.01%	1.135	13.93	1	7.18%	0.004%	0.143%	6.987%	0.026%	0.019%	12.93	92.82%	19.50%	73.32%	73.464%
N2	78.99%	1.458	14.97	1	6.68%	0.004%	0.133%	6.502%	0.024%	0.017%	13.97	93.32%	19.61%	73.71%	73.848%
	100.00%	1.567	16.01	1	6.25%	0.003%	0.125%	6.080%	0.022%	0.016%	15.01	93.75%	19.70%	74.06%	74.182%
		1.675	17.05	1	5.87%	0.003%	0.117%	5.709%	0.021%	0.015%	16.05	94.13%	19.78%	74.36%	74.476%
		1.783	18.08	1	5.53%	0.003%	0.110%	5.384%	0.020%	0.014%	17.08	94.47%	19.85%	74.62%	74.733%
		1.892	19.12	1	5.23%	0.003%	0.104%	5.091%	0.019%	0.014%	18.12	94.77%	19.91%	74.86%	74.965%
		2	20.16	1	4.96%	0.003%	0.099%	4.828%	0.018%	0.013%	19.16	95.04%	19.97%	75.07%	75.172%

PARAMETRIZACIÓN n CUENCA LLANOS ORIENTALES v=80cm/s

Componente	% en GN	GAS NATURAL										Aire			
		n	Mezcla	Molar	%	CO2	N2 GN	CH4	C2H6	C3H8	Molar	%	O2	N2	N2 TOTAL
CO2	5.35%	0.7	9.048	1	11.05%	0.591%	0.050%	8.172%	1.218%	1.022%	8.048	88.95%	18.69%	70.26%	70.31%
N2	0.45%	0.8083	10.29	1	9.72%	0.520%	0.044%	7.186%	1.071%	0.899%	9.29	90.28%	18.97%	71.32%	71.36%
CH4	73.94%	0.9167	11.54	1	8.67%	0.464%	0.039%	6.407%	0.955%	0.802%	10.54	91.33%	19.19%	72.15%	72.19%
C2H6	11.02%	1.025	12.78	1	7.82%	0.419%	0.035%	5.786%	0.862%	0.724%	11.78	92.18%	19.36%	72.81%	72.85%
C3H8	9.25%	1.133	14.03	1	7.13%	0.381%	0.032%	5.270%	0.785%	0.659%	13.03	92.87%	19.51%	73.36%	73.39%
	100.01%	1.242	15.27	1	6.55%	0.350%	0.029%	4.842%	0.722%	0.606%	14.27	93.45%	19.63%	73.82%	73.85%
O2	21.01%	1.35	16.52	1	6.05%	0.324%	0.027%	4.476%	0.667%	0.560%	15.52	93.95%	19.74%	74.21%	74.24%
N2	78.99%	1.458	17.77	1	5.63%	0.301%	0.025%	4.161%	0.620%	0.521%	16.77	94.37%	19.83%	74.55%	74.57%
	100.00%	1.567	19.01	1	5.26%	0.281%	0.024%	3.890%	0.580%	0.487%	18.01	94.74%	19.90%	74.84%	74.86%
		1.675	20.26	1	4.94%	0.264%	0.022%	3.650%	0.544%	0.457%	19.26	95.06%	19.97%	75.09%	75.11%
		1.783	21.5	1	4.65%	0.249%	0.021%	3.439%	0.513%	0.430%	20.5	95.35%	20.03%	75.32%	75.34%
		1.892	22.75	1	4.40%	0.235%	0.020%	3.250%	0.484%	0.407%	21.75	95.60%	20.08%	75.52%	75.54%
		2	23.99	1	4.17%	0.223%	0.019%	3.082%	0.459%	0.386%	22.99	95.83%	20.13%	75.70%	75.72%

PARAMETRIZACIÓN n VALLE INFERIOR MAGDALENA v=80cm/s

Componente	% en GN
N2	1.995%
CO2	0.053%
CH4	95.334%
C2H6	2.359%
C3H8	0.259%
	100.000%
	% en Aire
O2	21.01%
N2	78.99%
	100.00%

n	Mezcla	Molar	%	GAS NATURAL					Aire				N2 TOTAL
				CO2	N2 GN	CH4	C2H6	C3H8	Molar	%	O2	N2	
0.7	7.58	1	13.19%	0.007%	0.263%	12.574%	0.311%	0.034%	6.582	86.81%	18.24%	68.836%	
0.8083	8.60	1	11.63%	0.006%	0.232%	11.084%	0.274%	0.030%	7.601	88.37%	18.57%	70.040%	
0.9167	9.62	1	10.40%	0.005%	0.207%	9.911%	0.245%	0.027%	8.619	89.60%	18.82%	70.987%	
1.025	10.64	1	9.40%	0.005%	0.188%	8.960%	0.222%	0.024%	9.64	90.60%	19.03%	71.755%	
1.133	11.66	1	8.58%	0.005%	0.171%	8.176%	0.202%	0.022%	10.66	91.42%	19.21%	72.388%	
1.242	12.68	1	7.89%	0.004%	0.157%	7.518%	0.186%	0.020%	11.68	92.11%	19.35%	72.919%	
1.35	13.69	1	7.30%	0.004%	0.146%	6.964%	0.172%	0.019%	12.69	92.70%	19.47%	73.367%	
1.458	14.71	1	6.80%	0.004%	0.136%	6.481%	0.160%	0.018%	13.71	93.20%	19.58%	73.757%	
1.567	15.73	1	6.36%	0.003%	0.127%	6.061%	0.150%	0.016%	14.73	93.64%	19.67%	74.097%	
1.675	16.75	1	5.97%	0.003%	0.119%	5.692%	0.141%	0.015%	15.75	94.03%	19.75%	74.395%	
1.783	17.77	1	5.63%	0.003%	0.112%	5.365%	0.133%	0.015%	16.77	94.37%	19.83%	74.659%	
1.892	18.79	1	5.32%	0.003%	0.106%	5.074%	0.126%	0.014%	17.79	94.68%	19.89%	74.894%	
2	19.81	1	5.05%	0.003%	0.101%	4.812%	0.119%	0.013%	18.81	94.95%	19.95%	75.105%	

PARAMETRIZACIÓN n VALLE MEDIO MAGDALENA v=80cm/s

Componente	% en GN
O2 en GN	0.20%
N2	0.26%
CO2	1.03%
CH4	91.23%
C2H6	4.70%
C3H8	2.57%
	100.00%
	% en Aire
O2	21.01%
N2	78.99%
	100.00%

n	Mezcla	Molar	%	GAS NATURAL					Aire				O2 TOTAL	N2 TOTAL
				CO2	N2 GN	CH4	C2H6	C3H8	Molar	%	O2	N2		
0.7	7.96	1	12.56%	0.130%	0.033%	11.459%	0.590%	0.323%	6.961	87.44%	18.37%	69.07%	18.39%	69.103%
0.8083	9.04	1	11.06%	0.114%	0.029%	10.091%	0.520%	0.285%	8.04	88.94%	18.68%	70.25%	18.71%	70.283%
0.9167	10.12	1	9.88%	0.102%	0.026%	9.014%	0.464%	0.254%	9.12	90.12%	18.93%	71.19%	18.95%	71.212%
1.025	11.20	1	8.93%	0.092%	0.024%	8.145%	0.420%	0.230%	10.2	91.07%	19.13%	71.94%	19.15%	71.962%
1.133	12.28	1	8.14%	0.084%	0.022%	7.429%	0.383%	0.210%	11.28	91.86%	19.30%	72.56%	19.31%	72.581%
1.242	13.35	1	7.49%	0.077%	0.020%	6.833%	0.352%	0.193%	12.35	92.51%	19.43%	73.07%	19.45%	73.094%
1.35	14.43	1	6.93%	0.072%	0.018%	6.322%	0.326%	0.178%	13.43	93.07%	19.55%	73.52%	19.57%	73.536%
1.458	15.51	1	6.45%	0.067%	0.017%	5.882%	0.303%	0.166%	14.51	93.55%	19.65%	73.90%	19.67%	73.916%
1.567	16.59	1	6.03%	0.062%	0.016%	5.499%	0.283%	0.155%	15.59	93.97%	19.74%	74.23%	19.75%	74.246%
1.675	17.67	1	5.66%	0.058%	0.015%	5.163%	0.266%	0.146%	16.67	94.34%	19.82%	74.52%	19.83%	74.536%
1.783	18.75	1	5.33%	0.055%	0.014%	4.865%	0.251%	0.137%	17.75	94.67%	19.89%	74.78%	19.90%	74.793%
1.892	19.83	1	5.04%	0.052%	0.013%	4.600%	0.237%	0.130%	18.83	94.96%	19.95%	75.01%	19.96%	75.021%
2	20.91	1	4.78%	0.049%	0.013%	4.363%	0.225%	0.123%	19.91	95.22%	20.00%	75.21%	20.01%	75.227%

PARAMETRIZACIÓN n GLP APIAY v=80cm/s

COMP.	COMP% MOLAR
C3H8	0.56
C4H10	0.44
	1
	% en Aire
O2	21.01%
N2	78.99%
	100.00%

n	Mezcla	GAS LICUADO DE PETROLEO					Aire				
		Molar	%	C3H8	C4H10	Molar	%	O2	N2		
0.7	19.86	1	5.035%	2.820%	2.216%	18.86	94.965%	19.951%	75.014%		
0.8083	22.78	1	4.390%	2.458%	1.932%	21.78	95.610%	20.086%	75.524%		
0.9167	25.7	1	3.891%	2.179%	1.712%	24.7	96.109%	20.191%	75.918%		
1.025	28.62	1	3.494%	1.957%	1.537%	27.62	96.506%	20.274%	76.232%		
1.133	31.53	1	3.172%	1.776%	1.395%	30.53	96.828%	20.342%	76.486%		
1.242	34.45	1	2.903%	1.626%	1.277%	33.45	97.097%	20.399%	76.699%		
1.35	37.37	1	2.676%	1.499%	1.177%	36.37	97.324%	20.446%	76.878%		
1.458	40.29	1	2.482%	1.390%	1.092%	39.29	97.518%	20.487%	77.031%		
1.567	43.21	1	2.314%	1.296%	1.018%	42.21	97.686%	20.522%	77.164%		
1.675	46.13	1	2.168%	1.214%	0.954%	45.13	97.832%	20.553%	77.279%		
1.783	49.05	1	2.039%	1.142%	0.897%	48.05	97.961%	20.580%	77.381%		
1.892	51.96	1	1.925%	1.078%	0.847%	50.96	98.075%	20.604%	77.471%		
2	54.88	1	1.822%	1.020%	0.802%	53.88	98.178%	20.626%	77.552%		

PARAMETRIZACIÓN n GLP BARRANCABERMEJA v=80cm/s

COMP.	COMP% MOLAR
CH4	0.50%
C2H6	0.50%
C3H8	20.00%
C4H10	79.00%
C5H12	0.00%
	100.00%
	% en Aire
O2	21.01%
N2	78.99%
	100.00%

n	Mezcla	Molar	GAS LICUADO DE PETROLEO							Aire			
			%	CH4	C2H6	C3H8	C4H10	Molar	%	O2	N2		
0.7	21.23	1	4.710%	0.024%	0.024%	0.942%	3.721%	20.23	95.29%	20.02%	75.27%		
0.8083	24.36	1	4.105%	0.021%	0.021%	0.821%	3.243%	23.36	95.89%	20.15%	75.75%		
0.9167	27.5	1	3.636%	0.018%	0.018%	0.727%	2.873%	26.5	96.36%	20.24%	76.12%		
1.025	30.63	1	3.265%	0.016%	0.016%	0.653%	2.579%	29.63	96.74%	20.32%	76.41%		
1.133	33.77	1	2.961%	0.015%	0.015%	0.592%	2.339%	32.77	97.04%	20.39%	76.65%		
1.242	36.9	1	2.710%	0.014%	0.014%	0.542%	2.141%	35.9	97.29%	20.44%	76.85%		
1.350	40.03	1	2.498%	0.012%	0.012%	0.500%	1.974%	39.03	97.50%	20.48%	77.02%		
1.458	43.17	1	2.316%	0.012%	0.012%	0.463%	1.830%	42.17	97.68%	20.52%	77.16%		
1.567	46.3	1	2.160%	0.011%	0.011%	0.432%	1.706%	45.3	97.84%	20.55%	77.29%		
1.675	49.44	1	2.023%	0.010%	0.010%	0.405%	1.598%	48.44	97.98%	20.58%	77.39%		
1.783	52.57	1	1.902%	0.010%	0.010%	0.380%	1.503%	51.57	98.10%	20.61%	77.49%		
1.892	55.7	1	1.795%	0.009%	0.009%	0.359%	1.418%	54.7	98.20%	20.63%	77.57%		
2	58.84	1	1.700%	0.008%	0.008%	0.340%	1.343%	57.84	98.30%	20.65%	77.65%		

PARAMETRIZACIÓN n GLP CARTAGENA v=80cm/s

n	Mezcla	GAS LICUADO DE PETROLEO						Aire			
		Molar	%	C3H8	C4H10	Molar	%	O2	N2		
0.7	19.76	1	5.061%	2.935%	2.126%	18.76	94.939%	19.945%	74.994%		
0.8083	22.66	1	4.413%	2.560%	1.853%	21.66	95.587%	20.081%	75.506%		
0.9167	25.57	1	3.911%	2.268%	1.643%	24.57	96.089%	20.187%	75.902%		
1.025	28.47	1	3.512%	2.037%	1.475%	27.47	96.488%	20.270%	76.217%		
1.133	31.37	1	3.188%	1.849%	1.339%	30.37	96.812%	20.339%	76.474%		
1.242	34.28	1	2.917%	1.692%	1.225%	33.28	97.083%	20.396%	76.687%		
1.35	37.18	1	2.690%	1.560%	1.130%	36.18	97.310%	20.443%	76.867%		
1.458	40.08	1	2.495%	1.447%	1.048%	39.08	97.505%	20.484%	77.021%		
1.567	42.98	1	2.327%	1.349%	0.977%	41.98	97.673%	20.520%	77.154%		
1.675	45.89	1	2.179%	1.264%	0.915%	44.89	97.821%	20.551%	77.270%		
1.783	48.79	1	2.050%	1.189%	0.861%	47.79	97.950%	20.578%	77.373%		
1.892	51.69	1	1.935%	1.122%	0.813%	50.69	98.065%	20.602%	77.463%		
2	54.6	1	1.832%	1.062%	0.769%	53.6	98.168%	20.624%	77.545%		

COMP.	COMP % MOLAR
C3H8	58%
C4H10	42%
	100%
	% en Aire
O2	21.01%
N2	78.99%
	100.00%

PARAMETRIZACIÓN n GLP CUSIANA v=80cm/s

n	Mezcla	GAS LICUADO DE PETROLEO						Aire			
		Molar	%	CH4	C2H6	C3H8	C4H10	Molar	%	O2	N2
0.7	19.86	1	5.035%	0.050%	0.050%	2.367%	18.86	94.965%	19.951%	75.014%	
0.8083	22.78	1	4.390%	0.044%	0.044%	2.239%	21.78	95.610%	20.086%	75.524%	
0.9167	25.7	1	3.891%	0.039%	0.039%	1.984%	24.7	96.109%	20.191%	75.918%	
1.025	28.62	1	3.494%	0.035%	0.035%	1.782%	27.62	96.506%	20.274%	76.232%	
1.133	31.53	1	3.172%	0.032%	0.032%	1.618%	30.53	96.828%	20.342%	76.486%	
1.242	34.45	1	2.903%	0.029%	0.029%	1.480%	33.45	97.097%	20.399%	76.699%	
1.35	37.37	1	2.676%	0.027%	0.027%	1.365%	36.37	97.324%	20.446%	76.878%	
1.458	40.29	1	2.482%	0.025%	0.025%	1.266%	39.29	97.518%	20.487%	77.031%	
1.567	43.21	1	2.314%	0.023%	0.023%	1.180%	42.21	97.686%	20.522%	77.164%	
1.675	46.13	1	2.168%	0.022%	0.022%	1.106%	45.13	97.832%	20.553%	77.279%	
1.783	49.05	1	2.039%	0.020%	0.020%	1.040%	48.05	97.961%	20.580%	77.381%	
1.892	51.96	1	1.925%	0.019%	0.019%	0.982%	50.96	98.075%	20.604%	77.471%	
2	54.88	1	1.822%	0.018%	0.018%	0.929%	53.88	98.178%	20.626%	77.552%	

COMP.	COMP % MOLAR
CH4	1%
C2H6	1%
C3H8	51%
C4H10	47%
	100%
	% en Aire
O2	21.01%
N2	78.99%
	100.00%

ANEXO B. Balances estequiométricos para cada gas o mezcla de gases combustibles en el Software EES.

1. Código fuente en el software EES para el balance del Biogás.

```
"BALANCE ESTEQUIOMÉTRICO DEL BIOGAS"  
CH4=0,6  
CO2=0,4  
"(CH4+CO2)+at(O2+3,76*N2) -----> (Xt*CO2+Yt*H2O+Zt*N2)"  
"Balance entre reactivos y productos (CHON) TEÓRICO"  
"Carbono teórico"  
CH4+CO2=Xt  
"Hidrógeno teórico"  
4*CH4=2*Yt  
"Oxígeno teórico"  
2*CO2+2*at=2*Xt+Yt  
"Nitrógeno teórico"  
at*2*3,76=2*Zt  
"(CH4+CO2)+at(O2+3,76*N2) -----> (Xr*CO2+Yr*H2O+Zr*N2+Wr*O2)"  
"BALANCE REAL DEL BIOGAS"  
ar=n*at  
"Carbono real"  
CH4+CO2=Xr  
"Hidrógeno real"  
4*CH4=2*Yr  
"Oxígeno real"  
2*CO2+2*ar=2*Xr+Yr+2*Wr  
"Nitrógeno real"  
ar*2*3,76=2*Zr  
"Composición mezcla"  
M_biogas=(CH4+CO2)+ar*(1+3,76)
```

2. Código fuente en el software EES para el balance del GLP Apiay

```
"BALANCE ESTEQUIOMÉTRICO DE GLP APIAY"  
C3H8=0,56  
C4H10=0,44  
"(C3H8+C4H10)+at(O2+3,76*N2) -----> (Xt*CO2+Yt*H2O+Zt*N2)"  
"Balance entre reactivos y productos (CHON) TEÓRICO"  
"Carbono teórico"  
3*C3H8+4*C4H10=Xt  
"Hidrógeno teórico"  
8*C3H8+10*C4H10=2*Yt  
"Oxígeno teórico"  
2*at=2*Xt+Yt  
"Nitrógeno teórico"  
at*2*3,76=2*Zt  
"(C3H8+C4H10)+at(O2+3,76*N2) -----> (Xt*CO2+Yt*H2O+Zt*N2+Wr*O2)"  
"BALANCE REAL DE GLP APIAY"  
ar=n*at  
"Carbono real"  
3*C3H8+4*C4H10=Xr  
"Hidrógeno real"
```

$8 \cdot C_3H_8 + 10 \cdot C_4H_{10} = 2 \cdot Y_r$
 "Oxígeno real"
 $2 \cdot a_r = 2 \cdot X_r + Y_r + 2 \cdot W_r$
 "Nitrógeno real"
 $a_r \cdot 2 \cdot 3,76 = 2 \cdot Z_r$
 "Composición mezcla"
 $M_{apiay} = (C_3H_8 + C_4H_{10}) + a_r \cdot (1 + 3,76)$

3. Código fuente en el software EES para el balance del GLP Barrancabermeja

"BALANCE ESTEQUIOMETRICO DE GLP BARRANCA"
 $CH_4 = 0,005$
 $C_2H_6 = 0,005$
 $C_3H_8 = 0,2$
 $C_4H_{10} = 0,79$
 $C_5H_{12} = 0$
 $(CH_4 + C_2H_6 + C_3H_8 + C_4H_{10} + C_5H_{12}) + a_t \cdot (O_2 + 3,76 \cdot N_2) \text{ -----} > (X_t \cdot CO_2 + Y_t \cdot H_2O + Z_t \cdot N_2)$
 "Balance entre reactivos y productos (CHON) TEÓRICO"
 "Carbono teórico"
 $CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8 + 4 \cdot C_4H_{10} + 5 \cdot C_5H_{12} = X_t$
 "Hidrógeno teórico"
 $4 \cdot CH_4 + 6 \cdot C_2H_6 + 8 \cdot C_3H_8 + 10 \cdot C_4H_{10} + 12 \cdot C_5H_{12} = 2 \cdot Y_t$
 "Oxígeno teórico"
 $2 \cdot a_t = 2 \cdot X_t + Y_t$
 "Nitrógeno teórico"
 $a_t \cdot 2 \cdot 3,76 = 2 \cdot Z_t$
 $(CH_4 + C_2H_6 + C_3H_8 + C_4H_{10} + C_5H_{12}) + a_t \cdot (O_2 + 3,76 \cdot N_2) \text{ -----} > (X_t \cdot CO_2 + Y_t \cdot H_2O + Z_t \cdot N_2 + W_r \cdot O_2)$
 "BALANCE REAL DE GLP BARRANCA"
 $a_r = n \cdot a_t$
 "Carbono real"
 $CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8 + 4 \cdot C_4H_{10} + 5 \cdot C_5H_{12} = X_r$
 "Hidrógeno real"
 $3 \cdot CH_4 + 6 \cdot C_2H_6 + 8 \cdot C_3H_8 + 10 \cdot C_4H_{10} + 12 \cdot C_5H_{12} = 2 \cdot Y_r$
 "Oxígeno real"
 $2 \cdot a_r = 2 \cdot X_r + Y_r + 2 \cdot W_r$
 "Nitrógeno real"
 $a_r \cdot 2 \cdot 3,76 = 2 \cdot Z_r$
 "Composición Mezcla"
 $M_{Barranca} = (CH_4 + C_2H_6 + C_3H_8 + C_4H_{10} + C_5H_{12}) + a_r \cdot (1 + 3,76)$

4. Código fuente en el software EES para el balance del GLP Cartagena

"BALANCE ESTEQUIMÉTRICO DE GLP CARTAGENA"
 $C_3H_8 = 0,58$
 $C_4H_{10} = 0,42$
 $(C_3H_8 + C_4H_{10}) + a_t \cdot (O_2 + 3,76 \cdot N_2) \text{ -----} > (X_t \cdot CO_2 + Y_t \cdot H_2O + Z_t \cdot N_2)$
 "Balance entre reactivos y productos (CHON) TEÓRICO"
 "Carbono teórico"
 $3 \cdot C_3H_8 + 4 \cdot C_4H_{10} = X_t$
 "Hidrógeno teórico"
 $8 \cdot C_3H_8 + 10 \cdot C_4H_{10} = 2 \cdot Y_t$
 "Oxígeno teórico"

$2 \cdot a_t = 2 \cdot X_t + Y_t$
 "Nitrógeno teórico"
 $a_t \cdot 2 \cdot 3,76 = 2 \cdot Z_t$
 $(C_3H_8 + C_4H_{10}) + a_t(O_2 + 3,76 \cdot N_2) \text{ -----} \rightarrow (X_t \cdot CO_2 + Y_t \cdot H_2O + Z_t \cdot N_2 + W_r \cdot O_2)$
 "BALANCE REAL DE GLO CARTAGENA"
 $a_r = n \cdot a_t$
 "Carbono real"
 $3 \cdot C_3H_8 + 4 \cdot C_4H_{10} = X_r$
 "Hidrógeno real"
 $8 \cdot C_3H_8 + 10 \cdot C_4H_{10} = 2 \cdot Y_r$
 "Oxígeno real"
 $2 \cdot a_r = 2 \cdot X_r + Y_r + 2 \cdot W_r$
 "Nitrógeno real"
 $a_r \cdot 2 \cdot 3,76 = 2 \cdot Z_r$
 "Composición Mezcla"
 $M_{ctg} = (C_3H_8 + C_4H_{10}) + a_r \cdot (1 + 3,76)$

5. Código fuente en el software EES para el balance del GLP Cusiana

"BALANCE ESTEQUIOMÉTRICO DE GLP CUSIANA"
 $CH_4 = 0,01$
 $C_2H_6 = 0,01$
 $C_3H_8 = 0,51$
 $C_4H_{10} = 0,47$
 $(CH_4 + C_2H_6 + C_3H_8 + C_4H_{10}) + a_t(O_2 + 3,76 \cdot N_2) \text{ -----} \rightarrow (X_t \cdot CO_2 + Y_t \cdot H_2O + Z_t \cdot N_2)$
 "Balance entre reactivos y productos (CHON) TEÓRICO"
 "Carbono teórico"
 $CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8 + 4 \cdot C_4H_{10} = X_t$
 "Hidrógeno teórico"
 $4 \cdot CH_4 + 6 \cdot C_2H_6 + 8 \cdot C_3H_8 + 10 \cdot C_4H_{10} = 2 \cdot Y_t$
 "Oxígeno teórico"
 $2 \cdot a_t = 2 \cdot X_t + Y_t$
 "Nitrógeno teórico"
 $a_t \cdot 2 \cdot 3,76 = 2 \cdot Z_t$
 $(CH_4 + C_2H_6 + C_3H_8 + C_4H_{10}) + a_t(O_2 + 3,76 \cdot N_2) \text{ -----} \rightarrow (X_t \cdot CO_2 + Y_t \cdot H_2O + Z_t \cdot N_2 + W_r \cdot O_2)$
 "BALANCE REAL DE GLP CUSIANA"
 $a_r = n \cdot a_t$
 "Carbono real"
 $CH_4 + 2 \cdot C_2H_6 + 3 \cdot C_3H_8 + 4 \cdot C_4H_{10} = X_r$
 "Hidrógeno real"
 $4 \cdot CH_4 + 6 \cdot C_2H_6 + 8 \cdot C_3H_8 + 10 \cdot C_4H_{10} = 2 \cdot Y_r$
 "Oxígeno real"
 $2 \cdot a_r = 2 \cdot X_r + Y_r + 2 \cdot W_r$
 "Nitrógeno real"
 $a_r \cdot 2 \cdot 3,76 = 2 \cdot Z_r$
 "Composición Mezcla"
 $M_{cusiana} = (CH_4 + C_2H_6 + C_3H_8 + C_4H_{10}) + a_r \cdot (1 + 3,76)$

6. Código fuente en el software EES para el balance del GN Caquán-Putumayo

"BALANCE ESTEQUIOMÉTRICO GN Cuenca Caquán-Putumayo"
 $CO_2 = 0,06$

N2_c=0,028
 CH4=0,313
 C2H6=0,147
 C3H8=0,191
 C4H10=0,108
 C5H12=0,048
 C6H14=0,03
 C7H16=0,055
 C8H18=0,018
 C9H20=0,002
 "(CO2+N2_c+CH4+C2H6+C3H8+C4H10+C5H12+C6H14+C7H16+C8H18+C9H20)+at(O2+3,76*N2) -----> (Xt*CO2+Yt*H2O+Zt*N2)"
 "Balance entre reactivos y productos (CHON) TEÓRICO"
 "Carbono teórico"
 CO2+CH4+2*C2H6+3*C3H8+4*C4H10+5*C5H12+6*C6H14+7*C7H16+8*C8H18+9*C9H20=Xt
 "Hidrógeno teórico"
 4*CH4+6*C2H6+8*C3H8+10*C4H10+12*C5H12+14*C6H14+16*C7H16+18*C8H18+20*C9H20=2*Yt
 "Oxígeno teórico"
 2*CO2+2*at=2*Xt+Yt
 "Nitrógeno teórico"
 2*N2_c+at*2*3,76=2*Zt
 "(CO2+N2_c+CH4+C2H6+C3H8+C4H10+C5H12+C6H14+C7H16+C8H18+C9H20)+at(O2+3,76*N2) -----> (Xt*CO2+Yt*H2O+Zt*N2+Wt*O2)"
 "BALANCE REAL"
 ar=n*at
 "Carbono real"
 CO2+CH4+2*C2H6+3*C3H8+4*C4H10+5*C5H12+6*C6H14+7*C7H16+8*C8H18+9*C9H20=Xr
 "Hidrógeno real"
 4*CH4+6*C2H6+8*C3H8+10*C4H10+12*C5H12+14*C6H14+16*C7H16+18*C8H18+20*C9H20=2*Yr
 "Oxígeno real"
 2*CO2+2*ar=2*Xr+Yr+2*Wr
 "Nitrógeno real"
 2*N2_c+ar*2*3,76=2*Zr
 "COMPOSICIÓN MEZCLA"
 M_CagúanPutumayo=(CO2+N2_c+CH4+C2H6+C3H8+C4H10+C5H12+C6H14+C7H16+C8H18+C9H20)+ar*(1+3,76)

7. Código fuente en el software EES para el balance del GN Catatumbo

"BALANCE ESTEQUIOMÉTRICO GN Cuenca Catatumbo"
 CO2=0,0121
 N2=0,0001
 CH4=0,6031
 C2H6=0,1517
 C3H8=0,1429
 C4H10=0,0631
 C5H12=0,0197
 C6H14=0,0036
 C7H16=0,0037
 "(CO2+N2+CH4+C2H6+C3H8+C4H10+C5H12+C6H14+C7H16)+at(O2+3,76*N2) ----->
 (Xt*CO2+Yt*H2O+Zt*N2)"

"Balance entre reactivos y productos (CHON) TEÓRICO"
 "Carbono teórico"
 $CO_2+CH_4+2*C_2H_6+3*C_3H_8+4*C_4H_{10}+5*C_5H_{12}+6*C_6H_{14}+7*C_7H_{16}=Xt$
 "Hidrógeno teórico"
 $4*CH_4+6*C_2H_6+8*C_3H_8+10*C_4H_{10}+12*C_5H_{12}+14*C_6H_{14}+16*C_7H_{16}=2*Yt$
 "Oxígeno teórico"
 $2*CO_2+2*at=2*Xt+Yt$
 "Nitrógeno teórico"
 $2*N_2+at*2*3,76=2*Zt$
 "($CO_2+N_2+CH_4+C_2H_6+C_3H_8+C_4H_{10}+C_5H_{12}+C_6H_{14}+C_7H_{16}$)+ar($O_2+3,76*N_2$) ----->
 ($Xt*CO_2+Yt*H_2O+Zt*N_2+Wr*O_2$)"
 "BALANCE REAL"
 ar=n*at
 "Carbono real"
 $CO_2+CH_4+2*C_2H_6+3*C_3H_8+4*C_4H_{10}+5*C_5H_{12}+6*C_6H_{14}+7*C_7H_{16}=Xr$
 "Hidrógeno real"
 $4*CH_4+6*C_2H_6+8*C_3H_8+10*C_4H_{10}+12*C_5H_{12}+14*C_6H_{14}+16*C_7H_{16}=2*Yr$
 "Oxígeno real"
 $2*CO_2+2*ar=2*Xr+Yr+2*Wr$
 "Nitrógeno real"
 $2*N_2+ar*2*3,76=2*Zr$
 "Composición mezcla"
 $M_Catatumbo=(CO_2+N_2+CH_4+C_2H_6+C_3H_8+C_4H_{10}+C_5H_{12}+C_6H_{14}+C_7H_{16})+ar*(1+3,76)$

8. Código fuente en el software EES para el balance del Cordillera Oriental

"Cuenca Cordillera Oriental"
 $CO_2=0,0535$
 $N_2=0,0045$
 $CH_4=0,7394$
 $C_2H_6=0,1102$
 $C_3H_8=0,0528$
 $C_4H_{10}=0,0239$
 $C_5H_{12}=0,0105$
 $C_6H_{14}=0,0043$
 "($CO_2+N_2+CH_4+C_2H_6+C_3H_8+C_4H_{10}+C_5H_{12}+C_6H_{14}$)+at($O_2+3,76*N_2$) ----->
 ($Xt*CO_2+Yt*H_2O+Zt*N_2$)"
 "Balance entre reactivos y productos (CHON) TEÓRICO"
 "Carbono teórico"
 $CO_2+CH_4+2*C_2H_6+3*C_3H_8+4*C_4H_{10}+5*C_5H_{12}+6*C_6H_{14}=Xt$
 "Hidrógeno teórico"
 $4*CH_4+6*C_2H_6+8*C_3H_8+10*C_4H_{10}+12*C_5H_{12}+14*C_6H_{14}=2*Yt$
 "Oxígeno teórico"
 $2*CO_2+2*at=2*Xt+Yt$
 "Nitrógeno teórico"
 $2*N_2+at*2*3,76=2*Zt$
 "($CO_2+N_2+CH_4+C_2H_6+C_3H_8+C_4H_{10}+C_5H_{12}+C_6H_{14}$)+at($O_2+3,76*N_2$) ----->
 ($Xt*CO_2+Yt*H_2O+Zt*N_2+Wr*O_2$)"
 "Balance entre reactivos y productos (CHON) REAL"
 ar=n*at
 "Carbono real"
 $CO_2+CH_4+2*C_2H_6+3*C_3H_8+4*C_4H_{10}+5*C_5H_{12}+6*C_6H_{14}=Xr$
 "Hidrógeno real"

$4*CH_4+6*C_2H_6+8*C_3H_8+10*C_4H_{10}+12*C_5H_{12}+14*C_6H_{14}=2*Yr$
 "Oxígeno real"
 $2*CO_2+2*ar=2*Xr+Yr+2*Wr$
 "Nitrógeno real"
 $2*N_2+ar*2*3,76=2*Zr$
 "COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA"
 $M_CordilleraOriental=(CO_2+N_2+CH_4+C_2H_6+C_3H_8+C_4H_{10}+C_5H_{12}+C_6H_{14})+ar*(1+3,76)$

9. Código fuente en el software EES para el balance del GN Guajira

"BALANCE ESTEQUIMÉTRICO DEL GN Cuenca La Guajira"
 $CO_2=0,000525$
 $N_2=0,019952$
 $CH_4=0,973343$
 $C_2H_6=0,003591$
 $C_3H_8=0,00766$
 $C_4H_{10}=0,000762$
 $C_5H_{12}=0,000629$
 $C_6H_{14}=0,000432$
 $(CO_2+N_2+CH_4+C_2H_6+C_3H_8+C_4H_{10}+C_5H_{12}+C_6H_{14})+at(O_2+3,76*N_2) ----->$
 $(Xt*CO_2+Yt*H_2O+Zt*N_2)$
 "Balance entre reactivos y productos (CHON) TEÓRICO"
 "Carbono teórico"
 $CO_2+CH_4+2*C_2H_6+3*C_3H_8+4*C_4H_{10}+5*C_5H_{12}+6*C_6H_{14}=Xt$
 "Hidrógeno teórico"
 $4*CH_4+6*C_2H_6+8*C_3H_8+10*C_4H_{10}+12*C_5H_{12}+14*C_6H_{14}=2*Yt$
 "Oxígeno teórico"
 $2*CO_2+2*at=2*Xt+Yt$
 "Nitrógeno teórico"
 $2*N_2+at*2*3,76=2*Zt$
 $(CO_2+N_2+CH_4+C_2H_6+C_3H_8+C_4H_{10}+C_5H_{12}+C_6H_{14})+at(O_2+3,76*N_2) ----->$
 $(Xt*CO_2+Yt*H_2O+Zt*N_2+Wr*O_2)$
 "Balance entre reactivos y productos (CHON) REAL"
 $ar=n*at$
 "Carbono real"
 $CO_2+CH_4+2*C_2H_6+3*C_3H_8+4*C_4H_{10}+5*C_5H_{12}+6*C_6H_{14}=Xr$
 "Hidrógeno real"
 $4*CH_4+6*C_2H_6+8*C_3H_8+10*C_4H_{10}+12*C_5H_{12}+14*C_6H_{14}=2*Yr$
 "Oxígeno real"
 $2*CO_2+2*ar=2*Xr+Yr+2*Wr$
 "Nitrógeno real"
 $2*N_2+ar*2*3,76=2*Zr$
 "Composición mezcla"
 $M_guajira=(CO_2+N_2+CH_4+C_2H_6+C_3H_8+C_4H_{10}+C_5H_{12}+C_6H_{14})+ar*(1+3,76)$

10. Código fuente en el software EES para el balance del GN Llanos Orientales

"BALANCE ESTEQUIOMÉTRICO GN Cuenca Llanos Orientales"
 $CO_2=0,0535$
 $N_2=0,0045$
 $CH_4=0,7394$
 $C_2H_6=0,1102$

C3H8=0,0528
 C4H10=0,0249
 C5H12=0,0105
 C6H14=0,0043
 "(CO2+N2+CH4+C2H6+C3H8+C4H10+C5H12+C6H14)+at(O2+3,76*N2) ----->
 (Xt*CO2+Yt*H2O+Zt*N2)"
 "Balance entre reactivos y productos (CHON) TEÓRICO"
 "Carbono teórico"
 $CO_2+CH_4+2*C_2H_6+3*C_3H_8+4*C_4H_{10}+5*C_5H_{12}+6*C_6H_{14}=Xt$
 "Hidrógeno teórico"
 $4*CH_4+6*C_2H_6+8*C_3H_8+10*C_4H_{10}+12*C_5H_{12}+14*C_6H_{14}=2*Yt$
 "Oxígeno teórico"
 $2*CO_2+2*at=2*Xt+Yt$
 "Nitrógeno teórico"
 $2*N_2+at*2*3,76=2*Zt$
 "(CO2+N2+CH4+C2H6+C3H8+C4H10+C5H12+C6H14)+at(O2+3,76*N2) ----->
 (Xt*CO2+Yt*H2O+Zt*N2+Wr*O2)"
 "BALANCE REAL"
 ar=n*at
 "Carbono real"
 $CO_2+CH_4+2*C_2H_6+3*C_3H_8+4*C_4H_{10}+5*C_5H_{12}+6*C_6H_{14}=Xr$
 "Hidrógeno real"
 $4*CH_4+6*C_2H_6+8*C_3H_8+10*C_4H_{10}+12*C_5H_{12}+14*C_6H_{14}=2*Yr$
 "Oxígeno real"
 $2*CO_2+2*ar=2*Xr+Yr+2*Wr$
 "Nitrógeno real"
 $2*N_2+ar*2*3,76=2*Zr$
 "Composición mezcla"
 $M_{llanos}=(CO_2+N_2+CH_4+C_2H_6+C_3H_8+C_4H_{10}+C_5H_{12}+C_6H_{14})+ar*(1+3,76)$

11. Código fuente en el software EES para el balance del GN VIM

" BALANCE ESTEQUIOMÉTRICO GN Cuenca Valle Inferior Magdalena"
 CO2=0,000536
 N2=0,020359
 CH4=0,972799
 C2H6=0,003664
 C3H8=0,000782
 C4H10=0,000778
 C5H12=0,000642
 C6H14=0,000441
 "(CO2+N2+CH4+C2H6+C3H8+C4H10+C5H12+C6H14)+at(O2+3,76*N2) ----->
 (Xt*CO2+Yt*H2O+Zt*N2)"
 "Balance entre reactivos y productos (CHON) TEÓRICO"
 "Carbono teórico"
 $CO_2+CH_4+2*C_2H_6+3*C_3H_8+4*C_4H_{10}+5*C_5H_{12}+6*C_6H_{14}=Xt$
 "Hidrógeno teórico"
 $4*CH_4+6*C_2H_6+8*C_3H_8+10*C_4H_{10}+12*C_5H_{12}+14*C_6H_{14}=2*Yt$
 "Oxígeno teórico"
 $2*CO_2+2*at=2*Xt+Yt$
 $Wt=Xt*2+Yt$
 "Nitrógeno teórico"
 $2*N_2+at*2*3,76=2*Zt$

```

"(CO2+N2+CH4+C2H6+C3H8+C4H10+C5H12+C6H14)+at(O2+3,76*N2) ----->
(Xt*CO2+Yt*H2O+Zt*N2+Wt*O2)"
"BALANCE REAL"
ar=n*at
"Carbono real"
CO2+CH4+2*C2H6+3*C3H8+4*C4H10+5*C5H12+6*C6H14=Xr
"Hidrógeno real"
3*CH4+6*C2H6+8*C3H8+10*C4H10+12*C5H12+14*C6H14=2*Yr
"Oxígeno real"
2*CO2+2*ar=2*Xr+Yr+2*Wr
"Nitrógeno real"
2*N2+ar*2*3,76=2*Zr
"Composición mezcla"
M_vim=(CO2+N2+CH4+C2H6+C3H8+C4H10+C5H12+C6H14)+ar*(1+3,76)

```

12. Código fuente en el software EES para el balance del GN VMM

```

"BALANCE ESTEQUIOMÉTRICO GN Cuenca Valle Medio Magdalena"
O2_c=0,00201
CO2=0,01033
N2=0,002645
CH4=0,912258
C2H6=0,047007
C3H8=0,013839
C4H10=0,004464
C5H12=0,0003022
C6H14=0,0004425
"(O2_c+CO2+N2+CH4+C2H6+C3H8+C4H10+C5H12+C6H14)+at(O2+3,76*N2) ----->
(Xt*CO2+Yt*H2O+Zt*N2)"
"Balance entre reactivos y productos (CHON) TEÓRICO"
"Carbono teórico"
CO2+CH4+2*C2H6+3*C3H8+4*C4H10+5*C5H12+6*C6H14=Xt
"Hidrógeno teórico"
4*CH4+6*C2H6+8*C3H8+10*C4H10+12*C5H12+14*C6H14=2*Yt
"Oxígeno teórico"
2*O2_c+2*CO2+2*at=2*Xt+Yt
Wt=Xt*2+Yt
"Nitrógeno teórico"
2*N2+at*2*3,76=2*Zt
"(O2_c+CO2+N2+CH4+C2H6+C3H8+C4H10+C5H12+C6H14)+at(O2+3,76*N2) ----->
(Xt*CO2+Yt*H2O+Zt*N2+Wt*O2)"
"BALANCE REAL" ar=n*at
"Carbono real"
CO2+CH4+2*C2H6+3*C3H8+4*C4H10+5*C5H12+6*C6H14=Xr
"Hidrógeno real"
4*CH4+6*C2H6+8*C3H8+10*C4H10+12*C5H12+14*C6H14=2*Yr
"Oxígeno real"
2*CO2+2*ar=2*Xr+Yr+2*Wr
"Nitrógeno real"
2*N2+ar*2*3,76=2*Zr
"Composición mezcla"
M_vmm=(O2_c+CO2+N2+CH4+C2H6+C3H8+C4H10+C5H12+C6H14)+ar*(1+3,76)

```