

**ESTUDIO ANALÍTICO PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DE LA TASA DE  
INYECCIÓN DE AIRE SOBRE LOS PERFILES DE TEMPERATURA Y LOS  
GASES DE COMBUSTIÓN MEDIANTE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UNA  
PRUEBA DE TUBO**

**FABIÁN CAMILO YATTE GARZÓN**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2011**

**ESTUDIO ANALÍTICO PARA DETERMINAR LA INFLUENCIA DE LA TASA DE  
INYECCIÓN DE AIRE SOBRE LOS PERFILES DE TEMPERATURA Y LOS  
GASES DE COMBUSTIÓN MEDIANTE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UNA  
PRUEBA DE TUBO**

**FABIÁN CAMILO YATTE GARZÓN**

Trabajo de grado presentado como requisito para obtener el título de Magister en  
Ingeniería de Hidrocarburos

**M.Sc. SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO**

**DIRECTOR**

**M.Sc. CARLOS EDUARDO NARANJO SUAREZ**

**Co-DIRECTOR**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO – QUÍMICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS**

**BUCARAMANGA**

**2011**

## **DEDICATORIA**

**A Dios Por Dar-me La Oportunidad De Vida Y De Ser Quien Soy**

**A Mis Padres Jair E Isabel Por El Apoyo, Compañía Y Amor Incondicional Que Siempre Me Han Brindado**

**Papa Por Tenerte Presente, Mama Por El Cariño Y Fortaleza De Siempre**

**A Mi Hermanita María Paula Por Ser Una Motivación Y Chispa De Alegría En Mi Vida**

**A Mi Hermano Andrés Por Ser Mi Hermano, Mi Amigo Y Mi Compañero**

**A Mi Hermosa Yolanda A Quien Adoro Mucho. Por Su Único, E Incondicional Amor Y Compresión. Por Ser Mi Presente Y Mi Futuro**

**A mis abuelos y toda mi familia que ha crecido a mi lado deseándome siempre lo mejor**

**A mis amigos Fon, Negro, Forero, Herman, Juancho, Míguelo**

**Al profesor Samuel por tantos años de apoyo y de Sabiduría trasmitida. Infinita Gratitude por ser el Mentor y Guía del Camino Profesional del cual soy parte**

**A todos Mis compañeros e integrantes del grupo de Investigación Recobro Mejorado que hicieron parte de mi vida los últimos años**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al profesor Samuel Muñoz N por sus valiosos aportes y consejos.

Al Ingeniero Carlos Naranjo por su tiempo, opiniones, apoyo y confianza.

A la Ingeniera Diana Mercado por sus contribuciones y aportes.

Al Ingeniero Dubert Gutiérrez por las enseñanzas y asesorías.

A mis compañeros de oficina, Nelson, Fernando, Erika, Jorge, Yennifer, Luis, por tantos momentos compartidos, momentos de apoyo, risa y amistad.

A todos mis auxiliares, Alejandro, Yorleth, Carlos P, Luis O, Andrea O, Sandra V, Diana J, Paola M, Adriana O, por ser tan especiales, responsables, inteligentes y buenas personas; tienen un futuro promisorio por delante.

A Ecopetrol-ICP, por la información y demás oportunidades.

A Computer Modelling Group Latin America (CMG-LA), especialmente a Víctor Lara por sus consejos y asesorías en la herramienta; por su amistad.

A expertos en el tema que tuve la gran oportunidad de escuchar y con los cuales pude intercambiar ideas que aportaron significativamente para el desarrollo de la investigación. J Belgrave, Yuccel Akkutlu, Dubert Gutiérrez, Eider Niz Velásquez.

A Dios y a la vida

## CONTENIDO

	Pag.
INTRODUCCIÓN .....	24
1. ANTECEDENTES DE LAS VARIABLES DE INTERÉS EN PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN.....	27
1.1 GENERALIDADES DE LA COMBUSTION IN SITU .....	28
1.2 PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN.....	32
1.2.1 Esquema general de una prueba de tubo. ....	33
1.2.2 Procedimiento. ....	37
1.2.3 Variables involucradas en pruebas de tubo.....	38
1.2.4 Importancia de las pruebas de tubo. ....	40
1.2.5 Limitantes de las pruebas de tubo.....	41
1.3 ROL DE LOS GASES DE COMBUSTION Y LOS PERFILES DE TEMPERATURA EN PRUEBAS DE TUBO.....	42
1.3.1 Gases de combustión en procesos de combustión in situ.....	44
1.3.2 Perfiles de temperatura en pruebas de tubo. ....	49
1.3.3 Picos de temperatura. ....	52
1.4 INFLUENCIA DE LA TASA DE INYECCIÓN DE AIRE EN PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN.....	56
1.4.1 Consideraciones sobre la influencia de la tasa de inyección de aire en pruebas de tubo de combustión. ....	56
1.4.2 Estudio experimental por Martin y Alexander. ....	59

2. CONSTRUCCIÓN MODELO BASE DE SIMULACIÓN DE UNA PRUEBA DE TUBO PARA UNA MUESTRA REPRESENTATIVA DE UN CAMPO COLOMBIANO.....	67
2.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO BASE PARA LA MUESTRA REPRESENTATIVA A1 .....	67
2.1.1 Definición del emallado de simulación para el caso base. ....	68
2.1.2 Modelo de fluidos – Caso base. ....	70
2.1.3 Modelo de reacciones – Caso base. ....	71
2.1.4 Propiedades interacción roca-fluido – Caso base. ....	73
2.1.5 Calendario Inyección Producción – Caso base. ....	74
2.1.6 Ubicación de los calentadores – Caso base.....	75
2.1.7 Variables de salida – Caso Base.....	76
2.2 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS INICIALES .....	77
2.3 CREACIÓN DE ARCHIVOS HISTÓRICOS .....	84
2.4 COMPARACIÓN ARCHIVOS HISTÓRICOS CON RESULTADOS DE SIMULACIÓN .....	85
2.5 PROBLEMAS PRESENTADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL CASO BASE .....	90
3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE VARIABLES Y AJUSTE HISTÓRICO DEL MODELO BASE DE SIMULACIÓN PARA LA MUESTRA A1 .....	91
3.1 ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL ENMALLADO (GRID).....	92
3.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA CONFIGURACIÓN DEL TUBO Y PROPIEDADES TÉRMICAS .....	95

3.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARAMETROS ASOCIADOS AL MODELO DE REACCIONES QUIMICAS .....	99
3.3.1 Esquema de reacciones empleado en el modelo de simulación. ....	100
3.3.2 Parámetros cinéticos empleados en el modelo de reacciones. ....	101
3.3.3 Análisis de sensibilidad primer grupo de parámetros asociados a la cinética de reacción.....	102
3.3.4 Análisis de sensibilidad segundo grupo de parámetros asociados a la cinética de reacción.....	110
3.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA TASA NETA DE CALOR PROPORCIONADA POR LOS CALENTADORES .....	114
3.5 AJUSTE HISTÓRICO DE VARIABLES .....	115
3.5.1 Primer Nivel de ajuste. ....	117
3.5.2 Segundo Nivel de ajuste.....	120
3.5.3 Tercer Nivel de Ajuste (Definitivo). ....	129
4. DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA TASA DE INYECCIÓN DE AIRE SOBRE LOS PERFILES DE TEMPERATURA Y LOS GASES DE COMBUSTIÓN .....	135
4.1 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LA DATA .....	136
4.2 PERFILES DE TEMPERATURA .....	139
4.2.1 Picos de Temperatura. ....	141
4.2.2 Depositación y consumo de coque.....	147
4.2.3 Velocidad del frente de combustión.....	155
4.2.4 Temperaturas Promedio.....	161
4.3 GASES DE COMBUSTIÓN .....	166

4.3.1 Fracción molar de CO <sub>2</sub> producido .....	167
4.3.2 Fracción molar de O <sub>2</sub> y N <sub>2</sub> producido. ....	171
4.4 PARAMETROS DE COMBUSTIÓN.....	173
4.4.1 Relación aparente Hidrogenó/Carbono (H/C).....	174
4.4.2 Relación (CO <sub>2</sub> +CO)/N <sub>2</sub> .....	175
4.4.3 Oxígeno reaccionado convertido a óxidos de carbono (FO <sub>2</sub> R%).....	175
4.4.4 Relación Aire Combustible RAC (Pcs/lbm).....	176
4.4.5 Requerimientos de aire RA (Pcs/pc roca). ....	177
4.4.6 Requerimientos de combustible RC (lbm/pc roca). ....	180
4.5 ANÁLISIS MULTIVARIABLE .....	181
CONCLUSIONES .....	184
RECOMENDACIONES .....	185
BIBLIOGRAFIA.....	186
ANEXOS.....	191

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema general de un proceso de combustión frontal seca .....	29
Figura 2. Principales características de las reacciones de combustión .....	30
Figura 3. Tubo de Combustión.....	32
Figura 4. Esquema General de una prueba de Tubo de Combustión.....	34
Figura 5. Chaqueta presurizadora .....	35
Figura 6. Tipos de variables en pruebas de tubo .....	39
Figura 7. Prueba de Tubo en modo LTO .....	43
Figura 8. Prueba de Tubo en modo HTO.....	43
Figura 9. Perfil de temperatura en modo LTO. Corrida 1 .....	50
Figura 10. Perfil de temperatura en modo HTO. Corrida 2 .....	51
Figura 11. .Correlación CO <sub>2</sub> % Vs. Picos de temperatura °F .....	53
Figura 12. Correlación H/C Vs. Picos de temperatura °F.....	53
Figura 13. Correlación FO <sub>2</sub> R (100%) Vs. Picos de temperatura °F.....	54
Figura 14. Avance del frente Vs Flujo de aire. (Crudo 21 °API-Corridas No 13 a 18) .....	61
Figura 15. Efecto del consumo de oxígeno en la velocidad de avance del frente (Crudo 21 °API-Corridas No 13 a 18) .....	62
Figura 16. Eficiencia de combustión (% de oxígeno consumido).....	63
Figura 17. Comparación % Consumo de oxígeno- Flujo de aire y velocidad del frente.....	64
Figura 18. Requerimientos de aire vs flujo de aire inyectado .....	65
Figura 19. Variables de estudio en la presente investigación .....	66
Figura 20. Configuración del tubo y grid de simulación (modelo base).....	68
Figura 21. Modelo de reacciones.....	72
Figura 22. Calendario inyección producción .....	74
Figura 23. Vista lateral 2D, coeficiente transferencia de calor Btu/dia-°F .....	75

Figura 24. Ubicación de las termocuplas (puntos negros), vista lateral .....	77
Figura 25. Perfil de temperaturas - Caso base .....	78
Figura 26. Temperaturas máximas y temperaturas promedio - Caso base .....	79
Figura 27. Depositación de coque .....	80
Figura 28. Fracción molar de los gases de combustión producidos - Caso base ..	81
Figura 29. Posición del frente de a 353°F y 848°F .....	82
Figura 30. Perfil de propiedades 2D (Temperatura, Depositación coque, Saturación de aceite) .....	83
Figura 31. Comparación caso base contra histórico para el perfil de temperaturas (TC ubicadas en K=2, 14, 26) .....	85
Figura 32. Comparación caso base contra histórico para el perfil de temperaturas (TW1 ubicadas en K=38, 50, 62) .....	86
Figura 33. Comparación caso base contra histórico para temperaturas promedio y máximas registradas durante la prueba .....	87
Figura 34. Comparación caso base contra histórico para fracciones molares de los gases de combustión producidos.....	88
Figura 35. Comparación caso base contra histórico para las posiciones del frente a 353° y 848°F .....	89
Figura 36. Funciones objetivo y parámetros de variación .....	91
Figura 37. Perfil de temperatura en 2D para análisis de sensibilidad espesor de la celda en dirección Ka las 23.5 horas .....	93
Figura 38. Análisis del grid con respecto a los picos de temperatura, concentración de coque, posición del frente y temperatura promedio .....	94
Figura 39. Resultados del diseño experimental factorial de la configuración del tubo y parámetros térmicos con relación a la temperatura promedio .....	96
Figura 40. Constantes de Arrhenius contra temperatura. Representa la reactividad con las parámetros cinéticos base.....	102
Figura 41. Resultados del diseño experimental factorial parámetros cinéticos I con relación a la temperatura promedio .....	103

Figura 42. Diagrama tornado del % de influencia de parámetros cinéticos I sobre la temperatura promedio objetivo .....	104
Figura 43. Resultados del diseño experimental factorial parámetros cinéticos I con relación a los picos de temperatura .....	105
Figura 44. Diagrama tornado del % de influencia de parámetros cinéticos I, sobre los picos de temperatura objetivo .....	106
Figura 45. Diagrama tornado del % de influencia de parámetros cinéticos I sobre la fracción molar objetivo de CO <sub>2</sub> .....	107
Figura 46. Resultados del diseño experimental factorial parámetros cinéticos I con relación a la posición del frente de combustión a 848°F .....	108
Figura 47. Comparación mejores casos para el análisis del primer grupo de parámetros cinéticos con el caso base y los archivos históricos de la prueba experimental .....	109
Figura 48. Diagrama tornado del % de influencia de parámetros cinéticos II sobre la temperatura promedio objetivo .....	111
Figura 49. Diagrama tornado del % de influencia de parámetros cinéticos II sobre los picos de temperatura objetivo .....	112
Figura 50. Resultados del diseño experimental factorial parámetros cinéticos II con relación a la fracción molar de CO <sub>2</sub> producida .....	112
Figura 51. Diagrama tornado del % de influencia de parámetros cinéticos I sobre la fracción molar objetivo de CO <sub>2</sub> .....	113
Figura 52. Resultados del análisis de sensibilidad de la tasa neta de generación de calor sobre las diferentes funciones objetivo .....	114
Figura 53. Resultados primer nivel ajuste histórico. % error global Vs número de corrida .....	118
Figura 54. Comparación Resultados primer nivel ajuste histórico mejor caso, caso base e históricos medidos. ....	119
Figura 55. Análisis de la velocidad de reacción de combustión a partir de la energía de activación (Reacción 4) .....	122

Figura 56. Análisis de la velocidad de reacción de generación de coque a partir de la energía de activación (Reacción 3).....	124
Figura 57. Análisis de la velocidad de reacción de generación de coque a partir de la energía de activación (Reacción 2).....	125
Figura 58. Análisis del coeficiente estequiometrico del CO2 en la reacción de combustión.....	128
Figura 59. Resultados finales del ajuste histórico .....	129
Figura 60. Perfil de temperaturas 1 caso ajuste definitivo .....	133
Figura 61. Perfil de temperaturas 2 caso ajuste definitivo .....	134
Figura 62. Perfil de temperaturas 3 caso ajuste definitivo .....	134
Figura 63. Etapas para llevar a cabo el estudio analítico de la tasa de inyección de aire.....	135
Figura 64. Recolección y evaluación de datos.....	137
Figura 65. Duración total de la prueba Vs. Tasa de Inyección de aire (TIA).....	138
Figura 66. Perfiles de temperatura para diferentes tasas de inyección de aire (80, 160, 270, 400).....	140
Figura 67. Picos de temperatura máxima a diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d). Duración de las pruebas 27 horas.....	141
Figura 68. Picos de temperatura máxima a diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d). Duración de las pruebas variable .....	142
Figura 69. Diagrama de Cajas para los picos de temperatura máxima a diferentes tasas de inyección de aire. ....	143
Figura 70. Histograma para los picos de temperatura máxima a diferentes tasas de inyección de aire.....	144
Figura 71. Regresión picos de temperatura máxima a diferentes tasas de inyección de aire.....	146
Figura 72. Depositación de coque a diferentes tasas de inyección de aire. Duración de las pruebas 27 horas .....	147
Figura 73. Depositación de coque a diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d). Duración de las pruebas variable.....	148

Figura 74. Diagrama de cajas para la depositación de coque a diferentes tasas de inyección de aire. ....	149
Figura 75. Histograma para la depositación de coque a diferentes tasas de inyección de aire. ....	150
Figura 76. Regresión picos de temperatura máxima a diferentes tasas de inyección de aire. ....	152
Figura 77. Perfiles de coque depositado, fracción molar de $C_{21-30}$ , y fracción molar de vapor de agua a diferentes tasas de inyección de aire. ....	153
Figura 78. Factor de recobro y saturación de aceite promedio para diferentes TIA. ....	154
Figura 79. Posición del frente a 848°F para diferentes tasas de inyección de aire. Duración de las pruebas 27 horas ....	156
Figura 80. Posición del frente a 343°F para diferentes tasas de inyección de aire. Duración de las pruebas variable. ....	157
Figura 81. Diagrama de Cajas para la velocidad media del frente para una temperatura de 848°F y a diferentes tasas de inyección de aire. ....	158
Figura 82. Posición del frente a 343°F para una TIA de 360. Intervalo de tiempo y posición reducido. ....	159
Figura 83. Histograma para la velocidad media del frente a un temperatura de 848°F a diferentes tasas de inyección de aire. ....	160
Figura 84. Regresión velocidad media del frente de combustión a una temperatura de 848°F para diferentes tasas de inyección de aire. ....	161
Figura 86. Temperatura promedio para diferentes tasas de inyección de aire. Duración de las pruebas variable. ....	162
Figura 87. Diagrama de Cajas para las temperaturas promedio a diferentes tasas de inyección de aire. ....	163
Figura 88. Perfiles de temperatura y fracción molar de agua en 2D a diferentes tasas de inyección de aire. ....	163
Figura 89. Histograma para las temperaturas promedio a diferentes tasas de inyección de aire. ....	165

Figura 90.Regresión temperaturas promedio para diferentes tasas de inyección de aire.....	166
Figura 91. Fracción molar de CO <sub>2</sub> producido para diferentes tasas de inyección de aire. Duración de las pruebas 27 horas .....	168
Figura 92. Fracción molar de CO <sub>2</sub> producido para diferentes tasas de inyección de aire. Duración de las pruebas variables.....	168
Figura 93. Diagrama de Cajas para la fracción molar de CO <sub>2</sub> producido diferentes tasas de inyección de aire. ....	169
Figura 94.Histograma para las temperaturas promedio a diferentes tasas de inyección de aire.....	170
Figura 95. Diagrama de Cajas para la fracción molar de O <sub>2</sub> producido diferentes tasas de inyección de aire. ....	172
Figura 96. Diagrama de Cajas para la fracción molar de N <sub>2</sub> producido diferentes tasas de inyección de aire. ....	173
Figura 97. Línea de Tendencia relación aparente H/C para diferentes tasas de inyección de aire.....	174
Figura 98.Línea de Tendencia relación CO+CO <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> para diferentes tasas de inyección de aire.....	175
Figura 99. Línea de TendenciaFO <sub>2</sub> R% para diferentes tasas de inyección de aire. ....	176
Figura 100. Línea de Tendencia RAC para diferentes tasas de inyección de aire. ....	177
Figura 101.Requerimientos de aire en función de las tasas de inyección de aire. ....	179
Figura 102.Regresión requerimientos de aire para diferentes tasas de inyección de aire.....	180
Figura 103.Regresión requerimientos de combustible para diferentes tasas de inyección de aire.....	180
Figura 104. Grafica de Interacción TIA, EA y Picos de Temperatura.....	182

Figura 105. Mapa de contorno para la interacción de TIA, Ea y Picos de Temperatura .....183

Figura 106. Superficie de respuesta 3D para la interacción de TIA, EA4 y Picos de Temperatura .....183

## LISTA DE TABLAS

Pág.

Tabla 1. Dimensiones del tubo de combustión empleados en diferentes laboratorios .....	36
Tabla 2. Parámetros obtenidos a partir de los gases producidos .....	44
Tabla 3. Rangos en los que predomina LTO y HTO a partir de la relación aparente H/C.....	46
Tabla 4. Rangos en los que predomina LTO y HTO a partir de la relación FO <sub>2</sub> R%. .....	47
Tabla 5. Regiones de operación y características .....	55
Tabla 6. Data experimental y condiciones de las pruebas (Crudo 28 API-Corrida 1) (Crudo 21 API-Corridas 13 a 18) .....	60
Tabla 7. Dimensiones del tubo de combustión (modelo base) .....	69
Tabla 8. Propiedades del grid .....	69
Tabla 9. Propiedades térmicas y petrofísicas del sistema .....	70
Tabla 10. Distribución del aceite en pseudo-componentes.....	71
Tabla 11. Propiedades básicas de los componentes.....	71
Tabla 12. End points – Curvas de permeabilidad relativa.....	73
Tabla 13. Propiedades de inyección y producción.....	75
Tabla 14. Características de los modelos empleados para análisis de sensibilidad del espesor de la celda en dirección K .....	93
Tabla 15. Variables para el análisis de la configuración del tubo y propiedades térmicas .....	97
Tabla 16. Tabla de influencia de la configuración del tubo y propiedades térmicas .....	98
Tabla 17. Parámetros cinéticos involucrados en el esquema de reacción planteado .....	101

Tabla 18. Primer grupo de parámetros cinéticos sometidos a análisis de sensibilidad.....	103
Tabla 19. Segundo grupo de parámetros cinéticos sometidos a análisis de sensibilidad.....	110
Tabla 20. Tabla de influencia de variables total sobre las funciones objetivo.....	116
Tabla 21. Parámetros y valores empleados en el primer nivel de ajuste histórico.....	117
Tabla 22. Porcentajes de error obtenidos en el mejor caso para las diferentes funciones objetivo. Ajuste primer nivel.....	120
Tabla 23. Análisis de la entalpia de reacción y los órdenes para la reacción de combustión (Reacción 4).....	123
Tabla 24. Análisis de la entalpia de reacción y los órdenes para la reacción de depositación de combustible (Reacción 2).....	126
Tabla 25. Resultados finales del ajuste histórico.....	130
Tabla 26. Comparación de parámetros de ajuste para los tres niveles de ajuste.....	132
Tabla 27. Parámetros estadísticos para los picos de temperatura máxima a diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d).....	145
Tabla 28. Parámetros estadísticos para la depositación de coque diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d).....	151
Tabla 29. Parámetros estadísticos para la velocidad media del frente a una temperatura de 848°Fy para diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d).....	160
Tabla 30. Parámetros estadísticos para la temperatura promedio a diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d).....	165
Tabla 31. Tiempos de duración y ruptura para las pruebas a diferentes TIA.....	167
Tabla 32. Parámetros estadísticos para la fracción molar de CO <sub>2</sub> a diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d).....	171
Tabla 33. Parámetros de combustión a diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d).....	174
Tabla 34. Requerimientos de aire en función de las tasas y flujos de inyección de aire para velocidades promedio del frente a 848°F.....	178

Tabla 35. Data empleada y resultados interacción TIA, EA con respecto a los picos de temperatura .....181

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. GENERALIDADES DEL MODELAMIENTO NUMERICO DE PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN-SITU .....	192
ANEXO 2. DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD MEDIANTE DISEÑO FACTORIAL FRACCIONAL $2^{K-P}$ .....	202

## RESUMEN

**TÍTULO:** ESTUDIO ANALÍTICO PARA DETERMINAR LOS EFECTOS DE LA TASA DE INYECCIÓN DE AIRE SOBRE LOS PERFILES DE TEMPERATURA Y LOS GASES DE COMBUSTIÓN MEDIANTE LA SIMULACIÓN NUMÉRICA DE UNA PRUEBA DE TUBO. \*

**AUTORES:** Ing. FABIÁN CAMILO YATTE GARZON\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Combustión In-situ, Inyección de aire, Pruebas de tubo, Crudos pesados, Recobro mejorado, Simulación numérica, Ajuste histórico.

La combustión in-situ es una técnica de recobro mejorado en crudo pesado, que se basa en la formación de un frente de combustión gracias a las reacciones químicas generadas por la mezcla entre el oxígeno y el hidrocarburo, producto de estas reacciones se obtienen mecanismos de desplazamiento térmicos, miscibles e inmiscibles. Diversos son los factores que afectan la formación y sostenimiento del frente de combustión, entre los principales se encuentra la tasa de inyección de aire, si esta es baja se incurre en la extinción del frente y si es alta se puede ver afectada la economía del proyecto.

Para estudiar la influencia de la tasa de inyección de aire, se recurre a pruebas de laboratorio denominadas pruebas de tubo, donde a partir del análisis de los gases de combustión y los perfiles de temperatura, es posible obtener información, que contribuye con el entendimiento del proceso y con los estudios de factibilidad técnica para la posible aplicación en campo.

En Colombia no se cuenta con este tipo de pruebas, pero si se cuenta con resultados de unas pruebas llevadas a cabo en los laboratorios de la universidad de Calgary en Canadá para una muestra de un yacimiento colombiano, suministradas por Ecopetrol-ICP. Por lo tanto se construyó un modelo numérico representativo de dicha prueba, se ajustaron los resultados con los obtenidos experimentalmente, y se llevó a cabo el estudio para evaluar la influencia de la tasa de inyección de aire sobre el proceso; por último se establecieron las posibles tasas óptimas que generaron las más altas temperaturas y las mejores eficiencias de consumo de combustible con la menor cantidad de aire.

\* Trabajo de Investigación.

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Ingeniería de Petróleos.

Director: M.Sc. Samuel Fernando Muñoz Navarro. Co director: M.Sc. Carlos Eduardo Naranjo Suarez

## ABSTRACT

**TÍTULO:** ANALYTICAL STUDY TO DETERMINE THE INFLUENCE OF THE AIR INJECTION RATE ON THE TEMPERATURE PROFILES AND THE COMBUSTION GASES THROUGH THE NUMERICAL SIMULATION OF A TUBE TEST\*

**AUTHOR:** Ing. FABIÁN CAMILO YATTE GARZON\*\*

**KEYWORDS:** In-Situ Combustion In-situ, Air Injection, Combustion Tube test, Heavy oil, Enhanced oil recovery, Numerical Simulation, History Matching.

In-situ combustion is an enhanced recovery technique for heavy oils that is based on the formation of a combustion front thanks to the chemical reactions generated by the combination between the hydrocarbon and oxygen; as a product of this reaction miscible and immiscible displacement mechanisms are obtained. The factors that affect the formation and the combustion front maintenance are diverse in which it is possible to find the air injection rate; if it is low, it can fall into the extinction of the front but if it is high, the economy of the project can be affected.

In order to study the influence of the air injection rate, it is necessary to use laboratory tests called tube tests; where, starting from the analysis of the combustion gases and the temperature profiles it is possible to obtain information that contributes with the understanding of the process as well as the technical feasibility studies for a possible application in a field.

In Colombia it is not possible to carry out such tests but it relies on the results from some tests carried out in the Calgary University laboratories from a sample of a Colombian field, provided by Ecopetrol-ICP. Therefore, a representative numerical model of that test was built, the results were adjust with the ones that were experimentally obtained, and a study to evaluate the influence of the air injection rate over the process was carried out; finally it was established the possible optimum rates that generated the highest temperatures and the best efficiencies of oil consumption with the least amount of air.

\* Research Work.

\*\* Faculty of Engineering Physical Chemistry. School of Petroleum Engineering..

Director: M.Sc. Samuel Fernando Muñoz Navarro.

## INTRODUCCIÓN

La combustión in-situ es una técnica de recobro mejorado de crudo pesado, basada en la generación de mecanismos de desplazamiento térmicos, miscibles e inmiscibles. Estos mecanismos se dan gracias a las reacciones químicas entre el aire inyectado y el hidrocarburo en yacimiento. Una de las principales consecuencias de las reacciones químicas, reside en que permiten la depositación y consumo de un combustible denominado coque. El coque constituye la fracción más pesada del crudo y por lo tanto la combustión de este genera temperaturas entre los 800°F a 1200°F. Esta zona de consumo de combustible y altas temperaturas dentro del medio poroso, es denominada frente de combustión. La propagación de este frente desde el pozo inyector al pozo productor proporciona una alta eficiencia de barrido microscópica.

Dentro de los principales estudios para determinar la factibilidad de aplicación de la combustión in-situ en un campo específico, se encuentran las pruebas de tubo de combustión. Estas son simuladores físicos que permiten la evaluación del comportamiento de quema y por lo tanto la propagación del frente de combustión, bajo condiciones controladas lo más cercanamente posible a las de yacimiento.

Parte de la información relevante obtenida a partir de las pruebas de tubo, son los perfiles de temperatura y los gases de combustión. El análisis de estos permite estimar parámetros asociados con la eficiencia de combustión y con el desarrollo de proyecciones de tipo técnico y económico para la aplicación del proceso a escala de campo. Dentro de los principales parámetros se destacan, picos de temperatura, eficiencia de consumo de oxígeno, requerimientos de aire y combustible, por unidad de volumen de yacimiento quemado.

Una de las limitantes de las pruebas de tubo, que se asienta aún más, si no se cuenta con estas propiamente, como es el caso de las empresas petroleras colombianas; radica en que dados los costos asociados con el equipo, materiales

y procedimientos, contratar servicios externos para llevar a cabo múltiples pruebas con diversas muestras del mismo yacimiento resulta poco rentable. Luego variables tales como la tasa de inyección de aire, la cual influencia de manera significativa el comportamiento de quema, no pueden ser evaluadas en detalle. Por otro lado la simulación numérica ofrece la oportunidad de construir modelos de tubo de combustión a escala de los modelos físicos y de esta manera realizar estudios profundos de las variables implicadas en el proceso, sin mayores costos asociados.

Dado que Colombia cuenta con importantes yacimientos de crudo pesado, la aplicación de combustión in-situ como método de recobro resulta una importante alternativa, ya sea de manera inmediata o posterior a otros métodos térmicos, tales como inyección de vapor. Sin embargo, si bien se ha probado que la técnica puede llegar a tener una alta eficiencia de recuperación de crudo, también es sabido que dada la complejidad de la misma, resulta imprescindible el desarrollo de pruebas de laboratorio y modelamiento numérico previo a la aplicación de esta en un yacimiento específico.

La presente investigación se llevó a cabo con el fin de contribuir en el desarrollo, análisis y evaluación de pruebas de factibilidad técnica, para un yacimiento colombiano de crudo pesado. Por lo cual ECOPETROL-ICP suministro los resultados de una prueba de tubo de combustión llevada a cabo en una muestra representativa de dicho yacimiento, en los laboratorios de la universidad de Calgary en Canadá.

Con los resultados de la prueba de tubo e información adicional suministrada, asociada con las propiedades roca fluido y el esquema de reacciones químicas representativo para la muestra de estudio, se construyó una prueba de tubo mediante simulación numérica, a escala de la prueba experimental, a partir del software comercial STARS de CMG.

Construido el modelo numérico de tubo de combustión, se efectuó un análisis de sensibilidad de variables mediante el software CMOST de CMG. Este análisis permitió establecer el porcentaje de influencia de las variables de entrada previamente seleccionadas, sobre variables de respuesta tales como, picos de temperatura, posición del frente y concentración de los gases producidos. Posteriormente se realizó el ajuste histórico de variables entre el modelo de numérico y experimental.

Una vez el modelo fue ajustado lo más aproximadamente posible, se procedió con la parte principal de la investigación. Ya que este es un estudio de tipo analítico el cual busca establecer asociaciones y relaciones entre la tasa de inyección de aire (variable de entrada), los perfiles de temperatura (variable de salida), y los gases de combustión (variable de salida), se empleó la simulación numérica, la teoría de diseño de experimentos y técnicas estadísticas básicas para tal fin.

Fueron ejecutadas corridas de simulación con diferentes tasas de inyección de aire, sobre las cuales se realizó un análisis cualitativo de su influencia en las variables de respuesta. Posteriormente los resultados obtenidos mediante simulación numérica fueron exportados a un software estadístico, en donde se construyeron diagramas de caja, histogramas, regresiones numéricas y fueron determinados parámetros estadísticos básicos, que permitieron un mayor entendimiento de los efectos y mecanismos asociados a la tasa de inyección de aire. Por ultimo a partir de esta misma herramienta estadística, fue posible determinar la influencia de dicha variable de entrada sobre parámetros de combustión tales como requerimientos de aire, requerimientos de combustible y eficiencia de consumo de oxígeno; vitales para el diseño y posterior aplicación de la técnica en campo.

## 1. ANTECEDENTES DE LAS VARIABLES DE INTERÉS EN PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN

Las variables de importancia en la presente investigación de tipo analítica son las siguientes: tasa de inyección de aire, perfiles de temperatura, y concentración de los gases de combustión, por lo tanto este capítulo está centrado en la recopilación de los principales estudios e hipótesis reportadas en la literatura, asociadas a dichas variables. Países como Canadá, USA (United States of America), India e Inglaterra, entre otros, cuentan con laboratorios adecuados para el estudio de la CIS (Combustión In-Situ). Principalmente Canadá<sup>1</sup> y USA presentan una significativa cantidad de artículos reportados en bases de datos acerca de pruebas de tubo. Razón por la cual gran parte de la información recopilada es proveniente de investigaciones llevadas a cabo en laboratorios ubicados en las principales ciudades y universidades de estos países.

En este primer capítulo se dan a conocer las generalidades del proceso, la descripción de las reacciones y mecanismos de desplazamiento involucrados en este. Sin embargo se sugiere al lector que quiere profundizar en los conceptos básicos y otros aspectos relacionados con el tema recurrir al *Handbook* de Sarathi<sup>2</sup> y demás referencias publicadas al final del documento.

De acuerdo con la revisión llevada a cabo, los temas que contribuyeron para el desarrollo de la investigación y por lo tanto hacen parte de este capítulo introductorio, fueron los siguientes: 1- pruebas de tubo de combustión, herramientas y equipos empleados, procedimiento, importancia, limitantes y principales estudios. 2- el rol de los perfiles de temperatura y los gases de combustión en los procesos de CIS. 3- recopilación bibliográfica de las principales observaciones de expertos e investigadores, relacionadas con la influencia e

---

<sup>1</sup> MOORE R, G. LAURSHEN M,G. URSENBACH M,G. METHA R. BELGRAVE J,D. "a Canadian perspective on in situ combustion" University of Calgary. JCPT. Vol. 38. No. 13. Special Edition 1999. pp 1-8

<sup>2</sup> SARATHI S. P. In situ combustion Handbook. Principles and Practices. BDM Petroleum Technologies. National Petroleum Technology Office. Oklahoma. January 1999. pp 2-5

importancia que tiene la tasa de inyección de aire en procesos CIS a nivel de laboratorio y de campo.

## 1.1 GENERALIDADES DE LA COMBUSTION IN SITU

Un proceso de combustión in-situ, CIS o ISC (por sus siglas en inglés *In-situ Combustión*) hace referencia a la inyección de aire en crudos pesados, mientras que la inyección de aire en crudos livianos, es comúnmente denominada HPAI<sup>3</sup> (por sus siglas en inglés- *High Pressure Air Injection*). El presente trabajo de investigación está enfocado únicamente en combustión in situ frontal en seco, puesto que existen múltiples variaciones<sup>4</sup> de la técnica sin embargo esta ha sido la más empleada hasta el día de hoy.

La combustión in situ frontal seca, es un proceso en el cual se inyecta aire comprimido desde superficie (ver figura 1), a la zona de interés con el fin de generar diversas reacciones químicas<sup>5</sup>, las cuales se forman a partir de la mezcla del aire y los componentes hidrocarburos. Inicialmente el aire se difunde en el medio poroso cerca a la cara del pozo produciendo reacciones denominadas de oxidación a bajas temperaturas LTO (por sus siglas en inglés *Low Temperature Oxidation*) o también conocidas como reacciones de adición<sup>6</sup>. Estas se encargan de aumentar la temperatura, puesto que son exotérmicas y juegan un papel importante en la ignición del crudo. El predominio de este tipo de reacciones puede llegar a ser perjudicial para el éxito del proceso.

A medida que aumenta la cantidad de aire en el yacimiento y una que vez se da un considerable aumento de temperatura, el cual va depender de factores tales como la temperatura inicial del yacimiento y la composición del crudo, se inician

<sup>3</sup> MONTES, A.R., MOORE, R., MEHTA, R. URSENBACH, M. GUTIERREZ D." Is High Pressure Air Injection (HPAI) Simply a Flue-Gas Flood?" Canadian international petroleum conference. CMG, University of Calgary. Paper 180. June 2008. pp 1-9.

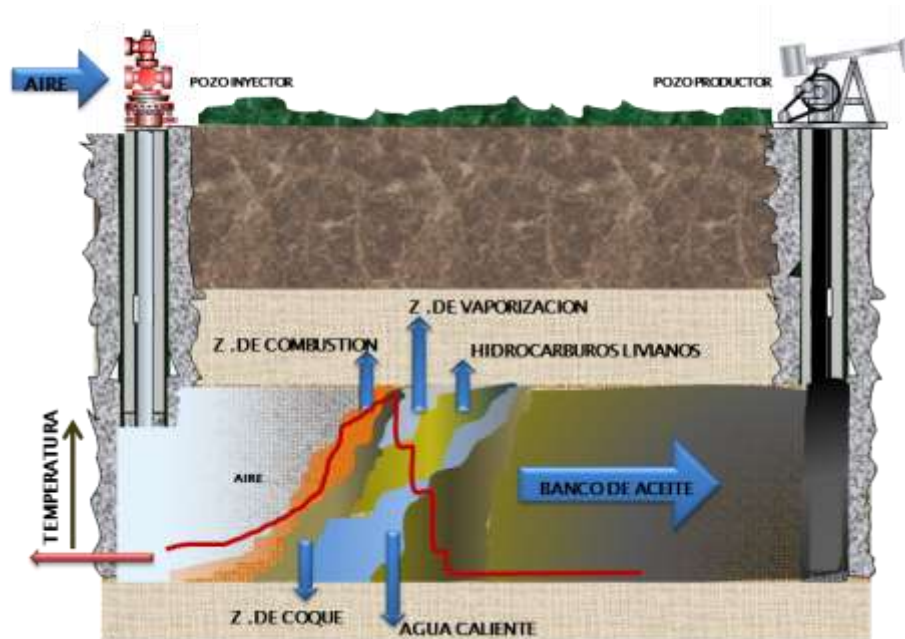
<sup>4</sup> SHEN, C. "Limitations and Potentials of In- Situ Combustion Processes for Heavy Oil Reservoirs". Canadian International Petroleum Conference. CreSim Technologies. Calgary, Alberta, Canada. Paper 217. June. 2002. pp 1-14

<sup>5</sup> MAHINPEY N. AMBALAE, A. ASGHARI K. "In situ combustion in enhanced oil recovery (EOR): A review". Faculty Engineering, University of Regina. Regina Canadá. Taylor & Francis Group. 2007. pp 995-1021

<sup>6</sup> MOORE R.G., MEHTA, S.A., URSENBACH, M.G., LAURESHEN, C.J. Strategies For Successful Air Injection-Based IOR Processes Paper No. 135, October 27-30, 1998. pp 1-6

las reacciones endotérmicas de pirolisis. En estas el crudo es separado en fracciones livianas (Vapor), intermedias (Líquido), pesadas (Sólido). La fracción de livianos al igual que las intermedias libres de componentes pesados, fluyen en dirección del pozo productor y contribuirán al desplazamiento del crudo inalterado, como se puede apreciar en la figura 1.

**Figura 1.** Esquema general de un proceso de combustión frontal seca



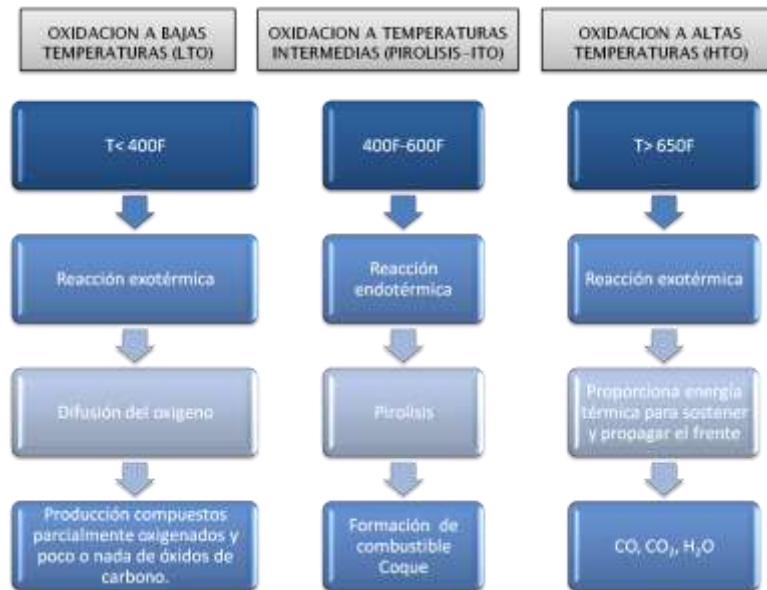
Fuente: El autor

La parte sólida formada a partir de reacciones de pirolisis, es denominada coque, este es el combustible principal para generar el tercer tipo de reacciones llamadas reacciones de oxidación a alta temperatura HTO (por sus siglas *High Temperature Oxidation*) o también reacciones de rompimiento, o simplemente reacciones de combustión. En la figura 2 se presenta un cuadro comparativo de las principales características de los tres tipos de reacciones generadas en yacimiento anteriormente mencionadas.

La reacción química entre el aire inyectado y el coque, genera un frente de combustión, el cual presenta las temperaturas más altas<sup>7</sup> (600 a 1200°F) durante el proceso, de esta manera se consigue la disminución de la viscosidad del crudo en cercanías a este (Ver figura 1). Debido a que esta es una reacción de combustión, se obtendrán como productos agua y óxidos de carbono, los cuales contribuirán al desplazamiento de crudo.

La clave de un proceso de combustión in-situ es poder generar rápidamente el frente en modo de alta temperatura HTO y mantenerlo estable desde el pozo inyector hasta el pozo productor, sin embargo este se ve influenciado por parámetros operacionales (tasa de inyección de aire, presión de inyección), de roca (litología, heterogeneidad, porosidad, permeabilidad), de fluido (composición) y por la eficiencia de las reacciones previas (adición y pirolisis).

**Figura 2.** Principales características de las reacciones de combustión



Fuente: El autor

Si se logra controlar el frente, el proceso ofrece diversos mecanismos de recuperación gracias a las diferentes reacciones químicas tales como: térmicos,

<sup>7</sup> CRAWFORD P.B. Chu C. Improve oil Recovery. Interstate oil compact commission. Chapter VI In situ combustion. Oklahoma city. 1983.

de desplazamiento miscible e inmisible, por esta razón algunos autores<sup>8</sup> consideran que la combustión in situ no puede ser catalogado únicamente como un proceso térmico.

Dentro de las principales ventajas que ofrece un proceso de combustión se encuentran:

- Térmicamente es el proceso de recobro más eficiente
- Disponibilidad del aire (fluido inyectado al yacimiento)
- La tecnología ha sido probada en diferentes escenarios de yacimientos (crudo pesado somero & crudo liviano profundo)
- Alta eficiencia de barrido microscópica, fenómeno conocido como efecto buldócer<sup>9</sup>.
- Puede ser aplicado en casos donde la inyección de agua y la inyección de vapor no son efectivas
- Puede ser aplicado donde se han desarrollado otras técnicas EOR como : inyección de químicos e inyección de CO<sub>2</sub>
- Ofrece un mejoramiento a la calidad del crudo gracias a la pirolisis del crudo, fenómeno conocido como *Upgrading*<sup>10</sup>

El proceso ha sido conocido en los últimos años más por sus problemas y desaciertos, que por los beneficios que puede llegar a presentar, gracias a los múltiples proyectos fallidos a través de la historia. Sin embargo autores como Moore et al<sup>11</sup>. Atribuyen este hecho a malas prácticas ingenieriles y desconocimiento del proceso. A continuación se presentan algunas de las principales desventajas.

- La compresión de aire y la operación puede resultar costosa

<sup>8</sup> SARATHI S. Op.Cit, "In situ combustion Handbook. Principles and Practices" 1999.

<sup>9</sup> URSENBACH, M.G. MOORE, R.G. MEHTA, R. Air Injection in Heavy Oil Reservoirs—A Process Who's Time Has Come (Again). Canadian International Petroleum Conference. Calgary, Alberta, June 2007.pp 48-54

<sup>10</sup> Working Document of the NPC Global Oil & Gas Study Made Available July 18, 2007 .TOPIC PAPER #22 HEAVY OIL. Available: [http://www.npc.org/Study\\_Topic\\_Papers/22-TTG-Heavy-Oil.pdf](http://www.npc.org/Study_Topic_Papers/22-TTG-Heavy-Oil.pdf) [Citado Julio 18 del 2007]

<sup>11</sup> MOORE G, LAURSEN C J, BELGRAVE J, URSENBACH M, METHA R. "In situ Combustion: New Ideas for an Old Process". Department of chemical & petroleum engineering. University of Calgary. Calgary Alberta Canada. Vol. 11. 1994. pp 1-33.

- Proceso complejo: flujo multifario, transferencia de calor y reacciones químicas , dificultad en el modelamiento
- Requiere de pruebas de laboratorio especiales
- Tratamiento de emulsiones
- Riesgo de explosiones
- Colapsos de casing
- Control del frente de combustión

## 1.2 PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN

Según Ursenbach<sup>12</sup> estas pruebas consisten en una muestra representativa de yacimiento la cual es empaquetada en un tubo de acero, se inyecta aire y se genera ignición de principio a fin del tubo, produciendo y midiendo los gases y líquidos recolectados.

**Figura 3.** Tubo de Combustión



Fuente: Memorias Curso simulación de procesos de combustión In situ. Dubert Gutiérrez. ICP Colombia. 2009

<sup>12</sup> URSENBACH M.G. An overview of laboratory in situ combustion Behavior of Athabasca oil sands". [MSc. Thesis]. University of Calgary. 1998.

Otra definición propuesta por Sarathi<sup>13</sup>, denomina a los tubos de combustión como simuladores físicos (Ver Figura 3), los cuales permiten la observación directa de la propagación del frente de combustión bajo condiciones las cuales se aproximan al yacimiento y constituyen el primer paso para el diseño de este tipo de procesos. Están desarrollados para crudos con gravedades que varían entre 6 y 45 °API en un rango de presiones desde 1 a 6000 Psi. La mayoría de los tubos de combustión involucran composiciones de aire normal (21% Oxígeno, 79 % Nitrógeno), sin embargo es posible realizar pruebas con mayores concentraciones de oxígeno. La combustión seca es el proceso más común que se realiza en este tipo de pruebas, pero también es posible llevar a cabo pruebas de combustión húmeda y súper húmeda.

A pesar que los modelos escalados de procesos de combustión no son considerados factibles debido a la dificultad en el escalamiento de la cinética de reacción, Moore<sup>14</sup> ha reconocido que la composición de gases producidos, propiedades de los líquidos, tales como contenido de asfáltenos del aceite producido, sulfato y pH del agua producida, ofrecen cierto ajuste con datos de campo. Por lo tanto las composiciones de los gases y las propiedades de los líquidos producidos pueden ser usadas junto con termómetros y termocuplas como indicadores del modo y eficiencia de quema durante la operación del proceso en campo.

### **1.2.1 Esquema general de una prueba de tubo.**

Los procedimientos para los laboratorios CIS, son muy dependientes del tipo de yacimiento, ya que basado en esto se diseñan las diferentes herramientas que lo componen; sin embargo todos presentan los siguientes componentes principales:

1. Sistema de inyección de gas,
2. tubo de combustión.
3. Sistema de producción de líquido.

<sup>13</sup> SARATHI S. Op.Cit, "In situ combustion Handbook. Principles and Practices" 1999.

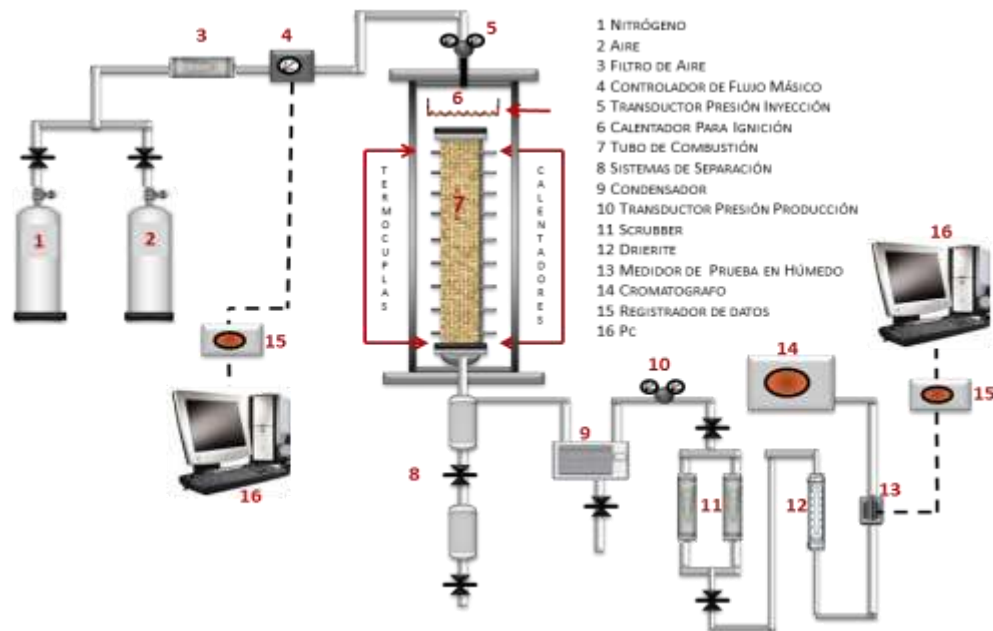
<sup>14</sup> MOORE R,G. MILLOUR J,P. BENNION D,W. BEST D,A. "Comparison Of Laboratory And Field Performance Of In Situ Combustion". Proceedings of the 5<sup>th</sup> Annual Advances in Petroleum Recovery & Upgrading Technology" Conference, Calgary, Alberta, June 14-15 1984.

4. Sistema de análisis de gases
5. El control y registro de datos del sistema.

A continuación se presenta el modelo físico, la descripción de los equipos y el procedimiento con base a un esquema empleado por Rodríguez<sup>15</sup> (Ver figura 4).

**Sistema de inyección de gas:** El sistema de inyección de fluidos consiste de dos partes: inyección de nitrógeno, e inyección de aire (normal u oxígeno enriquecido). La inyección de nitrógeno o la tasa de aire son controladas por un controlador de flujo másico. El tubing es enlazado al tubo de combustión para permitir la entrada de gas.

**Figura 4.** Esquema General de una prueba de Tubo de Combustión



Fuente: Tomado y modificado de: RODRIGUEZ J, R. "Experimental and analítica study to model Temperature profiles and stoichiometry in oxygenenriched in situ combustión". Requirement for Doctor Degree. Universidad de Texas, Mayo 2004.

**Tubo de Combustión:** Como menciona Sarathi<sup>16</sup> el corazón de este tipo de pruebas es el tubo de combustión; razón por la cual es también la parte central y

<sup>15</sup> RODRIGUEZ J, R. "Experimental and Analytical Study to Model Temperature Profiles and Stoichiometry in Oxygen Enriched In-Situ Combustion". [Phd Thesis]. Universidad de Texas, Mayo 2004.

<sup>16</sup> SARATHI S. Op.Cit, "In situ combustion Handbook. Principles and Practices" 1999.

de mayor énfasis de la presente investigación. El ensamblaje del tubo de combustión consiste en un tubo de acero inoxidable de espesor delgado, localizado en una chaqueta presurizadora. Según el equipo experimental presentado<sup>17</sup> en la figura 4, las dimensiones son las siguientes: diámetro externo de aproximadamente 3 pulgada (7.62 cm), con espesor de 1/16 de pulgada (0.063 pulgadas) (0.16 cm-) y una longitud de 40-1/8 pulgadas. (101.92 cm). Sin embargo Sarathi<sup>18</sup> recomienda que el espesor del tubo debe ser usualmente menor de 0.062 pulgadas para asegurar la uniformidad de calentamiento y minimizar la conducción de calor a lo largo de las paredes del tubo.

La chaqueta presurizadora (Ver figura 5) es usualmente fabricada de acero semiduro y diseñada para soportar las presiones de operación deseadas. El espacio anular entre el tubo y la chaqueta es llenado y presurizado con gas inerte para balancear la presión entre el interior y el exterior del tubo de combustión. Las diferencias de presión a través del tubo son pequeñas y siempre hacia el interior.

**Figura 5.** Chaqueta presurizadora



Fuente: Tomado y modificado de: RODRIGUEZ J, R. "Experimental and analytical study to model Temperature profiles and stoichiometry in oxygenenriched in situ combustión". Requirement for Doctor Degree. Universidad de Texas, Mayo 2004.

Los tubos de combustión varían en diámetro y longitud; en la tabla 1 se muestran las dimensiones del tubo empleadas en diferentes investigaciones. Diámetros

<sup>17</sup>RODRIGUEZ J, R. Op.Cit. Experimental and Analytical Study to Model Temperature Profiles and Stoichiometry in Oxygen Enriched In-Situ Combustion 2004

<sup>18</sup> SARATHI S. Op.Cit. "In situ combustion Handbook. Principles and Practices" 1999.

grandes son preferidos a diámetros pequeños, debido principalmente a que estos mantienen mejores condiciones adiabáticas y bajos flujos. Belgrave et al<sup>19</sup> estudió los efectos del diseño del tubo en el desempeño de la combustión y concluyó que diferentes diseños que operan bajo condiciones idénticas pueden producir diferencias en los resultados debido a las discrepancias en tasas de pérdidas de calor desde la pared del tubo.

**Tabla 1.** Dimensiones del tubo de combustión empleados en diferentes laboratorios

INSTALADOR	Longitud (Pies)	Diámetro (pulgadas)	Espesor de pared del tubo (pulgadas)	Referencia
Universidad de Calgary	6	4	0.042	Mehta (1997)
Universidad de Stamford	3	3	0.016	Mamora (1993)
Amoco	6	4	N.A	Yannimaras (1998)
Texaco	5	3	0.042	Bousaid (1987)
EssoResources, Canadá	4	3	0.025	Leaute and Collyer (1984)
Universidad de Texas	3.31	3	0.062	Rodriguez (2004)
Continental Oil CO	4	4.85	0.016	Martin & Alexander (1957)

Fuente: Tomada y modificada de SARATHI S. Partha. "In situ combustion Handbook", BDM Petroleum Technologies .Oklahoma. January 1999

**Sistema de producción de fluidos:** Un regulador de presión mantiene la presión de salida del tubo de combustión en un nivel constante durante el experimento<sup>20</sup>. Los fluidos producidos en el tubo pasan a través de dos etapas de separación donde ellos son recolectados. Los gases pasan a través de un condensador que

<sup>19</sup> BELGRAVE J, D.MOORE R,G. and BENNION, D.W "The Thermal Behavior of Vertically Operated Near-Adiabatic In-Situ Combustion Tubes". Journal of Petroleum Science & Engineering. Vol 5.1990

<sup>20</sup>RODRIGUEZ J, R. Op.Cit. Experimental and Analytical Study to Model Temperature Profiles and Stoichiometry in Oxygen Enriched In-Situ Combustion 2004

mantiene una baja temperatura para el recobro de cualquier volumen de líquido en esta corriente.

**Sistema de análisis de gases:** El flujo de los gases producidos se mide con un medidor de prueba húmeda. Las muestras de gases se analizan cada 15 a 20 min aproximadamente, y su composición es determinada mediante cromatografía de gases.

**Sistema de medición y registro de datos:** Dos registradores de datos y dos computadores personales son usados para registrar los siguientes parámetros. Tiempo, temperatura de la chaqueta, temperatura de las termocuplas ajustables, presión de inyección, presión de producción, distancia de la termocuplas móvil, tasa de inyección de gas, tasa promedio de gas producido, tasa acumulativa de gas.

### 1.2.2 Procedimiento.

El procedimiento que se describirá a continuación corresponde al empleado por Rodríguez<sup>21</sup> en la universidad de Texas. Si bien este procedimiento no es estándar, la descripción de este permite tener una mayor comprensión de los pasos que se deben seguir en cuanto al montaje y corridas de las pruebas de tubo de combustión.

Primero que todo se debe preparar una mezcla de arena, arcilla, agua y aceite en un recipiente amplio. La mezcla es introducida dentro del tubo, una vez que este se encuentre asegurado y en posición vertical. Posteriormente se instala cuidadosamente el sistema de inyección. Se introduce nitrógeno al tubo mediante la conexión de entrada del sistema de inyección, mientras que la conexión de salida del tubo es cerrada con el fin de presurizar el sistema.

La chaqueta es localizada en posición vertical y la conexión de salida del tubo es ensamblada al sistema de producción. Las termocuplas se conectan a sus

---

<sup>21</sup> Ibid. RODRIGUEZ

respectivos terminales. Se ajustan los calentadores de la chaqueta alrededor de 140 °F (60°C) para permitir que la temperatura de la mezcla de arena se estabilice.

La arena se presurizada con nitrógeno a 300 psi. Posteriormente corriente eléctrica debe ser gradualmente introducida en el ignitor hasta alcanzar aproximadamente los 570°F (300°C) y así inicia la inyección de aire.

La temperatura obtenida en la termocupla móvil es leída y registrada en el PC y se observara un incremento hasta aproximadamente 970 °F (520°C) indicando que la ignición ha ocurrido dentro del tubo de combustión. La composición del gas debe ser medida cada 15 a 20 minutos aproximadamente, se deben registrar perfiles de temperatura aproximadamente cada 6 pulgadas, y líquidos de producción deben ser medidos también cada 15 a 20 minutos. El final de la combustión ocurre cuando no se tiene más producción de aceite, en otras palabras la arena es quemada completamente del tope a la base del tubo de combustión.

### **1.2.3 Variables involucradas en pruebas de tubo.**

Son diversas las variables analizadas en una prueba de tubo, sin embargo la mayoría de las veces, las investigaciones de este tipo se centran en un mecanismo de estudio específico a partir de la variación de parámetros operacionales o de yacimiento, y lógicamente apoyados en los resultados obtenidos en cuanto a las variables de producción. En la figura 6 se pueden apreciar los diferentes tipos de variables involucradas en las pruebas de tubo.

La composición de los gases producidos, las propiedades de los fluidos y las temperaturas registradas dentro del tubo, son la principal fuente de estudio para este tipo de procesos, ya que permiten determinar parámetros que indican el desempeño del proceso y que permiten realizar proyecciones económicas, tal como se discutirá en capítulos posteriores.

VARIABLES<sup>22</sup> tales como la producción de óxidos de carbono ( $\text{CO}_2$  y  $\text{CO}$ ), relaciones H/C, relación aire combustible y la fracción de oxígeno consumido convertida a óxidos de carbono son sumamente importantes para estimar el modo de quema (desempeño del proceso) en el proceso (Alta o Baja temperatura LTO-HTO). Alta concentración de  $\text{CO}_2$  en los gases producidos es un indicativo de combustión en modo LTO, mientras que baja concentración de  $\text{CO}_2$  es un indicio de combustión en modo HTO.

Ursebach<sup>23</sup> mostró que la viscosidad, densidad y contenido de asfaltenos del aceite producido en una muestra de Athabasca disminuyen a medida que el frente de combustión se acerca al otro extremo del tubo. El incremento de la viscosidad y asfaltenos son indicios de que en el proceso predomina la reacción a baja temperatura. Las propiedades del agua producida en inyección de aire han sido estudiadas por diversos autores. Ellos afirman que el frente de llama es usualmente acompañado por un bajo PH y alto contenido de sulfato en el agua.

**Figura 6.** Tipos de variables en pruebas de tubo



Fuente: El autor

<sup>22</sup> URSENBACH M,G. Op.Cit "An overview of laboratory in situ combustion Behavior of Athabasca oil sands". 1998.

<sup>23</sup> Ibid URSENBACH M,G 1998.

En el caso específico de la presente investigación, a partir de la variable de control “Flujo de aire” y mediante las variables de producción “Gases de combustión” se pretende analizar el efecto que tiene sobre los siguientes parámetros de estudio “Perfiles de temperatura, velocidad del frente, y parámetros de combustión asociados al diseño y economía del proyecto”.

#### **1.2.4 Importancia de las pruebas de tubo.**

Una de las principales observaciones obtenidas por Ursebach<sup>24</sup> a partir del estudio de las pruebas de tubo, es que una buena quema en estas no garantiza una satisfactoria aplicación en campo, mientras que una pobre quema en laboratorio garantiza que se presentaran dificultades. En resumen, las pruebas de tubo de combustión pueden ser vistas como el mejor escenario para un yacimiento en cuestión.

Según Burger y Sourieau<sup>25</sup> de este tipo de pruebas se puede determinar la influencia de parámetros operacionales, flujo de aire, relación agua/aire, las propiedades del medio poroso y del aceite sobre la estabilidad del proceso. Lo cual ha contribuido para un mayor entendimiento de los diversos mecanismos que presenta la técnica.

Expertos en el tema como Gutiérrez et al<sup>26</sup> plantean que los tubos de combustión son simuladores físicos los cuales permiten la observación directa de la propagación del frente de combustión bajo condiciones las cuales pueden aproximarse a las de yacimiento. Mientras las pruebas sean hechas bajo condiciones representativas de yacimiento estas exhiben una buena correlación entre el oxígeno y los requerimientos de combustible, la estabilidad de la combustión, características del aceite producido y las fases agua y gas. Razón por lo cual a partir de esta información es posible tomar decisiones que contribuyen con el diseño y posterior desarrollo de la técnica en campo.

---

<sup>24</sup> Ibid URSENBACH M.G.1998.

<sup>25</sup> BURGER J. SORIEAU P. “Thermal Methods of oil Recovery”. Institut Français du Pétrole Publications,1985. 247-305 p

<sup>26</sup> GUTIERREZ D, Moore G, Ursebach M, and Metha R. “The challenge of predicting field performance of air injection projects based on laboratory and numerical modeling. JCPT. Vol. 48, No. 4. April 2009. Pp 23-34.

Las mediciones de tubo de combustión de aire y combustible para un aceite el cual muestra un buen desempeño de quema en el laboratorio pueden ser usados como datos de entrada para modelos analíticos. Tal es el caso del trabajo histórico realizado por Nelson and McNeil<sup>27</sup>. Igualmente diversos autores tales como Gates & Ramey<sup>28</sup>, Showalter<sup>29</sup>, y Couch<sup>30</sup> entre otros, han generado importantes correlaciones para el cálculo de variables de diseño para CIS a partir de la data obtenida mediante las pruebas de tubo.

### 1.2.5 Limitantes de las pruebas de tubo.

La principal desventaja<sup>31</sup> de las pruebas de tubo es que son experimentos no escalables. Por lo tanto la data obtenida de estos no puede ser escalada en una correlación directa que represente lo que ocurrirá en yacimiento. El comportamiento de quema del aceite en el tubo no es similar al de yacimiento debido a que está afectado por la tasa de inyección y las saturaciones de los fluidos.

Una de las principales consideraciones que se deben tener en cuenta en cualquier proceso de recobro que involucre la inyección de un fluido es la eficiencia de barrido; por lo tanto al realizar pruebas de tubo se presenta una eficiencia de barrido vertical del 100% cosa que en campo no ocurre.

La configuración física afecta significativamente la simulación experimental y no permite el escalamiento a condiciones de yacimiento, en este caso las pruebas piloto resultan un mejor recurso para información y/o estudio de la eficiencia de barrido.

Cuestiones concernientes a como el aire y el agua se distribuyen dentro de la zona quemada y en qué condiciones existirían cuando se genere el frente de combustión no pueden ser respondidas de los estudios de tubo de combustión. La

<sup>27</sup> NELSON, T. W. & MCNEIL, Op.cit. "How to Engineer a Combustion In Situ Project" 1961

<sup>28</sup> GATES, C; RAMEY. Op.Cit. "A Method for Engineering In Situ Combustion Oil Recovery Projects" 1980

<sup>29</sup> SHOWALTER, W. "Combustion Drive Test". SPE 456. Union Oil Co. California. March 1963, pp 53-58

<sup>30</sup> COUCH E,J. "Effects of porosity and permeability in-situ combustion fuel consumption". SPE 2873. Houston Texas. October 1970.

<sup>31</sup> SARATHI S. Op.Cit, "In situ combustion Handbook. Principles and Practices" 1999.

segregación gravitacional es una importante consideración, ya que su efecto es eliminado en el laboratorio por la ejecución de pruebas con el tubo en posición vertical.

Debido a que el frente de avance de combustión<sup>32</sup> es controlado por reacciones químicas y permeabilidades relativas características del yacimiento, los tubos de combustión proporcionan estimativos del efecto neto de las interrelaciones entre los varios mecanismos que afectan la combustión.

Este tipo de pruebas proporciona información cuantitativa del desempeño que se puede esperar en campo de dicha técnica sin embargo esta no proporciona datos cinéticos de las reacciones que ocurren.

El yacimiento es naturalmente aislado por el overburden y el underburden y las pérdidas de calor son relativamente pequeñas comparadas con la cantidad de calor generado. En el laboratorio el tubo tiene unas altas pérdidas de calor debido a que su principal material es el metal y además es limitada la cantidad de calor generado.

### **1.3 ROL DE LOS GASES DE COMBUSTION Y LOS PERFILES DE TEMPERATURA EN PRUEBAS DE TUBO**

Autores como Ursenbach<sup>33</sup> afirman que los gases de combustión son una herramienta fundamental para determinar la eficiencia de un proceso de combustión in situ, ya sea a nivel de laboratorio o de campo. Dependiendo de la concentración de los gases es posible determinar en qué rango de temperaturas predomina el proceso ya sea HTO o LTO, la cual es otra manera de clasificar la combustión in situ según Graves<sup>34</sup>.

---

<sup>32</sup> GUTIERREZ D, "Air Injection Laboratory Studies". Reservoir Simulation of In-Situ Combustion Processes. ICP Bucaramanga Colombia. September 2009. pp 1-52

<sup>33</sup> URSENBACH M,G. Op.Cit "An overview of laboratory in situ combustion Behavior of Athabasca oil sands". 1998.

<sup>34</sup>M GREAVES, T.J YOUNG, S,R REN. "Air injection into light and medium Heavy oil reservoirs-Combustion Tube studies on west of Shetlands clair oil and light Australian oil". Departament of Chemical Engineering. University of Bath, UK. 2000

Una combustión en pruebas de tubo la cual predomina en modo LTO producirá una mayor cantidad de oxígeno y menor cantidad de óxidos de carbono, puesto que no logro formarse el suficiente combustible, o fue tanto el combustible que los requerimientos de aire no fueron suficientes para lograr la combustión de todo el coque lo cual ocasiona el predominio del proceso en temperaturas bajas (Ver figura 7).

**Figura 7.**Prueba de Tubo en modo LTO



Fuente: El autor

Al predominar una combustión en modo LTO en una prueba de tubo, los perfiles de temperatura obtenidos presentaran un pico de temperatura promedio en rangos de baja temperatura. Si la temperatura de combustión está bajo los 300°C (527°F), las reacciones entre el oxígeno inyectado e hidrocarburos, producen compuestos oxigenados (alcoholes, cetonas, peróxidos, aldehídos, ácidos carboxílicos, etc.)Un proceso de combustión que predomina en modo HTO presentara en la composición de los gases producidos un aumento en la concentración de óxidos de carbono y una disminución en el oxígeno producido, indicando la eficiencia de combustión de coque (ver figura 8), por lo tanto se espera que en los perfiles de temperatura obtenidos el pico máximo promedio de temperatura se encuentre en rangos mayores a los presentados en el modo LTO.

**Figura 8.**Prueba de Tubo en modo HTO



Fuente: El autor

El modo en que opere el proceso va depender de diversos factores que afectan la cinética de la reacción entre los que se encuentra: Tasa de inyección, requerimientos de aire, tipo de crudo, temperaturas de ignición, heterogeneidades, litología entre otras.

### 1.3.1 Gases de combustión en procesos de combustión in situ.

El monitoreo constante de los gases de combustión en procesos de combustión in situ es de vital importancia ya que estos permiten determinar el modo de que en un proceso ya sea LTO o HTO, y además permiten determinar el potencial económico y la factibilidad de llevar a cabo la aplicación en campo.

El proceso de combustión a altas temperaturas está dado por la siguiente ecuación estequiometrica:



Dónde:

$$R = \frac{\text{Fraccion molar } N_2}{\text{Fraccion molar } O_2}$$

**Tabla 2.** Parámetros obtenidos a partir de los gases producidos

Importantes para estimar el modo de quema en el proceso (Alta o Baja temperatura LTO-HTO).		
Relación H/C	Relación (CO <sub>2</sub> +CO)/N <sub>2</sub>	FO <sub>2</sub> R(%)

Importantes para determinar el potencial económico y la factibilidad de llevar a cabo la aplicación en campo.		
Relación Aire/Combustible	Requerimientos de Aire	Requerimientos de Combustible

Fuente: El autor

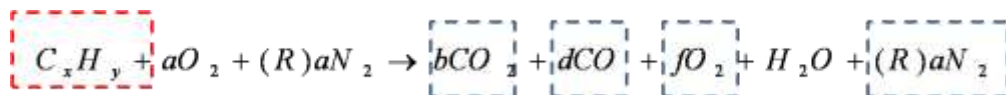
Como se puede observar a partir de la reacción exotérmica del coque con el aire se obtienen como productos CO<sub>2</sub>, CO, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O; donde a, b, c y d son los

respectivos coeficientes estequiométricos. Exceptuando al agua las concentraciones de los productos se pueden obtener a partir de una cromatografía de gases. Teniendo estas concentraciones y a partir de relaciones establecidas por Ursenbach<sup>35</sup>, es posible determinar parámetros que indiquen el régimen de reacción y permitan establecer valoraciones económicas iniciales con respecto al aire inyectado (Ver Tabla 2).

**Relación atómica aparente H/C (AAHCR).** Denominada AAHCR por sus siglas en inglés (Apparent Atomic H/C ratio) está dada por:

$$AAHCR = \frac{4 \left[ \frac{[N_2]}{R} - [CO_2] - \frac{[CO]}{2} - [O_2] \right]}{[[CO_2] + [CO]]} \quad (2)$$

La AAHCR es teóricamente la relación de átomos de hidrógeno a átomos de carbono en el hidrocarburo quemado. Lo que sugiere es que a partir de la ecuación 1, la concentración de los óxidos de carbono (Ver siguiente ecuación) y del nitrógeno (azul) es posible determinar el índice H/C del combustible o coque (rojo).



La AAHCR está relacionada al oxígeno consumido y no al producido como óxidos de carbono dividido por la cantidad de óxidos, de ahí la designación de aparente. El consumo de oxígeno por reacciones de oxidación a bajas temperaturas afecta la AAHCR, entonces este parámetro puede no ser necesariamente reflejo H/C del combustible quemado. En vista de esta limitación, la AAHCR es muy empleada para determinar cómo opera un proceso de combustión in situ

<sup>35</sup> URSENBACH M.G. Op.Cit "An overview of laboratory in situ combustion Behavior of Athabasca oil sands". 1998.

Una menor relación H/C indica que el hidrocarburo tiene mayor cantidad de Carbono e Hidrogeno, por lo tanto la producción de estos a partir de combustión será cada vez mayor logrando una mayor entalpia de reacción, mayores temperaturas y una mayor eficiencia en el proceso.

**Tabla 3.** Rangos en los que predomina LTO y HTO a partir de la relación aparente H/C

PRODUCTOS COMBUSTION	RELACION H/C (AAHCR)	PESO MOLECULAR COQUE	DISPONIBILIDAD DE COMBUSTIBLE	REACCION PREDOMINANTE
BAJA [ ] CO & CO <sub>2</sub>	AUMENTA 3-10	BAJO	BAJA O ALTA	LTO (200-400 °F)
ALTA [ ] CO & CO <sub>2</sub>	DISMINUYE <2	ALTO	SUFICIENTE	HTO (600-1200 °F)

Fuente: El autor

Una mayor relación H/C indica que el combustible presenta un menor peso molecular comparado con uno de relación menor. Un combustible de bajo peso molecular (H/C alta), tendrá una entalpia de reacción menor comparada con una de H/C mayor, de esta manera la composición de los gases de combustión será en mayor proporción oxígeno y en menor proporción óxidos de carbono. Para resumir lo anteriormente dicho se presenta la tabla 3 elaborada por Ursebach<sup>36</sup>, a partir del estudio realizado sobre 50 pruebas de tubo en Canadá. Se determinó un rango de H/C en el que predominan tanto LTO como HTO.

**Relación  $CO_2+CO/N_2$ .** La relación óxidos de carbono a nitrógeno (CNR-por sus siglas en inglés) es calculada de la siguiente manera:

$$CNR = \frac{(CO_2 + CO)}{[N_2]} \quad (3)$$

Esta relación es usada como indicador del modo de combustión, con valores esperados en el rango de 0.2 para combustión normal. Entre más aire necesite para quemar una unidad de volumen la relación CNR será menor ya que se obtendrán grandes cantidades de N<sub>2</sub>, indicando reacciones en modo LTO. Entre mayor sea la relación CNR, quiere decir que se obtuvo una buena producción de

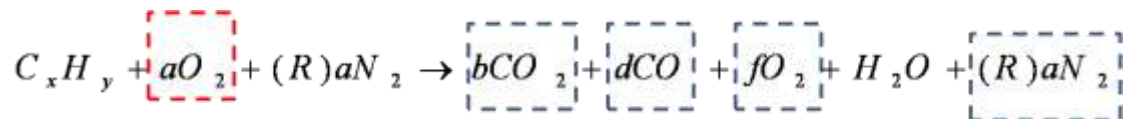
<sup>36</sup> Ibid. URSENBACH M,G.

óxidos de carbono, lo cual a su vez indica una buena quema del combustible, predominando las reacciones HTO.

**Oxígeno reaccionado convertido a óxidos de carbono ( $FO_2R\%$ ).** El porcentaje de oxígeno reaccionado el cual es convertido a óxidos de carbono ( $FO_2R$ ) es calculado de la siguiente manera:

$$FO_2R(\%) = \frac{\left[ \frac{[CO]}{2} + [CO_2] \right] * 100}{\left[ \frac{[N_2]}{R} - [O_2] \right]} \quad (4)$$

A partir de la concentración de los óxidos de carbono y el oxígeno producido, es posible encontrar cuanto del oxígeno inyectado y que se encuentra en el aire está reaccionando.



Este es un buen indicador de la cantidad de oxígeno involucrado en alta temperatura Vs baja temperatura. Bajo condiciones de laboratorio de HTO en las cuales la utilización de oxígeno es completa, este parámetro se encontró en rangos entre 60 a 70 %. Por ejemplo, para una prueba de 14%  $CO_2$ , 2%  $CO$  y 82%  $N_2$ , el % de oxígeno que aparece en los carbonos es de 68.8. El oxígeno restante 31.2 % podría suponerse que se empleó para la formación de agua.

**Tabla 4.** Rangos en los que predomina LTO y HTO a partir de la relación  $FO_2R\%$ .

$FO_2R$ (%)	PRODUCTOS COMBUSTION	REACCION PREDOMINANTE
AUMENTA (60-70)	ALTA [] CO & CO <sub>2</sub>	HTO (700-1200°F)
DISMINUYE (<60%)	BAJA [] CO & CO <sub>2</sub>	LTO (200-550°F)

Fuente: El autor

De la misma manera que Ursenbach concluye a partir de las revisiones experimentales para el índice H/C, el estableció rangos para **FO<sub>2</sub>R%** en los cuales predomina LTO o HTO (Ver Tabla 4). Cabe resaltar que las pruebas revisadas por Ursenbach fueron llevadas a cabo en bitumen de las arenas de Athabasca por lo tanto este rango no es una base estandarizada y puede variar dependiendo del tipo de crudo, sin embargo proporciona estimativos de suma importancia.

A continuación se presentan los parámetros más influyentes para el diseño y economía en un proyecto, los cuales pueden ser determinados a partir de las pruebas de tubo.

**Relación aire combustible (AFR).** La relación aire combustible AFR (por sus siglas en inglés) es basada en la producción equivalente de aire calculada de la producción de nitrógeno y la producción acumulada de óxidos de carbono. La relación aire/combustible es calculada como:

$$AFR(sm^3 / Kg) = \frac{23.6445 \left[ \frac{1+R}{R} \right] N_2}{12.011(CO_2 + CO) + 4.032 \left[ \frac{N_2}{R} - CO_2 - \frac{CO}{2} - O_2 \right]} \quad (5)$$

Donde cada uno de los gases hace referencia al volumen producido acumulado. Intuitivamente se podría esperar que un buen proceso de combustión tenga bajas relaciones aire/combustible AFR (mas producción de óxidos de carbono con menos inyección de aire). Sin embargo se deben tomar las mismas precauciones señaladas en la AAHCR, con respecto al hidrogeno, por lo tanto las LTO puede afectar la AFR. Las LTO perjudican la producción de óxidos de carbono por lo tanto estarían afectando la concentración de combustible ocasionando altos incrementos en AFR.

**Requerimientos de aire (AR).** El requerimiento de aire AR es el volumen de aire requerido por unidad de volumen de yacimiento, y es calculado de la siguiente manera:

$$AR(sm^3 / m^3) = \frac{U_{air}}{V_b} \quad (6)$$

El termino  $U_{air}$ , hace referencia al flujo de aire inyectado ( $sm^3/m^2h$ ) y  $V_b$  es la velocidad del frente de combustión (m/h). Los requerimientos de aire controlan gran parte de la economía del proceso, ya que esta representa la cantidad de aire que debe ser inyectado en el yacimiento para barrer un volumen dado.

**Requerimientos de combustible (FR).** El requerimiento de combustible para un proceso está dado por:

$$FR(Kg / m^3) = \frac{AR}{AFR} \quad (7)$$

El combustible requerido es teóricamente la masa de hidrocarburo la cual debe ser consumida durante un proceso de combustión. Este parámetro es muy sensible al consumo de oxígeno por reacciones de oxidación a bajas temperaturas, y solamente en el caso de altas temperaturas de combustión es un indicador de la actual cantidad de aceite el cual no es disponible para recobro. Mayor consumo de oxígeno durante las LTO produciría mayor cantidad de compuestos oxigenados, mayor cantidad de la necesaria de coque es formada gracias a la oxigenación del crudo.

### 1.3.2 Perfiles de temperatura en pruebas de tubo.

Según Greaves<sup>37</sup> Los perfiles de temperatura axial generados a lo largo del tubo de combustión, caracterizan el comportamiento esencial de un proceso de combustión in situ. Para generar un perfil de temperatura a un determinado tiempo es necesario ubicar a lo largo del tubo de combustión una serie de termocuplas. La mayor temperatura a un tiempo dado representa el frente de combustión y a diferentes tiempos es posible observar el avance de este. Los perfiles de

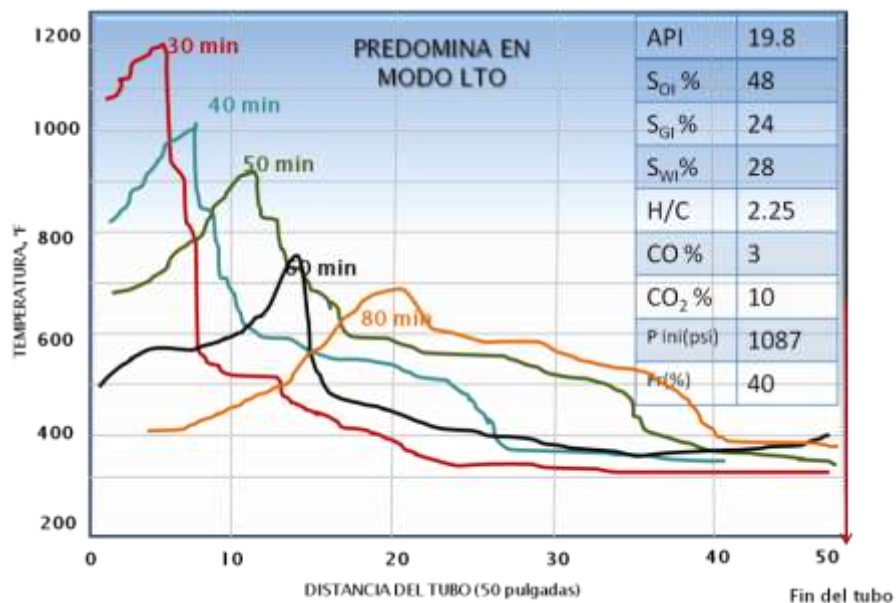
---

<sup>37</sup> M GREAVES, T.J Op.Cit. Air injection into light and medium Heavy oil reservoirs-Combustion Tube studies on west of Shetlands clair oil and light Australian oil" 2000

temperatura al igual que los gases de combustión permiten determinar el régimen de reacción predominante en el proceso.

La figura 9 representa un perfil de temperaturas para una corrida experimental llevada a cabo por Graves. Como se puede apreciar gracias a las temperaturas, al comienzo de la prueba se dio el modo HTO, puesto que se alcanzaron temperaturas superiores a los 100°F y se evidencio una concentración de CO<sub>2</sub> superior al 10%. En la medida que avanzó el frente de combustión, las temperaturas cayeron drásticamente (hasta 650°F) y la concentración de CO<sub>2</sub> fue de aproximadamente 7%; lo cual sugiere la prueba predominó en modo LTO la mayor parte de esta.

**Figura 9.** Perfil de temperatura en modo LTO. Corrida 1

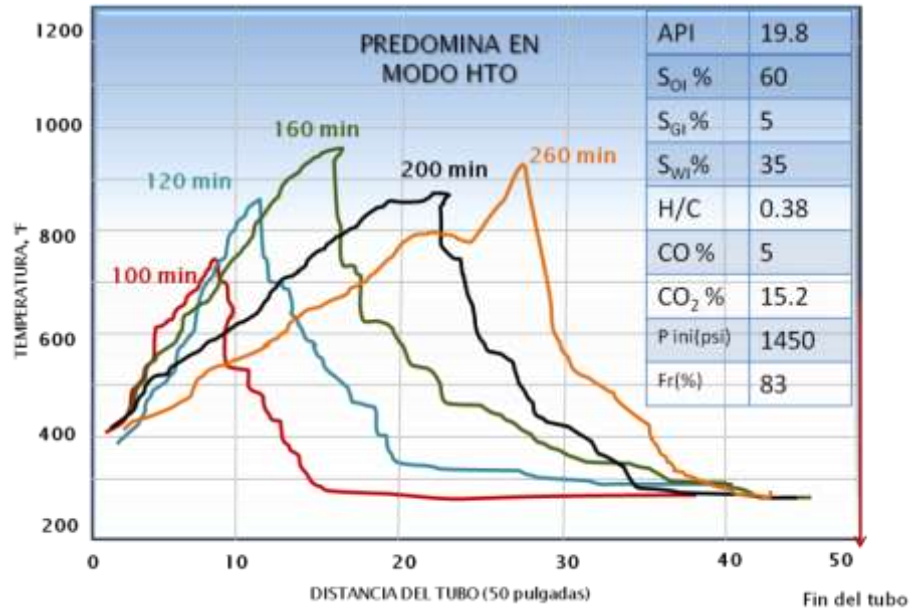


Fuente; Tomada y modificada M GREAVES, T.J YOUNG, S.R REN. "Air injection into light and medium Heavy oil reservoirs-Combustion Tube studies on west of Shetlands clair oil and light Australian oil". Department of ChemicalEngineering. University of Bath, UK. 2000

Hay dos posible razones para este fenómeno. La primera es que la matriz preferencialmente mojada por aceite puede presentar una zona de saturación corriente abajo del frente de combustión, así que no hay la cantidad de combustible disponible para mantener la combustión en alta temperatura y por lo

tanto presenta una inhabilidad para el consumo de oxígeno inyectado. La otra posible razón es que el calor proporcionado por los calentadores no fue suficiente para mantener unas condiciones adiabáticas

**Figura 10.** Perfil de temperatura en modo HTO. Corrida 2



Fuente; Tomada y modificada M GREAVES, T.J YOUNG, S.R REN. "Air injection into light and medium Heavy oil reservoirs-Combustion Tube studies on west of Shetlands clair oil and light Australian oil". Department of ChemicalEngineering. University of Bath, UK. 2000

El mismo autor llevo a cabo otra corrida con parámetros y condiciones similares exceptuando  $S_o=60\%$ , presión 100 bar (1450 Psi). Los perfiles de temperatura se presentan en la figura 10. Se puede apreciar claramente que los picos de temperatura a diferentes tiempos se comportan de manera estable en aproximadamente 900 F y teniendo en cuenta que la producción de CO y CO<sub>2</sub> aumento mientras el índice H/C disminuyo con respecto a la primera prueba, es posible afirmar que la corrida dos predomino en modo HTO.

De acuerdo a las investigaciones presentadas y a diversas reportadas<sup>38 39</sup> es posible concluir que los perfiles de temperatura son herramientas fundamentales

<sup>38</sup> MAMORA D. "New findings into of crude oil". Texas A&MU.SPE 29324.March 1995. pp 577-592.

<sup>39</sup> CHICUTA AM. Trevisa O. (2009) "Experimental study combustion in-situ of Brazilian heavy oil". SPE 122036 . June 2009. pp 1-11

para el entendimiento y monitoreo del proceso, puesto que indican la forma en que se desarrolla y se mantiene el frente de combustión.

### 1.3.3 Picos de temperatura.

El pico o máximo de temperatura corresponde al punto en el cual a un tiempo dado se presenta el valor más alto de temperatura el cual corresponde a la formación del frente de combustión. En otras palabras el pico indica el lugar en el cual se encuentra el frente de llama en su máxima eficiencia térmica.

A partir de una prueba dada se pueden obtener a diferentes tiempos un perfil de temperaturas con diferentes picos, sin embargo se acostumbra obtener el promedio de estos picos y así empelarlos como parámetros para diferenciar el modo de quema del proceso ya sea HTO o LTO. En la investigación que se mencionó anteriormente realizada por Ursebach<sup>40</sup>, se presenta un análisis de los picos promedios de temperatura para diversas pruebas de tubo.

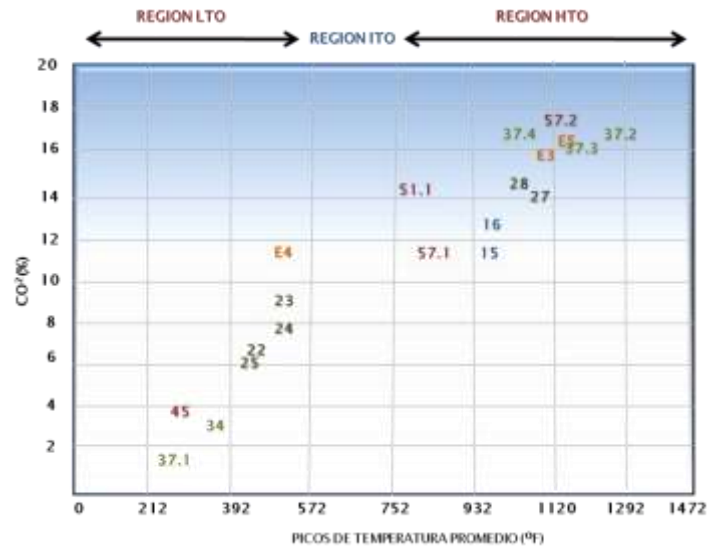
Los resultados más significativos surgidos de la investigación de los picos de temperatura propuesta por Ursebach<sup>41</sup> están plasmados en una serie de correlaciones de parámetros de combustión en función de los picos de temperatura tal como se presenta a continuación.

**Correlación de CO<sub>2</sub> Vs Picos de Temperatura.** En la figura 11 el CO<sub>2</sub> estabilizado es graficado contra el pico de temperatura promedio de la zona estabilizada. Esta muestra un continuo incremento de cero a 10% de CO<sub>2</sub> sobre el rango de 356 °F a 572 °F C, seguido de una abertura entre 572 a 932°F. Para temperaturas sobre 932 °F, las concentraciones de CO<sub>2</sub> entran entre un rango de 12 a 18%. Valores de CO<sub>2</sub> del 15 a 18% sobre un rango de temperaturas entre 932 °F a 1300°F son consideradas representativas de un proceso clásico de combustión in situ. Las altas temperaturas y altos niveles de CO<sub>2</sub> son indicativos de un aceite pre-oxidado.

<sup>40</sup> URSENBACH M.G. Op.Cit "An overview of laboratory in situ combustion Behavior of Athabasca oil sands". 1998.

<sup>41</sup> Ibid. URSENBACH M.G.

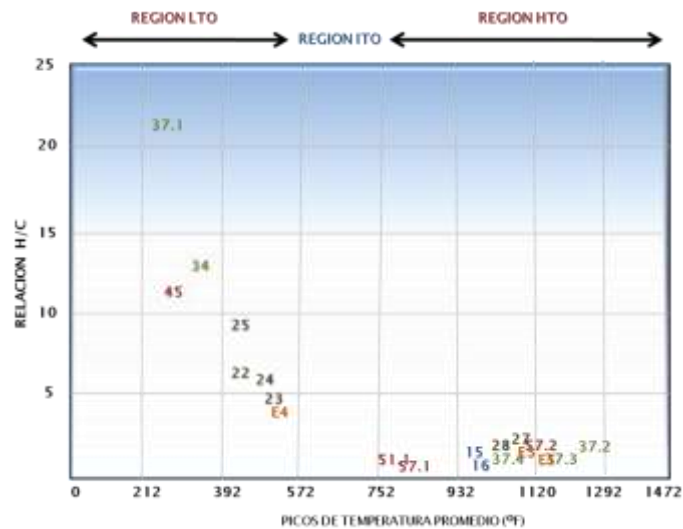
**Figura 11.** Correlación CO<sub>2</sub>% Vs. Picos de temperatura °F



Fuente: Tomada y modificada de URSENBACH M.G. "An overview of laboratory in situ combustion Behavior of Athabasca oil sands". University of Calgary. 1998.

**Correlación de índice H/C & FO<sub>2</sub>R% Vs Picos de Temperatura.** Las figura 12 y 13 presentan la relación atómica aparente H/C y la fracción de oxígeno reaccionado convertido a óxidos de carbono (FO<sub>2</sub>R) como función del pico de temperatura promedio de la zona estabilizada.

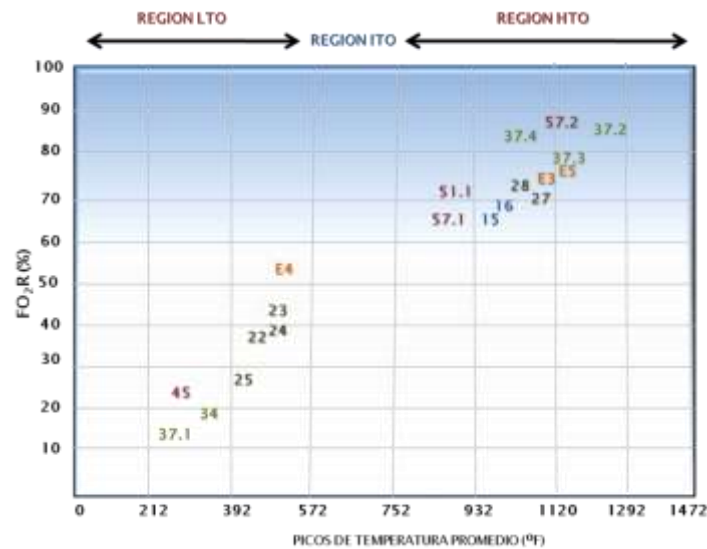
**Figura 12.** Correlación H/C Vs. Picos de temperatura °F.



Fuente: Tomada y modificada de URSENBACH M.G. "An overview of laboratory in situ combustion Behavior of Athabasca oil sands". University of Calgary. 1998.

Las pruebas 34, 37.1 y 45 fueron pruebas a baja temperatura de oxidación con temperaturas por debajo de 392 °F. En el rango de 392 a 662 °F, la relación H/C decae de 10 a 3, con un correspondiente incremento de en FO<sub>2</sub>R de 30 a 55%. Las relaciones H/C en el rango de uno a dos y FO<sub>2</sub>R de 65 a 75% fueron típicas corridas de combustión a alta temperatura. Valores menores de 1.0 para H/C y mayores que 80% FO<sub>2</sub>R indican la combustión del aceite pre oxidado

**Figura 13.** Correlación FO<sub>2</sub>R (100%) Vs. Picos de temperatura °F



Fuente: Tomada y modificada de URSENBACH M.G. "An overview of laboratory in situ combustion Behavior of Athabasca oil sands". University of Calgary. 1998.

Algunas observaciones importantes que menciona Ursenbach en su trabajo realizado son las siguientes: Los datos de los picos de temperatura indican la existencia de una "región de gradiente de temperatura negativo" entre los regímenes de oxidación de alta y baja temperatura. El proceso tiende a no operar en esta región.

La sucesión de periodos estabilizados se debe a que inicialmente se da el periodo de oxidación a bajas temperaturas y sucesivamente periodos que representan la quema del aceite pre oxidado. Hay una fuerte relación entre el pico de temperatura dentro del tubo y la composición de gas estabilizada producida. Cuatro principales

regiones de operación fueron identificadas y tabuladas de la siguiente manera (ver tabla 5).

**Tabla 5.** Regiones de operación y características

REGION DE OPERACION	RANGO DE TEMPERATURA (F)	RANGO DE CO <sub>2</sub> % MOLAR	RANGO RELACION H/C	RANGO FO <sub>2</sub> R (%)
LTO	100-300	0-10	3-10	30-55
ITO	350-450	N/A	N/A	N/A
HTO	500-700	12-15	1-2	65-75
Combustión Bitumen Pre-Oxidado	600-800	15-18	<1	>80

Fuente: Tomada y modificada de URSENBACH M,G. "An overview of laboratory in situ combustion Behavior of Athabasca oil sands". University of Calgary. 1998.

El cuarto régimen de reacción hace referencia a cuando el hidrocarburo fue sometido a largos periodos de oxidación a baja temperatura y durante este periodo logro formarse combustible el cual junto con el formado durante la región intermedio hizo combustión posteriormente. Este fenómeno es negativo, puesto que a pesar que se alcancen temperaturas altas, el aceite que se hubiera podido recuperar está siendo convertido en combustible durante la región a baja temperatura.

Se debe tener en cuenta que las consideraciones y los rangos bajos los cuales predominan las reacciones se basan en estudios realizados a bitúmenes en Canadá, luego para otro tipo de crudo pueden variar estos rangos levemente. Sin embargo este estudio realizado por Ursenbach constituye una fuente de gran importancia para la realización de pruebas de tubo y proyectos a escala de campo; además constituyeron un punto de partida importante para el desarrollo y guía del presente estudio analítico, como se verá en capítulos posteriores.

## 1.4 INFLUENCIA DE LA TASA DE INYECCIÓN DE AIRE EN PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN

La tasa de inyección tiene un efecto significativo sobre la cinética de la reacción por lo cual resulta un parámetro de vital importancia que va determinar el éxito o el fracaso técnico del proyecto. Se esperaría que una alta tasa de inyección aumente la velocidad de reacción (puesto que está afectando directamente la presión parcial del oxígeno, y genera un aumento de las colisiones efectivas), dando lugar a una rápida reacción en modo de baja temperatura LTO (Reacción de adición), pasando posteriormente a reacción de pirolisis donde se forma el coque. Este combustible depositado, junto con una gran proporción de oxígeno genera el frente de alta temperatura que desplazara el crudo hacia los pozos productores.

Existen diferentes estudios los cuales sugieren que un aumento en la tasa no solo influye de manera positiva en el proceso; puesto que existe la posibilidad que tenga efectos negativos, como se verán más adelante en el presente documento.

### 1.4.1 Consideraciones sobre la influencia de la tasa de inyección de aire en pruebas de tubo de combustión.

Según estudios de laboratorio y experiencias en campo, *Nelson & McNeil*<sup>42</sup> proponen que la tasa de inyección de aire está regida e influenciada por tres factores:

El primero de ellos es la **velocidad de avance** del frente de combustión, la cual es directamente proporcional a la tasa de inyección, ya que si el frente de combustión se mueve rápidamente, se debe inyectar a una mayor tasa. La velocidad del frente de combustión debe ser lo más rápida posible, ya que el yacimiento se quemara más rápido y por lo tanto las tasas de producción del aceite serían mayores. Este máximo está limitado por la posibilidad de manejo que tengan los pozos productores del aceite.

---

<sup>42</sup>NELSON, T. W.; MCNEIL, Op.Cit. "How to Engineer a Combustion In Situ Project". 1961

Por otra parte, la velocidad del frente de avance de combustión debe ser tan baja que requiera un mínimo de aire, el cual es suficiente para mantener la combustión estable. Las experiencias de campo han mostrado que los valores de la velocidad de avance del frente de combustión están entre 0.5 y 0,125 pies por día. Cabe mencionar que estos valores se encuentran asociados a espesores de formación entre 20 y 30 pies.

El segundo factor que gobierna la tasa de inyección de aire es la **eficiencia volumétrica** de barrido,  $E_v$ . Esta representa la falta de combustión en ciertas regiones. El tercer factor que influye en la tasa de inyección de aire son las **condiciones operacionales**, que se deben tener en cuenta para la planeación del calendario de inyección de aire del proyecto, debido que la tasa varía a medida que transcurre el proyecto.

Publicaciones realizadas por *Martin & Alexander (1962)*<sup>43</sup>, presentan un estudio detallado acerca de la influencia de la tasa, el cual se profundizara posteriormente. Sin embargo a continuación se presentan importantes consideraciones:

Es posible que el oxígeno pase a través de un frente de combustión en un yacimiento de petróleo a una velocidad tal que algo de este oxígeno no puede reaccionar en la máxima zona de temperatura, dando lugar a que ocurran reacciones LTO. Por lo tanto altas tasas de inyección pueden perjudicar la eficiencia del proceso.

Sin embargo, no es necesario que el oxígeno sin reaccionar pase a través del frente de combustión. Muchas pruebas de campo han demostrado la existencia de oxígeno libre en los gases de chimenea de los pozos productores antes del rompimiento del frente a estos pozos. Es obvio que algo del oxígeno libre puede ser atribuido a efectos de canalización (Bypassing). Cualquier flujo de aire a través de las arenas que son calentadas por conducción de una canalización del frente de combustión proporciona efectos de LTO.

---

<sup>43</sup> MARTIN W. ALEXANDER J,D Op.cit, Factors affecting fuel availability and composition during in situ combustion.1962.

Por otro lado, es posible la propagación de un frente LTO a través de un yacimiento en dirección frontal bajo condiciones de altas pérdidas de calor y/o bajas tasas de aire. Los efectos de LTO pueden ser generados durante la fase de ignición en una relativamente baja temperatura de ignición a bajas tasas de aire; de esta forma se podría depositar una buena cantidad de coque y si se produce un aumento en la tasa de inyección el proceso podría pasar a modo HTO.

*Garon&Wiga*<sup>44</sup> (1974) a partir de pruebas experimentales en modo de alta temperatura únicamente, observaron que en bajos flujos de aire y presiones de inyección bajas, el oxígeno no es utilizado eficientemente, igualmente realizaron pruebas a diferentes flujos y estudiaron la relación que tiene con respecto a variables de importancia para el proceso. A partir de los estudios infirieron que mayores flujos de aire proporcionan un menor consumo de combustible dado que el tiempo en el que ocurre la reacción es menor, y si bien existen más partículas para reaccionar muchas de ellas no reaccionan y la cantidad de coque formado producto de estas reacciones disminuye.

*Burger & Sourieau*<sup>45</sup> (1985) estudiaron la influencia del flujo aire, y la presión en la velocidad del frente de combustión y la máxima temperatura alcanzada. Los resultados se obtuvieron gracias a pruebas de tubo a partir de una mezcla de arena y un lubricante base de gravedad 0.883. A partir de estos estudios se obtuvieron las siguientes observaciones: En presión constante se observó que la velocidad del frente incrementa linealmente con el flujo de aire, mientras que la máxima temperatura es relativamente inalterada. Adicionalmente el efecto de la presión es pequeño.

Dada una mezcla de matriz–aceite se puede aproximar:

$$\frac{\text{Flujo de Aire } V_a}{\text{velocidad del Frente de Combustion } u_b} = a \cong \text{Requeimientos de aire en inyeccion} \quad (8)$$

<sup>44</sup> GARON A.M. WYGAL R.J. "A laboratory Investigation of fired-Water Flooding". SPE 4162. Gulf Research & Development co. Pittsburgh. 1974

<sup>45</sup> BURGER, J. SORIEAU, P. Op.cit. "Thermal Methods of oil Recovery". 1985.

La relación encontrada experimentalmente sugiere que; altos flujos de aire implican altos requerimientos de este, sin embargo se debe tener en cuenta que velocidades bajas del frente también requieren altos requerimientos. Es posible extrapolar los resultados obtenidos en el laboratorio para determinar los requerimientos de aire a futuro de una aplicación en campo, las diferencias en presión y flujo de aire en laboratorio a campo no son muy significativas.

*SuatBagci*<sup>46</sup> (1998) menciona en sus publicaciones que debido a que los perfiles de temperatura reflejan la cinética de reacción; la forma y máximas temperaturas alcanzadas en estos, se ven influenciados por la tasa de calentamiento, el flujo de aire y las saturaciones iniciales. Cualquier alteración en la cinética debería también ser apreciable en la composición de los gases producidos.

*Sequera*<sup>47</sup> (2007) a partir de sus investigaciones concluye que las reacciones LTO ocurren si el flujo de aire llega a ser muy bajo para sostener las reacciones de combustión. Generalmente, dada la complejidad de representar reacciones LTO, simulaciones numéricas solo se basan en las reacciones de depositación y consumo del coque. Esto según el autor puede arrojar predicciones no realistas si el oxígeno contacta al aceite en regiones de baja temperatura.

Si se incluye un modelo cinético que represente los efectos de reacciones LTO, estudios sobre variables operacionales tales como la tasa de inyección permitirían un mejor entendimiento de los efectos reales que se tienen sobre el proceso. A continuación se describe uno de los estudios que presentan más énfasis en la influencia que tiene la tasa de inyección de aire en pruebas de tubo.

#### **1.4.2 Estudio experimental por Martin y Alexander.**

En este estudio<sup>48</sup> se llevaron a cabo pruebas de tubo de combustión para crudos entre 10 a 34.2° API, mezclados con arena inconsolidada. Las condiciones

---

<sup>46</sup> BAGCI S. "Estimation of combustion zone thickness during in situ combustion process". Petroleum and natural gas engineering department middle east technical university. Ankara Turkey. 1998

<sup>47</sup> SEQUERA B. MOORE R, G. METHA, R. URSENBACH M.G." Numerical Simulation Of In-Situ Combustion Experiments Operated Under Low Temperature Conditions". Canadian international petroleum conference. University of Calgary. Paper 189. June 2007. pp 1-15

<sup>48</sup> MARTIN W. ALEXANDER J, D. Op.Cit. "Process Variables of in situ Combustion"1957

experimentales fueron variadas en ciertos rangos para determinar la influencia de variables operacionales y de proceso. El flujo de aire inyectado fue una de las principales variables de estudio, para el cual se empleó un crudo de 21.2 °API. Basados en el análisis de los efectos del flujo de aire, se evaluaron fenómenos tales como: mínimo flujo de aire para el auto sostenimiento del frente de combustión, eficiencia de oxígeno consumido, velocidad de avance del frente y requerimientos de aire.

**Resultados.** Se realizaron corridas iniciales exploratorias, corridas de prueba y ajuste para diferentes crudos a tasas de inyección variables, sin embargo las de mayor interés son las corridas para un crudo de 21 °API a tasa de flujo constante. Las principales características se pueden apreciar en la tabla 6. La corrida 1 hace referencia a una exploratoria y de la 12 a 18 son a flujos constantes.

**Tabla 6.** Data experimental y condiciones de las pruebas (Crudo 28 API-Corrida 1) (Crudo 21 API-Corridas 13 a 18)

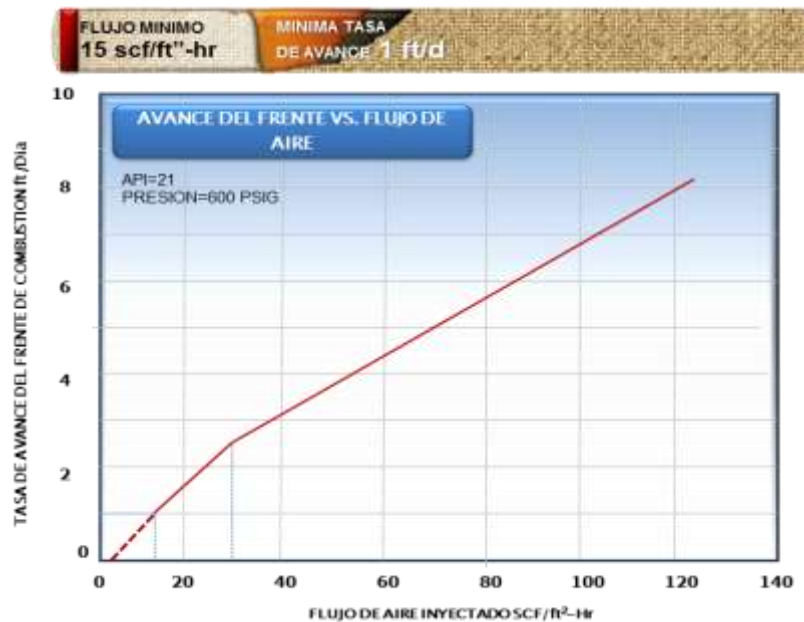
VARIABLE/CORRIDA	1	13	14	15	16	17	18
FLUJO DE AIRE (SCF/lr-ft <sup>2</sup> )	250	29.5	29.7	31.8	63.5	125	10.7
PRESION EN EL FRENTE (psig)	26	80	80	600	600	600	600
So (%)	70.5	52.3	56.6	76.2	61.0	69.6	67.7
Sw (%)	8.4	9	19.7	10	10.9	9.6	9.4
TASA DE AVANCE DEL FRENTE (ft/d)	12.5	2.9	3.26	3.05	5.17	8.39	0.85
TEMPERATURA DE COMBUSTION (°F)	850	825	800	775	800	850	650
CO <sub>2</sub> PROMEDIO (%)	-	10.8	10.7	10.9	9.9	7.7	11.4
CO PROMEDIO (%)	-	3.2	4.1	3.4	3.3	2.0	3.1
O <sub>2</sub> PROMEDIO (%)	-	3.3	2.2	1.9	3.9	8.6	1.0
AIRE REQUERIDO SCF/ft <sup>3</sup>	-	245	219	251	295	358	301

Fuente: Tomado y modificado de MARTIN W. ALEXANDER J,D. "Process Variables of in situ Combustion". SPE 914-G.Continental Oil Co. Ponca City.1957

Si se compara la corrida de mayor flujo (17) con la de menor (18) como se aprecia en la tabla anterior, los beneficios de un flujo alto: alta velocidad del frente y alta temperatura de combustión. También se presentan desventajas como es el caso de: alta producción de oxígeno, baja eficiencia de reacción dado los porcentajes de CO<sub>2</sub> producidos y los mayores requerimientos de aire.

**Mínima velocidad de combustión auto sostenida** La figura 14 muestra el efecto del flujo de aire inyectado en la velocidad de avance del frente de combustión. Se puede observar que la tasa de avance incrementa casi linealmente con el incremento del flujo sobre un flujo de 30 scf/hr-ft<sup>2</sup>. La tasa de avance cae rápidamente con una disminución en el flujo.

**Figura 14.** Avance del frente Vs Flujo de aire. (Crudo 21 °API-Corridas No 13 a 18)



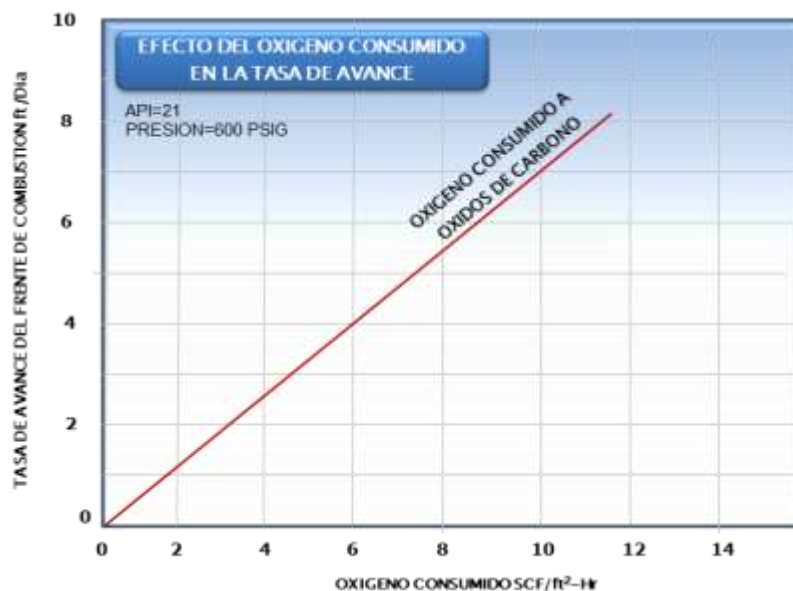
Fuente: Tomado y modificado de MARTIN W. ALEXANDER J,D. "Process Variables of in situ Combustion". SPE 914-G.Continental Oil Co. Ponca City,1957

Por otro lado el frente de combustión progresa a través del medio poroso por la quema de material residual. Por lo tanto la velocidad de avance es inversamente proporcional a la cantidad de material residual depositado. La mínima velocidad de

avance está sujeta a la cantidad de combustible residual que debe ser removido en el mínimo flujo de aire.

**Mínimo flujo de aire.** El mínimo flujo de aire en cualquier situación es el requerido para proporcionar la mínima velocidad de auto sostenimiento de combustión. A su vez, esta es la que resulta cuando el aire es proporcionado con un mínimo flujo. Este parámetro encontrado experimentalmente es aplicable a arenas in-consolidadas. Corridas de tubo con medio poroso consolidado requieren mayores flujos para compensar la alta conductividad térmica de la roca. En condiciones de campo, el mínimo flujo dependerá principalmente de las propiedades de yacimiento y del gradiente térmico predominante.

**Figura 15.** Efecto del consumo de oxígeno en la velocidad de avance del frente (Crudo 21 °API- Corridas No 13 a 18)



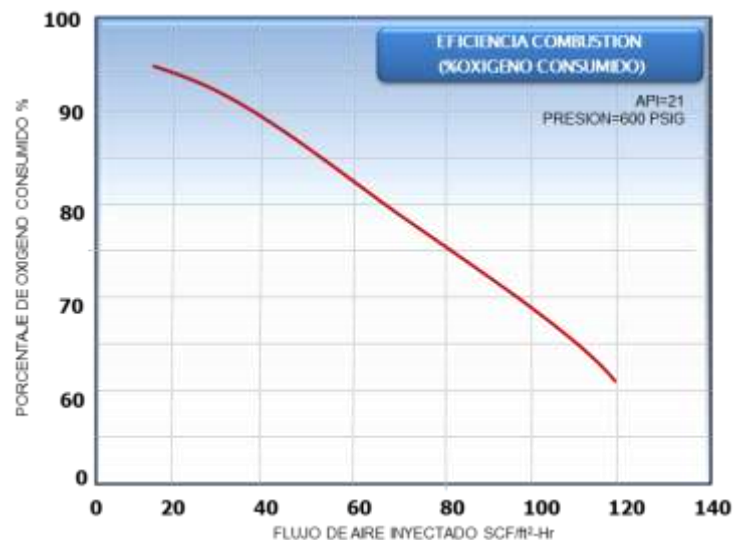
Fuente: Tomado y modificado de MARTIN W. ALEXANDER J,D. "Process Variables of in situ Combustion". SPE 914-G.Continental Oil Co. Ponca City,1957

**Flujo y eficiencia de oxígeno consumido.** La figura 15 muestra una relación lineal entre el oxígeno consumido y la tasa de avance del frente de combustión. El oxígeno convertido a óxidos de carbono fue obtenido del análisis de los gases. El total de oxígeno consumido fue calculado como la diferencia entre el oxígeno

abastecido y el oxígeno libre producido. Se asume que el oxígeno que no aparece en los gases producidos fue reaccionado para formar agua o productos oxigenados tales como ácidos orgánicos y alcoholes. La presencia de componentes oxigenados en el agua producida, fue establecida por su color, olor y bajo pH.

El término consumo de oxígeno hace referencia a la tasa o flujo de consumo y permite evaluar la eficiencia técnica del proceso puesto que entre más rápido el oxígeno sea consumido por unidad de área, la reacción de combustión a alta temperatura se generara y se estabiliza más rápida y favorablemente. Como se presenta en la gráfica anterior, a medida que se consume más oxígeno el frente avanzara con mayor rapidez, sin embargo altos flujos de aire que aseguren una alta velocidad de oxígeno consumido no garantizan que todo oxígeno se consuma, por esta razón surge el término de eficiencia de consumo. La eficiencia de consumo de oxígeno influencia la economía del proceso de combustión. Es evidente que una más baja eficiencia utilización del oxígeno, incrementa los requerimientos de aire y por ende los costos de compresión.

**Figura 16.** Eficiencia de combustión (% de oxígeno consumido)

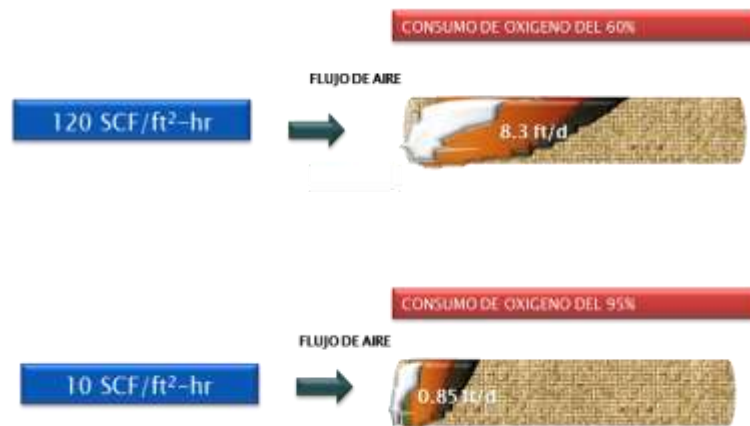


Fuente: Tomado y modificado de MARTIN W. ALEXANDER J,D. "Process Variables of in situ Combustion". SPE 914-G.Continental Oil Co. Ponca City,1957

De la figura 16 se observa que cuando el flujo de aire es incrementado a valores extremadamente altos, un porcentaje más pequeño del oxígeno del aire es utilizado. A bajos flujos el porcentaje de oxígeno consumido aumenta, sin embargo en bajos flujos según las gráficas 14 y 16 es poco probable que se mantenga el frente de combustión.

Haciendo referencia nuevamente a las corridas 17 y 18, las de mayor y menor flujo respectivamente, en la figura 17, se representan las diferencias en cuanto al porcentaje de consumo de oxígeno y velocidad del frente. Cuando el flujo es alto (120 scf/ft<sup>2</sup>-hr), la velocidad del frente aumenta considerablemente (8.3 ft/d) y se consume el oxígeno rápidamente (11 scf/ft<sup>2</sup>-hr), sin embargo dado que no existe un tiempo de residencia adecuado para la generación de reacciones a alta temperatura, una parte del oxígeno queda sin reaccionar y simplemente es producida. De allí la baja eficiencia del consumo en altos flujos (60%).

**Figura 17.** Comparación % Consumo de oxígeno- Flujo de aire y velocidad del frente



Fuente: El autor

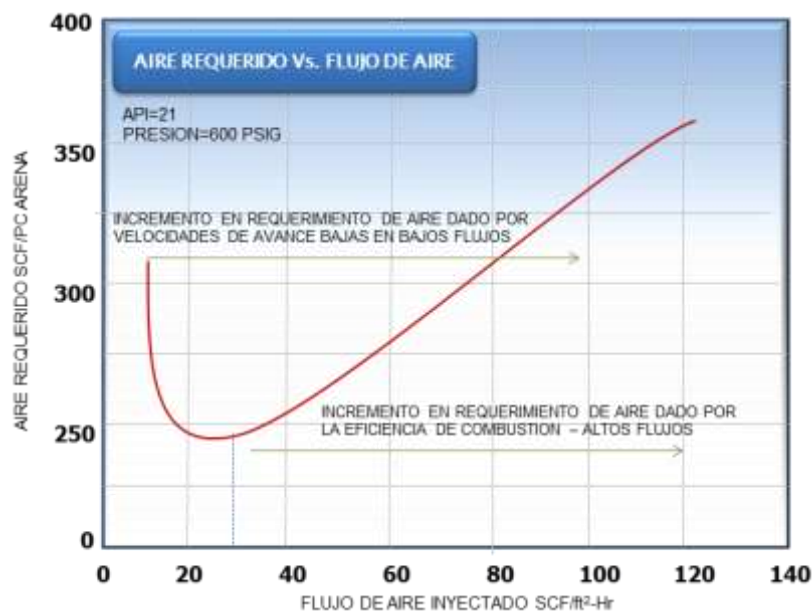
Por otro lado bajos flujos (10 scf/ft<sup>2</sup>-hr) favorecen el consumo de oxígeno (95%), pero la velocidad del frente (0.85 ft/d) y de consumo de oxígeno pueden llegar a ser tan bajas (1.2 scf/ft<sup>2</sup>-hr) que se corre el riesgo de que el frente de se apague.

**Requerimiento de aire.** La figura 18 presenta el aire requerido por pie cúbico de arena limpia en función del flujo de aire inyectado. Esta curva muestra un mínimo

de aire requerido de alrededor de 240 scf/ft<sup>3</sup> de arena limpia en un flujo cercano a 20 scf/hr-ft<sup>2</sup>. El incremento en el aire requerido cuando el flujo se incrementa fue debido a la disminución de la eficiencia del oxígeno consumido ya que como se presentó anteriormente en altos flujos parte del oxígeno no reacciona en el frente y pasa a través de este, por lo cual no es usado eficientemente y se necesita en mayores cantidades. Este fenómeno se ve afectado cuando el material residual no es suficiente para asegurar una alta temperatura de combustión (800-1000 °F).

Para quemar un volumen de arena determinado es necesario una mayor cantidad de aire si el frente de combustión se desplaza lentamente en comparación con uno más rápido, y considerando que a bajos flujos las velocidades de avance son bajas, en la gráfica se observa el aumento de requerimientos de aire en bajos flujos.

**Figura 18.** Requerimientos de aire vs flujo de aire inyectado



Fuente: Tomado y modificado de MARTIN W. ALEXANDER J,D. "Process Variables of in situ Combustion". SPE 914-G.Continetal Oil Co. Ponca City,1957

Como se puede apreciar a lo largo del presente capítulo la tasa de inyección o flujo de aire (por unidad de área) es un factor que influye tanto técnica como

económicamente en el proceso. Si bien la tasa de inyección en pruebas de tubo no es escalable, las propiedades de los fluidos producidos exhiben un comportamiento análogo en campo, por lo tanto es posible a partir del estudio de los gases de combustión de la prueba, tener un mejor entendimiento de los efectos que tiene la tasa para un crudo específico.

Dado que en Colombia no se cuenta con laboratorios para realizar pruebas de tubo, son desconocidos los rangos de valores posibles para variables tales como, picos de temperatura, velocidades del frente, eficiencia de consumo de oxígeno, relaciones H/C aparentes, flujos mínimos y requerimientos de aire. Un estudio detallado tanto experimental como a nivel de simulación numérica con muestras representativas de campos colombianos, constituye un gran avance en pro de una posible aplicación de la técnica en próximos años.

Dada la revisión de los efectos de la tasa y de los parámetros que se pueden calcular y analizar a partir de los gases de combustión y los perfiles de temperatura, la presente investigación está enfocada en el estudio de las variables presentadas en la figura 19.

**Figura 19.** Variables de estudio en la presente investigación



Fuente: El autor

## **2. CONSTRUCCIÓN MODELO BASE DE SIMULACIÓN DE UNA PRUEBA DE TUBO PARA UNA MUESTRA REPRESENTATIVA DE UN CAMPO COLOMBIANO**

Para la presente investigación se construirá y resolverá el respectivo modelo numérico de una prueba de tubo de combustión a partir de los software desarrollados por la empresa CMG<sup>49</sup> (*Builder, Stars, Winpro, Cmost y Results*), ya que estos cuentan con un módulo robusto para el tratamiento de reacciones químicas.

La parte principal de esta sección es establecer el modelo base de tubo de combustión construido a partir de una muestra representativa del campo colombiano A-1. (Denominado A-1 por acuerdos de confidencialidad), el cual presenta unas características favorables para la aplicación de CIS. Por esta razón ECOPETROL-ICP ha suministrado al grupo de Investigación Recobro Mejorado GRM-UIS información valiosa proveniente de pruebas de laboratorio con dicha muestra llevadas a cabo en laboratorios de la universidad de Calgary en Canadá, con el fin de realizar el presente estudio de simulación.

En el Anexo 1 se presentan generalidades de la simulación de yacimientos en procesos de combustión in-situ, se recomienda al lector que desee comprender más a fondo esta investigación, leer previamente dicho anexo.

### **2.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO BASE PARA LA MUESTRA REPRESENTATIVA A1**

En la presente sección se describe la construcción del caso base para una muestra representativa de un campo colombiano denominado A-1. Se ilustran las propiedades y características para los diferentes módulos, enmallado, modelo de fluidos, modelo de reacciones, calendario de inyección producción, entre otros.

---

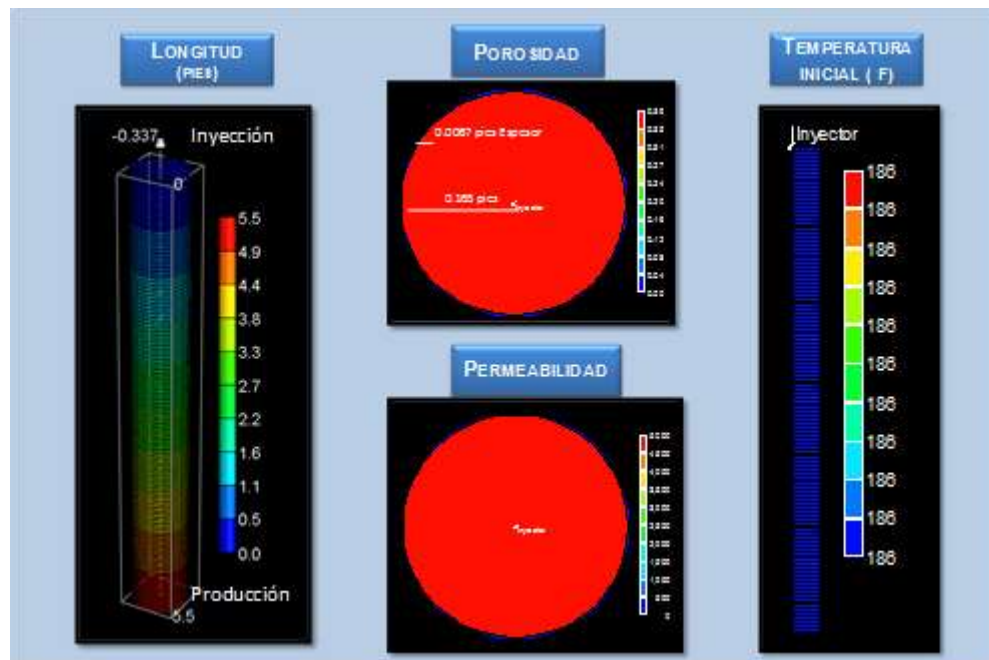
<sup>49</sup>CMG. Computer Modeling Group. Calgary Alberta Canada. User Manual. 2009

Por último se presenta una comparación entre los archivos históricos y los resultados iniciales obtenidos mediante el modelo de simulación construido.

### 2.1.1 Definición del enmallado de simulación para el caso base.

La configuración del tubo de combustión en simulación numérica no requiere de un diseño complejo<sup>50</sup> con chaqueta presurizadora y espacio anular.

**Figura 20.** Configuración del tubo y grid de simulación (modelo base)



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG), Steam, Thermal and advance Processes Reservoir Simulation, STARS.

En el modelo numérico se establecen las condiciones iniciales de presión y temperatura de la muestra, por lo tanto es posible generar una combustión controlada a través del tubo sin tener en cuenta las pérdidas de calor hacia los alrededores y así simular condiciones adiabáticas<sup>51</sup>. Por lo anterior el modelo base para el tubo de combustión planteado, únicamente presenta la respectiva muestra y el tubo de acero que la recubre, tal como se presenta en la figura 20.

<sup>50</sup> ANAYA, I. CRUZ, R. ALVAREZ, A. GUTIERRE, D. SKOREYKO, F. "Simulation Study for Designing an In-Situ Combustion Pilot In the Orinoco Belt of Venezuela: From Laboratory Studies to the Field Scale. SPE. PDVSA, CMG. SPE- 137491. 2010.

<sup>51</sup> KUMAR, M. "Simulation of laboratory In-Situ Combustion Data and Effect of Process Variations". Chevron Oil Field Research Co, SPE 16027.1987. Pp 343 – 358.

**Tabla 7.** Dimensiones del tubo de combustión (modelo base)

DIMENSIONES DEL MODELO BASE		
PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Longitud Tubo	5.5	pies
Diámetro Interno	0.327	Pies
Radio de la muestra	0.165	pies
Espesor Acero	0.006663	pies
Diámetro Total	0.337	pies

Fuente: Informe resultados experimentales pruebas de tubo Ecopetrol-ICP 2010

En la figura 20 se presentan vistas en 3D y 2D del sistema. Las tablas 7 y 8 presentan las dimensiones del grid y configuración del tubo. Establecidas las dimensiones del modelo de tubo, se puede definir las propiedades del grid, tal como se presenta en la tabla 8. El acero y el medio poroso constituyen dos divisiones en dirección r.

**Tabla 8.** Propiedades del grid

PROPIEDADES DEL GRID		
PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Divisiones r	2	
Divisiones $\theta$	1	
Divisiones K	128	
Espesor x Grid (k)	0.0429687	pies
Total de Celdas	256	

Fuente: Informe resultados experimentales pruebas de tubo Ecopetrol-ICP 2010

Propiedades térmicas de la roca y el acero además de la porosidad y permeabilidad se presentan en la tabla 9 (M capacidad calorífica, K conductividad térmica). Las propiedades térmicas tanto del medio poroso como del acero y el espacio anular no son reportadas en la información suministrada para la muestra del campo A-1, sin embargo se emplearon datos a partir de un modelo de tubo

suministrado por Gutiérrez<sup>52</sup> ( $M=35\text{Btu/lbm-}^\circ\text{F}$ ) los cuales fueron comparados con valores reportados en la literatura por autores como Kumar<sup>53</sup> ( $M=34\text{Btu/lbm-}^\circ\text{F}$ ). Estas serán variables sometidas a análisis de sensibilidad posteriormente.

**Tabla 9.** Propiedades térmicas y petrofísicas del sistema

PROPIEDADES TÉRMICAS Y PETROFÍSICAS DEL SISTEMA		
PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
$M_{(muestra)}$	35	Btu/ft <sup>3</sup> -F
$M_{(tubo)}$	170	Btu/ft <sup>3</sup> -F
$K_{(tubo)}$	400	Btu/ft-d-F
$K_{(roca)}$	38	Btu/ft-d-F
$K_{(del\ aceite)}$	1.8	Btu/ft-d-F
$K_{(del\ gas)}$	0.64	Btu/ft-d-F
$K_{(del\ agua)}$	8.6	Btu/ft-d-F
Presión refer Poro	3100	psi
Porosidad <sub>(muestra)</sub>	39.2	%
Porosidad acero <sub>(tubo)</sub>	0	%
Permeabilidad $i,j,k_{(muestra)}$	5000	md

Fuente: Informe resultados experimentales pruebas de tubo Ecopetrol-ICP 2010

### 2.1.2 Modelo de fluidos – Caso base.

Para la construcción del modelo de fluidos se contó con un *sector model* del campo A-1 suministrado por el ICP. Dentro de la información y propiedades de mayor interés de este crudo de 13°API, se encuentra el fraccionamiento del crudo original en pseudo-componentes (ver tabla 10). La cual es de interés para el desarrollo posterior del modelo de reacciones.

En la tabla 11 se presentan propiedades básicas y necesarias para la elaboración de este modelo de fluidos. Igualmente se obtienen curvas de viscosidad contra temperatura, factor volumétrico, densidad y viscosidad del crudo en función de la presión, las cuales son necesarias para determinar los cambios del fluido en función de presión y temperatura.

<sup>52</sup>GUTIERREZ D, Op.cit "Air Injection Based Processes for Improved Oil Recovery". 2010.

<sup>53</sup> KUMAR, M. Op.cit. "Simulation of laboratory In-Situ Combustion Data and Effect of Process Variations"1987. Pp 345.

**Tabla 10.** Distribución del aceite en pseudo-componentes

COMPOSICIÓN DEL ACEITE	
Componente	Fracción Molar
CO <sub>2</sub>	0.036712
N <sub>2</sub>	0.029872
C <sub>1</sub> -NC <sub>4</sub>	0.465960
IC <sub>5</sub> -C <sub>20</sub>	0.146570
C <sub>21</sub> -C <sub>30</sub>	0.320890

Fuente: Informe resultados experimentales pruebas de tubo Ecopetrol-ICP 2010

Las tablas de constantes de equilibrio son necesarias para modelar los cambios líquido gas de todos los componentes por lo tanto también son incluidas en el presente modelo de componentes.

**Tabla 11.** Propiedades básicas de los componentes

PROPIEDADES BASICAS DE LOS COMPONENTES		
PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Peso molecular Coque	13.13	lb/lbmol
Densidad del coque	79.3	lb/ft <sup>3</sup>
Entalpia del coque	4.06	BTU/lbm-F
Presión de referencia	3651	psi
Temperatura yacimiento	186	F
Presión de superficie	14.7	psi
Temperatura Superficie	60	F
Densidad aceite T@y <sub>to</sub>	58	ft <sup>3</sup> /lbm
Viscosidad aceite T@Y <sub>to</sub>	149	Cp

Fuente: Informe resultados experimentales pruebas de tubo Ecopetrol-ICP 2010

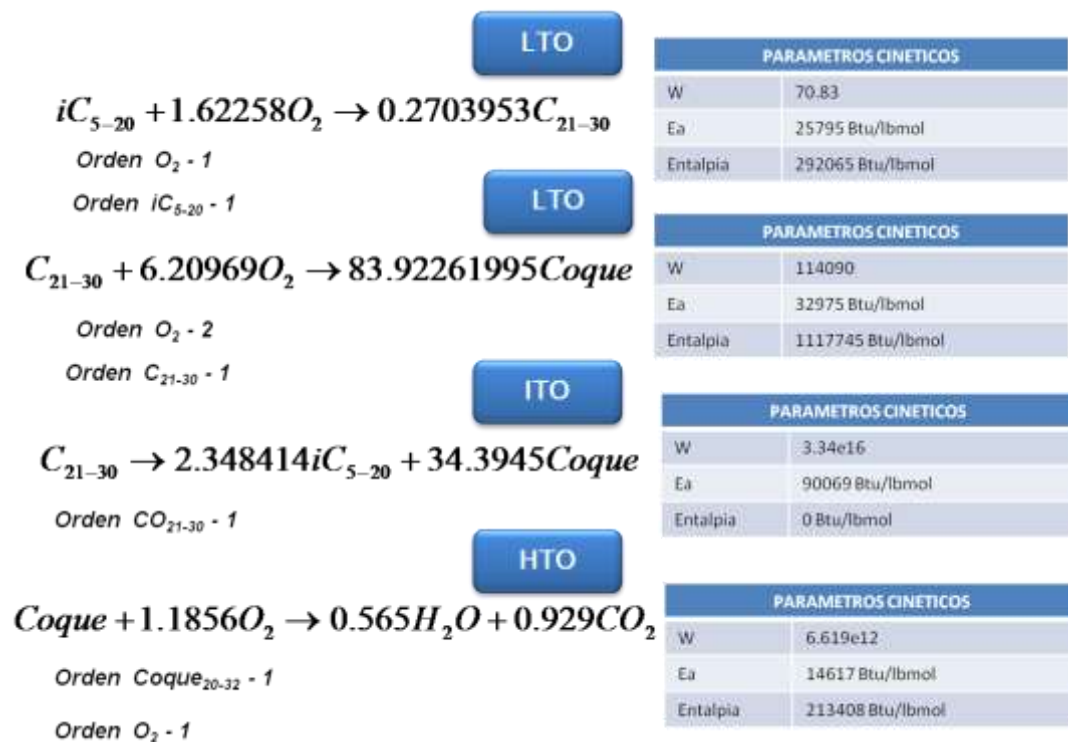
### 2.1.3 Modelo de reacciones – Caso base.

El modelo de reacciones es fundamental para que se genere el frente de combustión y por lo tanto constituyen en gran medida la base para la presente investigación. El modelo debe ser determinado mediante pruebas adicionales

como las como la pruebas RTO<sup>54</sup> (por sus siglas en inglés- *Ramped Temperature Oxidation*), las cuales no se cuenta en Colombia.

El modelo de reacciones suministrado por Ecopetrol-ICP, no es el definitivo sin embargo según confirmaron algunos de los miembros del equipo encargado de la simulación de este campo, el modelo permitirá lograr el ajuste histórico, claro está con la debida modificación de los parámetros cinéticos.

**Figura 21.** Modelo de reacciones



Fuente: Informe resultados experimentales pruebas de tubo Ecopetrol-ICP 2010

Como se puede apreciar en la figura 21, el modelo de reacciones está en función de pseudo componentes y cuenta con dos reacciones de oxidación a baja temperatura o reacciones de adición de oxígeno, una reacción de craqueo o depositación de combustible y la reacción de combustión a altas temperaturas. Una de las características a resaltar es que una de las reacciones a baja

<sup>54</sup> MOORE R.G. URSENBACH M.G. LAURSHEN C.J. Belgrave J.D. Metha S.A. "Ramped Temperature Oxidation Analysis of Athabasca Oil Sands Bitumen". University of Calgary. PETSOC 991340. Vol. 38. No. 13. Special Edition 1999. pp 1-10

temperatura permite la depositación de combustible, mecanismo importante para el análisis de la tasa de inyección de aire, puesto que según la literatura una baja tasa promueve las reacciones en baja temperatura y por lo tanto la depositación de combustible.

Los parámetros correspondientes a la energía de activación, factor de frecuencia, entalpia de reacción y órdenes de reacción fueron suministrados junto con el modelo. Estos serán sometidos a análisis de sensibilidad y posteriormente si es necesario se les realizara la respectiva modificación dentro de rangos coherentes para obtener el ajuste con variables objetivo.

#### 2.1.4 Propiedades interacción roca-fluido – Caso base.

No se tuvieron en cuenta efectos capilares, la roca es preferencialmente mojada por agua, no se tuvieron en cuenta fenómenos de histéresis ni de absorción.

**Tabla 12.** End points – Curvas de permeabilidad relativa

END POINTS CURVAS DE PERMEABILIDAD RELATIVA	
PROPIEDAD	VALOR
Saturación de agua connata	0.14
Saturación de agua critica	0.14
Saturación Aceite Irreducible (Curva Agua-Aceite)	0.2
Saturación Aceite Residual (Curva Agua-Aceite)	0.2
Saturación Aceite Irreducible (Curva Gas-Liquido)	0.15
Saturación Aceite Residual (Curva Gas-Liquido)	0.15
Saturación de gas connata	0.05
Saturación critica de gas	0.05
Permeabilidad relativa aceite en saturación agua connata	0.6
Permeabilidad relativa agua en saturación aceite irreducible	0.2
Permeabilidad relativa al gas en liquido connata	0.2
Exponentes n para las correlaciones de Stone	2

Fuente: Informe resultados experimentales pruebas de tubo Ecopetrol-ICP 2010

Las curvas de permeabilidad relativa fueron generadas a partir de los *end points* que se presentan en la tabla 12 mediante la correlación de Stone, en donde la saturación inicial de los fluidos fue establecida a partir de un informe de la prueba

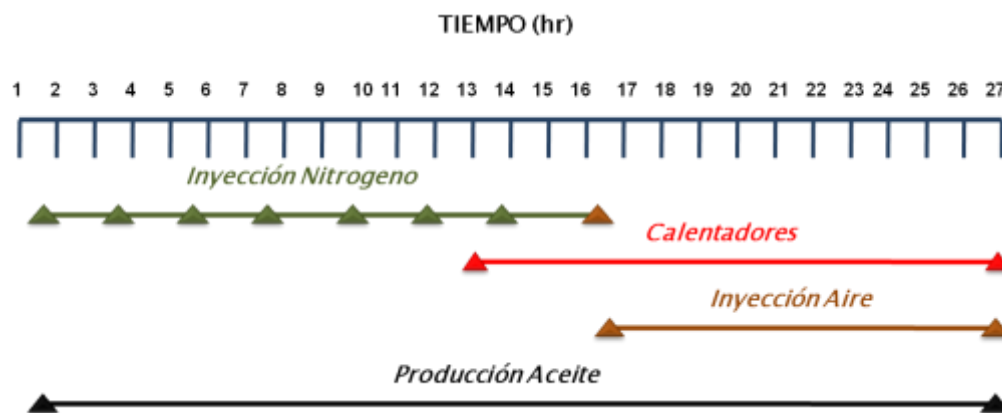
de tubo llevada a cabo en la universidad de Calgary, los demás valores fueron obtenidos a partir del sector model suministrado.

### 2.1.5 Calendario Inyección Producción – Caso base.

De acuerdo a los informes suministrados de las pruebas llevadas a cabo en la universidad de Calgary, se obtuvo el calendario que se puede apreciar en la figura 22. En este se estableció un periodo de inyección de nitrógeno (periodo de purga) por 16.5 horas, iniciando al minuto 3. No se estableció el periodo inicial de presurización y el final de enfriamiento puesto que no son necesarios en simulación numérica.

Los calentadores iniciaron su trabajo a las 13 horas, mientras que la inyección de aire comenzó a las 16.5 horas, por un periodo total de 10.5 horas, para una duración total de la prueba de 27 horas. Para la distribución de las datas se generaron 3241 datas con un tiempo de paso de 0.5 minutos.

**Figura 22.** Calendario inyección producción



Fuente: Informe resultados experimentales pruebas de tubo Ecopetrol-ICP 2010

En cuanto a las condiciones operacionales de la prueba, (ver tabla 13), se estableció una tasa de inyección de aire la cual es de 270 pies<sup>3</sup>/d, y que es reportada en los informes preliminares. En la tabla 13 también es posible observar la temperatura de inyección además de la composición del aire inyectado y las presiones de producción e inyección.

**Tabla 13.** Propiedades de inyección y producción

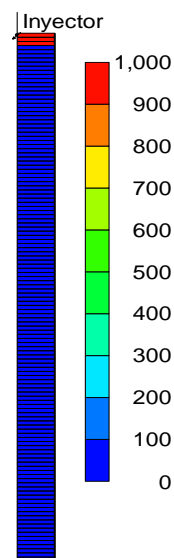
PROPIEDADES DE INYECCION Y PRODUCCION		
Propiedad	Valor	Unidad
Tasa de inyección de aire	270	pies <sup>3</sup> /d
Temperatura de Inyección	186	°F
Composición del aire	21 % O2 79% N2	%
Presión de Inyección BHP MAX	4500	Psia
Presión de producción BHP MIN	3220	Psia

Fuente: Informe resultados experimentales pruebas de tubo Ecopetrol-ICP 2010

### 2.1.6 Ubicación de los calentadores – Caso base.

Se ubicaron 3 calentadores en las celdas K=1, K=2, K=3 (ver figura 23 – celdas en rojo) a una temperatura inicial de 186 °F, sin embargo esta ira en aumento hasta alcanzar temperaturas cercanas a los 500°F. Como se mencionó anteriormente su funcionamiento se dio a las 13 horas. Los tres calentadores se ajustaron con una tasa neta de calor de 1000 Btu/dia y un coeficiente de transferencia de calor de 100 Btu/dia-°F.

**Figura 23.** Vista lateral 2D, coeficiente transferencia de calor Btu/dia-°F



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

El calendario para el aumento de la temperatura al inicio y disminución de esta al final de la prueba, se obtuvo gracias al archivo histórico de los perfiles de temperatura. Se escogió la termocupla inicial de la prueba experimental y gracias a que se tenían tabulados los valores de temperatura en el tiempo se determinó el calendario de temperatura para los calentadores del modelo de simulación asignándole un valor de menos 10°F a cada valor correspondiente a los registros de la termocupla inicial del modelo experimental. Esto con el fin de no enmascarar los perfiles de temperatura producto de las reacciones químicas. Esta configuración también es desarrollada por autores como Kumar<sup>55</sup> y Gutiérrez<sup>56</sup>.

### **2.1.7 Variables de salida – Caso Base.**

Las variables de salida de mayor importancia corresponden a los perfiles de temperatura, por lo tanto es necesario asignar las termocuplas. Para este caso se emplearon un total de 20 termocuplas, 10 correspondientes al centro de la muestra y las otras 10 ubicadas en el exterior del tubo tal como se muestra en la figura 24. TC hace referencia a temperatura en el centro, TP al segundo grupo de termocuplas que se ubicara en el exterior de la pared del tubo. Entre cada grupo de termocuplas en dirección K existen aproximadamente 0.5pies, la misma distancia entre cada 3 termocuplas del modelo experimental el cual presenta 33 termocuplas distribuidas en la parte central de la muestra. Para el presente modelo se escogieron 10 de estas termocuplas manteniendo su distancia respectiva, ya que es posible lograr representar la tendencia y comportamiento del frente a partir de estas 10 tal como se presenta en la figura 24.

Otras variables para analizar, de gran importancia para la presente investigación y que se deben activar en el software son:

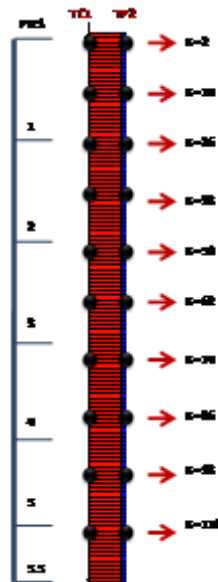
- Viscosidad y densidad de los componentes,
- Concentración del componente solido (Coque),
- Concentración de los gases producidos,

<sup>55</sup> KUMAR, M. Op.cit. 1987. "Simulation of laboratory In-Situ Combustion Data and Effect of Process Variations" Pp 345.

<sup>56</sup> GUTIERREZ D. Op.Cit. "Air Injection Based Processes for Improved Oil Recovery" 2010.

- Fracciones molares producidas de los pseudo-componentes.
- Localización del frente contra distancia.

**Figura 24.** Ubicación de las termocupas (puntos negros), vista lateral



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

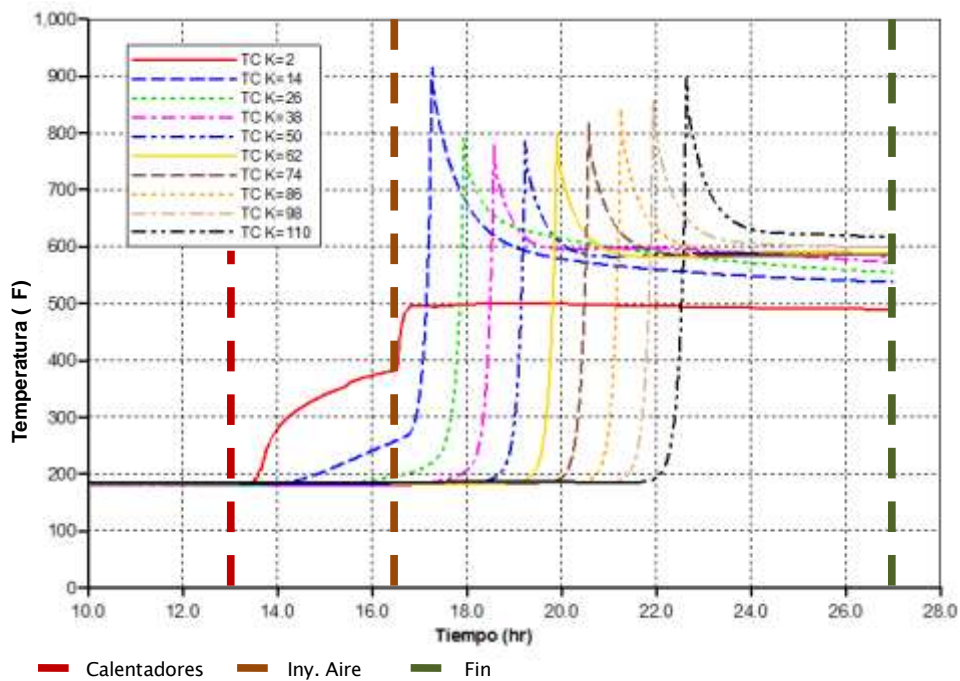
## 2.2 VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS INICIALES

Una vez construido el caso base inicial se procede a visualizar los resultados. Al ser estos los preliminares se espera que difieran significativamente de los resultados experimentales, una vez llevado a cabo el ajuste histórico y el análisis de sensibilidad. En todas las gráficas obtenidas se indicó el inicio de los calentadores (línea punteada en rojo), el inicio de la inyección de aire (línea punteada en naranja) y la finalización de la prueba (línea punteada en verde). La escala de tiempo en todas las gráficas comienza a partir de 10 horas ya que entre el periodo 0 y 13 horas solamente se inyectó nitrógeno con el fin de simular la etapa de purga de la prueba experimental.

Inicialmente se analizaron los resultados correspondientes a los perfiles de temperatura, tal como se puede apreciar en la figura 25. En esta gráfica TC hace

referencia a los registros de temperatura del centro del medio poroso. Cuando inicia el funcionamiento de los calentadores, se observa un incremento de temperatura hasta aproximadamente 380°F; se debe tener en cuenta que la temperatura inicial de la prueba es de 186 F. Se evidencia en la primera termocupla (K=2) que no se consiguió la ignición instantáneamente (16.5hr) en la parte inicial del tubo, sin embargo esta se evidencio en la segunda termocupla (K=14) alrededor de 0.56 pies.

**Figura 25.** Perfil de temperaturas - Caso base



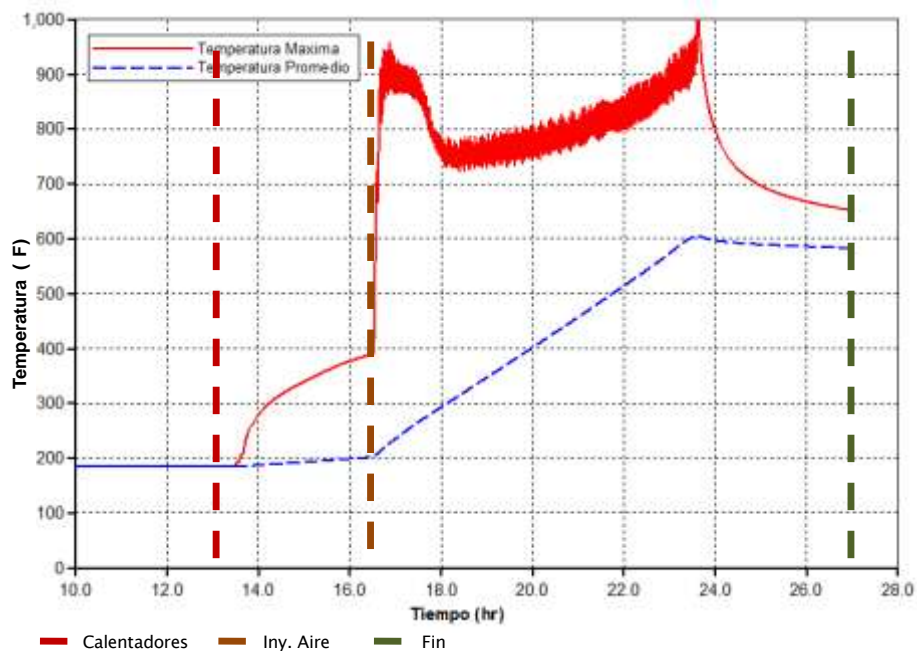
Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Una vez conseguida la ignición se obtiene un incremento de temperatura hasta los 900°F, sin embargo posteriormente tiene una ligera caída este pico (termocuplas 26, 38, 50) y nuevamente se incrementa según como se observa para las termocuplas finales. Un punto importante para resaltar de este perfil de temperaturas es que el máximo para la última termocupla (K=110) se registró alrededor de las 22.6 horas, lo que quiere decir que rápidamente el frente llego al final del tubo en un tiempo menor al empleado en la prueba experimental. En el

análisis de sensibilidad y ajuste histórico se determinaran las causas de este efecto y se realizaran las respectivas correcciones.

En la figura 26 se presentan los picos de temperatura (Curva roja) y la temperatura promedio (Curva azul). La temperatura promedio durante la prueba alcanza los 600°F a alrededor de las 23.5 horas y después se mantuvo constante, lo cual indica tal como se describió anteriormente que el frente de combustión alcanzó el final del tubo antes del tiempo esperado; puesto que debería llegar al final del tubo a las 27.5 horas tal como sucede en la prueba experimental.

**Figura 26.** Temperaturas máximas y temperaturas promedio - Caso base



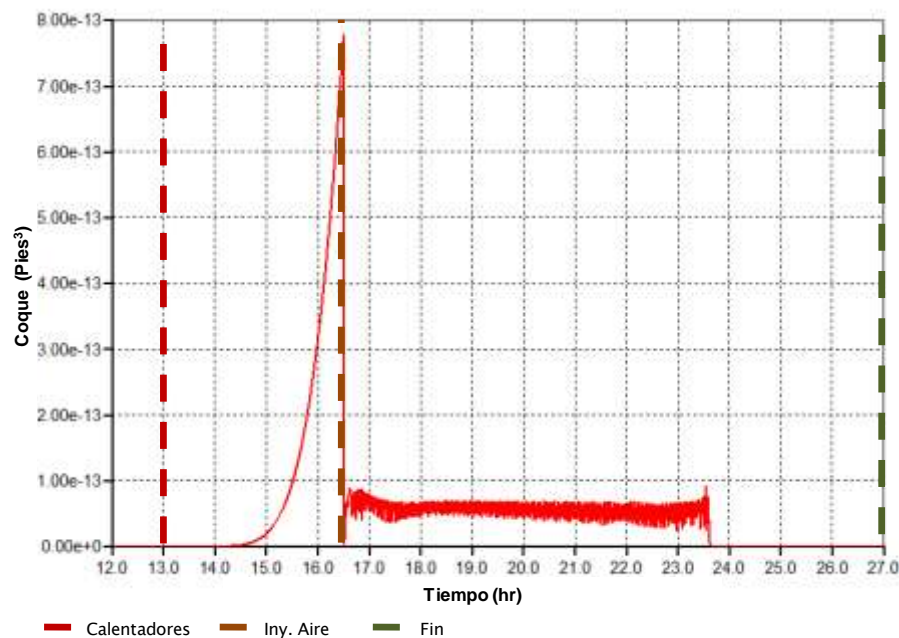
Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Los picos representan el avance del frente de combustión a medida que se consume y se forma el coque en cada una de las celdas, por lo tanto aumentan y disminuyen de forma alternada y oscilatoria. Otros efectos importantes que se presentan en esta curva de picos de temperatura, están relacionados con los picos altos que se dan al comienzo de la prueba, posteriormente caen y nuevamente hacia el final de la prueba vuelven a alcanzar alrededor de los

1000°F, este fenómeno está relacionado igualmente a la formación y consumo de coque.

Tal como se puede apreciar en la figura 27, se generó una mayor cantidad de coque producto de los calentadores; una vez iniciada la inyección de aire se consumió este coque lo cual concuerda con los picos máximos de temperatura al inicio de la prueba de la figura 26. Una vez consumido esta cantidad de coque al inicio de la inyección de aire, posteriormente se presentan picos oscilatorios de generación y consumo de coque (lo cual concuerda con el fenómeno oscilatorio de los picos de temperatura) sin embargo en comparación con la cantidad de coque inicial generada, el coque depositado y consumido posteriormente y durante la mayor parte de la prueba es menor.

**Figura 27.** Depositación de coque



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

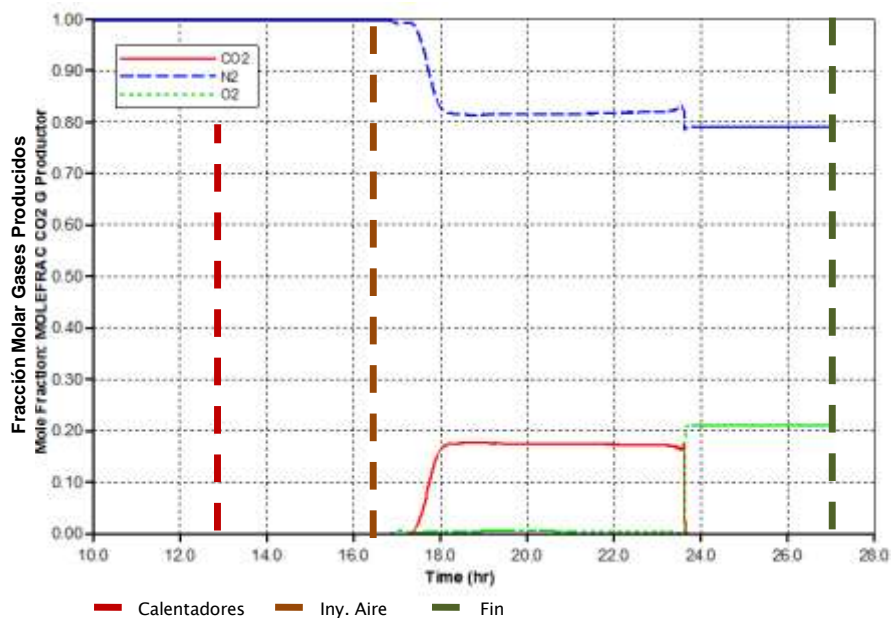
Cuando el frente llega al final del tubo (23.5 horas) se observa una tendencia creciente en la cantidad de coque consumido (los picos de coque llegan más abajo que al inicio de la inyección de aire), por esta razón los picos de temperatura se incrementan al final de la prueba. Este fenómeno está relacionado con la

transferencia de calor cuando el frente llega al final del tubo, la cual es menor precisamente gracias a que disminuye el número de celdas delante de este.

En la figura 28 se encuentra la fracción molar de los gases producidos, oxígeno, nitrógeno y dióxido de carbono. Poco después de iniciarse la inyección de aire alrededor de las 17 horas se dio un decremento notorio en la fracción de  $N_2$  y posteriormente se estabilizó en un valor de 81%, mientras que el  $CO_2$  se estabilizó en alrededor de 18% en la hora 18.

El frente de combustión estable se inició a las 18 horas, se dio en un régimen de reacción de alta temperatura o HTO. Sin embargo también se puede evidenciar gracias a la producción de oxígeno que el frente de combustión llegó al final del tubo alrededor de la hora 23.5, por lo tanto a partir de ese momento solamente se produjo aire (21%  $O_2$  y 79%  $N_2$ ).

**Figura 28.** Fracción molar de los gases de combustión producidos - Caso base

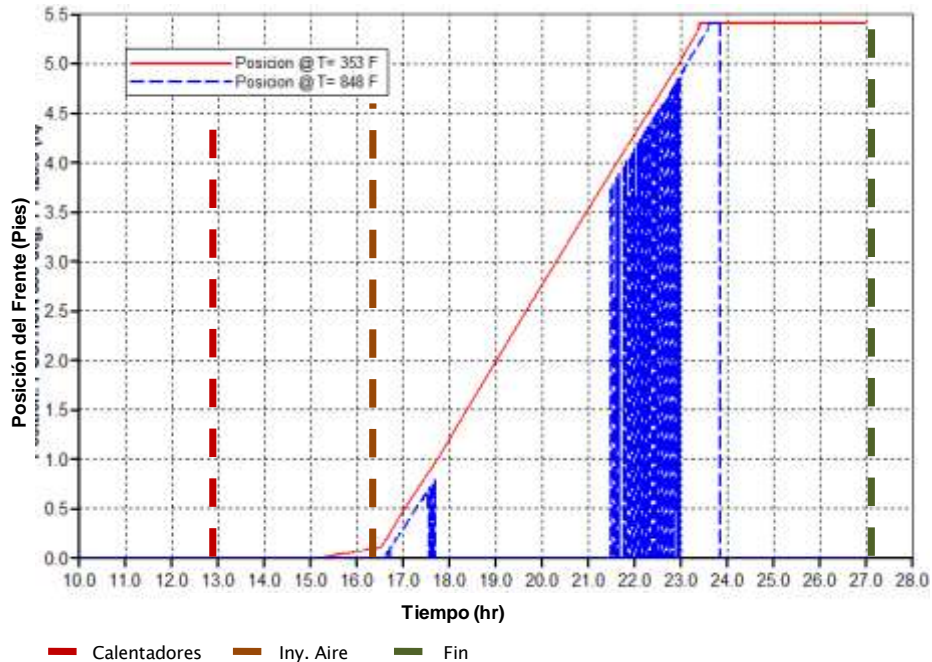


Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

En la figura 29 se presenta la gráfica de posición contra tiempo, en esta el eje Y representa la longitud del tubo (teniendo en cuenta la longitud del tubo de 5.5

pies), además es posible obtener la posición del frente a diferentes temperaturas, para este caso se trabajara con dos temperaturas, de 353°F y 848°F, esto debido a que se cuenta con las respectivas posiciones a estas temperaturas para el modelo experimental (datos suministrados).

**Figura 29.** Posición del frente de a 353°F y 848°F



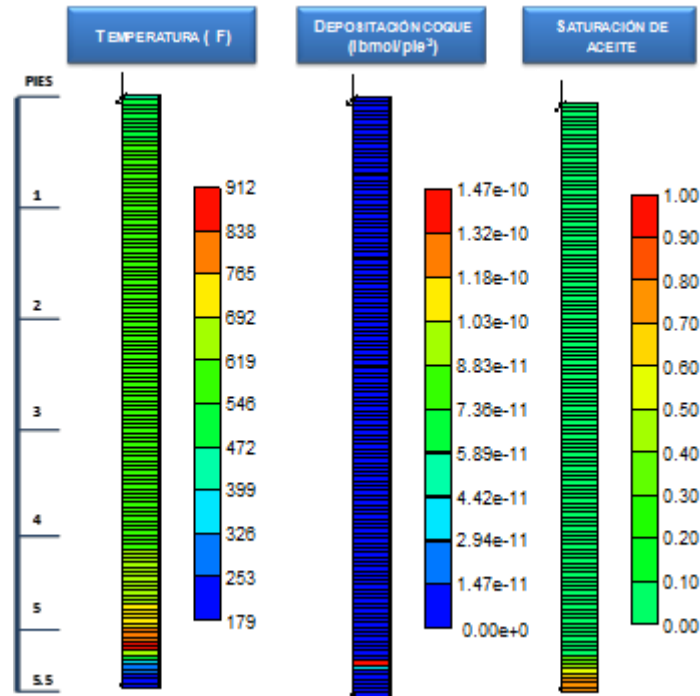
Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

La curva en rojo representa la posición del frente de combustión a una temperatura estable de 353°F. A esta temperatura el frente inicio inmediatamente se dio la inyección de aire. Este tiene una tendencia de tipo lineal con pendiente positiva, sin embargo al igual que la posición del frente para una temperatura de 848°F, alcanzan rápidamente el final del tubo a 23.5 horas tal como se mencionó anteriormente. Por otro lado la posición del frente a 848°F (curva azul) presenta ese comportamiento oscilatorio ya que las temperaturas también presentan este comportamiento y sobrepasan los 848 °F, pero caen inmediatamente por debajo de este valor y vuelven a subir por encima de este a alrededor de las 21.5 horas. Dado que el presente estudio está enfocado en el comportamiento de quema y la

influencia que la tasa de inyección tiene sobre este, no se analizaran la producción de fluidos, ni el factor de recobro.

Por último en la figura 30 se pueden apreciar perfiles en 2D de temperatura, depositación de coque y saturación de aceite. Estos perfiles fueron tomados un tiempo antes de que el frente de máxima temperatura llegara al final del tubo (alrededor de 23 horas). Estos permiten evidenciar la formación de un frente de combustión. Detrás de este la saturación de aceite es alrededor de 0, delante de este es la saturación original. Igualmente en las inmediaciones del frente justo delante de este se observa la formación de coque.

**Figura 30.** Perfil de propiedades 2D (Temperatura, Depositación coque, Saturación de aceite)



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Gracias al perfil de temperatura se puede apreciar que las mayores temperaturas representan el frente de combustión (alrededor de 910°F). Al inicio del tubo donde está ubicado el sistema de inyección y los calentadores se observan temperaturas alrededor de los 500°F, producto del efecto de los calentadores, mientras que en

la parte intermedia están alrededor de los 580°F. Inmediatamente delante del frente de combustión se observa una disminución de temperatura, en la parte final del tubo donde la temperatura se acerca a la temperatura original de la muestra 186°F.

Un problema apreciable se debe a que el frente alcanzo más rápido de lo esperado el final del tubo, esto comparado con la prueba física. Posteriormente se corregirá este inconveniente a partir de la manipulación de variables como la energía de activación y factor de frecuencia.

### **2.3 CREACIÓN DE ARCHIVOS HISTÓRICOS**

Gracias a los datos suministrados referentes a las pruebas físicas llevadas a cabo sobre la muestra representativa del yacimiento colombiano A-1, fue posible construir los siguientes archivos históricos.

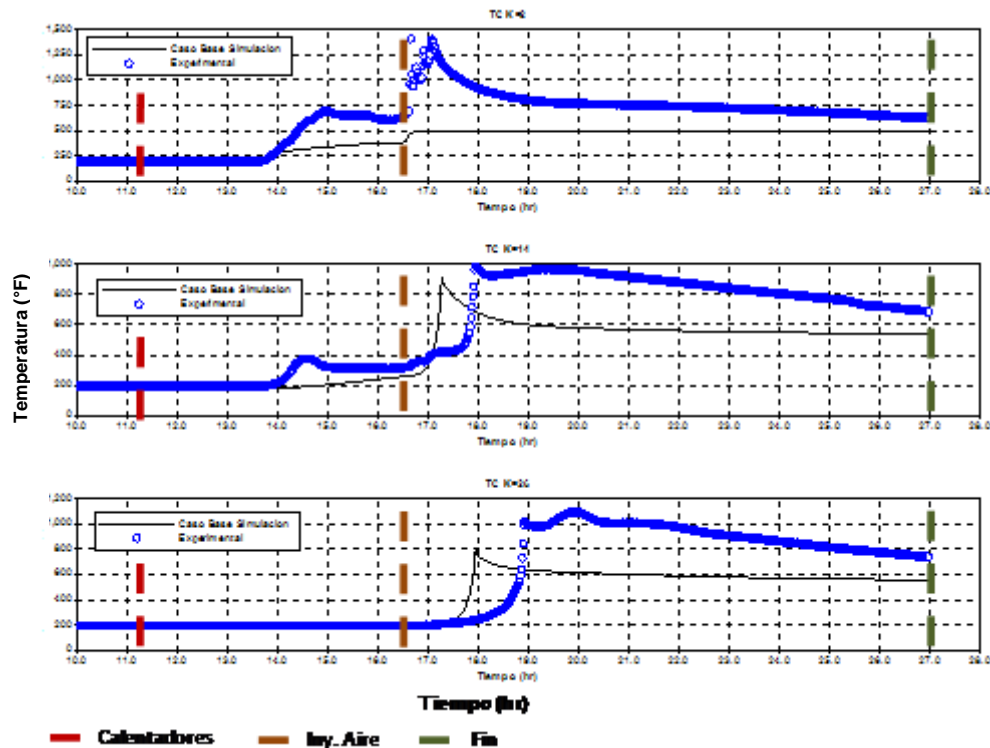
1. Perfil de temperaturas para 10 termocuplas
- 2 Temperatura promedio
3. Temperaturas Máximas
4. Fracción molar de los gases producidos (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>)
5. Posición del frente a 343°F
6. Posición del frente de combustión a 848°F

Para la creación de los archivos históricos relacionados con la temperatura se contó con una historia completa de los registros de temperaturas de la prueba para termocuplas localizadas en la parte central y en el exterior del tubo de combustión. Se seleccionaron termocuplas que cubren la longitud completa del tubo. Los perfiles de temperatura para las 10 termocuplas de la parte central para el modelo físico coinciden con los perfiles de temperatura de las 10 termocuplas del modelo de simulación, ubicadas en las celdas K=2, 14, 26, 38, 50, 62, 74, 86, 98, 110(espaciadas alrededor de 0.56 pies dirección K).

## 2.4 COMPARACIÓN ARCHIVOS HISTÓRICOS CON RESULTADOS DE SIMULACIÓN

En cada una de las figuras (figuras 31 a 35) se presentan dos curvas. La curva roja continua corresponde a los resultados de simulación y la curva azul discontinua corresponde a los resultados de la prueba física o archivos históricos. En la figura 32 se presentan las temperaturas registradas por las termocuplas ubicadas en el centro de la muestra, en las celdas K=2, 14, 26, (parte inicial del tubo) y en la figura 33 para las celdas K= 54, 67, 94 (parte intermedia del tubo, ya que en la parte final no se desarrolló el frente para el modelo de simulación). Nótese que para estas graficas el eje correspondiente al tiempo inicia en 10 horas, ya que antes de esta hora no se presentan eventos de importancia.

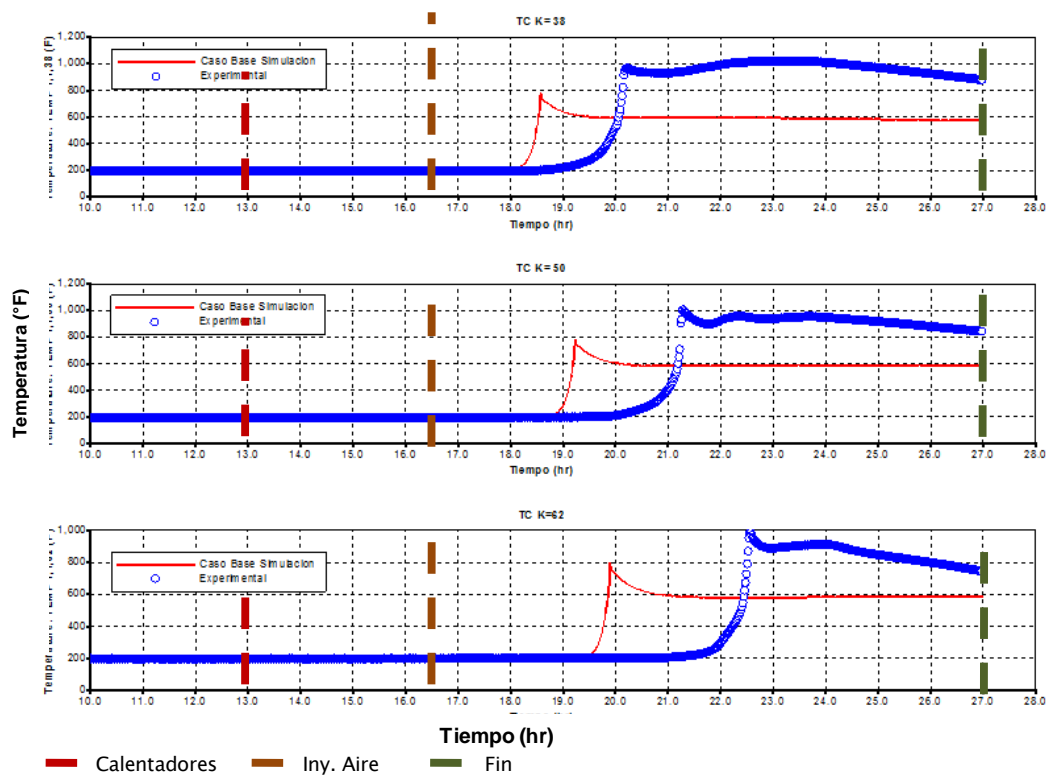
**Figura 31.** Comparación caso base contra histórico para el perfil de temperaturas (TC ubicadas en K=2, 14, 26)



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Se observa una considerable diferencia (ver figuras 31 y 32) entre las temperaturas alcanzadas por la prueba experimental y el caso base de simulación, indicando que la prueba experimental presenta un adecuado comportamiento de quema en modo de alta temperatura HTO. Por análisis de gases principalmente por la fracción molar de CO<sub>2</sub> producido promedio (17%) el caso base también está desarrollando un frente en modo HTO sin embargo las temperaturas no alcanzan las experimentales. Después del análisis de sensibilidad y el estudio para el ajuste histórico se establecerán las causas y/o razones por las cuales se presenta esta diferencia de temperaturas.

Figura 32. Comparación caso base contra histórico para el perfil de temperaturas (TW1 ubicadas en K=38, 50, 62)



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

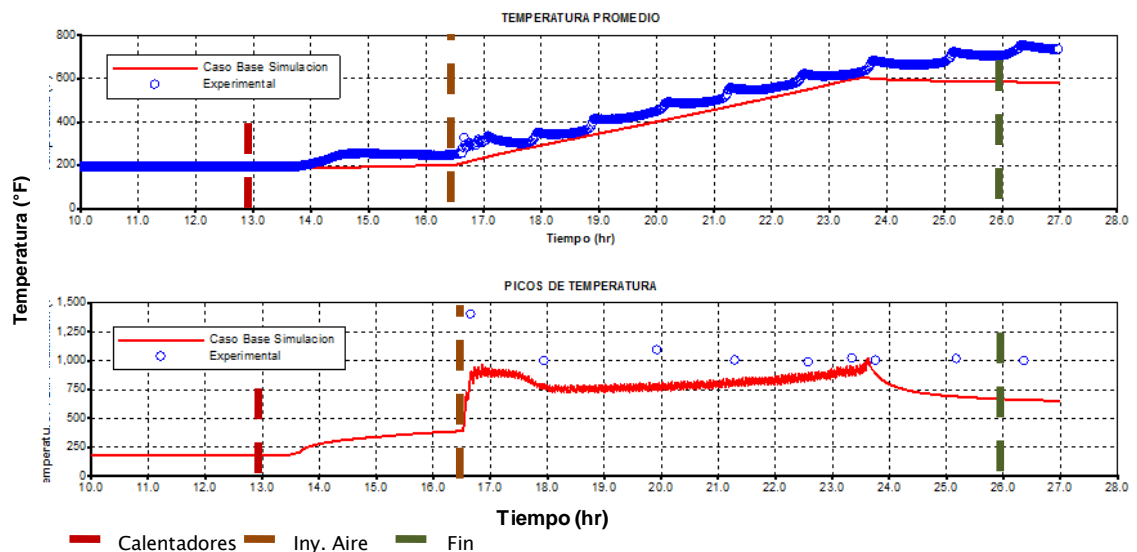
Como era de esperarse las termocuplas ubicadas en la parte intermedia del tubo (figura 35 K=50, K=32) también presentan diferencias de temperatura de alrededor

de los 200°F, por lo tanto se puede concluir que es necesario realizar un análisis de sensibilidad para determinar cuáles son los parámetros que inciden en el aumento de temperaturas, con el fin de posteriormente lograr el ajuste histórico

La siguiente comparación corresponde a las temperaturas promedio y máximas, como se puede apreciar en la figura 33. La temperatura promedio del archivo histórico va en aumento de forma lineal hasta llegar a aproximadamente los 800°F, se puede apreciar que existe una tendencia similar a las temperaturas promedio del modelo de simulación, la gran diferencia radica en que el frente llega antes del tiempo establecido al final del tubo, razón por la cual alrededor de 23.5 horas la temperatura permanece casi constante.

En cuanto a los picos de temperatura el promedio del archivo histórico está alrededor de los 1000°F mientras que en el caso base está alrededor de los 850°F con fluctuaciones al inicio y al final de la prueba. Esta variación se estudiará durante el análisis de sensibilidad de variables.

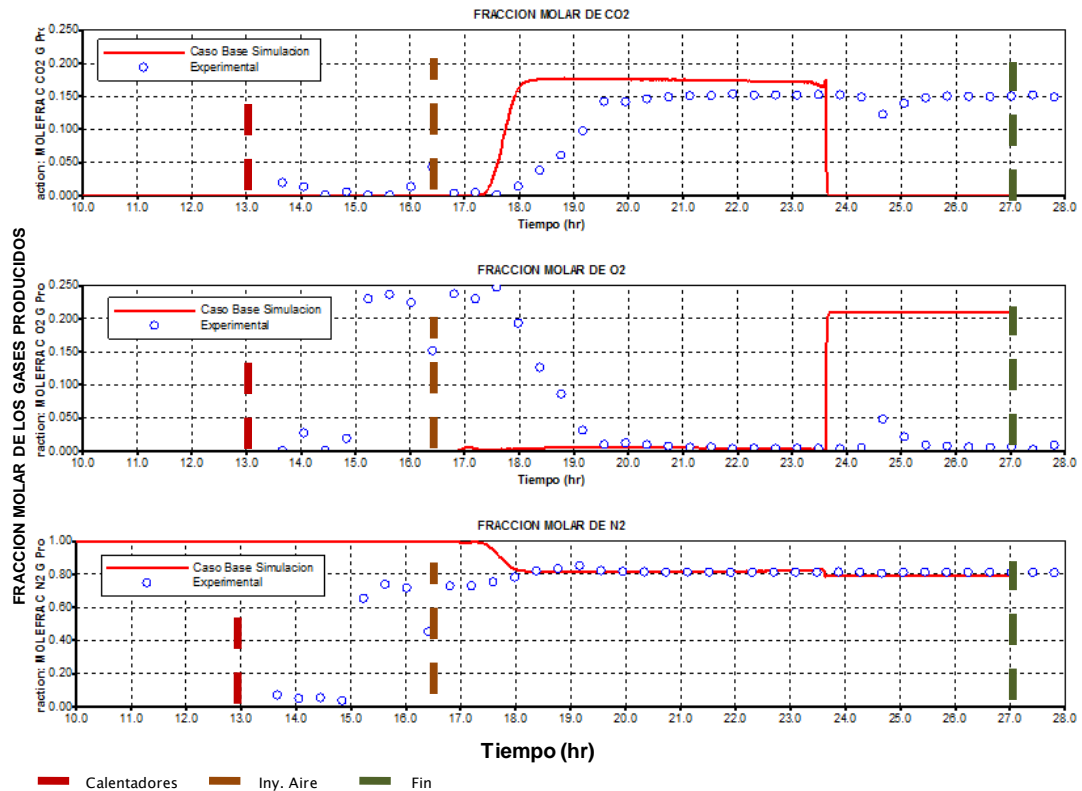
**Figura 33.** Comparación caso base contra histórico para temperaturas promedio y máximas registradas durante la prueba



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

En la comparación de la fracción molar de los gases producidos (Ver figura 34), las primeras curvas de arriba hacia abajo corresponden a la fracción molar de  $\text{CO}_2$ , en la cual la curva de históricos es menor que la curva de los resultados de simulación aunque la variación no es muy significativa, y en las dos se puede concluir que se dan reacciones en modo HTO.

**Figura 34.** Comparación caso base contra histórico para fracciones molares de los gases de combustión producidos



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

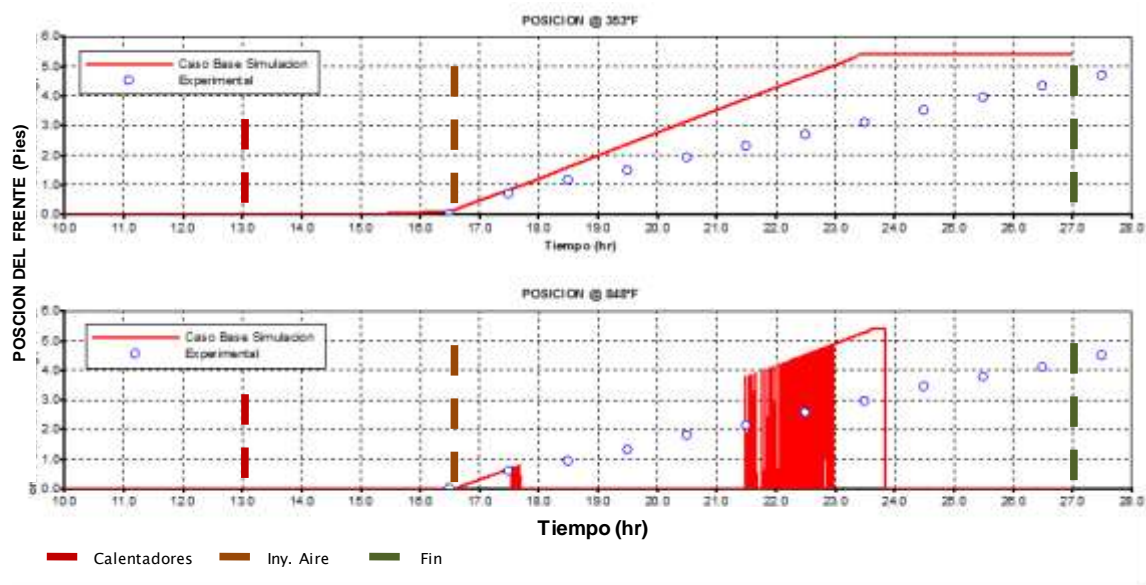
Las curvas del medio corresponden a la producción de oxígeno, en la cual para la experimental se observa un leve incremento de la producción de oxígeno para luego caer a una producción de 0, mientras que para el modelo de simulación no se observa la producción inicial de oxígeno pero si una vez se inyecta air, la producción es nula, con excepción del final, como se ha mencionado

anteriormente el frente llegó a las 23.5 horas por lo tanto se produce aire únicamente.

Las curvas finales de arriba hacia abajo de la figura 34 corresponden a la fracción molar de nitrógeno, se puede observar que se obtiene un ajuste significativo de estas curvas.

Por último en la figura 35 se presenta la comparación entre los archivos históricos para la posición del frente de combustión a temperaturas de 353°F y 848°F respectivamente. Se puede observar que las posiciones alcanzadas en determinados tiempos son mayores para el modelo de simulación que para el experimental por lo tanto se puede decir que se presentaron mayores velocidades del frente. Estas deben corregirse con el fin de lograr el ajuste.

**Figura 35.** Comparación caso base contra histórico para las posiciones del frente a 353° y 848°F



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Durante el análisis de sensibilidad se determinara cuáles son los parámetros que más inciden sobre la posición del frente y por lo tanto sobre la velocidad de este. Como se mencionó anteriormente la curva para la posición del frente a 848°F

presenta ese comportamiento debido a que en algunos tramos del tubo el frente está sobrepasando esa temperatura pero otros cae por debajo de esta.

## 2.5 PROBLEMAS PRESENTADOS EN LA CONSTRUCCIÓN DEL CASO BASE

Se debe mencionar que en la construcción de un caso base previo se empleó como gas de purga helio sin embargo con este componente se obtuvieron corridas con errores en el balance de materia de más de 20%. Después de un riguroso análisis para determinar este error se cambió el componente de purga a otro gas inerte, el nitrógeno, y los balances de materia al final de la corrida, se redujeron a 1.033%. Por esta razón se decidió continuar con uso del nitrógeno como gas de purga. Si bien algunos autores como Belgrave<sup>57</sup> afirman que el nitrógeno en el espacio anular puede generar efectos convectivos que afectan los perfiles de temperatura y las pérdidas de calor, el también aclara que este efecto es más propenso en altas presiones. Por otro lado en la literatura simulaciones comerciales y expertos<sup>58</sup> en el tema trabajan con nitrógeno.

Uno de los principales desafíos que se presentó para la construcción del modelo es que no se contó con información precisa acerca del esquema experimental de tubo ni del procedimiento llevado a cabo; esto con el fin de construir un modelo de tubo representativo. Por lo tanto existe cierta incertidumbre en la ubicación exacta de las termocuplas y en algunos datos correspondientes a propiedades térmicas del tubo y del medio poroso.

El problema más significativo del modelo base es que las temperaturas generadas aun no alcanzan en promedio los 800°F y que el frente llega rápidamente al final del tubo en un tiempo menor al empleado en la prueba experimental. Este tema se seguirá discutiendo en capítulos posteriores.

---

<sup>57</sup> BELGRAVE J, Op.Cit. "The Thermal Behavior of Vertically Operated Near-Adiabatic In-Situ Combustion Tubes" 1990

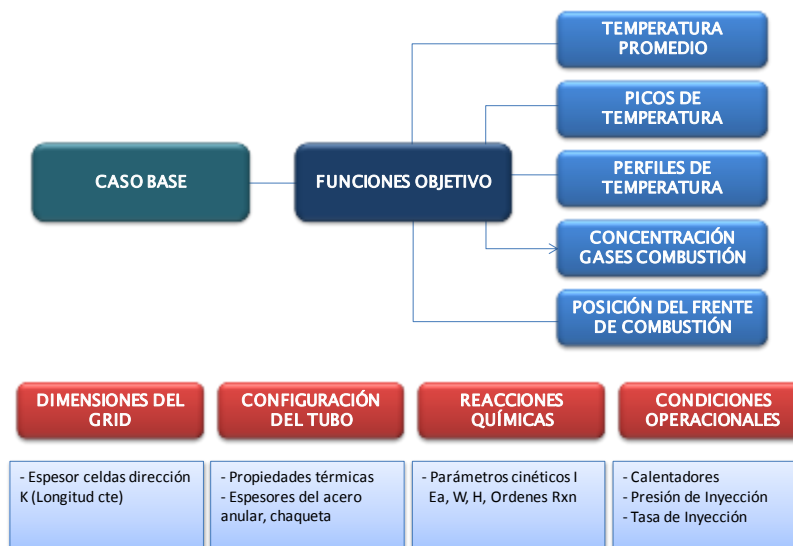
<sup>58</sup>GUTIERREZ D, Op.Cit. "Air Injection Based Processes for Improved Oil Recovery" 2010.

### 3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE VARIABLES Y AJUSTE HISTÓRICO DEL MODELO BASE DE SIMULACIÓN PARA LA MUESTRA A1

Construido el modelo base de simulación se procedió con el análisis de sensibilidad de variables. Para este análisis se empleó en la mayoría de los casos la herramienta CMOST. Esta herramienta permite llevar a cabo diseños factoriales fraccionados, los cuales permiten obtener resultados de manera organizada y concreta (Ver Anexo 2).

En primera instancia fue necesario definir las funciones objetivo (ver figura 36), las cuales tal como se había comentado en el anterior capítulo son las asociadas al comportamiento de quema del frente de combustión y por lo tanto las de mayor interés para la presente investigación, estas son: perfiles de temperatura (picos o máximos de temperatura, temperatura promedio) composición de los gases de combustión (concentración de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> producidos) y la posición del frente de combustión (a temperaturas de 353°F y 848°F). Cabe aclarar que son diversas las posibles funciones objetivo.

**Figura 36.** Funciones objetivo y parámetros de variación



Fuente: El autor

El siguiente paso fue establecer las variables sobre las cuales se pretendía estudiar el comportamiento de dichas funciones objetivo (Ver figura 36). Las variables de mayor importancia y sobre las cuales se enfatizara en el presente análisis, son las relacionadas al modelo de reacciones químicas, puesto que parámetros tales como energía de activación, factor de frecuencia, ordenes de reacción y entalpías de reacción, de acuerdo a la literatura<sup>59</sup>, son muy influyentes sobre el comportamiento de quema, además son los más empleados para realizar el ajuste histórico de este tipo de funciones objetivo.

Se realizó un análisis de menor énfasis con respecto a parámetros relacionados al enmallado o grid de simulación, propiedades térmicas, configuración del tubo y parámetros operacionales.

La última parte del presente capítulo está enfocada al ajuste histórico de las funciones objetivo. Gracias al análisis de sensibilidad se pudo establecer cuáles son los parámetros que presentan mayor incidencia y si esta es positiva o negativa. Con la ayuda de la herramienta software de simulación, también es posible realizar un ajuste histórico asistido; para este caso se llevaron a cabo tres niveles de ajuste con el fin de encontrar la mejor aproximación.

### **3.1 ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL ENMALLADO (GRID)**

En este primer análisis se mantuvo constante la longitud del tubo (5.5 pies), mientras que se varió el espesor por celda en la dirección K tal como se presenta en la tabla 14 y en la figura 37. Se puede apreciar que entre menor sea el espesor de la celda mayor serán el número de celdas (manteniendo la longitud constante) y por lo tanto el tiempo de computo se incrementa significativamente.

Después de llevado a cabo el análisis se determinó que a escala de laboratorio las variaciones no son muy significativas para las funciones objetivo evaluadas, sin

---

<sup>59</sup>FASSIHI R. BRIGHAM W. Ramey H. "Reaction Kinetics of In-Situ Combustion: Part 2-Modeling". SPE, Stamford U. SPE 9454. August 1984. pp 408-416

embargo se pudieron establecer las siguientes conclusiones importantes, con respecto a los picos de temperatura y la posición del frente de combustión.

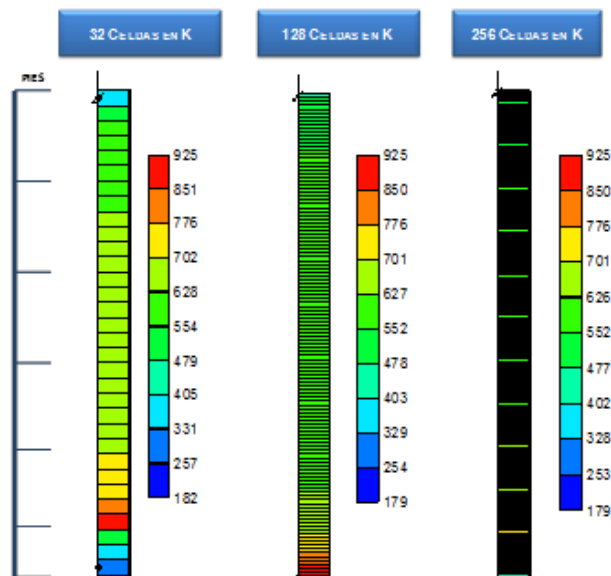
**Tabla 14.** Características de los modelos empleados para análisis de sensibilidad del espesor de la celda en dirección K

NUMERO DE CELDAS	ESPEJOR CELDA EN DIRECCION K	TIEMPO DE COMPUTO
256	0.02148 Pies	12 MIN 18 SG
128 (C BASE)	0.04296 Pies	7 MIN 42 SG
32	0.17187 Pies	2 MIN 10 SG

Fuente: El autor

En la figura 37 se pueden observar ligeras diferencias en la escala de colores que indican variaciones de temperatura producto de la diferencia en el número de celdas, aunque no es muy significativo. Para entender más en detalle las variaciones que están ocurriendo, se realizaron graficas de los picos de temperatura, temperatura promedio, depositación de coque y posición del frente a un temperatura de 353 F (Ver figura 38).

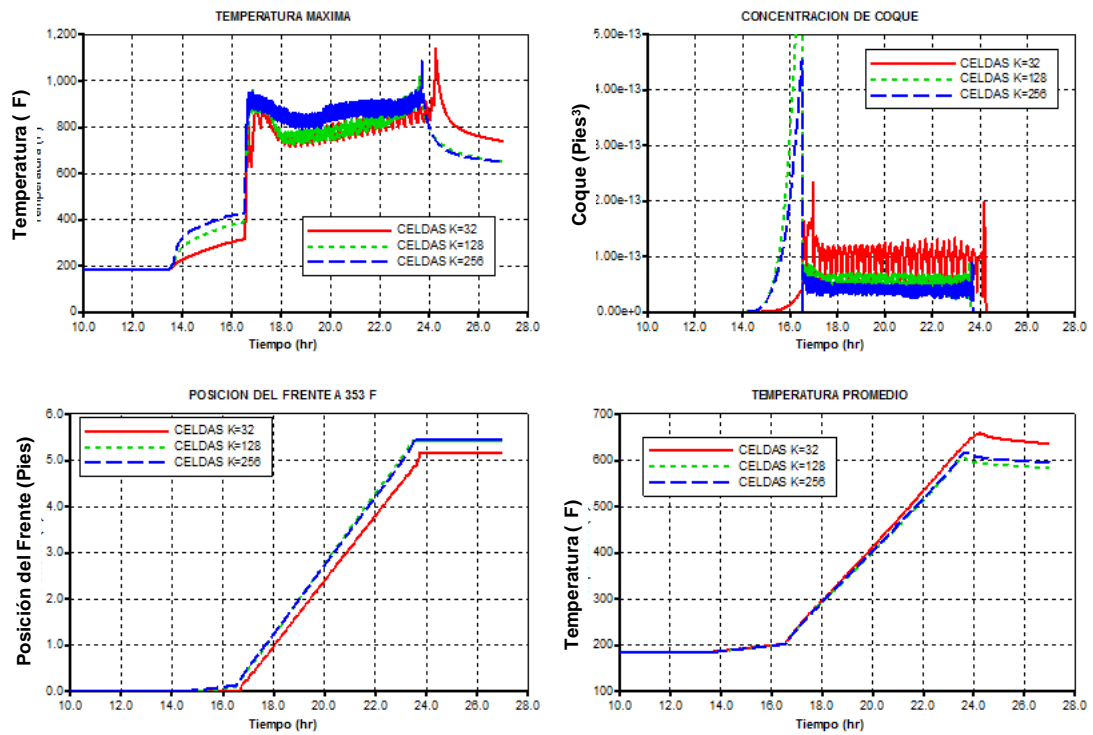
**Figura 37.** Perfil de temperatura en 2D para análisis de sensibilidad espesor de la celda en dirección Ka las 23.5 horas



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Los mayores picos se presentaron en el modelo de 256 celdas (ver figura 38) y a su vez este presenta una menor depositación y consumo de coque (curva azul), a diferencia del modelo para 32 celdas (curva roja), el cual presenta los menores picos de temperatura y las mayores cantidades de coque. Este hecho se puede explicar gracias a que entre menor sea el número de celdas, existirá menor cantidad de aceite por celda, más rápidamente ocurrirán las reacciones entre el aire y el aceite, se formará menos coque y a su vez genera mayor temperatura ya que el combustible se consume eficientemente. A diferencia de celdas de mayor tamaño donde más lenta ocurrirá la reacción, más cantidad de coque se formará y como se está inyectando la misma cantidad de aire, se consumirá menos coque y por lo tanto las temperaturas máximas serán menores.

**Figura 38.** Análisis del grid con respecto a los picos de temperatura, concentración de coque, posición del frente y temperatura promedio



Fuente: El autor

En cuanto a la posición del frente, se puede observar que el modelo de 32 celdas se demoró más tiempo en alcanzar el final del tubo y esto se debe a que a mayor

volumen por celda, mas aceite se tendrá, genera más coque y por lo tanto llevara más tiempo para que ocurran las diferentes reacciones por celda. Este comportamiento se relaciona igualmente con la temperatura promedio, en el que para este mismo modelo de menor número de celdas al emplear más tiempo de reacciones por celda (por tener mayor volumen) la curva de temperatura promedio alcanzara valores más altos dado que demora más tiempo en llegar el frente al final del tubo. Esto en comparación con los casos de mayor numero de celdas, los cuales rápidamente generan coque, se consume y avanza rápidamente el frente de combustión, llegando de esta manera en menores tiempos al final del tubo de combustión. Por otro lado también se debe tener en cuenta que los bloques de menor tamaño generaron mayores picos de temperatura, y esta es proporcional a la velocidad de reacción.

A partir de la figura 38 se puede observar la influencia de los calentadores en el proceso. Los calentadores son encendidos en la hora 13 mientras que la inyección de aire inicia a la hora 16.5, por lo tanto en el periodo en el que ocurre el aumento de temperatura exclusivamente por efecto de los calentadores (13-16.5 horas), se puede observar la depositación más significativa de coque. El consumo de esta mayor cantidad de coque inicial, trae consigo el aumento en los picos de temperatura iniciales, una vez iniciada la inyección de aire. Por último entre menor tamaño tenga la celda el efecto de los calentadores será mayor, generando así mayores temperaturas.

### **3.2 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA CONFIGURACIÓN DEL TUBO Y PROPIEDADES TÉRMICAS**

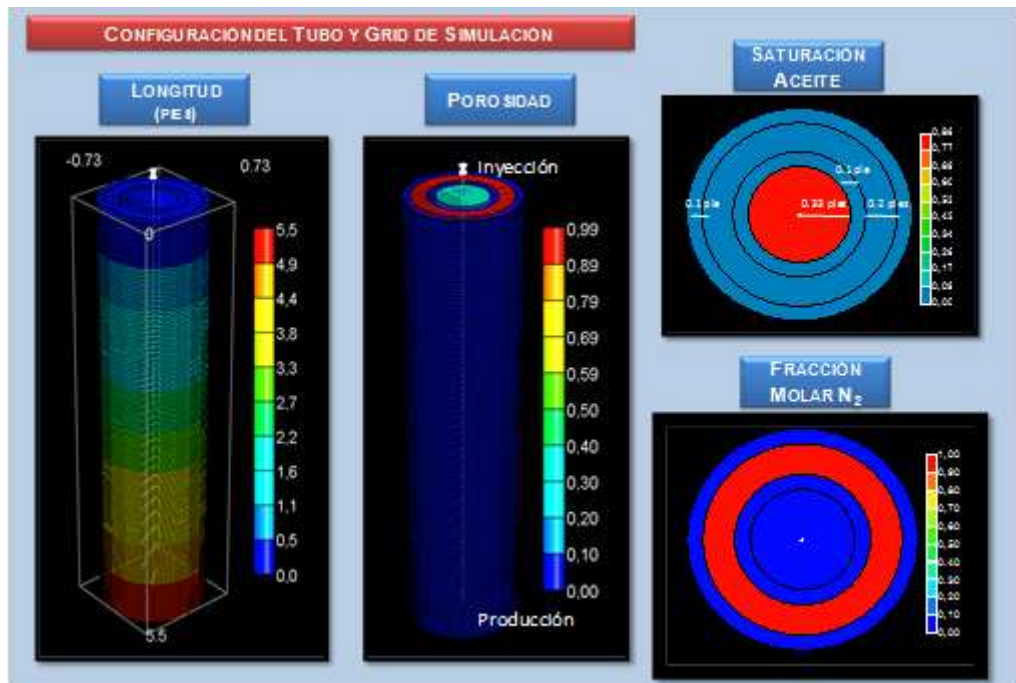
Dado que en simulación numérica, de acuerdo algunos reportes de la literatura<sup>6061</sup> es posible construir un modelo de tubo y lograr el ajuste histórico de variables sin espacio anular ni chaqueta de presurización y que además el análisis de estas

<sup>60</sup> ANAYA, I. Op.cit. "Simulation Study for Designing an In-Situ Combustion Pilot In the Orinoco Belt of Venezuela: From Laboratory Studies to the Field Scale 2010.

<sup>61</sup> KUMAR, M. Op.Cit. "Simulation of laboratory In-Situ Combustion Data and Effect of Process Variations" 1987.

variables no corresponden con el objetivo principal de la tesis, simplemente se presentara una tabla de resultados con los porcentajes de influencia sobre las funciones objetivo, con el fin conocer el efecto que pudieran llegar a tener sobre el modelo de simulación, además se da un punto de partida para próximas investigaciones relacionadas con la configuración del tubo.

**Figura 39.** Resultados del diseño experimental factorial de la configuración del tubo y parámetros térmicos con relación a la temperatura promedio



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Parámetros relacionados con la configuración del tubo y propiedades térmicas tales como: espesores, conductividades térmicas, capacidades caloríficas tanto de la muestra A-1 como del equipo experimental donde fueron llevadas a cabo las pruebas no fueron suministrados. Los parámetros base fueron obtenidos de la literatura<sup>62</sup> y a partir de recomendaciones por expertos<sup>63</sup>, por lo tanto se sometieron a análisis de sensibilidad para determinar su influencia sobre las funciones objetivo.

<sup>62</sup> BELGRAVE J, MOORE G, URSENBACH M, BENNION W, "A comprehensive Approach in situ combustion modeling. Department of chemical & petroleum engineering. University of Calgary. Calgary Alberta Canada. SPE 20250. Advance technology series. Vol 1. April 1990. pp 751-762

<sup>63</sup> GUTIERREZ D, Op.cit. "Air Injection Laboratory Studies". Reservoir Simulation of In-Situ Combustion Processes 2009.

Para llevar a cabo este análisis, a diferencia del anterior (relacionado con el enmallado) se empleara la herramienta CMOST de CMG. Por medio de esta herramienta es posible realizar un análisis de sensibilidad de segundo nivel mediante el diseño de experimentos de tipo factorial fraccional; este es descrito en el Anexo 2. Se recomienda al lector revisar este anexo antes de continuar con los siguientes análisis de sensibilidad.

Con el fin de llevar a cabo este análisis se re diseño la configuración del tubo y se creó un espacio anular con nitrógeno y la respectiva chaqueta de presurización, también de acero al igual que el espesor del tubo. En la figura 39 y tabla 15 se presenta la nueva configuración con las respectivas dimensiones.

**Tabla 15.** Variables para el análisis de la configuración del tubo y propiedades térmicas

NOMBRE	ABREVIATURA	UNIDADES	VALOR BASE	VALOR MIN	VALOR MAX
ESPEJOR DEL ACERO DEL TUBO	ESPT	Pies	0.1	0.0066	0.3
ESPEJOR DEL ESPACIO ANULAR	EANUL	Pies	0.2	0.001	0.4
ESPEJOR DEL ACERO DE LA CHAQUETA	ECHAQ	Pies	0.1	0.0033	0.3
CONDUCTIVIDAD DEL MEDIO POROSO	KMPORO	Btu/(ft*day*F)	38	20	80
CONDUCTIVIDAD DEL ACERO DEL TUBO	KETUBO	Btu/(ft*day*F)	400	200	500
CONDUCTIVIDAD DEL ESPACIO ANULAR	KEANUL	Btu/(ft*day*F)	0.082	0.001	10
CONDUCTIVIDAD DEL GAS EN EL ESPACIO ANULAR	KGASEANUL	Btu/(ft*day*F)	0.4	0	10
CONDUCTIVIDAD DEL ACERO DE LA CHAQUETA	KCHAQ	Btu/(ft*day*F)	400	200	500
CAPACIDAD CALORÍFICA DEL MEDIO POROSO	MMPORO	Btu/(ft <sup>3</sup> *F)	35	20	40
CAPACIDAD CALORÍFICA DEL ACERO DEL TUBO	METUBO	Btu/(ft <sup>3</sup> *F)	170	100	300
CAPACIDAD CALORÍFICA DEL ESPACIO ANULAR	MANUL	Btu/(ft <sup>3</sup> *F)	0	0	10
CAPACIDAD CALORÍFICA DEL ACERO DE LA CHAQUETA	MECHAQ	Btu/(ft <sup>3</sup> *F)	170	100	300

Fuente: El autor

En la tabla 16 se encuentran resaltadas las variables que presentan un porcentaje de influencia mayor al 10%, por lo tanto estas pueden llegar a ser decisivas si se varían en rangos coherentes para obtener el ajuste histórico, claro está cuando se

tiene incertidumbre en este tipo de datos. Cabe aclarar que el signo indica el tipo de influencia; los valores que están negativos indican que una disminución de ese valor causa el aumento de la función objetivo.

**Tabla 16.** Tabla de influencia de la configuración del tubo y propiedades térmicas

PARAMETROS	FRMOL_CO2 %	POS_FR_353 %	TEMP_MAX %	TEMP_PROM %
EANUL(0.001, 0.4)	0.88	2.42	0.70	-5.85
ECHAQ(0.0033, 0.3)	-1.78	-5.83	-1.38	-8.95
ESPT(0.0033, 0.3)	-6.85	-22.02	-4.71	-10.59
KCHAQ(200, 500)	0.45	1.07	0.19	-0.04
KEANUL(0.001, 10)	-0.45	-1.80	-0.13	-0.41
KETUBO(200, 500)	0.22	0.17	0.47	-0.10
KGASEANUL(0, 10)	-1.91	-7.16	-1.12	0.23
KMPORO(20,80)	-1.97	-6.54	-2.12	0.48
MEANUL(0, 10)	-0.36	-1.52	-0.09	-0.38
MECHAQ(100, 300)	0.13	0.84	0.20	-0.23
METUBOL(100, 300)	-1.16	-2.83	-0.50	-1.05
MMPORO(20, 40)	-3.22	-10.02	-1.64	-1.80
<b>OBJETIVO</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Fuente: El autor,

De la tabla 16 es posible concluir que el espesor del tubo es la variable que presenta la mayor incidencia sobre las funciones objetivo y más aún sobre la posición del frente y la temperatura promedio, además incide de manera negativa, indicando que entre menor espesor, se obtiene una mayor temperatura promedio, por lo tanto una mayor posición del frente. Esto refleja el hecho de que un mayor espesor de acero permitirá mayores flujos de energía, dada su alta conductividad térmica.

Variabes como los espesores del espacio anular y la chaqueta contribuyen con la disipación de la energía, por lo tanto se concluye que para realizar un modelo de tubo con la configuración completa es necesario ubicar un sistema de calentadores a lo largo del tubo tal como se hace el equipo experimental, con el fin de minimizar las pérdidas de calor.

Dado que en simulación numérica es posible establecer las condiciones dadas de temperatura y presión, sin una configuración adicional; a partir del caso base (medio poroso y espesor del acero), se realizó el ajuste histórico sin el espacio anular ni la chaqueta de presurización, tal como se han llevado a cabo en algunas investigaciones del tema presentadas en la literatura<sup>64</sup>.

Para finalizar este análisis se puede afirmar a partir de la tabla 15 que ninguno de los parámetros considerados influye de manera significativa sobre los picos de temperatura ni sobre la composición de los gases producidos. Sin embargo la capacidad calorífica del medio poroso es una variable que presenta cierta influencia sobre la posición del frente de combustión de manera negativa. Entre menor sea la capacidad calorífica menos energía se necesita para aumentar la temperatura del medio poroso, por lo cual se favorecerá la reactividad de las reacciones implicadas con el aumento de temperatura, logrando de esta manera un avance más rápido de la generación y combustión del coque.

### **3.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE PARAMETROS ASOCIADOS AL MODELO DE REACCIONES QUIMICAS**

Dado que los parámetros involucrados en las reacciones químicas son diversos y de alta complejidad, se decidió dividir este análisis en dos partes: la primera hace referencia al análisis de parámetros tales como, energías de activación, factor de frecuencia, y entalpías de reacción y la segunda parte se llevó a cabo con parámetros tales como órdenes de reacciones.

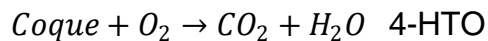
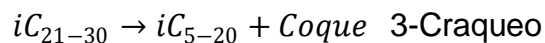
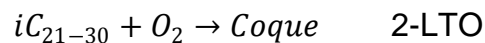
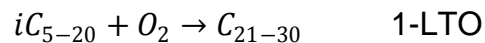
Antes de presentar los resultados del análisis se describe el esquema de reacciones empleado en el presente modelo de simulación y que fue suministrado por ECOPETROL-ICP. Por último se presenta una breve descripción de los parámetros cinéticos involucrados en dicho esquema de reacciones.

---

<sup>64</sup> ANAYA, I. Opcit. "Simulation Study for Designing an In-Situ Combustion Pilot In the Orinoco Belt of Venezuela: From Laboratory Studies to the Field Scale 2010.

### 3.3.1 Esquema de reacciones empleado en el modelo de simulación.

Como se describió anteriormente en la sección de construcción del modelo de simulación, para el presente modelo se establecieron dos reacciones de baja temperatura (LTO), una reacción de craqueo y una de combustión a alta temperatura (HTO) en función de pseudo-componentes, tal como se presenta a continuación:



A escala de campo la reacción 2 resulta sumamente importante ya que si se prolonga el régimen de reacción en baja temperatura se tendría gran cantidad de coque adicional al generado en craqueo y por lo tanto se requerirían mayores cantidades de aire.

La reacción tres es típica del comportamiento de un crudo pesado sometido a pirolisis. Con esta básicamente se está representando, gracias a un aumento de temperatura, el fraccionamiento de un pseudo-componente pesado en coque y pseudo-componente intermedio. Se espera que esta reacción tome un importante rol durante la simulación del modelo ya que esta será la encargada de suministrar el combustible para la formación del frente de combustión.

La reacción cuatro, resulta ser la de mayor importancia ya que a partir de esta se romperán los enlaces del coque para formar óxidos de carbono y agua por lo tanto en esta se presentara una gran liberación de energía y en consecuencia se formara el frente de combustión con las mayores temperaturas del sistema. Para lograr esta reacción, se debe generar en primera instancia coque.

### 3.3.2 Parámetros cinéticos empleados en el modelo de reacciones.

Los parámetros cinéticos básicos para modelar reacciones químicas mediante la ley de velocidad y ecuación de Arrhenius (Ver Anexo 1), se deben calcular mediante pruebas de laboratorio en presencia de una muestra representativa de estudio. A partir de pruebas de laboratorio de tipo cinéticas es posible determinar parámetros tales como energía de activación, factor de frecuencia, orden de reacción, y entalpía de cada una de las reacciones. Estos parámetros fueron suministrados por ECOPETROL-ICP (Ver tabla 17).

Los diferentes parámetros cinéticos se relacionan mediante la ecuación de velocidad de reacción entre el oxígeno y un hidrocarburo tal como se presenta a continuación:

$$R_c = \frac{dC_m}{dt} = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) [P_o]^p [HC]^q \quad (9)$$

A= Factor de frecuencia

Ea= Energía de Activación

R = Constante de los gases

Po = Presión parcial del oxígeno

HC = Concentración de hidrocarburo

p,q = Ordenes de reacción

**Tabla 17.** Parámetros cinéticos involucrados en el esquema de reacción planteado

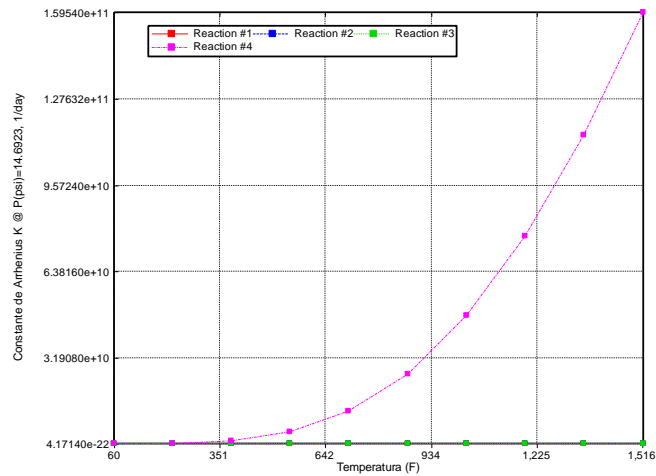
PARAMETROS CINETICOS LTO - 1		PARAMETROS CINETICOS LTO - 2	
W	70.83	W	114090
Ea	25795 Btu/lbmol	Ea	32975 Btu/lbmol
Entalpia	292065 Btu/lbmol	Entalpia	1117745 Btu/lbmol
Orden O <sub>2</sub>	1	Orden O <sub>2</sub>	2
Orden HC	1	Orden HC	1

PARAMETROS CINETICOS CRAQUEO - 3		PARAMETROS CINETICOS HTO	
W	3.34e16	W	6.619e12
Ea	90069 Btu/lbmol	Ea	14617 Btu/lbmol
Entalpia	0 Btu/lbmol	Entalpia	213408 Btu/lbmol
Orden O <sub>2</sub>	1	Orden O <sub>2</sub>	1
		Orden HC	1

Fuente: Informe resultados experimentales pruebas de tubo Ecopetrol-ICP 2010

**Figura 40.** Constantes de Arrhenius contra temperatura. Representa la reactividad con los parámetros cinéticos base



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Es de esperarse, dados los factores de frecuencia y las energías de activación, mayores constantes de Arrhenius K para la reacción de alta temperatura HTO, tal como se indica en la figura 40. Claramente se puede apreciar en esta figura que la reacción cuatro presentara mayores velocidades de reacción y superara en un amplio margen al resto de reacciones, indicando mayor reactividad. Para que se pueda dar esta reacción 4 serán necesarias las reacciones 2 y 3 para la formación de coque. Con respecto a los órdenes de reacción presentados en la tabla 17, todos están alrededor de 1 excepto el orden de reacción con respecto al oxígeno para la reacción de baja temperatura LTO. En cuanto a las entalpías de reacción las mayores entalpías son las presentadas por las reacciones en baja temperatura LTO, sin embargo se espera que este régimen de temperaturas no sea predominante ya que tienen una mayor reactividad la reacción de craqueo y la de alta temperatura. A continuación se presenta un análisis de sensibilidad detallado de estos parámetros.

### 3.3.3 Análisis de sensibilidad primer grupo de parámetros asociados a la cinética de reacción.

En la tabla 18 se presenta el primer grupo de parámetros que fueron sometidos a un análisis de sensibilidad mediante el diseño factorial fraccional de tipo  $2^{12-6}$ , con

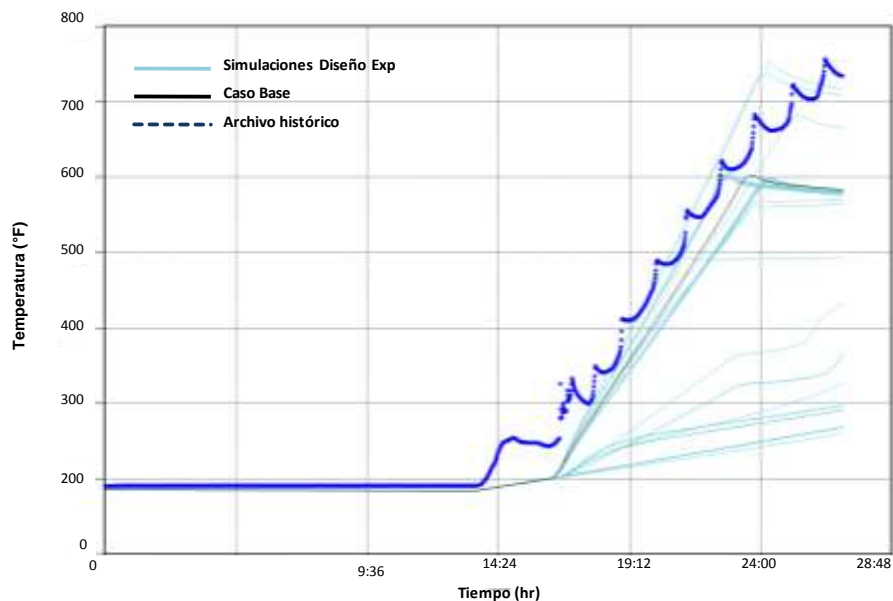
64 corridas experimentales. En la figura 41 se presentan los resultados obtenidos en cuanto a la temperatura promedio para este primer grupo de parámetros cinéticos.

**Tabla 18.** Primer grupo de parámetros cinéticos sometidos a análisis de sensibilidad

NOMBRE	ABREVIATURA	UNIDADES	VALOR BASE	VALOR MIN	VALOR MAX
ENERGIA DE ACTIVACION RXN 1	EA1	Btu/lbmol	25795	10000	50000
ENERGIA DE ACTIVACION RXN 2	EA2	Btu/lbmol	32975	10000	60000
ENERGIA DE ACTIVACION RXN 3	EA3	Btu/lbmol	90069	70000	110000
ENERGIA DE ACTIVACION RXN 4	EA4	Btu/lbmol	14617	10000	40000
ENTALPIA DE RXN 1	ER1	Btu/lbmol	292065	270000	350000
ENTALPIA DE RXN 2	ER2	Btu/lbmol	1117745	1000000	1300000
ENTALPIA DE RXN 3	ER3	Btu/lbmol	0	-10000	0
ENTALPIA DE RXN 4	ER4	Btu/lbmol	213408	180000	250000
FACTOR DE FRECUENCIA RXN 1	FF1		70.83	50	5.00E+04
FACTOR DE FRECUENCIA RXN 2	FF2		114090	50	2.00E+06
FACTOR DE FRECUENCIA RXN 3	FF3		3.34E+16	1.00E+07	2.00E+20
FACTOR DE FRECUENCIA RXN 4	FF4		6.62E+12	1.00E+06	2.00E+20

Fuente: El autor

**Figura 41.** Resultados del diseño experimental parámetros cinéticos I con relación a la temperatura promedio

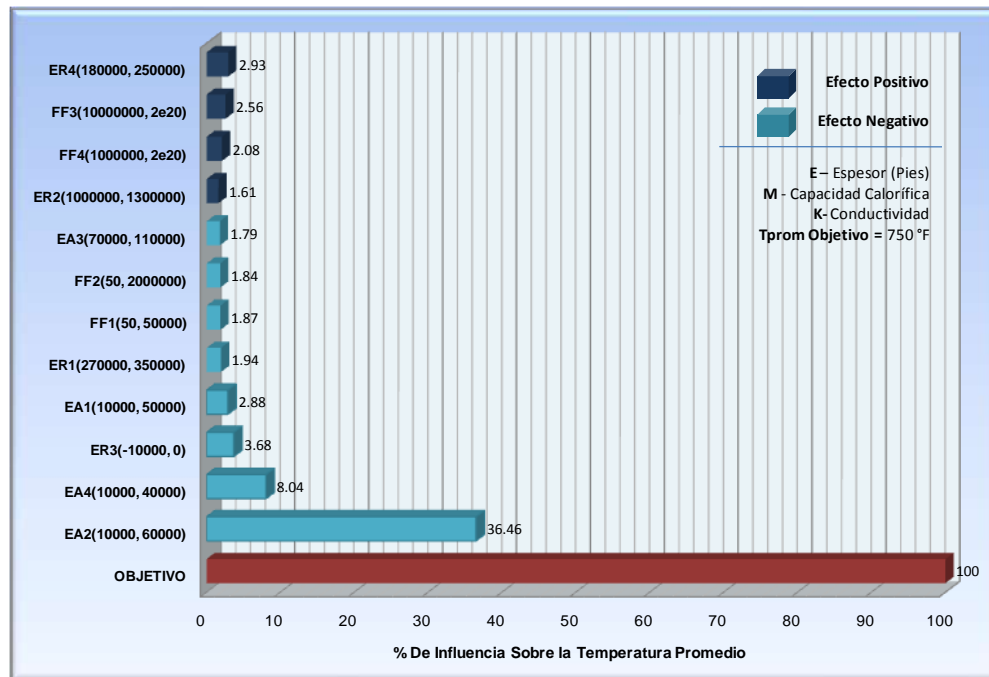


Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Se aprecia que existió una influencia sobre esta función objetivo gracias a cierta combinación de parámetros (ver figura 41). Algunas corridas (Azul claro) se acercaron a los valores históricos de temperaturas promedio (Azul oscuro) significativamente, además se obtuvieron corridas en las cuales la temperatura promedio fue más alta en un tiempo mayor, a la obtenida en el caso base (Curva negro), indicando que el frente se demoró un poco más en alcanzar el final del tubo de combustión.

En la figura 42 se presenta el diagrama tornado de porcentaje de influencia sobre la temperatura promedio, la cual alcanza un valor de 750°F aproximadamente. Fue posible determinar que la energía de activación de la reacción de 2 (formación de coque en LTO) juega el papel más importante para el incremento de la temperatura promedio y además del incremento del tiempo en el cual se llega a al final del tubo.

**Figura 42.**Diagrama tornado del % de influencia de parámetros cinéticos I sobre la temperatura promedio objetivo

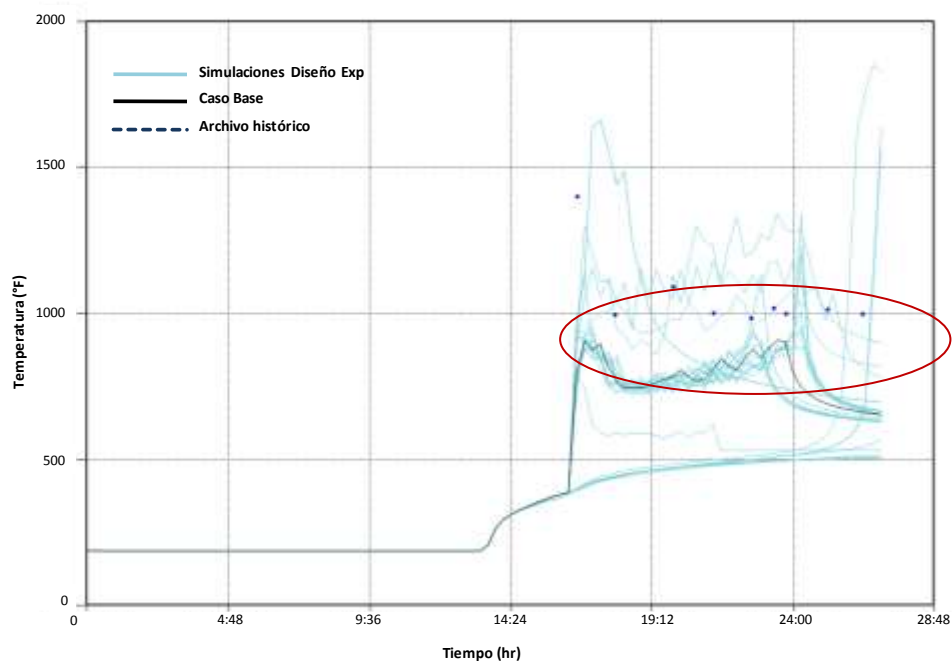


Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Se debe tener en cuenta que esta influencia es de tipo negativa, por lo tanto una disminución de la energía de activación de la reacción dos ocasionara un aumento en la temperatura promedio. Al disminuir esta energía de activación, la reacción estará más propensa a ocurrir, esto a su vez contribuirá a aumentar la cantidad de coque depositado. Mayor cantidad de coque más tiempo se requiere para consumirlo, de allí que se incremente el tiempo en el cual el frente llegue al final del tubo.

En cuanto a los picos de temperatura, en la figura 43 se presentan los resultados generales de las corridas experimentales. Se obtuvo una favorable respuesta ya que con cierta combinación de parámetros cinéticos fue posible aumentar los picos de temperatura por encima de los archivos históricos y una combinación en particular se acerca en gran medida a los puntos que representan los resultados del modelo físico (más adelante se discute acerca de esta corrida en particular).

**Figura 43.** Resultados del diseño experimental factorial parámetros cinéticos I con relación a los picos de temperatura

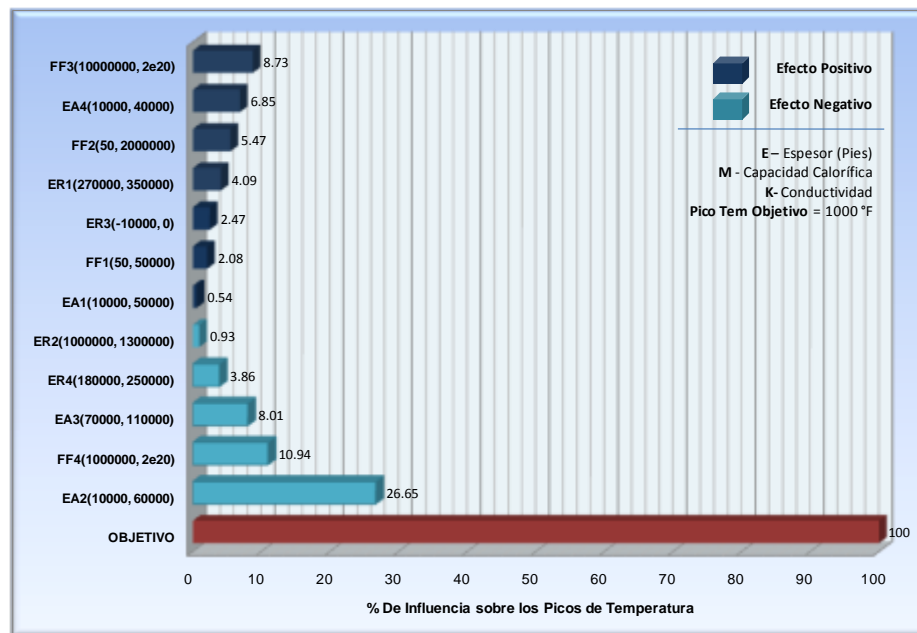


Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Este comportamiento es de esperarse ya que dichas variables en la ecuación de velocidad sean dependientes de la velocidad de reacción, por lo tanto de la generación y consumo de reactivos y productos, oxígeno, coque, óxidos de carbono, agua, y pseudo-componentes hidrocarburos. A si mismo dependiendo de la formación o consumo de masa, estos parámetros son a su vez dependientes de la liberación o ganancia de energía en cada una de las reacciones.

Según el diagrama de influencia de variables (ver figura 44) la energía de activación de la reacción 2 fue la más influyente (de manera negativa) sobre la temperatura máxima objetivo, igualmente la energía de activación 3 tuvo un papel significativo (influencia negativa) y dado que la reacciones 2 y 3 son las encargadas de formar coque; se puede concluir que al disminuir estas energías de activación se contribuye con la formación de coque en el medio poroso, por lo tanto más tiempo se emplea para consumir este. Una vez consumido el combustible se liberara mayor energía; igualmente el tiempo final de la prueba se incrementara.

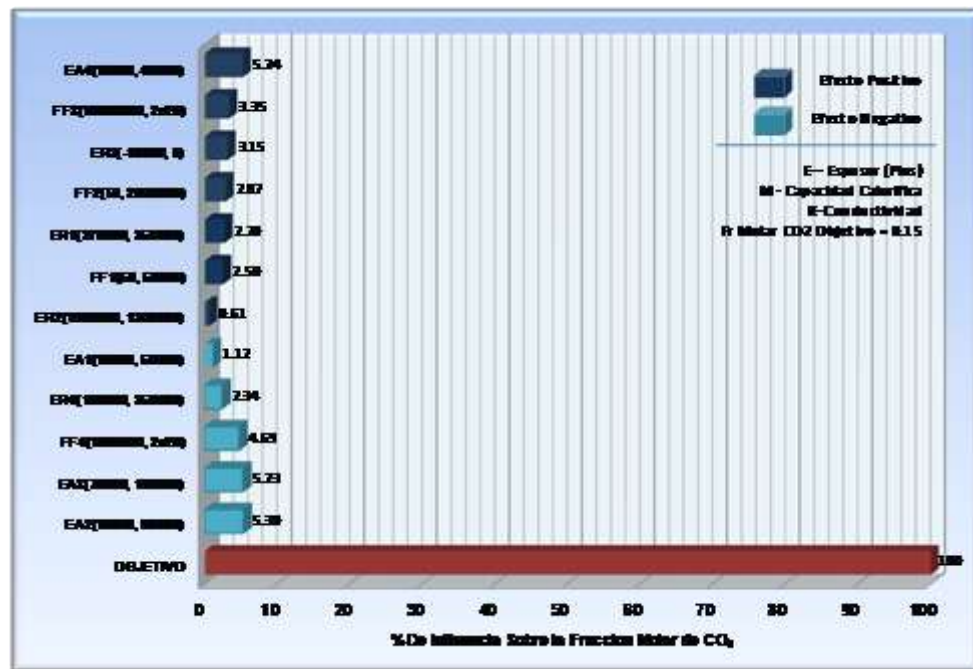
**Figura 44.** Diagrama tornado del % de influencia de parámetros cinéticos I, sobre los picos de temperatura objetivo



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

El factor de frecuencia de la reacción de combustión también tiene un aporte considerable, en este caso de manera negativa y teniendo en cuenta que la energía de activación de 4 también influencia los picos de temperatura, pero de forma positiva, se puede afirmar que si se disminuye la velocidad de la reacción de combustión, se contribuye con el objetivo de alcanzar la temperatura final de los archivos históricos. Esto gracias a que menor velocidad de la reacción de combustión permitirá que el frente avance con menor velocidad y por lo tanto llegara en un tiempo prolongado al final del tubo, tal como sucede en la prueba experimental.

**Figura 45.** Diagrama tornado del % de influencia de parámetros cinéticos I sobre la fracción molar objetivo de CO<sub>2</sub>



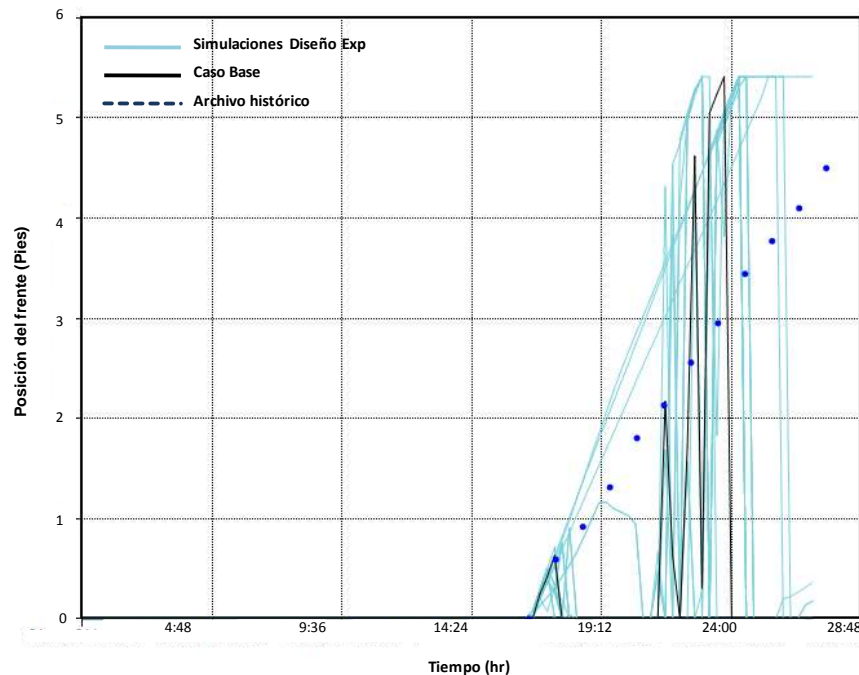
Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

El efecto de este primer grupo de parámetros cinéticos, sobre los gases de combustión no fue significativo. En la figura 45 se presenta el diagrama de influencia sobre la fracción molar de CO<sub>2</sub> objetivo. Para este caso es de alrededor de 0.15. Se puede apreciar que las mayores influencias están alrededor de 5% lo cual no es significativo y por lo tanto se puede concluir que la manipulación de

este tipo de parámetros no permitirá ajustar las fracciones de los gases producidos. Igualmente la influencia para la fracción de oxígeno producido no fue significativa, por lo tanto no se presenta el diagrama de influencia.

La posición del frente fue un parámetro complejo de analizar mediante esta técnica, ya que como se dio en el caso base, el frente rápidamente atraviesa el tubo. Además, para una posición del frente a una temperatura de 848°F no se puede apreciar una línea continua, puesto que como se explicó en el capítulo anterior, la temperatura para el caso base en diferentes zonas sobrepasa y luego cae por debajo de dicha temperatura, tal como se aprecia en la figura 46.

**Figura 46.** Resultados del diseño experimental factorial parámetros cinéticos I con relación a la posición del frente de combustión a 848°F



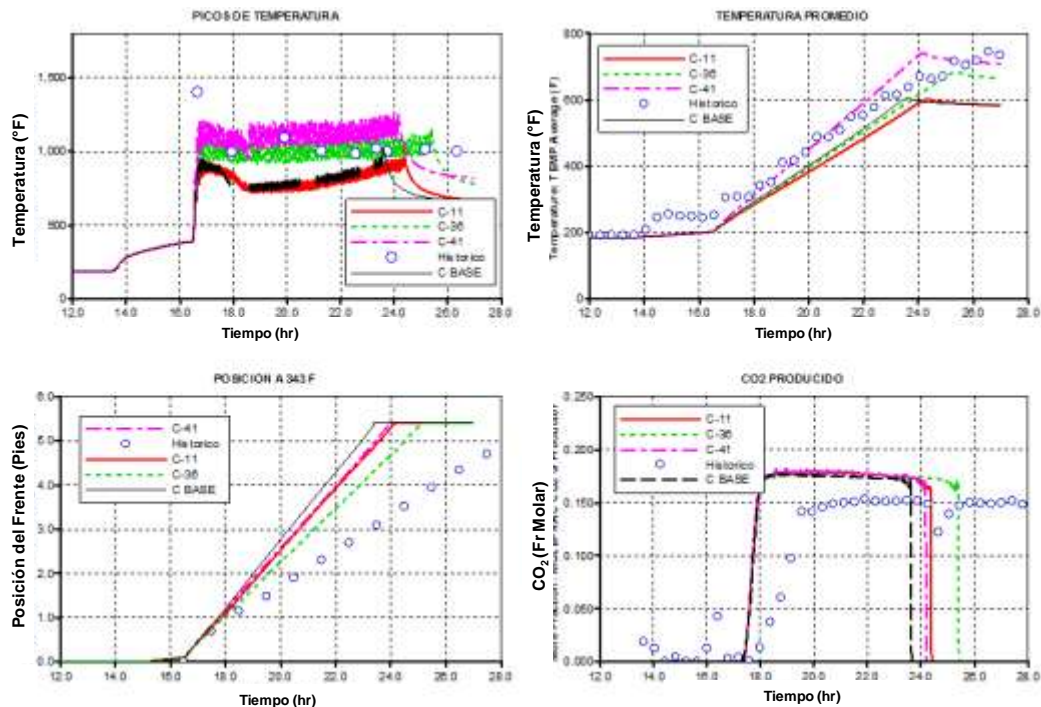
Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

De la figura 46 se puede evidenciar que se obtuvieron algunas corridas en las que la posición a esa temperatura se desarrolló continuamente y con menor pendiente que la del caso base (curva en negro). Sin embargo se requiere aun una menor velocidad, por lo tanto menor pendiente, con el fin de lograr el ajuste con los

archivos experimentales (puntos azules). No se presenta el diagrama de influencia para la posición del frente ya que el máximo efecto fue de apenas 6%; la variable que logro este porcentaje fue la energía de activación de la reacción 2, la cual es la encargada de generar coque, por lo tanto una mayor cantidad de coque permitirá al frente avanzar con un menor velocidad, resultado importante ya que se busca alcanzar la posición objetivo de 5.5 pies en 27.5 horas.

En la figura 47 se presentan los 3 mejores casos observados junto con el caso base (curva negra) y caso experimental (puntos azules) para las funciones objetivo sobre las cuales tuvieron más influencia, como fue el caso de los picos de temperatura y la posición del frente. En la esquina superior izquierda se encuentran los picos de temperatura, donde el caso 36 presento el mejor acercamiento hacia las temperaturas máximas objetivo.

**Figura 47.** Comparación mejores casos para el análisis del primer grupo de parámetros cinéticos con el caso base y los archivos históricos de la prueba experimental



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Un aspecto importante que presentan estas corridas, es que tal como se puede apreciar en las diferentes gráficas, se logró disminuir la velocidad del frente de combustión. Fue posible que el frente de combustión alcanzara el final del tubo a un tiempo mayor, y sin duda la corrida de menor velocidad y por lo tanto mejor comportamiento fue la 36 (curva verde). Esta misma corrida presento el mejor acercamiento en cuanto a la temperatura promedio objetivo (750°F). Aun siendo el mejor caso, no fue posible lograr un acercamiento significativo para la posición del frente y la producción de CO<sub>2</sub>.

**Tabla 19.** Segundo grupo de parámetros cinéticos sometidos a análisis de sensibilidad

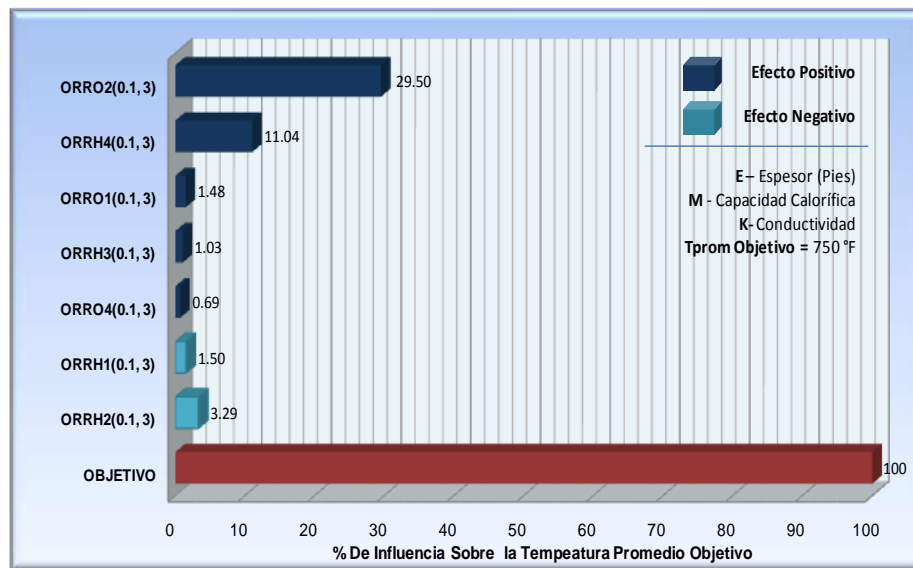
NOMBRE	ABREVIATURA	VALOR BASE	VALOR MIN	VALOR MAX
ORDEN RXN 1 CON RESPECTO HC	ORRH1	1	0.1	3
ORDEN RXN 1 CON RESPECTO O <sup>2</sup>	ORRO1	1	0.1	3
ORDEN RXN 2 CON RESPECTO HC	ORRH2	1	0.1	3
ORDEN RXN 2 CON RESPECTO O <sup>2</sup>	ORRO2	2	0.1	3
ORDEN RXN 3 CON RESPECTO HC	ORRH3	1	0.1	3
ORDEN RXN 4 CON RESPECTO HC	ORRH4	1	0.1	3
ORDEN RXN 4 CON RESPECTO O <sup>2</sup>	ORRO4	1	0.1	3

Fuente: El autor

**3.3.4 Análisis de sensibilidad segundo grupo de parámetros asociados a la cinética de reacción.** Para este análisis se empleó un diseño experimental de tipo 2<sup>7-2</sup>, 2 niveles (máximo y mínimo), 7 variables (7 órdenes de reacción) para un total de 32 corridas. En la tabla 19 se encuentran las variables analizadas, su abreviatura, valor base, mínimo y máximo, para los órdenes de reacción de las 4 reacciones empleadas en el presente modelo de simulación.

De acuerdo a la figura 48, la variable de mayor influencia sobre la temperatura promedio corresponde al orden de reacción de consumo de oxígeno de la reacción de generación de coque LTO. Esto sugiere que un mayor consumo del oxígeno en esta reacción (siendo la de mayor entalpia), genera una mayor velocidad reacción, lo cual permite establecer temperaturas mayores, al igual que se puede apreciar en la figura 49.

**Figura 48.** Diagrama tornado del % de influencia de parámetros cinéticos II sobre la temperatura promedio objetivo

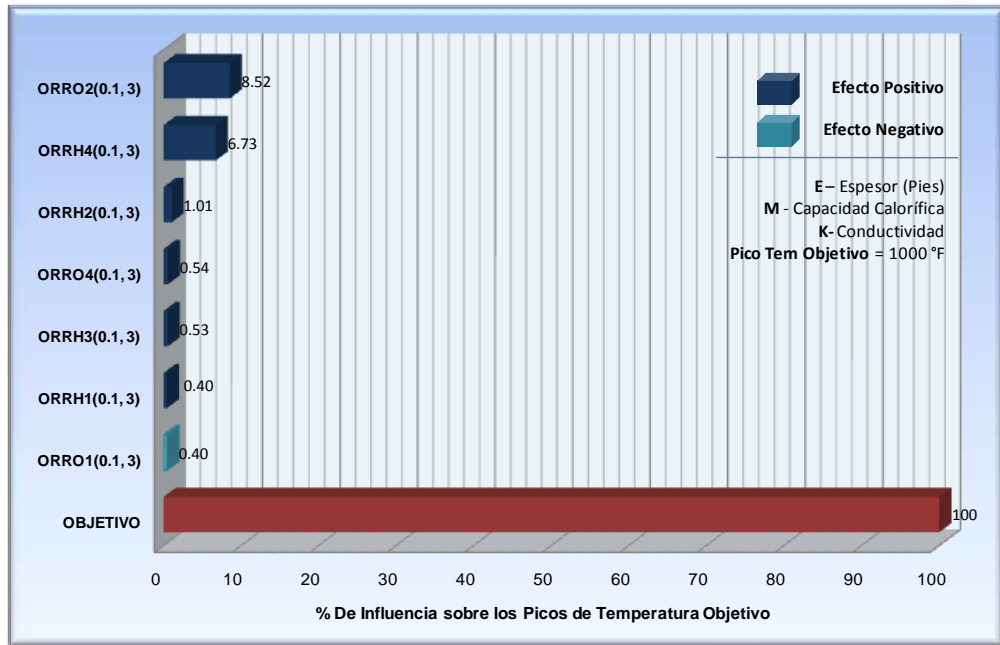


Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

En la figura 49 se presentan los porcentajes de influencia de los órdenes de reacción sobre el pico de temperatura objetivo, en este caso alrededor de 1000°F. Al igual que en caso anterior el orden de reacción para generación de craqueo en baja temperatura (ORRO2) fue el parámetro más influyente, además el orden de reacción de la reacción de combustión con respecto al hidrocarburo (ORRH4) también aporó para el aumento de los máximos de temperatura.

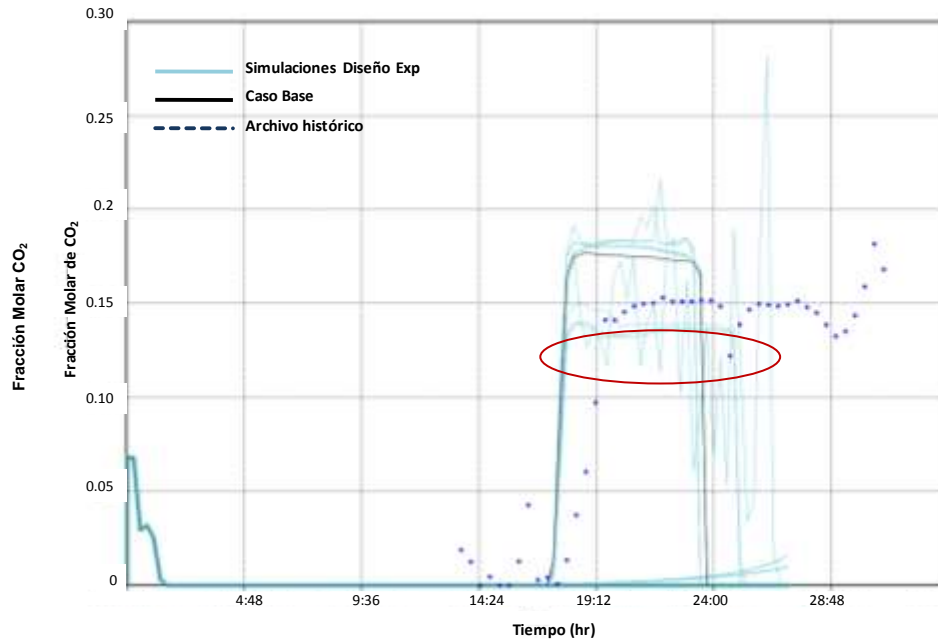
La influencia de los órdenes de reacción sobre la posición del frente y la composición de los gases según los diagramas tornados no fue significativa, por esta razón no se enfatizara en este tema; sin embargo a partir de la figura 50 se puede concluir que tres corridas presentaron una combinación de parámetros que lograron disminuir la concentración de CO<sub>2</sub> además de disminuir la velocidad el frente (ya que el tiempo en el que finalizó la prueba fue mayor) tal como se subraya en el círculo rojo de la figura.

**Figura 49.** Diagrama tornado del % de influencia de parámetros cinéticos II sobre los picos de temperatura objetivo



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

**Figura 50.** Resultados del diseño experimental factorial parámetros cinéticos II con relación a la fracción molar de CO<sub>2</sub> producida.

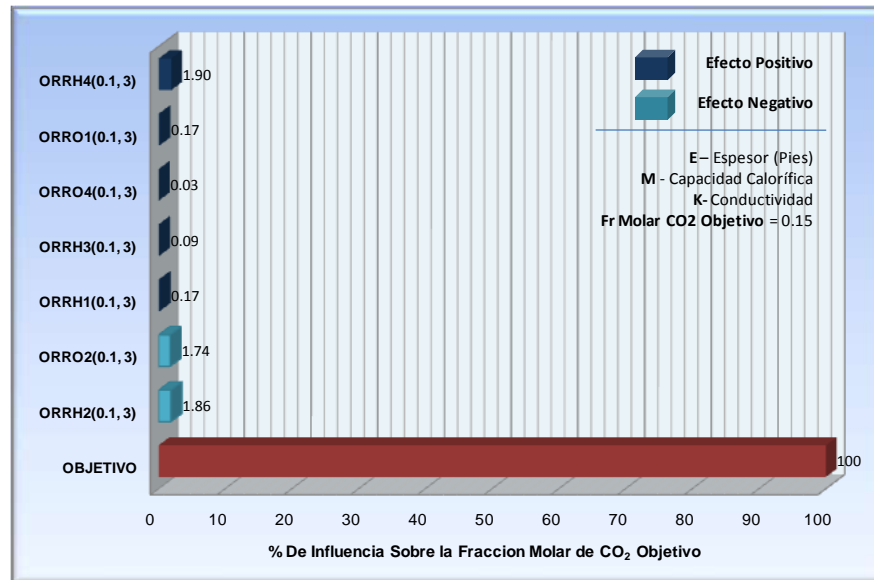


Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

A partir del análisis anterior y de la figura 51 se pudo determinar que un menor orden de reacción con respecto al oxígeno de la reacción de combustión (reacción 4) y un aumento de los órdenes de reacción tanto para el hidrocarburo como para el oxígeno de la reacción de formación de craqueo (reacción 2), permitirán lograr disminuir la producción de CO<sub>2</sub>. Si aumentan los órdenes en una reacción, más rápido ocurrirá, por lo cual en este caso se busca acelerar la reacción de depositación de combustible a partir del consumo rápido de oxígeno y el pseudo-componente del crudo.

Algunos autores a partir de pruebas de laboratorio afirman que los órdenes de reacción tanto con respecto al oxígeno como al hidrocarburo son alrededor de 1, sin embargo en algunas ocasiones los órdenes de reacción con respecto al oxígeno son menores a 1 y otros afirman que los órdenes de reacción con respecto al oxígeno son de 2, según como reporta Fassihi<sup>65</sup>.

**Figura 51.** Diagrama tornado del % de influencia de parámetros cinéticos I sobre la fracción molar objetivo de CO<sub>2</sub>



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

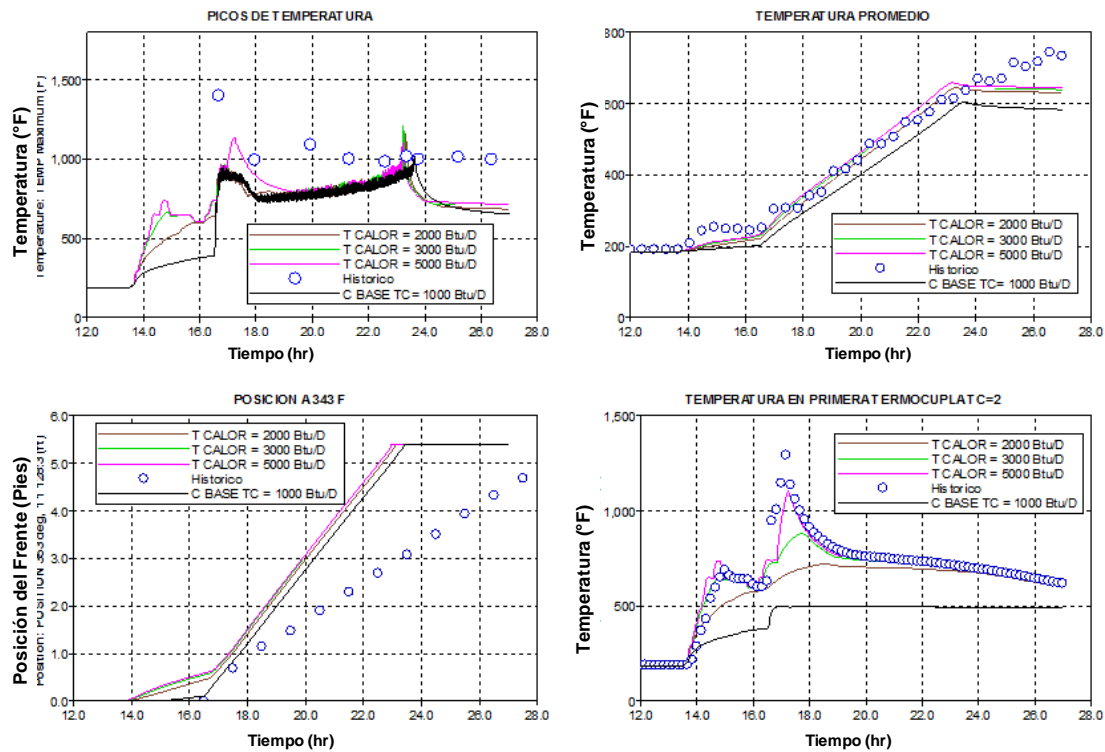
<sup>65</sup> FASSIHI R. BRIGHAM W. RAMEY H. "Reaction Kinetics of In-Situ Combustion: Part 1-Observations". SPE, Stamford U. SPE 8907. August 1984. pp 399-407

### 3.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LA TASA NETA DE CALOR PROPORCIONADA POR LOS CALENTADORES

Antes de presentar los resultados obtenidos en cuanto a los calentadores, cabe aclarar que se llevó a cabo un análisis para otras variables operacionales tales como presión de inyección y tasa de inyección; sin embargo la presión de inyección no presentó una influencia significativa sobre las funciones objetivo, a diferencia de la tasa de inyección de aire la cual sí influyó notoriamente. Los efectos de la tasa de inyección de aire serán discutidos en el siguiente capítulo.

La tasa neta de calor del caso base proporcionada por los tres calentadores que se encuentran en las tres primeras celdas, (parte inicial del tubo - ver figura 23) generan 1000 Btu/día, (41.6 Btu/hr). Esta tasa se varió entre los valores límites, mínimo 500 Btu/día (20.83 Btu/hr) y máximo 3000 Btu/día (125 Btu/hr).

**Figura 52.** Resultados del análisis de sensibilidad de la tasa neta de generación de calor sobre las diferentes funciones objetivo



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Los resultados del análisis de sensibilidad para esta variable no fueron muy significativos en cuanto la producción de gases de combustión, posición del frente y picos de temperatura (influencia menor de 1%). En cuanto a la temperatura promedio se presentó una influencia positiva de alrededor del 10%, mientras que para la temperatura generada en la primera termocupla presento la mayor influencia (28%).

Dado estos resultados obtenidos para un valor mínimo y máximo, y que se obtiene una influencia positiva y significativa sobre las temperaturas registradas por las primeras termocuplas, se decidió llevar a cabo un análisis de sensibilidad para diferentes valores de tasa neta de generación de calor: 1000 Btu/D (Caso base), 2000, 3000 y 5000 Btu/D. Los resultados se presentan en la figura 52.

Se puede apreciar de la figura 52, que un aumento en la tasa neta de generación de calor, proporciona un aumento considerable en la temperatura registrada por la primera termocupla (tal como se presenta en el recuadro inferior derecho). El aumento de esta tasa, más exactamente la tasa de 5000 Btu/D, permite un mayor acercamiento a al pico de temperatura objetivo para esta termocupla (1100°F), la cual está asociada a la ignición artificial del crudo. El inconveniente principal de aumentar la tasa de energía de los calentadores, radica en que el aumento de esta afecta positivamente la temperatura promedio, sobrepasando la temperatura promedio objetivo. Este parámetro como se mostrara más adelante del presente documento, será involucrado dentro del proceso de ajuste histórico.

### **3.5 AJUSTE HISTÓRICO DE VARIABLES**

Para llevar a cabo el ajuste histórico entre los valores medidos en laboratorio y los obtenidos en el modelo de simulación, se empleó el módulo de ajuste histórico asistido de la herramienta CMOST de CMG. Con esta se realizó un primer nivel de ajuste (Ajuste I). Se desarrolló un segundo nivel de ajuste (Ajuste II) de tipo

manual a partir del mejor caso encontrado en el ajuste I. A partir de este ajuste II se determinaron los parámetros óptimos, ya que durante el cotejo asistido se presentaron múltiples corridas con inestabilidad numérica debido al aumento de temperatura por encima de los 1500°F. Por último se llevó a cabo un tercer y definitivo ajuste (Ajuste III) a partir del mejor caso encontrado durante el ajuste II. En este ajuste definitivo se empleó la herramienta CMOST y posteriormente se llevaron a cabo unas modificaciones manuales.

**Tabla 20.** Tabla de influencia de variables total sobre las funciones objetivo

PARAMETROS	CO2_PRO	PS_FR_848 F	TEMP_MAX	TEMP_PRO
	% influencia	% influencia	% influencia	% influencia
FF4(1000000, 2e20)	-4.69	-5.88	-10.94	2.08
FF3(10000000, 2e20)	5.24	5.76	8.73	2.56
FF2(50, 2000000)	3.15	3.88	5.47	-1.84
FF1(50, 50000)	2.50	3.57	2.08	-1.87
ER4(180000, 250000)	-2.34	6.60	-3.86	2.93
ER3(-10000, 0)	3.35	-4.59	2.47	-3.68
ER2(1000000, 1300000)	0.61	3.89	-0.93	1.61
ER1(270000, 350000)	2.87	5.62	4.09	-1.94
EA4(10000, 40000)	5.73	-3.92	6.85	-8.04
EA3(70000, 110000)	-5.23	3.09	-8.01	-1.79
EA2(10000, 60000)	-5.30	-6.73	-26.65	-36.46
EA1(10000, 50000)	-1.12	-4.29	0.54	-2.88
ORRO4(0.1, 3)	-0.03	0.00	0.52	0.69
ORRO2(0.1, 3)	-1.63	0.00	8.23	29.50
ORRO1(0.1, 3)	0.16	0.00	-0.39	1.48
ORRH4(0.1, 3)	1.78	0.00	6.50	11.04
ORRH3(0.1, 3)	-0.08	0.00	0.51	1.03
ORRH2(0.1, 3)	-1.74	0.00	0.98	-3.29
ORRH1(0.1, 3)	-0.16	0.00	0.38	-1.50
HEATR(500, 3000)	0.00	0.00	4.72	9.54
MMPORO(20,40)	-3.22	-10.02	-1.64	-1.80

	INFLUENCIA ENTRE 5 Y 10%
	INFLUENCIA MAYOR A 10%

Fuente: El autor

Antes de analizar los resultados obtenidos es necesario mencionar que el ajuste histórico asistido, se llevó a cabo mediante el cálculo del error para cada función objetivo analizada. Para este caso: temperaturas máximas, temperaturas promedio, posición del frente a 848°F, y concentración del CO<sub>2</sub> producido.

Gracias al análisis de sensibilidad de parámetros llevado a cabo y presentado anteriormente, en la tabla 20 se presenta la tabla de influencia total, la cual representa el % de influencia que tiene cada variable sobre las correspondientes 4 funciones objetivo.

Para el ajuste I se emplearan únicamente energías de activación y factores de frecuencia. En el ajuste II se tendrán en cuenta los órdenes de reacción y las entalpías de reacción, energía liberada por los calentadores y nuevamente las energías de activación. En el ajuste definitivo se involucran energías de activación y la capacidad calorífica de la formación. A continuación se describirá con más detalle los diferentes niveles de ajuste

### 3.5.1 Primer Nivel de ajuste.

Gracias a la tabla 20 se puede observar que las energías de activación tienen un papel importante para lograr el ajuste histórico, y sobre todo la energía de activación de la reacción 2, además tanto las energías de activación como los factores de frecuencia son tomados como parámetros de ajuste principales en simulaciones de procesos de combustión in situ, gracias a la incertidumbre que existe en la determinación de estos.

**Tabla 21.** Parámetros y valores empleados en el primer nivel de ajuste histórico

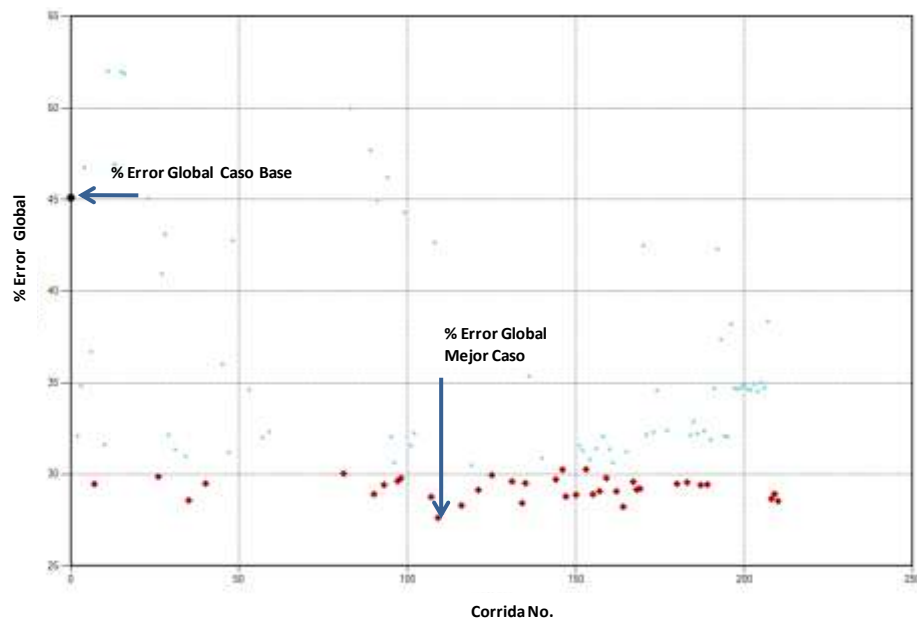
PARAMETRO	VALOR BASE	VALOR 1	VALOR 2	VALOR 3
EA2	32975	10000	20000	30000
EA3	90069	60000	70000	80000
EA4	14617	8000	10000	20000
FF2	114090	500000	1000000	2000000
FF3	3.34E+16	1.00E+07	1.00E+10	1.00E+20
FF4	6.62E+12	1.00E+07	1.00E+10	1.00E+20

Fuente: El autor

Para la presente investigación fueron adquiridos gracias a Ecopetrol-ICP, sin embargo tal como se mencionó anteriormente se consideran aproximaciones iniciales para el modelo de reacciones, pero no definitivos, por lo tanto presentan una alta incertidumbre y serán los primeros en involucrar en el ajuste histórico de las funciones objetivo.

Como se puede apreciar en la tabla 21 para este primer nivel de ajuste histórico se emplearon los parámetros referentes a las energías de activación y los factores de frecuencia para todas las reacciones a excepción de la reacción 1 la cual según la tabla de influencia total no es significativa sobre las funciones objetivo. Para cada parámetro se emplearon tres posibles valores, por lo tanto el software llevara a cabo diversas combinaciones entre estos parámetros para lograr encontrar cuales de estos son descartables o cuales son los que presentan los menores errores de la función objetivo global, una vez el mínimo error converja a un valor específico, y por lo tanto después de diversas corridas no se pueda lograr un error menor, el software detendrá las corridas de simulación con las combinaciones de los parámetros establecidos.

**Figura 53.** Resultados primer nivel ajuste histórico. % error global Vs número de corrida

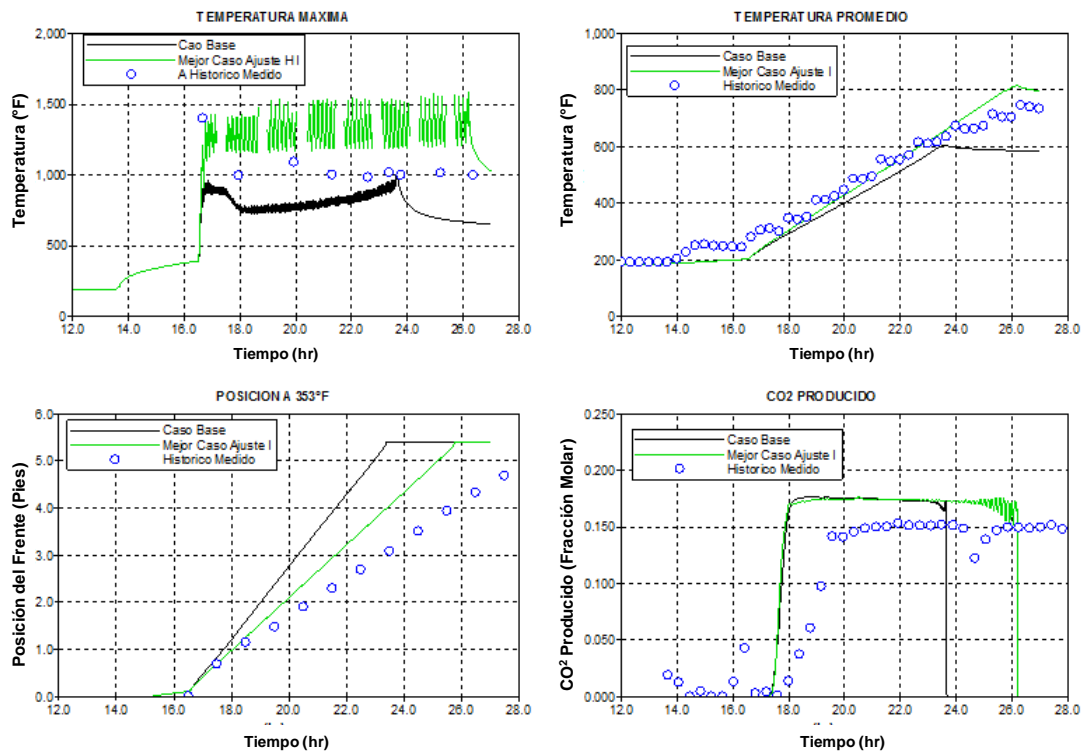


Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Cabe aclarar que algunos valores tal como la energía de activación de la reacción 4 y los factores de frecuencia están por debajo y por encima de los valores base, esto se debe principalmente a que valores muy por debajo de las energías de activación de 2 y 3 generarían altas temperaturas las cuales ocasionan a su vez inestabilidad numérica. Por lo tanto estos valores (factores de frecuencia y energía de activación de 4) servirán de equilibrio para que no se alcancen valores superiores de temperatura.

Después de 210 corridas de simulación los resultados generales se pueden apreciar en la figura 53. El porcentaje de error global para el caso base corresponde a 45%, mientras que el mejor caso (Caso 109) a partir de la combinación de dichos parámetros establecidos logro un 27% de error, lo cual es una disminución en el error significativa.

**Figura 54.** Comparación Resultados primer nivel ajuste histórico mejor caso, caso base e históricos medidos.



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

La forma de los picos de temperatura para el caso 109 se diferencia del caso base gracias a la formación de coque la cual es más uniforme y en mayor proporción, para el caso base se estaba produciendo y consumiendo en promedio alrededor de  $1e-13$  pies<sup>3</sup>, mientras que para el caso 109 alrededor de  $1e-5$ pies<sup>3</sup>. Esta alta producción de coque es obtenida gracias a la disminución de las energías de activación en las reacciones 2 y 3 (reacciones de generación de coque) y al aumento de la energía de activación de la reacción 4.

Bajos valores de energía de activación para las reacciones 2 y 3 son perjudiciales ya que las temperaturas obtenidas pueden ser superiores a las objetivo, por lo tanto el valor optimo esta en 20000 Btu/lbmol para la reacción 2 y en un rango entre 60000 y 80000 para la reacción 3.

**Tabla 22.** Porcentajes de error obtenidos en el mejor caso para las diferentes funciones objetivo. Ajuste primer nivel.

FunciónObj	% Err Caso Base	% Err Mejor Caso (109)
GLOBAL	45	27.62
TEMP_MAX	57	46.96
TEMP_PROM	8.9	5.6
FR_ML_CO2	55	39.4
POS_FR_848	59	18.4

Fuente: El autor

En la tabla 22 se presentan los porcentajes de error obtenidos en el mejor caso de simulación para este primer nivel de ajuste histórico de variables. Se observa que el error se redujo en todas las funciones, sin embargo aún es significativo, por lo tanto se debe recurrir a un segundo nivel de ajuste.

### 3.5.2 Segundo Nivel de ajuste.

Para llevar a cabo este segundo nivel de ajuste se partió del mejor caso del ajuste I (Caso 109) y por lo tanto los objetivos de este ajuste fueron disminuir los picos de temperatura, disminuir la velocidad del frente de combustión y disminuir la

producción de  $\text{CO}_2$ , en cuanto a las temperaturas promedio se puede decir que ya se consiguió un ajuste considerable.

Dado que durante el ajuste I asistido mediante CMOST algunas combinaciones de energías de activación y factores de frecuencia generaron inestabilidad numérica y que además se probaron solamente tres posibles valores para cada variable de ajuste; en este caso se decidió llevar a cabo un ajuste manual con el fin de encontrar parámetros óptimos además de entender claramente el papel de estas variables sobre las velocidades de reacción.

La metodología que se llevó a cabo para este segundo nivel de ajuste fue la siguiente:

1- Se analizó la velocidad de reacción para cada una de las reacciones con respecto a las demás, a partir de la manipulación de la energía de activación y de esta manera se encontraron valores óptimos.

2- Se analizó la influencia de los órdenes de reacción, (más específicamente para la reacción 2) con el fin de llevar todos los órdenes a un valor de 1 sin que se afecten las diferentes funciones objetivo. Esto puesto que durante el análisis de sensibilidad de variables se determinó que los órdenes pueden alterar la temperatura y la velocidad sin embargo estas funciones objetivo también pueden ser manipuladas a partir de energías de activación dejando los órdenes constantes e iguales a 1.

3- Se analizó la influencia de las entalpías de reacción

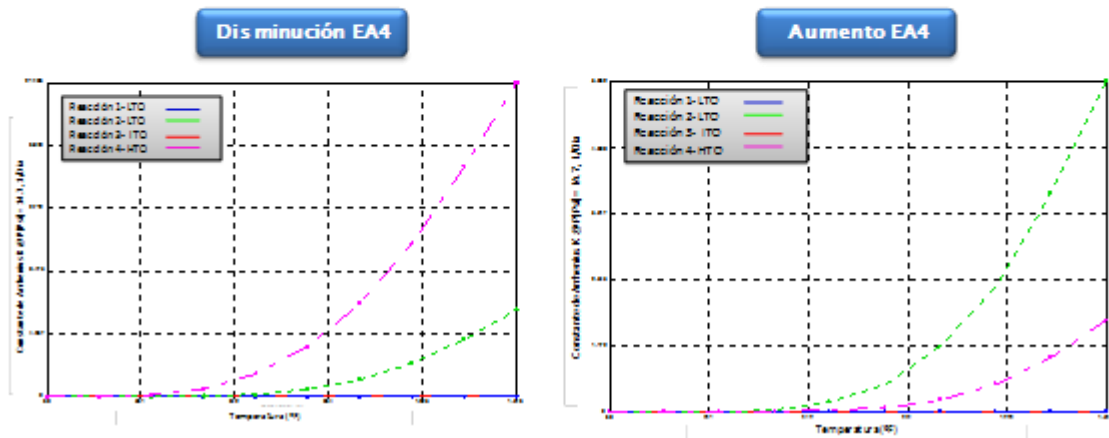
4- Se obtuvieron conclusiones, resultados del segundo ajuste y posibles soluciones para seguir disminuyendo el error global objetivo y acercarse más al ajuste histórico.

- **Reacción de combustión o rompimiento (Reacción 4 HTO).** En la figura 55 se puede observar los resultados en cuanto al análisis de la reactividad de la reacción 4 gracias a la modificación de la energía de activación. Se puede

observar que el aumento de la energía de activación de 4 causa una disminución de la velocidad de reacción por lo tanto la reacción que predominara será la reacción de generación de coque (2). Esto a su vez genera una mayor cantidad de coque una y disminución de velocidad de consumo de este. Valores muy altos de EA4 causan temperaturas tan altas que generan inestabilidad numérica y por lo tanto no se pueden llevar a cabo.

**Figura 55.** Análisis de la velocidad de reacción de combustión a partir de la energía de activación (Reacción 4)

EA4	Mayor Velocidad de Reacción	Temperaturas	Velocidad del Frente	CO2	Comentarios
Aumenta	2 LTO	<b>Aumenta</b>	<b>Disminuye</b>	<b>Cambio Leve</b>	- Alta cantidad de coque - Inestabilidad Numérica
Disminuye	4 HTO	<b>Disminuyen</b>	<b>Aumenta</b>	<b>Cambio Leve</b>	- Menor cantidad de coque



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

La disminución de la energía de activación genera una mayor reactividad de esta reacción, lo cual según la figura 55, la constante de Arrhenius K ocasionara que esta sea la reacción predominante, por encima de las demás reacciones inclusive las de generación de coque, esto sugiere menor cantidad de coque producido, menores temperaturas y mayor velocidad de consumo del coque depositado, por lo tanto la velocidad del frente es mayor.

Este mismo análisis para la entalpia de reacción y los órdenes de reacción se puede apreciar en la tabla 23. Como se mencionó anteriormente este análisis se llevó a cabo para determinar los valores óptimos de forma manual, sin embargo estos valores y las principales conclusiones serán presentadas posteriormente.

**Tabla 23.** Análisis de la entalpia de reacción y los órdenes para la reacción de combustión (Reacción 4)

ORROX	Temperaturas	Velocidad del Frente	CO <sub>2</sub>	Comentarios
Aumenta	Aumenta	Disminuye	Cambio Leve	- Alta cantidad de coque - Inestabilidad Numérica
Disminuye	Disminuyen	Aumenta	Cambio Leve	- Menor cantidad de coque

ORRHC	Temperaturas	Velocidad del Frente	CO <sub>2</sub>	Comentarios
Aumenta	Aumenta	Disminuye	Cambio Leve	- Alta cantidad de coque - Inestabilidad Numérica
Disminuye	Disminuyen	Aumenta	Cambio Leve	- Menor cantidad de coque

ER	Temperaturas	Velocidad del Frente	CO <sub>2</sub>	Comentarios
Aumenta	Aumenta	Aumenta	Cambio Leve	- Alta cantidad de coque - Inestabilidad Numérica
Disminuye	Disminuyen	Disminuye	Cambio Leve	- Menor cantidad de coque - Efecto Favorable para el ajuste

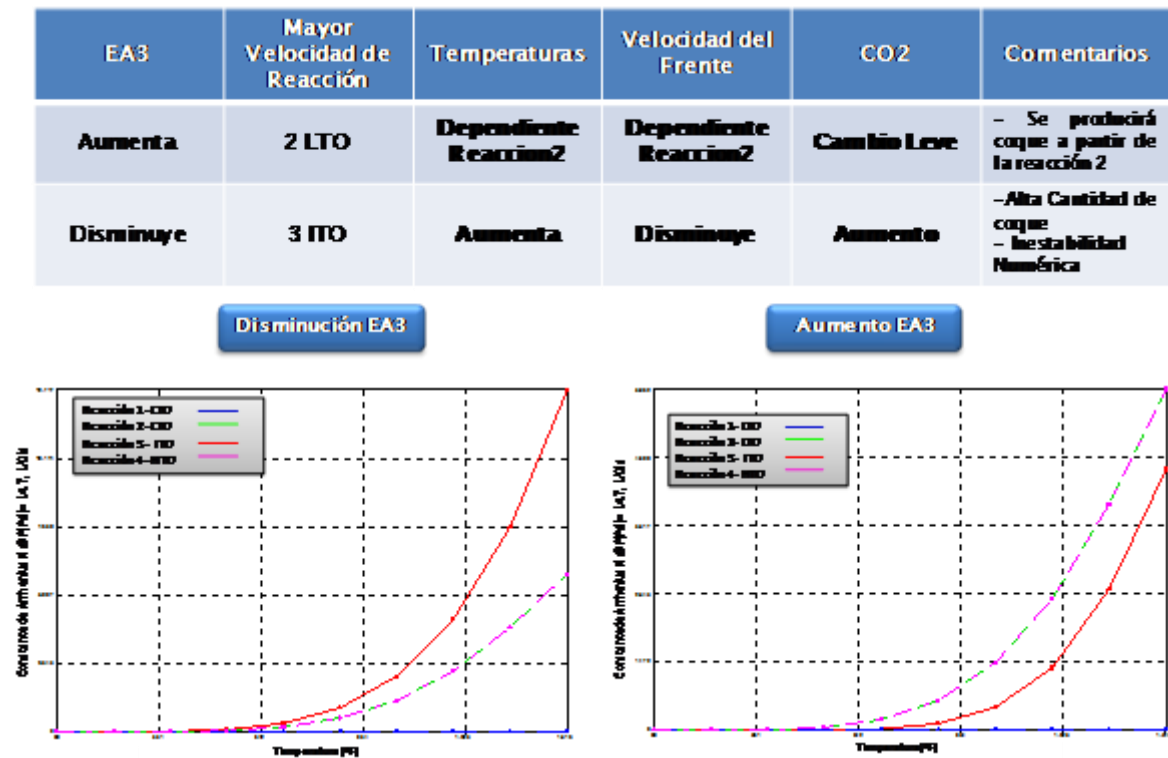
Fuente: El autor

- **Reacción de depositación de coque a partir de craqueo (Reacción 3 ITO).** A partir del estudio de reactividad de esta reacción se pudo obtener información que no fue posible observar durante el análisis de sensibilidad mediante CMOST. En la figura 56 se puede observar que cuando se aumentó la energía de activación a un valor tal que la reacción predominante de generación de craqueo fuera la reacción 2, las variables como temperatura y velocidad del frente, dependieron directamente de esta reacción 2, que también forma coque. Sin embargo la gran diferencia entre las dos reacciones de formación de coque radica en que una genera coque a partir únicamente del aumento de temperatura (reacción 3 -

endotérmica) mientras que la otra genera coque a partir de la reacción con el oxígeno (reacción 2 – exotérmica).

Se puede concluir que se puede generar coque a partir de las dos reacciones (2 y 3) y entre más reactiva sea una reacción, mayor será la cantidad de coque producido, mayor será la temperatura y menor será la velocidad del frente de reacción. Por otro lado dado que la reacción 3 es endotérmica una mayor reactividad de esta comparada con la reacción 2 implica producción de coque desde antes de inyectar oxígeno gracias a los efectos de los calentadores. Puede ser posible encontrar valores óptimos de energía de activación que permitan la generación en mayor proporción de coque a partir de la reacción 2 y en menor proporción para la reacción 3 con el fin de evitar la producción de coque en mayores cantidades antes de entrar en contacto el hidrocarburo con el oxígeno.

**Figura 56.** Análisis de la velocidad de reacción de generación de coque a partir de la energía de activación (Reacción 3)



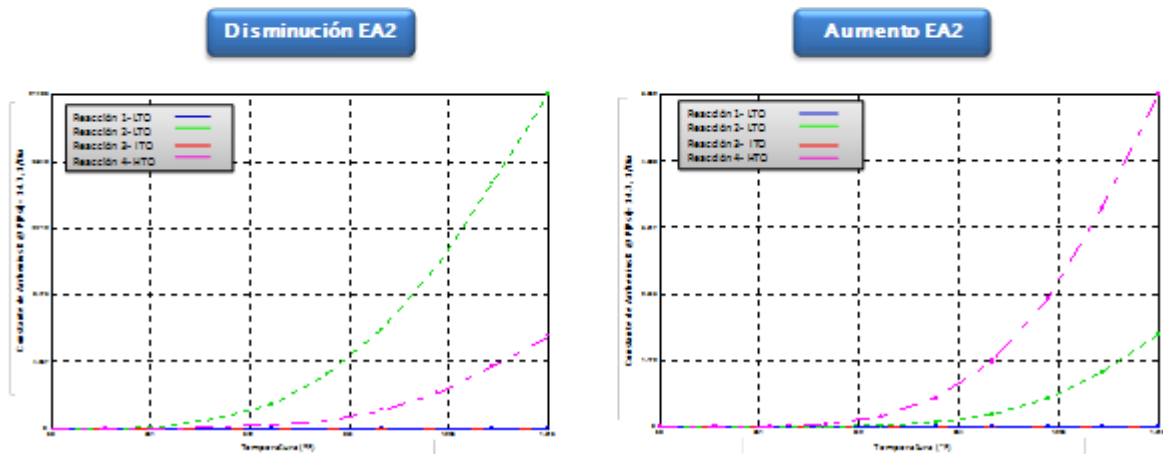
Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

**- Reacción de depositación de coque a partir de oxidación (Reacción 2 LTO).**

Al igual que para la anterior reacción y según la figura 57 una menor reactividad de esta reacción (aumento de EA2) permite que predomine en cuanto a reactividad, la reacción 4 o de combustión por lo tanto será menor la producción de coque y aumentara la velocidad de consumo de este. Una mayor reactividad de esta reacción (disminución de EA2) implica una mayor cantidad de coque, mayores temperaturas y por lo tanto una menor velocidad del frente de combustión, sin embargo muy bajos valores presentan inestabilidad numérica por las altas temperaturas generadas.

**Figura 57.** Análisis de la velocidad de reacción de generación de coque a partir de la energía de activación (Reacción 2)

EA2	Mayor Velocidad de Reacción	Temperaturas	Velocidad del Frente	CO2	Comentarios
Aumenta	4 HTO	Disminuyen	Aumenta	Cambio Leve	- Menor cantidad de coque
Disminuye	2 LTO	Aumentan	Disminuye	Cambio Leve	- Mayor cantidad de coque - Inestabilidad Numérica



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Por ultimo en la tabla 24 se presenta el análisis de la entalpia y los órdenes de para esta reacción, donde se puede observar que la disminución de la entalpia de reacción genero un efecto positivo y deseado para el ajuste histórico.

Tal como se presentaron los análisis de reactividad, para los órdenes y entalpías de las diferentes reacciones, se llevó a cabo un análisis para la reacción LTO 1, sin embargo a pesar de que se aumentó su reactividad hasta ser la reacción predominante no se obtuvieron cambios significativos sobre las funciones objetivo por lo tanto este análisis no se describe en el presente documento.

**Tabla 24.** Análisis de la entalpia de reacción y los órdenes para la reacción de depositación de combustible (Reacción 2)

ORROX	Temperaturas	Velocidad del Frente	CO2	Comentarios
Aumenta	Disminuye	Aumentan	Cambio Leve	- Menor producción de coque
Disminuye	Aumenta	Disminuye	Cambio Leve	- Alta cantidad de coque
ORRHC	Temperaturas	Velocidad del Frente	CO2	Comentarios
Aumenta	Disminuyen	Aumenta	Cambio Leve	- Menor producción de coque
Disminuye	Aumenta	Disminuye	Cambio Leve	- Alta cantidad de coque - Inestabilidad Numérica
ER	Temperaturas	Velocidad del Frente	CO2	Comentarios
Aumenta	Aumenta	Aumenta	Cambio Leve	- Alta cantidad de coque - Inestabilidad Numérica
Disminuye	Disminuyen	Disminuye	Cambio Leve	- Menor cantidad de coque - Efecto Favorable para el ajuste

Fuente: El autor

**- Conclusiones del análisis llevado a cabo para el ajuste manual II.** El aumento en la reactividad de las reacciones de depositación de coque, genera mayor cantidad de este y por ende aumento de temperatura y menor velocidad del frente de combustión. Esto gracias a que se quema más coque; sin embargo altas concentraciones de este generan temperaturas superiores a 1500°F y por lo tanto se presenta inestabilidad numérica.

Si bien se puede ajustar la velocidad del frente ya que esta se quiere disminuir, aumentaría las temperaturas, siendo este el efecto contrario que se busca en el

ajuste histórico donde se busca disminuir las temperaturas. En conclusión mientras se ajustaría la temperatura se estaría alejando del ajuste la velocidad del frente y viceversa.

El aumento en la reactividad de la reacción de combustión o rompimiento genera una mayor velocidad del frente, menor cantidad de coque depositado y por lo tanto menores temperaturas.

El aumento en la reactividad de la reacción de craqueo (3) sobre la de depositación de coque (2), genera efectos desfavorables, asociados a aumento de CO<sub>2</sub>, presencia de coque antes de la inyección de aire, menor consumo de este, y por lo tanto menores temperaturas.

La reactividad de la reacción LTO-1, no presento efectos significativos sobre las funciones objetivo.

Se deben establecer valores de energía de activación óptimos, tanto para la reacción HTO como las de depositación de coque.

La disminución de las entalpías de las reacciones de combustión y depositación de coque (2 y 4), generan efectos favorables para el ajuste histórico ya que se disminuyen las temperatura con una leve disminución de la velocidad del frente. Variaciones necesarias para acercarse a un ajuste aceptable.

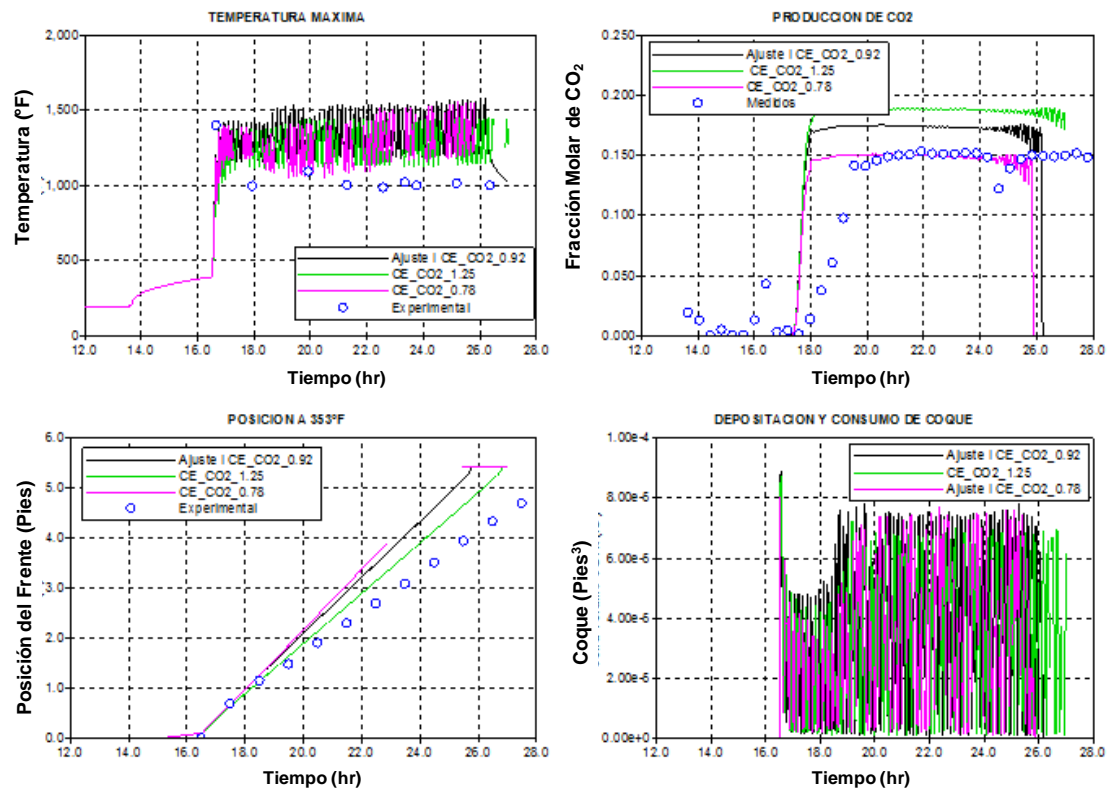
Ni la variación de órdenes de reacción ni las energías de activación permitieron disminuir significativamente la fracción molar de CO<sub>2</sub>. Por lo tanto se trabajara con órdenes de reacción de 1.

Gracias a que a partir de ninguna de las variables anteriormente mencionadas fue posible disminuir la producción de CO<sub>2</sub>, se recurrió a evaluar la estequiometria de la reacción de combustión (4); en la figura 58 se presentan los resultados de este análisis, el cual consistió en la variación del coeficiente estequimetrico asociado con la producción de CO<sub>2</sub> para la reacción de combustión o reacción 4.

De la figura 58 se pudo observar que en la medida que se disminuya el coeficiente para el CO<sub>2</sub> se disminuye la fracción molar en cuanto a la producción de este mismo obteniendo de esta manera un efecto favorable para el ajuste histórico. Cabe aclarar que la obtención de estos coeficientes estequiométrico se lleva a cabo a partir de pruebas de laboratorio con muestras representativas del yacimiento objetivo, sin embargo dado que el modelo de reacciones suministrado por ECOPETROL-ICP no es considerado como definitivo ya que están en procesos diferentes pruebas de laboratorio, existe cierta incertidumbre de este tipo de valores. Razón por la cual se optó por manipularlos con el fin de reducir el error relativo para el ajuste histórico de la fracción molar de CO<sub>2</sub>.

Los resultados obtenidos y los valores óptimos correspondientes a este ajuste manual II se presentaran en conjunto con el ajuste III o ajuste definitivo.

**Figura 58.** Análisis del coeficiente estequiométrico del CO<sub>2</sub> en la reacción de combustión

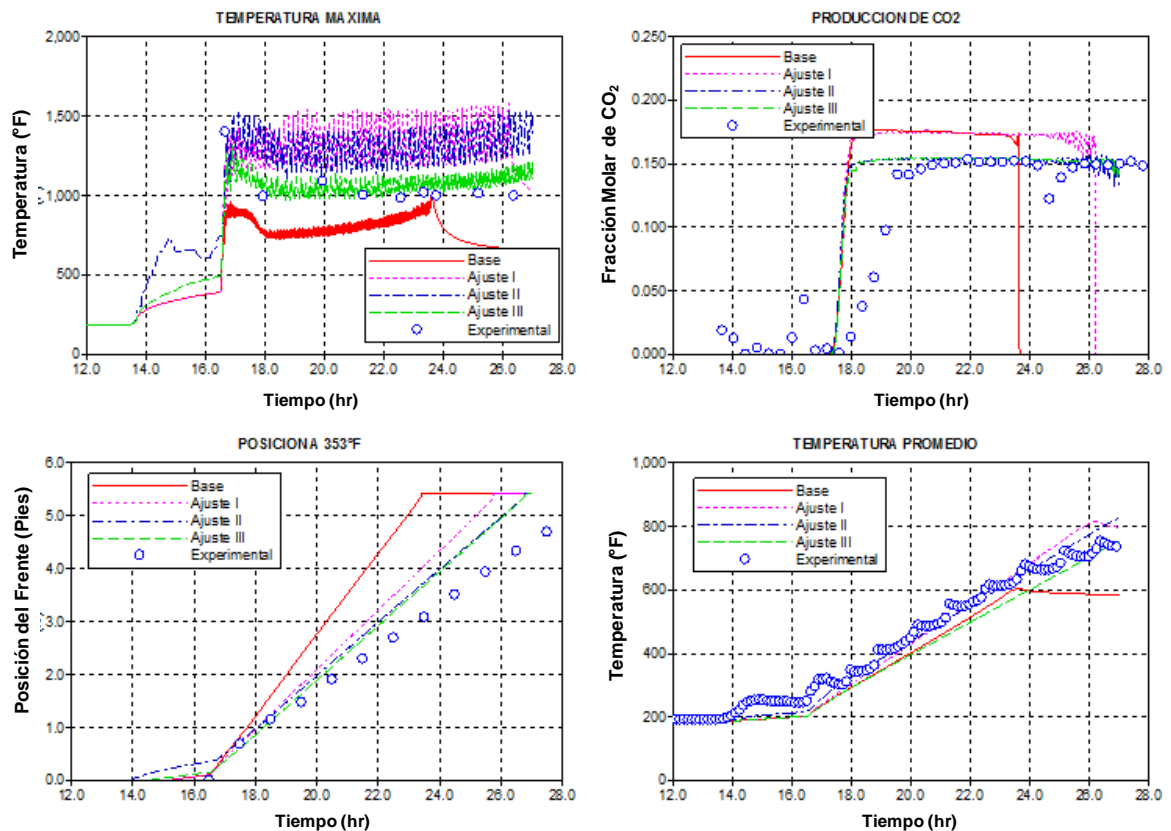


Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

### 3.5.3 Tercer Nivel de Ajuste (Definitivo).

Una vez encontrado parámetros óptimos de ajuste a partir del ajuste manual II, se procedió a llevar a cabo último cotejo asistido mediante CMOST, para las energías de activación; posteriormente se modificaron manualmente parámetros tales como energía proporcionada por los calentadores y capacidad calorífica de la roca.

Figura 59. Resultados finales del ajuste histórico



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

En la figura 59 y tabla 25 se presentan los resultados obtenidos tanto para el primer, segundo y tercer nivel de ajuste comparados con el caso base. Los aportes más significativos en cuanto al ajuste II se dieron en la posición del frente y la producción de CO<sub>2</sub>. Para disminuir la posición del frente con el tiempo y por lo tanto la velocidad de este, se disminuyeron las energías de activación de las reacción de generación de coque mientras que se aumentó la energía de la combustión del mismo, esto generara por lo tanto mayores cantidades de coque

que reaccionan con menor velocidad. Generar altas cantidades de coque ocasiona altas temperaturas tal como se mencionó anteriormente y por lo tanto el error relativo en cuanto a los picos de temperatura aumento para este ajuste II.

Fue posible a partir de la manipulación de los coeficientes estequiométricos de la reacción de combustión lograr un mejor ajuste en cuanto a la producción de CO<sub>2</sub> para este nivel II. La entalpia de reacción de las reacciones 2 y 4 tuvieron también un papel importante gracias a que con la disminución de estas fue posible una disminución de la posición del frente con el tiempo y con una leve disminución en la temperatura.

En cuanto al ajuste III este se llevó a cabo con el fin de disminuir el error presentado por los picos de temperatura del ajuste II. Por esta razón se realizó un ajuste asistido mediante CMOST a partir del caso correspondiente al ajuste II, nuevamente de las energías de activación pero en un rango más discretizado gracias a los análisis llevados a cabo el ajuste anterior.

**Tabla 25.** Resultados finales del ajuste histórico

Función Obj	% Err Modelo Base	% Err Ajuste I	% Err Ajuste II	% Err Ajuste III
<b>GLOBAL</b>	<b>45</b>	<b>27.62</b>	<b>27.46</b>	<b>16.918</b>
<b>TEMP_MAX</b>	57	46.96	67.28	23.974
<b>TEMP_PROM</b>	8.9	5.6	4.2	6.48
<b>FR_ML_CO2</b>	55	39.4	25.24	24.48
<b>POS_FR_848</b>	59	18.4	13.11	12.72

Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Se pudo lograr una reducción significativa del error para los picos de temperatura sin embargo esto implicaba un aumento en el error para la posición del frente, razón por la cual se optó por disminuir la energía de los calentadores (HEATR ver tabla 29) los cuales afectan de manera positiva esta variable, además se recurrió a la capacidad calorífica de la formación tal como se presenta en la tabla 30. Si bien

los valores presentados en la literatura hacen referencia a capacidades caloríficas entre 34 a 36 Btu/pie<sup>3</sup> °F, el aumento de esta fue la única opción posible para disminuir la posición del frente con el tiempo sin incurrir a aumentar la temperatura.

De esta manera el caso III constituye el mejor y definitivo ajuste histórico, ya que se obtuvo un error global de 16.9%, y si bien es posible seguir reduciendo el error a partir de la manipulación de órdenes de reacción y/o propiedades térmicas de la roca y fluidos, sin embargo no se considera buena práctica en este tipo de procedimientos y por lo tanto se desiste en la búsqueda de reducir el error y se opta por tomar este último caso como el base para realizar los estudios relacionados con la tasa de inyección.

Se debe aclarar que si bien la producción de CO<sub>2</sub> de la figura 59 presenta un buen ajuste al final de la prueba a diferencia del comienzo de esta, algunos autores manifiestan que esto es debido a que en la prueba experimental se presenta solubilización del CO<sub>2</sub> en el aceite. Mientras que el modelo de simulación no se está representado este mecanismo de solubilización ya que es de alta complejidad y requiere pruebas de laboratorio adicionales.

Existe una serie de propiedades y variables de los pseudo-componentes del fluido (constantes de equilibrio, densidades, entalpías, propiedades PVT, etc.) que no pudieron ser manipuladas y que están relacionadas al modelo de fluidos, el cual fue suministrado por parte de ECOPETROL-ICP. Por lo tanto no fue posible verificar y analizar este tipo de propiedades, y comprobar si fue posible obtener el ajuste de estas propiedades con las respectivas pruebas PVT para el fluido de interés. Tampoco se cuenta con información precisa acerca de las pruebas PVT de este fluido.

Por esta razón anteriormente expuesta puede darse la imposibilidad de ajustar la posición del frente sin aumentar significativamente las temperaturas, ya que el

modelo de fluidos controla los cambios de fase y las entalpías de los pseudo-componentes.

Otra razón por la cual no pude seguir reduciendo el error para encontrar el ajuste puede estar asociada a que el modelo de fluidos está en función de pseudo-componentes y no en función de maltenos y asfaltenos o en función de la fracción SARA, los cuales según la literatura permiten representar de una manera más adecuada el comportamiento de quema de una muestra de crudo

**Tabla 26.** Comparación de parámetros de ajuste para los tres niveles de ajuste

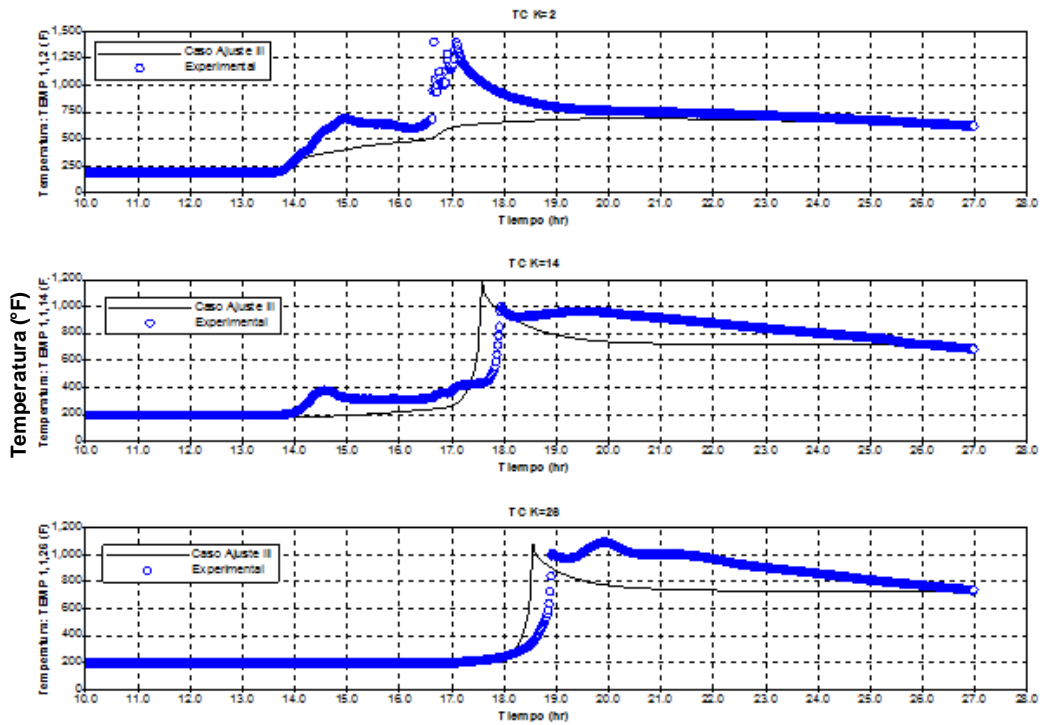
PARAMETRO	CASO BASE	AJUSTE I (ASISTIDO)	AJUSTE II (MANUAL)	AJUSTE III (COMBINADO)
EA4	14617	20000	25000	22000
EA3	90069	80000	40000	40000
EA2	32975	20000	19000	20000
ER4	213408	213408	180000	180000
ER2	1117745	1117745	900000	900000
ORR2_OXÍGENO	2	2	1	1
CE_RXN4_CO2	0.929501	0.929501	0.82456	0.82456
HEATR	1000	1000	2500	1000
M-Roca	35	35	35	40

Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

En la tabla 26 se presenta una comparación de los diferentes parámetros de ajuste hasta llegar a los parámetros definitivos del ajuste III. Parámetros como factores de frecuencia solamente se variaron en el ajuste I, sin embargo gracias a que la energía de activación presenta mayor influencia que estos, tal como se presentó en el análisis de sensibilidad, no se tuvieron en cuenta para los demás ajustes y por lo tanto no se incluyeron en esta tabla final.

Por ultimo en las figuras 60,61 y 62 se presentan los perfiles de temperatura para las diferente termocuplas (9) a excepción de la penúltima termocupla correspondiente a la celda 98.

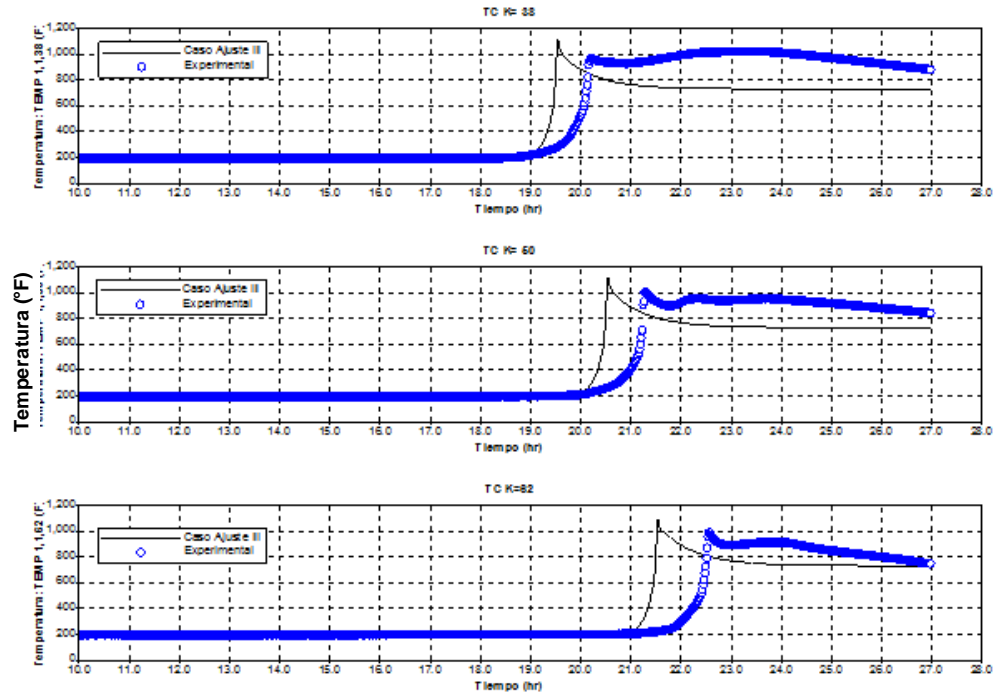
**Figura 60.** Perfil de temperaturas 1 caso ajuste definitivo



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

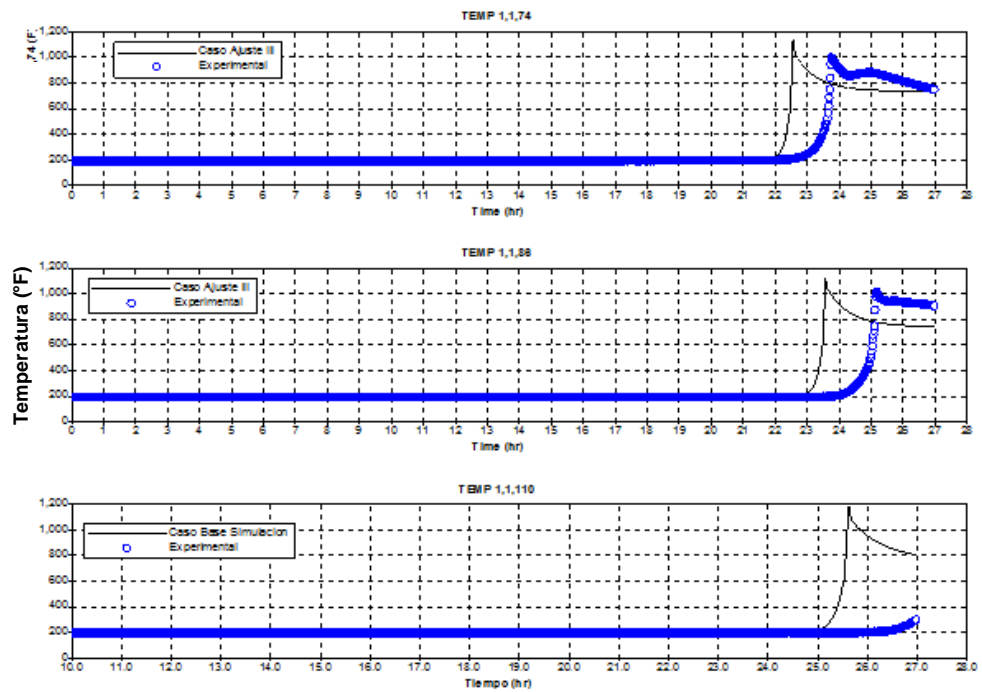
Como se mencionó anteriormente se obtuvo un muy buen acercamiento en cuanto a los picos de e temperatura a excepción de la temperatura de ignición (primera termocupla celda 2), sin embargo no se pudo obtener un acercamiento hacia los valores experimentales de la posición del frente, por esta razón los perfiles de temperatura de las ultimas termocuplas presentan esa diferencia en cuento al tiempo en el cual avanza el frente de combustión.

Figura 61. Perfil de temperaturas 2 caso ajuste definitivo



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Figura 62. Perfil de temperaturas 3 caso ajuste definitivo



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

#### 4. DETERMINACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA TASA DE INYECCIÓN DE AIRE SOBRE LOS PERFILES DE TEMPERATURA Y LOS GASES DE COMBUSTIÓN

Una vez construido y ajustado lo más aproximadamente el modelo de simulación con respecto al modelo experimental, el siguiente y último paso corresponde al estudio de la tasa de inyección de aire (TIA por sus siglas en español) sobre los perfiles de temperatura y los gases de combustión.

Dado que la presente investigación es de tipo analítica, se establecerán asociaciones y relaciones directas entre dichas variables<sup>66</sup> mediante análisis cualitativo y cuantitativo. En la literatura<sup>67</sup> se presentan diversas técnicas para este tipo de análisis, en este caso específico se emplearon herramientas tales como diagramas de cajas, histogramas, análisis de regresión, determinación de parámetros estadísticos básicos, graficas de interacción y de superficie de respuesta. Para llevar a cabo esta parte final de la investigación se plantearon las siguientes etapas (ver figura 63).

**Figura 63.** Etapas para llevar a cabo el estudio analítico de la tasa de inyección de aire



Fuente: El autor

<sup>66</sup> ARBELAEZ de Moncaleano .Ruby. "El proceso de la Investigación", Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2005

<sup>67</sup> MONTGOMERY D. "Diseño y Análisis de Experimentos", Universidad Estatal de Arizona.LimusaWiley. 2 Edición. 2004.pp 60-115.

El análisis de tipo cualitativo<sup>68</sup> hace referencia a la extracción de significados que permitan comprender la situación objeto de estudio. El análisis de tipo cuantitativo<sup>69</sup> es un conjunto de técnicas de análisis estadísticos donde el propósito es extraer una invariante o estructura de interés a partir de los datos y/o establecer relaciones entre variables a partir diversos métodos.

El estudio de estas variables permitirá tener un mayor entendimiento del comportamiento de quema que presenta la muestra A-1 en función de la tasa de inyección. Por otro lado se establecerán que efectos asociados a la tasa son posibles de modelar numéricamente mediante una prueba de tubo de acuerdo con algunos resultados presentes en la literatura y que son discutidos en el primer capítulo.

#### **4.1 OBTENCIÓN Y ANÁLISIS DE LA DATA**

El factor principal o variable de entrada será la tasa de inyección de aire, mientras que las variables de respuesta o salida serán los picos de temperatura, la velocidad del frente de combustión, los gases de combustión y por lo tanto los parámetros asociados a estos gases tales como aire requerido y relación aparente hidrogeno carbono, entre otros (ver figura 64).

En cuanto a la obtención de la data, tal como se observa en la figura 64, se realizaron corridas del modelo de simulación ajustado para diferentes tasas de inyección de aire entre 10 a 400 Pcs/d con un total de 11 niveles, incluyendo la tasa aplicada en el modelo experimental y base de simulación la cual fue de 270 Pcs/d. Igualmente en la figura 64 debajo de cada tasa de inyección de aire (Pcs/d) se encuentra su correspondiente flujo de aire (Pcs/hr-pie<sup>2</sup>) en función del área transversal al flujo, para este caso corresponde a 0.0855 pies<sup>2</sup>.

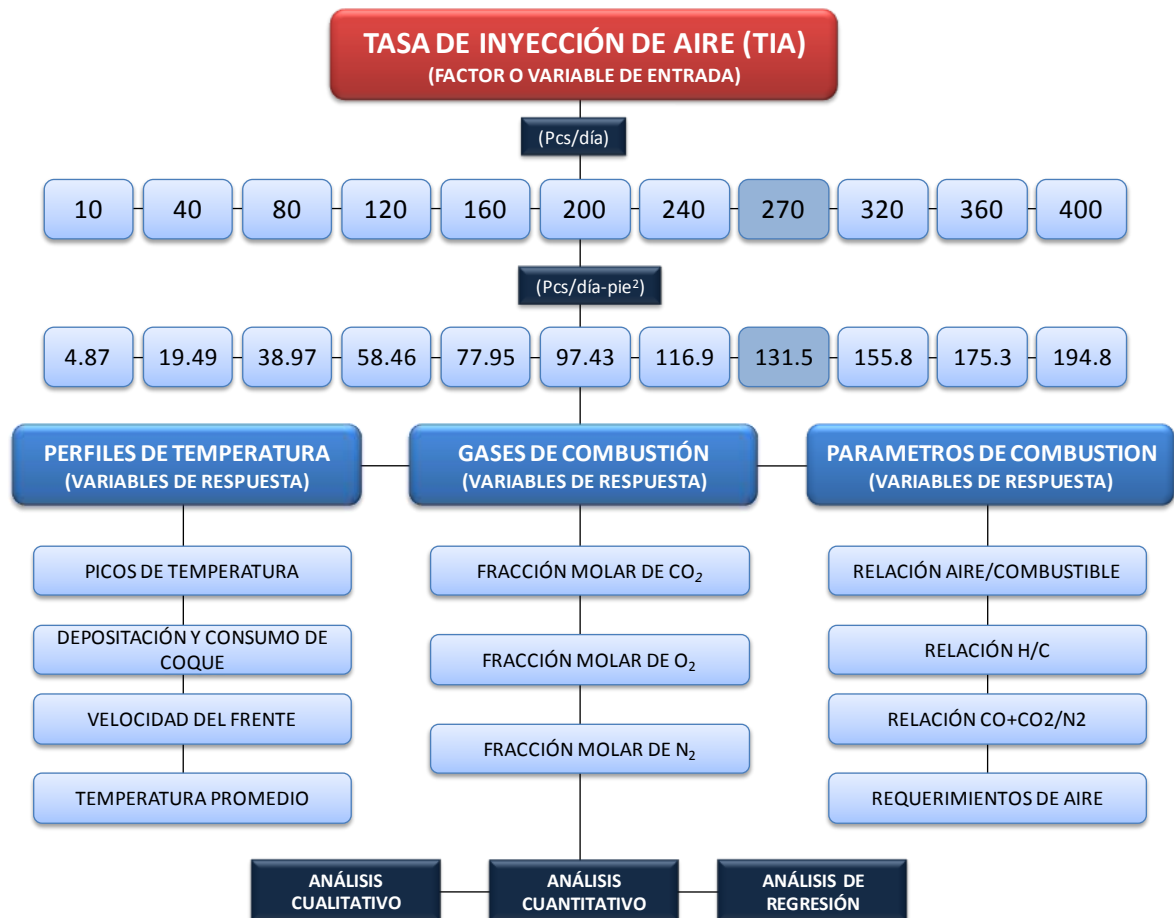
---

<sup>68</sup> REBOLLEDO, A. "El Análisis en investigación Cualitativa", Universidad Del Bio-Bio.Chile. Tomado de Internet: <http://www.slideshare.net>.

<sup>69</sup> ROUTIO, P. "Arteología, la ciencia de productos y profesiones, Análisis Cuantitativo", 2007. Tomado de Internet: <http://www2.uiah.fi/projects/metodi/s00.htm>

Este rango de tasas o flujos fue determinado a partir de comparaciones con la literatura. Tal es el caso de las pruebas de Martin et al<sup>70</sup> descritas en el primer capítulo, en las cuales se llevó a cabo un estudio de los flujos de aire en un rango de 10 a 140 Pcs/hr-pie<sup>2</sup>, o tal es el caso de Kumar<sup>71</sup> que estudia los efectos del flujo en un rango entre 10 a 108 Pcs/hr-pie<sup>2</sup>. Sin embargo para este estudio específico se decidió abarcar un mayor rango (4.8 y 194.8 Pcs/hr-pie<sup>2</sup>).

**Figura 64.** Recolección y evaluación de datos



Fuente: El autor

Dado que el objetivo principal es evaluar el efecto de la TIA sobre las variables de respuesta o funciones objetivo ya mencionadas, se obtuvieron graficas directamente del simulador y de esta manera se realizó un análisis preliminar o

<sup>70</sup> MARTIN W. Op.Cit. "Process Variables of in situ Combustion" 1957

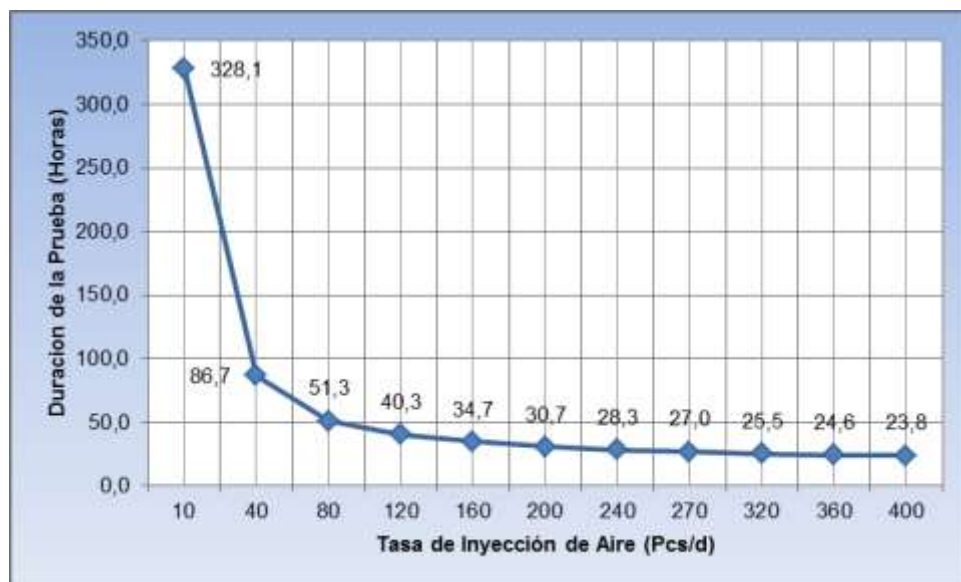
<sup>71</sup> KUMAR, M. Op.Cit. "Simulation of laboratory In-Situ Combustion Data and Effect of Process Variations" 1987.

análisis cualitativo. Posteriormente se exportaron todos los datos a Excel con el fin de llevar a cabo un análisis más profundo (análisis cuantitativo) y se contó además con la herramienta software de análisis estadístico *Minitab15*<sup>72</sup> para esta etapa.

Los datos ya exportados a Excel y Minitab15 se sometieron a un análisis estadístico básico en el que se emplearon los denominados diagramas de caja, e histogramas de datos, esto con el fin de examinar la interacción entre la variable de respuesta (Ej. picos de temperatura) y el factor o variable de entrada (tasa de inyección de aire). El paso siguiente fue establecer la expresión matemática que describe la relación entre las dos variables involucradas, en caso de que sea posible y se pueda observar una tendencia definida.

Cabe aclarar que inicialmente las corridas de simulación para las diferentes tasas se llevaron a cabo con un mismo periodo de tiempo inyección/producción de fluidos (27 horas). Sin embargo dado que la tasa controla el avance del frente llama, los tiempos de inicio y finalización de este serán diferentes.

**Figura 65.** Duración total de la prueba Vs. Tasa de Inyección de aire (TIA)



Fuente: El autor

<sup>72</sup> SOFTWARE DE ANALISIS ESTADISTICO. MINITAB® 15.1.30.0. © 2007 Minitab Inc.

Por lo anterior se decidió llevar a cabo el análisis estadístico para las diferentes tasas con diferentes tiempos de simulación (ver figura 65). Teniendo en cuenta que la prueba para cada tasa finaliza una vez que el frente llegue al final del tubo y por lo tanto se deje de producir  $\text{CO}_2$  y se empiece a producir aire nuevamente.

De la figura 65 se puede apreciar que existe una marcada tendencia, entre menor sea la TIA (Tasa de inyección de aire), mayor será la duración de la prueba, sin embargo a bajas tasas la pendiente es más pronunciada puesto que entre la TIA de 10 y la de 40 Pcs/d existe una diferencia aproximadamente de 242 horas, mientras que entre TIA, de 360 y 400 Pcs/d, la diferencia es de 0.8 horas. Durante el análisis de las variables de respuesta se seguirá discutiendo acerca de la razón de estas variaciones asociadas con el tiempo de duración de la prueba.

#### **4.2 PERFILES DE TEMPERATURA**

En cuanto a los perfiles de temperatura, es posible analizar: los picos de temperatura, la posición del frente a determinada temperatura, la temperatura promedio y un parámetro asociado a estos de gran importancia como es el caso de la depositación de coque.

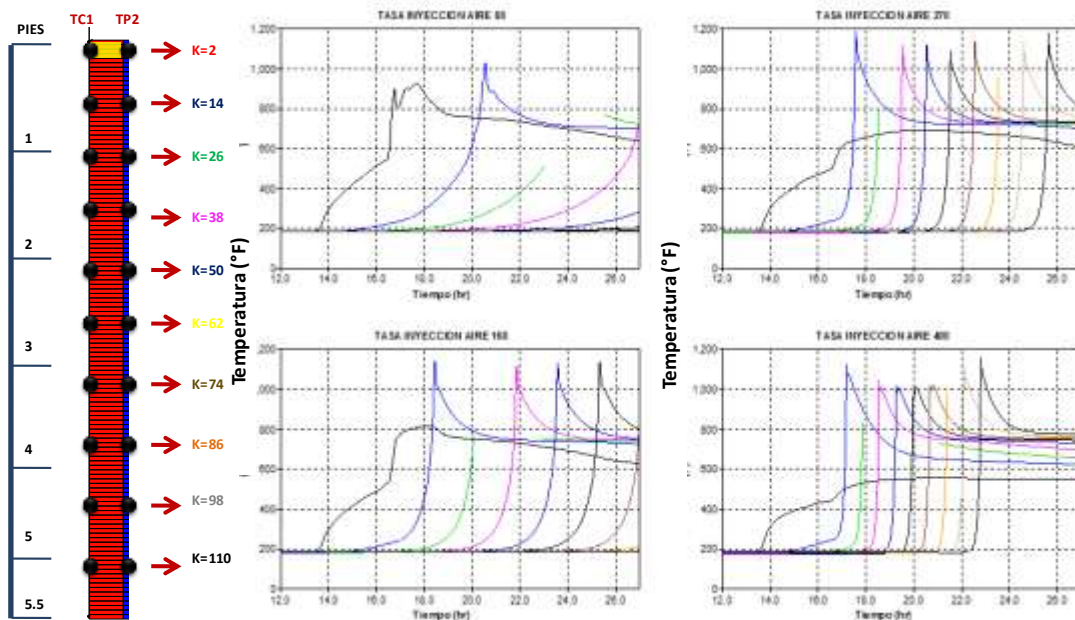
Antes de entrar en detalle en este análisis, en la figura 66 se presentan perfiles de temperatura completos para cuatro TIA (80, 160, 270, 400 Pcs/d), donde se puede apreciar que para un mismo tiempo algunos perfiles simplemente en TIA bajas no se alcanzaron a desarrollar completamente. Por otro lado los picos presentados para todas las diferentes TIA (incluyendo 10 y 40 Pcs/d) permitieron concluir que la prueba se desarrolló en modo de alta temperatura o HTO.

La figura 66 presenta perfiles de temperatura para cuatro tasas de inyección de aire específicas (80, 160, 270, y 400 pies<sup>3</sup>/d) desde el inicio de funcionamiento de los calentadores (12.5 horas) periodo en cual aún se encuentra activa la inyección

de nitrógeno al 100%, pasando por el inicio de la inyección de aire (16.5 horas) hasta finalizar la prueba (27 horas).

Es posible visualizar el efecto que tiene la tasa de inyección de aire sobre el periodo de calentamiento, donde claramente se aprecia que el aumento de la tasa durante el periodo de inyección de nitrógeno genero efectos negativos sobre el funcionamiento de los calentadores, puesto que se obtuvieron temperaturas menores. Entre menor fue esta temperatura más bajo fue el pico de ignición reportado por esta primera termocupla, o simplemente no se generó.

**Figura 66.** Perfiles de temperatura para diferentes tasas de inyección de aire (80, 160, 270, 400)



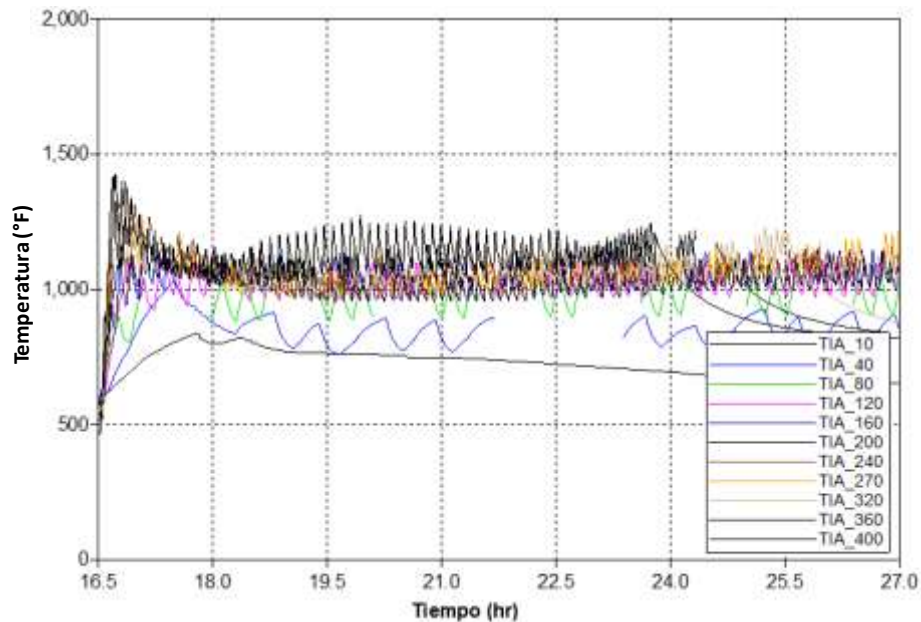
Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Se debe aclarar que a pesar de que altas tasas condujeron a un efecto negativo en los calentadores y por ende en la ignición artificial temprana del crudo, la posterior termocupla (curva azul para tasas 160, 270, 400 Pcs/d) muestra un pico alto de temperatura al que se puede considerar como la ignición. Por lo tanto no se dio precisamente la ignición en la parte inicial del tubo sino a una distancia de 0.5 pies.

### 4.2.1 Picos de Temperatura.

**Análisis Cualitativo.** En la figura 67 se puede observar la influencia que tiene la tasa de inyección de aire sobre los picos de temperatura, con un mismo periodo de duración de la prueba (27 horas).

**Figura 67.** Picos de temperatura máxima a diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d). Duración de las pruebas 27 horas



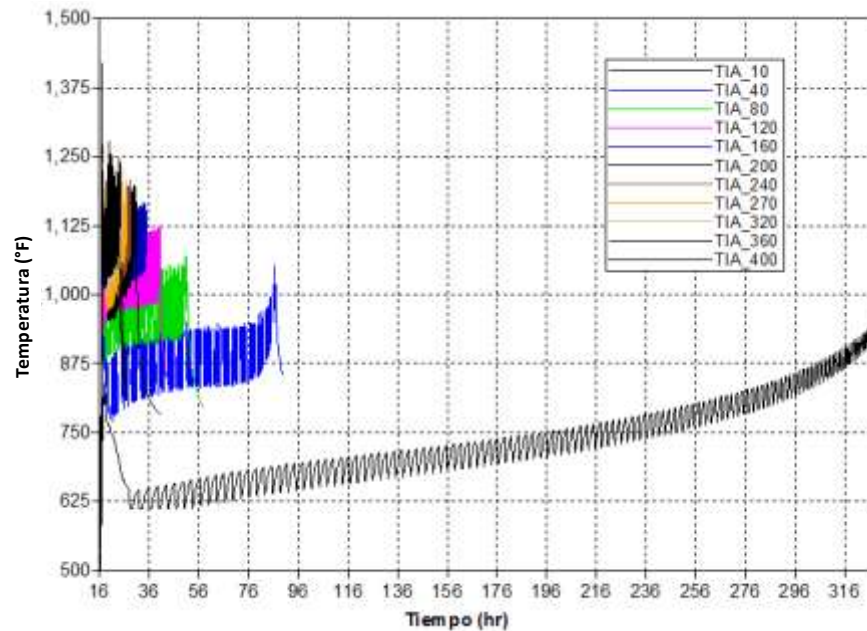
Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Se puede observar (ver figura 67) que entre menor sea la tasa de inyección de aire menores van a ser las temperaturas alcanzadas en el modelo de simulación. Este efecto es más marcado para las tasas más bajas y altas en comparación con tasas intermedias. Tasas entre 120 y 270pies<sup>3</sup>/d presentan un comportamiento casi superpuesto y difícil de distinguir a simple vista.

Es posible observar de la figura 67 que altas TIA (320, 360, 400 Pcs/d) finalizan rápidamente la prueba y los picos de temperatura caen. Por otro lado bajas TIA no permitieron la finalización de la prueba (llegada del frente de combustión al final de tubo) durante estas 27 horas. Al evaluar el comportamiento de la TIA teniendo en cuenta que cada prueba se desarrolla completamente, se tienen tiempos de

finalización diferentes (ver figura 65), y es posible hacer más inferencias a cerca esta relación de variables.

**Figura 68.** Picos de temperatura máxima a diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d). Duración de las pruebas variable



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

A partir de la figura 68 se pueden discutir diferentes fenómenos asociados con la TIA y los picos de temperatura. Existe una gran diferencia entre la TIA de 10 Pcs/d (Curva roja) y las demás tasas, inclusive con la inmediatamente siguiente a 40 Pcs/d. Al comienzo de la inyección de aire (16.5 horas) para la TIA de 10, se presenta un primer pico sin embargo este decae rápidamente. Posteriormente cerca a la hora 28 se empieza a presentar un comportamiento oscilatorio desde una temperatura de 625°F hasta aproximadamente alcanzar los 1000°F en la hora 328. Las demás tasas, de acuerdo a la figura 67 no presentan este aumento en la temperatura hacia el final de la prueba, en estas los picos también son oscilatorios pero no tienden a incrementarse.

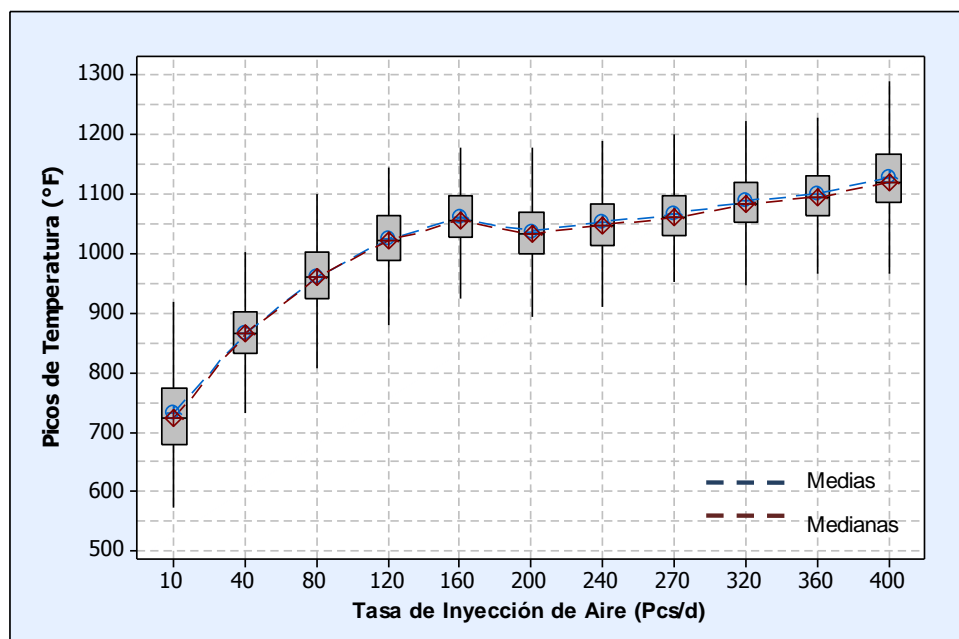
Otro efecto que se puede observar es que la oscilación de los picos es menor entre menor sea la TIA, pero con el fin de comprender mejor la causa de estos

efectos, es necesario estudiar el comportamiento del consumo y generación de coque, el cual se discutirá más adelante del presente capítulo.

Dadas las temperaturas máximas obtenidas en las diferentes pruebas, se puede concluir que el comportamiento de quema se dio en modo de alta temperatura inclusive para las tasas más bajas las cuales registraron temperaturas por encima de los 600°F, sin embargo esto se corroborara con el análisis de los gases de combustión.

**Análisis Cuantitativo.** Una vez exportados los datos a Excel para las diferentes tasas con tiempos de finalización de la prueba variables (data desde inicio de la inyección de aire hasta que el frente llega al final del tubo), es posible llevar a cabo un análisis profundo gracias a la determinación de parámetros estadísticos de medida central y de dispersión. A continuación se presentan los principales parámetros estadísticos en función de los picos de temperatura y las TIA.

**Figura 69.** Diagrama de Cajas para los picos de temperatura máxima a diferentes tasas de inyección de aire.



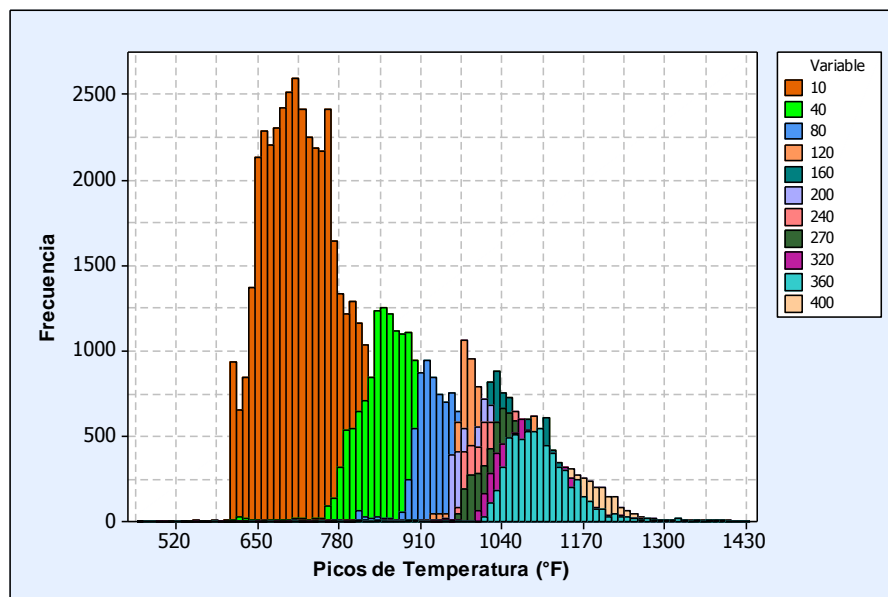
Fuente: Minitab15. Software Estadístico

En la figura 69 se presenta el diagrama de cajas correspondiente a los picos de temperatura en función de las diferentes TIA. La curva azul del diagrama representa la unión de las medias aritméticas y la curva roja la unión de medianas de los datos de temperaturas máximas para cada una de las tasas. A partir de este diagrama se pueden realizar las siguientes observaciones.

Dado que la extensión de la caja y los bigotes representan una medida de dispersión se puede decir que para todas las diferentes TIA los datos están dispersos, por lo tanto se presentan variaciones de los picos de temperatura. Esto era de esperarse dado las tendencias oscilatorias de dicha variable según la figura 68.

La línea central de las cajas que representan la mediana se encuentran aproximadamente en el centro de cada caja, además esta coincide con la media aritmética, indicando que las distribuciones son simétricas. Existen igual cantidad de datos por encima y por debajo de la mediana, además la mayoría de los picos de temperatura para cada tasa están alrededor de la mediana.

**Figura 70.** Histograma para los picos de temperatura máxima a diferentes tasas de inyección de aire.



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

A partir del histograma de la figura 70 para las diferentes TIA en función de los picos de temperatura se puede comprobar que las distribuciones para cada una de las TIA presentan un comportamiento simétrico a simple vista, además se puede apreciar que el histograma para la TIA de 10 Pcs/d presenta los valores más altos de frecuencia. Esto es debido a que esta prueba fue la de mayor duración por lo tanto presenta la mayor cantidad de picos de temperaturas a diferentes tiempos, sin embargo su distribución es hacia los valores más bajos de temperatura comparado con el resto de histogramas.

También se puede observar que los histogramas se encuentran superpuestos para las TIA entre las tasas de 160 y 400 Pcs/d; este comportamiento también es visible en los diagramas de caja, puesto que la tendencia en la línea de las medias o medianas está dividida en dos partes, de 10 a 160 Pcs/d y de 200 a 400 Pcs/d. El primer grupo presenta las temperaturas más bajas y presenta un comportamiento ascendente más pronunciado a diferencia del segundo grupo, el cual presenta las temperaturas más altas pero el aumento de temperatura entre una tasa y otra es menor comparado con el primer grupo.

Gracias a la determinación de parámetros estadísticos tales como la desviación estándar y la varianza (ver tabla 27) se puede concluir lo siguiente: La corrida que presentó mayor varianza y por lo tanto desviación estándar fue la de TIA 10 Pcs/d, sugiriendo que esta corrida es la que presenta mayor variación de picos de temperatura con respecto a la media.

**Tabla 27.** Parámetros estadísticos para los picos de temperatura máxima a diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d).

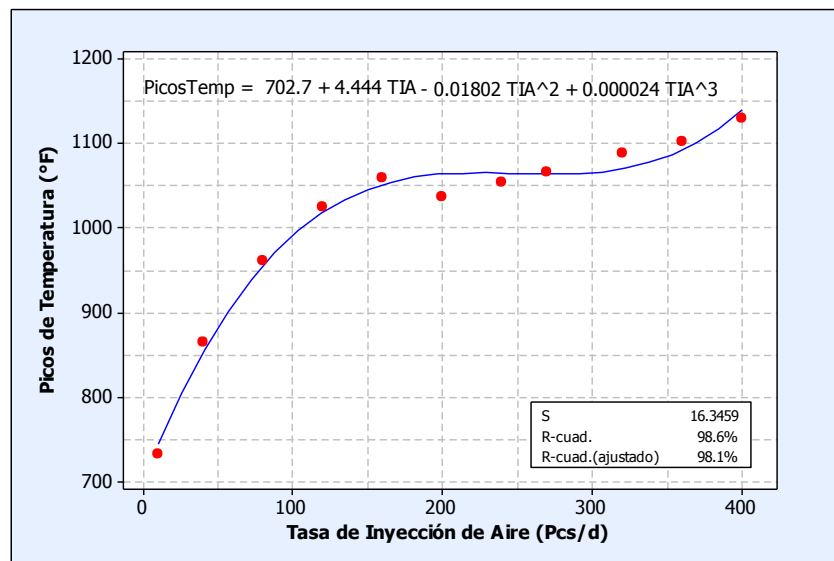
PARAMETRO	TIA_10	TIA_40	TIA_80	TIA_120	TIA_160	TIA_200	TIA_240	TIA_270	TIA_320	TIA_360	TIA_400
Media	732.23	865.60	961.04	1024.25	1059.68	1037.12	1053.67	1065.29	1088.56	1101.05	1128.50
Mediana	722.84	864.95	960.28	1021.41	1056.00	1031.98	1047.78	1059.78	1083.47	1094.19	1120.76
Moda	612.69	856.89	963.40	1072.18	1116.61	1009.36	1063.41	1057.99	1043.07	1107.65	1146.53
Desviación estándar	71.12	53.60	51.51	55.26	51.51	57.48	64.22	58.99	57.15	63.64	69.65
Varianza de la muestra	5058.59	2873.13	2652.81	3053.28	2653.05	3304.02	4124.60	3479.81	3266.69	4050.47	4850.78

Fuente: El autor

**Análisis de Regresión.** Cuando los datos se distribuyen de forma simétrica, se usan para describir dicha variable su media y desviación típica. En el caso de distribuciones asimétricas, la mediana y la amplitud son medidas más adecuadas<sup>73</sup>. Por lo tanto se emplearan las medias para las correspondientes tasas con el fin de generar una expresión matemática que describa esta relación.

En la figura 71 se presenta la gráfica de la línea ajustada, para las diferentes medias de los picos de temperatura en función de las tasas de inyección de aire, donde se puede apreciar que el ajuste se logró a partir de un modelo de regresión cubico, representado por la ecuación que se encuentra en la parte superior de la figura. Con esta expresión matemática es posible predecir a diferentes tasas los picos de temperatura de acuerdo al comportamiento observado entre estas dos variables mediante simulación numérica para la muestra representativa A-1 en un rango entre 10 a 400 Pcs/d.

**Figura 71.** Regresión picos de temperatura máxima a diferentes tasas de inyección de aire.



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

Para concluir este análisis, de la gráfica 71 se puede apreciar que el aumento en las tasas de inyección de aire causara un aumento en los picos de temperatura sin

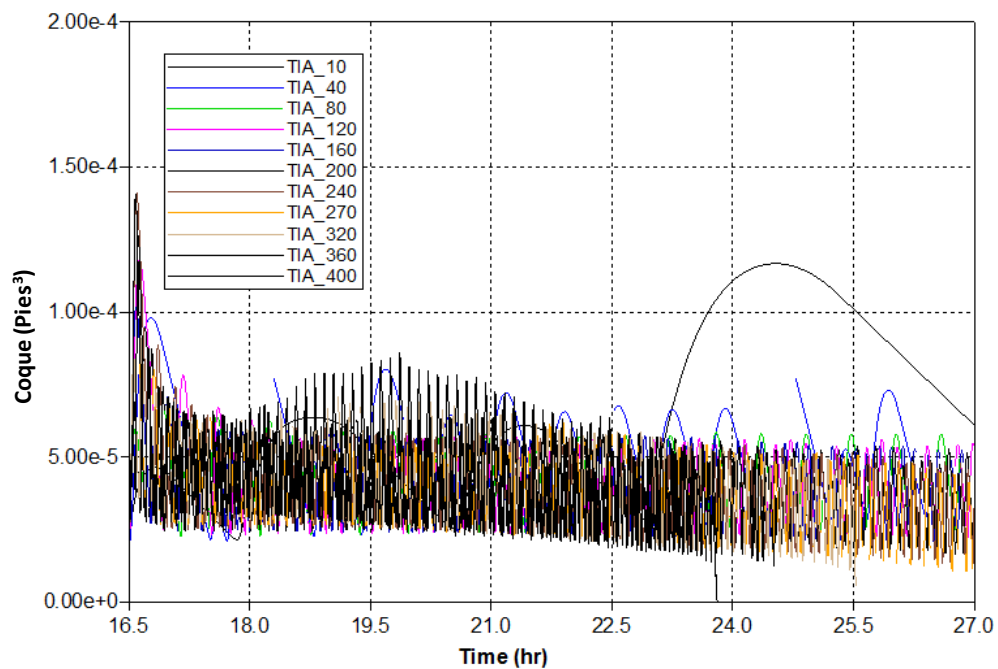
<sup>73</sup> ROUTIO, P. Op.Cit. "Arteología, la ciencia de productos y profesiones, Análisis Cuantitativo", 2007.

embargo este aumento es más pronunciado en bajas que en altas TIA, existiendo una excepción dada por un punto de inflexión (TIA=200 Pcs/d) entre las tasas altas y bajas. Para entender mejor la razón de este comportamiento se requiere llevar a cabo el análisis de la depositación y consumo de coque además del análisis de los gases.

#### 4.2.2 Depositación y consumo de coque

**Análisis cualitativo.** En la figura 72 se presenta la cantidad de coque depositado y consumido en el modelo de simulación para las diferentes tasas a un mismo tiempo de duración de la prueba (27 horas). El comportamiento oscilatorio de las curvas se da gracias a que, en la medida que fluye el aire por cada celda se va generando coque pero inmediatamente este se consume gracias al avance del frente de combustión.

**Figura 72.** Depositación de coque a diferentes tasas de inyección de aire. Duración de las pruebas 27 horas



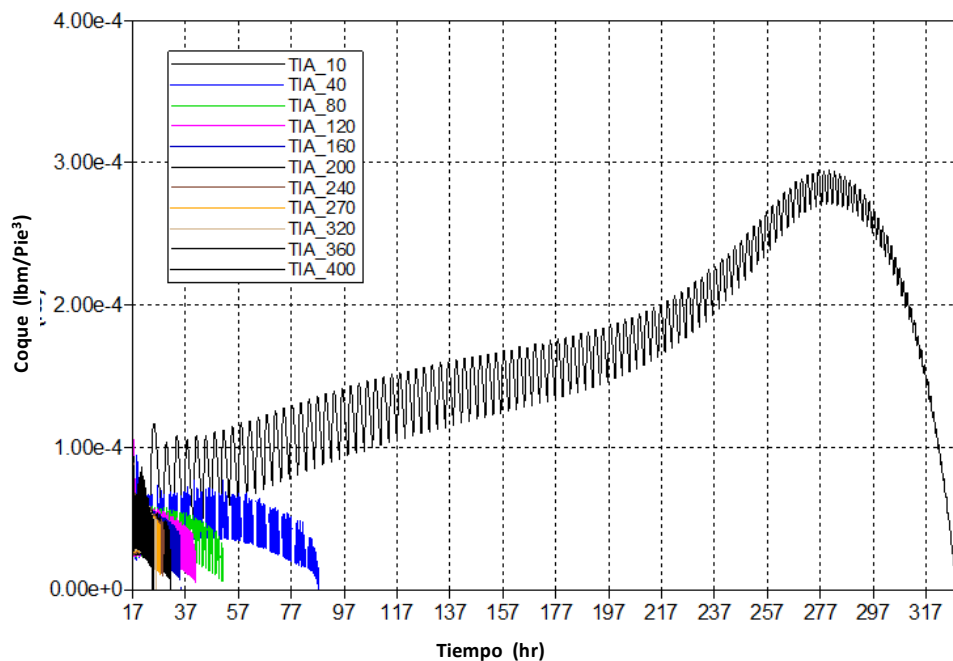
Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

La curva amarilla corresponde a la tasa de inyección de 400 pies<sup>3</sup>/d la cual alcanzó los mayores picos de temperatura y a su vez presento los mayores picos

en la gráfica de generación de coque (ver figura 72) con excepción de las dos tasas más bajas. Estas tasas bajas presentaron picos más altos de generación de coque pero con menores oscilaciones indicando que se produjo alta cantidad de coque pero la cantidad de aire suministrada no fue la necesaria para quemar rápidamente este coque generado. Este comportamiento en las curvas también sugiere que para las demás tasas de inyección ( $> 80$  pies<sup>3</sup>/d), se generaba coque pero así mismo, este se consumía rápidamente en la medida en que el aire entra en contacto con el crudo y coque.

De la figura 72 también es posible afirmar que no necesariamente se debe generar grandes cantidades de coque para obtener las mayores temperaturas (curva roja y azul) ya que también es necesario que se pueda consumir en su totalidad, rápida y continuamente para un auto sostenimiento del frente de combustión a altas temperaturas.

**Figura 73.** Depositación de coque a diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d). Duración de las pruebas variable

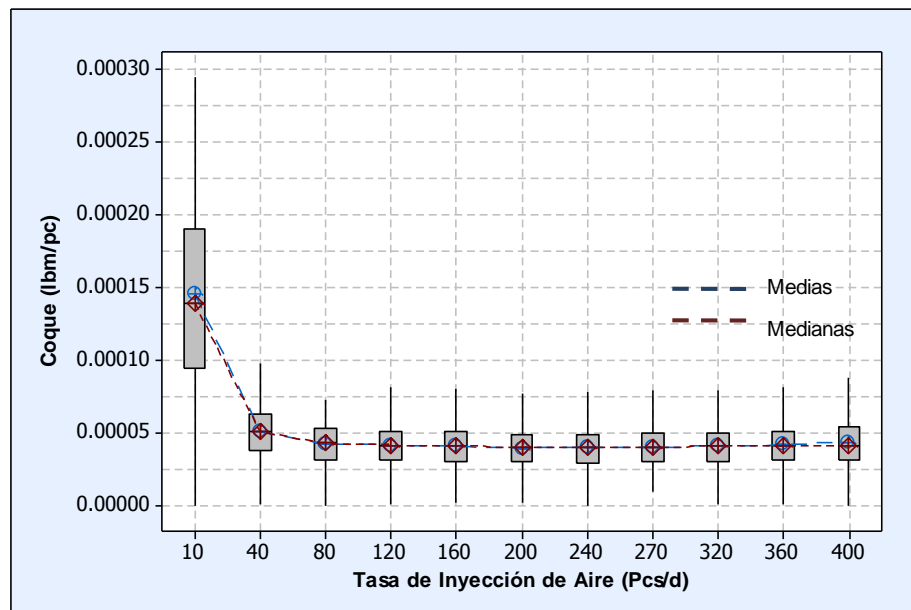


Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

En la figura 73 se puede observar el coque depositado en función del tiempo para las diferentes TIA. En esta grafica se tienen en cuenta que las pruebas se desarrollaron completamente, por lo tanto el tiempo de duración es variable. De esta grafica se puede observar que la TIA de 10 Pcs/d, genero las más altas concentraciones de coque, sin embargo a medida que trascurrió la prueba, la amplitud de los picos disminuyó considerable mente, lo cual sugiere que se generó coque pero no hubo suficiente oxígeno para consumirlo adecuadamente.

**Análisis Cuantitativo.** En la figura 74 se presenta el diagrama de cajas correspondiente a la depositación de coque para diferentes tasas de inyección de aire. Sobre este se pueden realizar las siguientes observaciones:

**Figura 74.** Diagrama de cajas para la depositación de coque a diferentes tasas de inyección de aire.



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

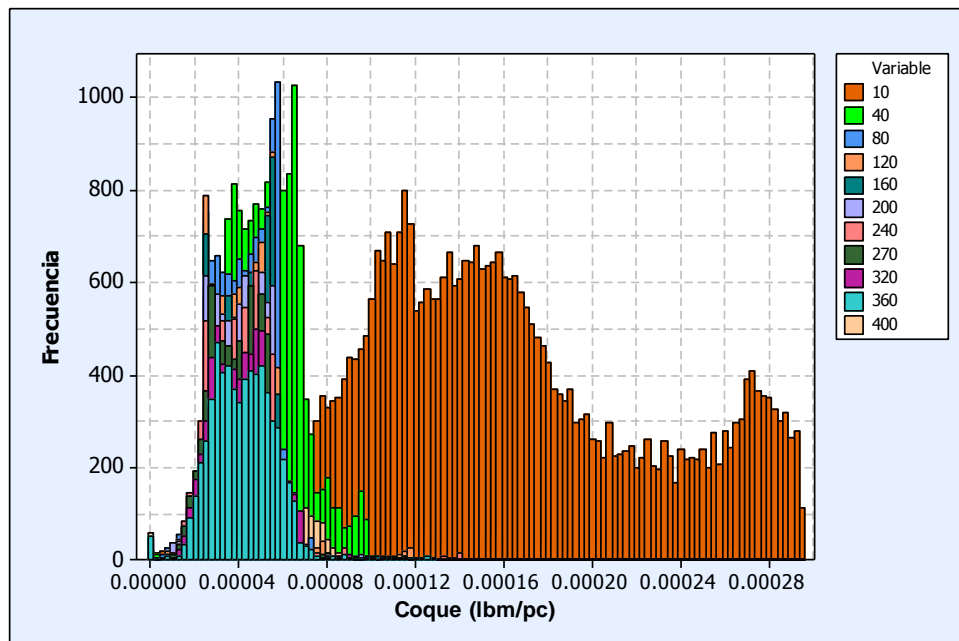
Dado que la extensión de la caja y los bigotes representan una medida de dispersión se puede decir que para todas las diferentes TIA los datos están dispersos al igual que para los picos de temperatura, por lo tanto se presentan variaciones en la cantidad de coque registradas a lo largo de la prueba. Esto

explica el comportamiento oscilatorio marcado precisamente por la depositación del coque en determinada celda y su posterior consumo. La tasa que presento una mayor dispersión fue la de 10 Pcs/d.

La línea central de las cajas que representan la mediana, se encuentra aproximadamente en el centro de cada caja, además esta coincide con la media aritmética, lo cual indica que las distribuciones son simétricas. Existen igual cantidad de datos por encima y por debajo de la mediana, además la mayoría de los picos de temperatura para cada tasa están alrededor de la mediana. Cabe aclarar que para la tasa más baja y la más alta, la simetría no se cumple del todo.

Para verificar la dispersión de los datos se presenta el histograma en la figura 75. Igualmente se puede observar que la tasa más baja presento en promedio la cantidad de coque más alta. Dado el comportamiento de los picos de temperatura (ver figura 69), todo indica que si bien pudo generarse alta cantidad de coque la tasa de TIA no fue adecuada para consumir eficientemente el combustible depositado.

**Figura 75.** Histograma para la depositación de coque a diferentes tasas de inyección de aire.



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

De los histogramas presentados en la figura 75 se puede apreciar la alta dispersión de las tasas más bajas, sobre todo por la TIA de 10 Pcs/d. Se puede observar que no existe un comportamiento simétrico a pesar de que su media y mediana sean muy cercanas.

Los datos para TIA entre 120 y 400 Pcs/d se encuentran sobrepuestos indicando que se obtuvieron valores de depositación de coque muy parecidos tal como se puede apreciar también en la gráfica 75.

**Tabla 28.** Parámetros estadísticos para la depositación de coque diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d).

PARAMETRO	TIA 10	TIA 40	TIA 80	TIA 120	TIA 160	TIA 200	TIA240	TIA 270	TIA 320	TIA 360	TIA 400
Media	0.000146	0.000051	0.000042	0.000042	0.000041	0.000039	0.000040	0.000040	0.000041	0.000042	0.000044
Mediana	0.000140	0.000051	0.000043	0.000042	0.000041	0.000040	0.000040	0.000040	0.000041	0.000042	0.000041
Moda	0.000061	0.000066	0.000033	0.000025	0.000049	0.000051	0.000028	0.000045	0.000043	0.000055	0.000044
Desviación estándar	0.000071	0.000017	0.000013	0.000014	0.000013	0.000012	0.000015	0.000013	0.000013	0.000015	0.000017
Varianza de la muestra	5.06E-09	2.86E-10	1.573E-10	2.04E-10	1.57E-10	1.5E-10	2.2E-10	1.75E-10	1.822E-10	2.17E-10	2.92E-10

Fuente: El autor

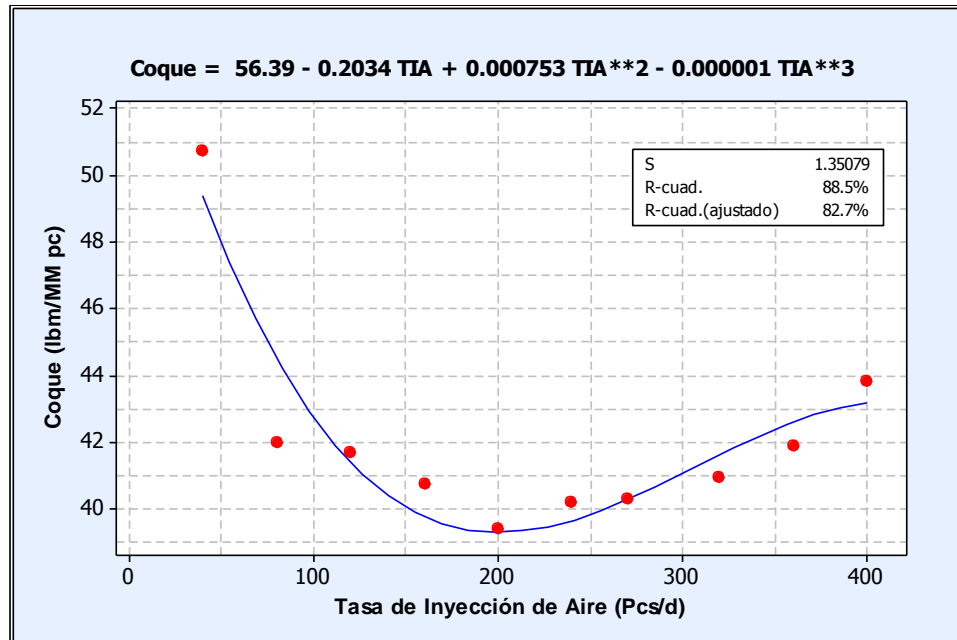
De acuerdo a la tabla 28 en la cual se presentan los parámetros estadísticos básicos, la mayor desviación estándar fue precisamente presentada por la TIA más baja, dada su facilidad de formar altas cantidades de coque pero a la vez por la incapacidad de consumirlo eficientemente y en menor tiempo.

**Análisis de Regresión.** Como bien se indicó anteriormente gracias a que la media y la mediana para cada una de las diferentes TIA son casi iguales, se tomaron las medias para establecer la relación matemática entre el coque promedio depositado y la TIA, tal como se presenta en la figura 79.

Se debe aclarar que debido a que el software estadístico (Minitab15) no permite valores del orden de  $10^{-5}$  para llevar a cabo la regresión, fue necesario multiplicar los valores correspondientes a las medias de coque por 1000000 (1 MM), por lo tanto la expresión matemática presentada en la figura 78 puede ser empleada para determinar la cantidad de coque en libras por cada millón de pie cúbico de

roca; se tendría simplemente que dividir entre 1 MM para obtener las libras por cada pie cubico de roca.

**Figura 76.** Regresión picos de temperatura máxima a diferentes tasas de inyección de aire.



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

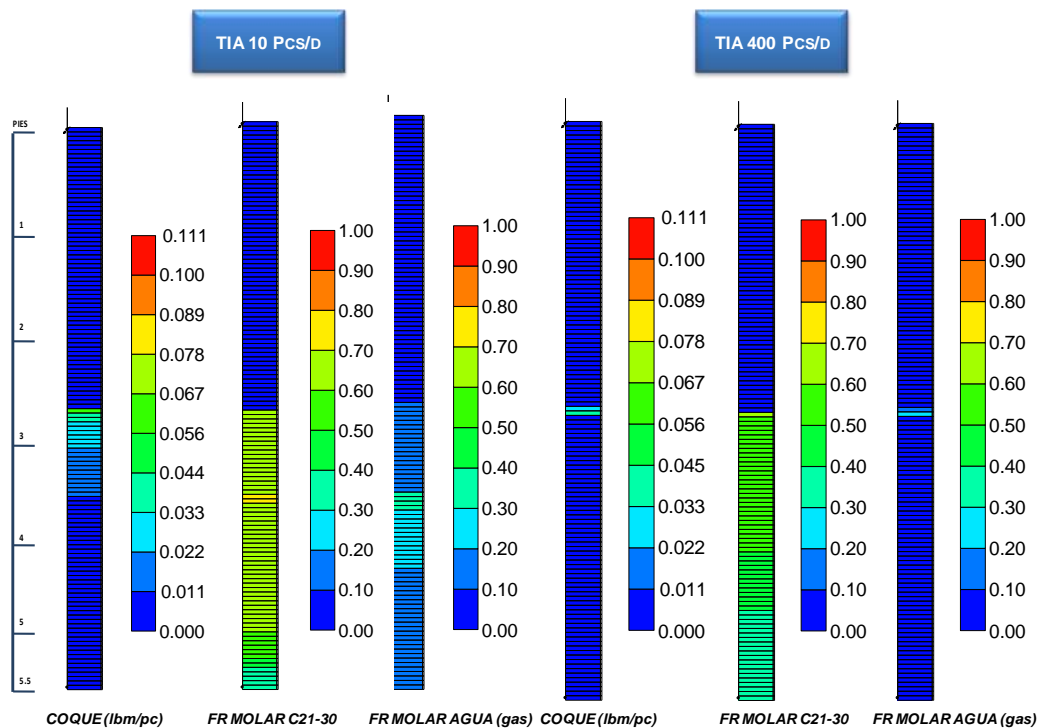
Gracias a que tomando la TIA de 10 Pcs/d la regresión presentaba coeficientes R menores de 80%, indicando que no era posible obtener una buena correlación ni lineal, cuadrática, ni tampoco cubica, se eliminó este valor y se generó un regresión cubica para determinar la expresión matemática. Esta presenta un coeficiente de regresión de 88% y puede ser empleada entre valores de 40 a 400 Pcs/d.

Al suprimir la menor TIA se pudo observar detalladamente las variaciones de coque con respecto a la TIA y fue posible obtener una correlación mediante una regresión de tipo cubica con un R de 88.5%, en donde el menor valor de depositación de coque promedio correspondió a la TIA de 200 Pcs, mismo valor denominado como punto de inflexión en el análisis de TIA con respecto a los picos de temperatura.

De acuerdo a lo anterior se puede establecer que bajas TIA proporcionaron las mayores cantidades de coque, sin embargo la mayor parte del oxígeno fue empleado precisamente para generar coque y vapor de agua (tal como se demostrara posteriormente) pero no para consumirlo eficientemente, de allí las bajas temperaturas.

Altas TIA, proporcionaron alta cantidad de coque no tanto como bajas tasas sin embargo dada la alta cantidad de aire fue posible consumir la mayor parte de este ya que las temperaturas fueron altas. TIA intermedias presentaron la menor cantidad de coque depositado sin embargo las temperaturas son mayores en comparación con bajas TIA, gracias a que pudo consumirse el coque de manera más eficiente.

**Figura 77.** Perfiles de coque depositado, fracción molar de  $C_{21-30}$ , y fracción molar de vapor de agua a diferentes tasas de inyección de aire.



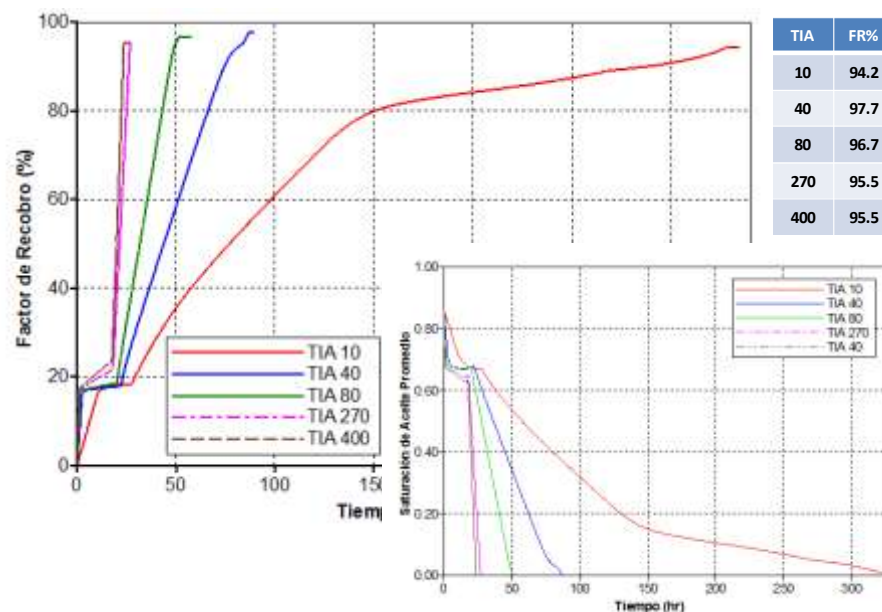
Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Para una mejor comprensión de los efectos de la depositación de coque, con respecto a las diferentes TIA, en la figura 77 se presentan perfiles del coque

depositado, fracción molar del componente más pesado (encargado de la depositación de coque) y la fracción molar del vapor de agua formado por la reacción de combustión para la TIA más baja y más alta.

De la figura 77 es posible observar que el frente de combustión se ubica a los 2.6 pies del inicio del tubo. Una TIA baja (10 Pcs/d) genero una alta cantidad de coque delante del frente, y esto se debe a dos razones: primero al ser una combustión de tipo incompleta, en la que el oxígeno no reacciona eficientemente, se generó un banco de vapor de agua. Esto no ocurrió a altas TIA donde la combustión es más eficiente. Segundo tal como menciona Kumar<sup>74</sup> en una de sus publicaciones, bajas TIA causan menores caídas de presión a lo largo del tubo, por lo tanto se generan zonas de alta saturación de aceite. Tal como se puede apreciar en el perfil de fracción molar de C21-C30, esta es mayor delante del frente a bajas TIA que a altas TIA, por lo cual por celda se tendrá una mayor cantidad de coque depositado en TIA bajas.

**Figura 78.** Factor de recobro y saturación de aceite promedio para diferentes TIA.



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

<sup>74</sup>KUMAR, M. Op.Cit. "Simulation of laboratory In-Situ Combustion Data and Effect of Process Variations"1987.

Estos dos efectos contribuyen con la depositación de coque a bajas TIA. El banco de vapor trasfiere el calor delante del frente logrando de esta manera producir coque, gracias la reacción endotérmica y en altas zona de saturación la cantidad de coque depositado también es mayor a medida que avanza el frente de combustión.

Con la figura 78 es posible corroborar que en altas TIA el efecto de desplazamiento del crudo es mayor por lo tanto este se produce rápidamente y se generan menores saturaciones promedio comparado con bajas TIA. Por otro lado si se observa los factores de recobro últimos se puede apreciar que la TIA genero los menores factores de recobro a pesar de que el frente barrió todo el tubo, lo cual indica que esta produjo las mayores cantidades de coque.

Altas TIA no generaron los mayores factores de recobro gracias a que como se observa en la figura 77 se produjo más cantidad de coque (producto de las altas temperaturas las cuales favorecen el craqueo térmico) comparadas con TIA intermedias las cuales produjeron las menores cantidades de coque y por lo tanto los mayores factores de recobro.

**4.2.3 Velocidad del frente de combustión.** Para determinar la velocidad promedio del frente de combustión, se parte de la posición del frente a dos temperaturas (353 y 848°F), estas son las empleadas en las pruebas físicas según los reportes<sup>75</sup>, por lo tanto se emplearon también en el estudio de la posición y velocidad media del frente para el modelo de simulación. Estos datos posteriormente fueron exportados a Excel, donde se obtienen velocidades medias promedio a partir de la relación:

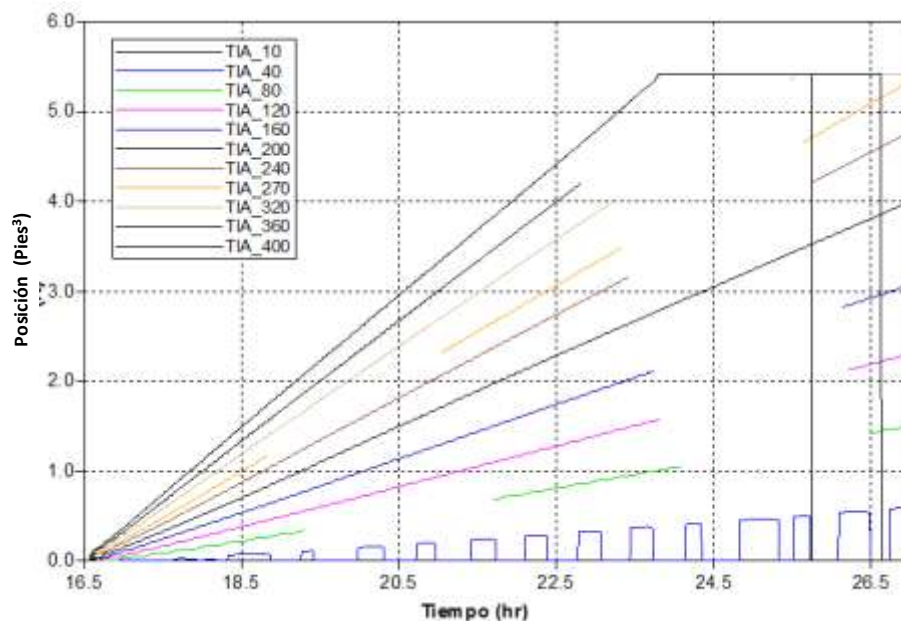
$$Velocidad\ Media\ \left(\frac{Pies}{hr}\right) = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (9)$$

<sup>75</sup> ABU I. MOORE R. METHA, R. URSENBACH, M. "A Preliminary Combustion Tube Test Report". University of Calgary. October 2010

Donde  $x$  es la posición y  $t$  el tiempo. A continuación se presenta el respectivo análisis cualitativo y cuantitativo con respecto a la velocidad. Cabe aclarar que gracias a que el simulador arroja valores de posición vs tiempo los cuales posteriormente son convertidos a velocidad promedio, el análisis cualitativo se llevara a cabo sobre la posición para diferentes tasas y el cualitativo directamente sobre la velocidad.

**Análisis Cualitativo.** La figura 79 presenta la relación directa entre la tasa de inyección de aire y la posición del frente de combustión a diferentes tiempos, pero para un mismo periodo de duración de la prueba de 27 horas, y para una temperatura de 848°F. Entre mayor sea la tasa de inyección de aire más rápido se llegara al final del tubo de combustión. Tasas de inyección por debajo de 270 pies<sup>3</sup>/d (tasa empleada en la prueba experimental) no lograron frentes de combustión que recorrieran toda la longitud del tubo (5.5 pies) en el tiempo empleado para la prueba experimental (27 horas).

**Figura 79.** Posición del frente a 848°F para diferentes tasas de inyección de aire. Duración de las pruebas 27 horas

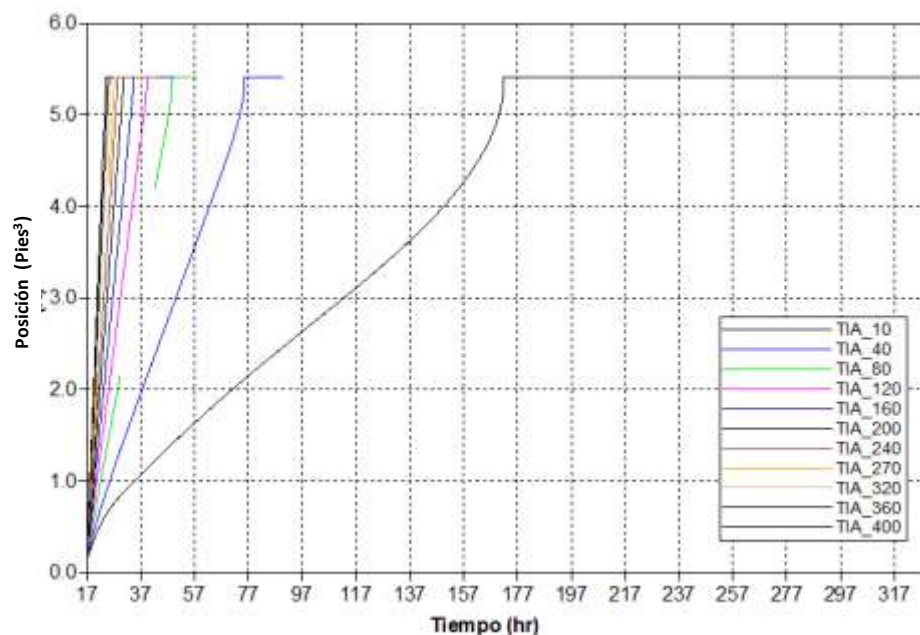


Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

La figura 79 permite tener una idea acerca de la relación entre la velocidad del frente y las TIA, dado que entre mayores son estas, más rápidamente llega el frente al final del tubo. Se puede afirmar entonces, que al aumentar las TIA aumenta la velocidad. Sin embargo tasas bajas (10 y 40 Pcs/d) no pudieron generar frentes estables a esta temperatura.

En la figura 80 se presenta la relación entre la posición y el tiempo para las diferentes tasas a una temperatura de 373°F y teniendo en cuenta tiempos de finalización variables. Se puede apreciar que la TIA más baja (10 Pcs/d) fue precisamente la que tomó mayor tiempo en alcanzar el final del tubo (5.5 pies), y además la tendencia de la gráfica no es del todo lineal. Se presenta cierta curvatura al final. Esta curvatura está relacionada con la depositación y consumo de coque presentada en la figura 73, en esta se aprecia que finalizando la prueba, es menor la cantidad de coque depositado y consumido. Esto se puede reflejar en una mayor pendiente de la curva de posición hacia el final de la prueba, como se presenta en la figura 80.

**Figura 80.** Posición del frente a 343°F para diferentes tasas de inyección de aire. Duración de las pruebas variable

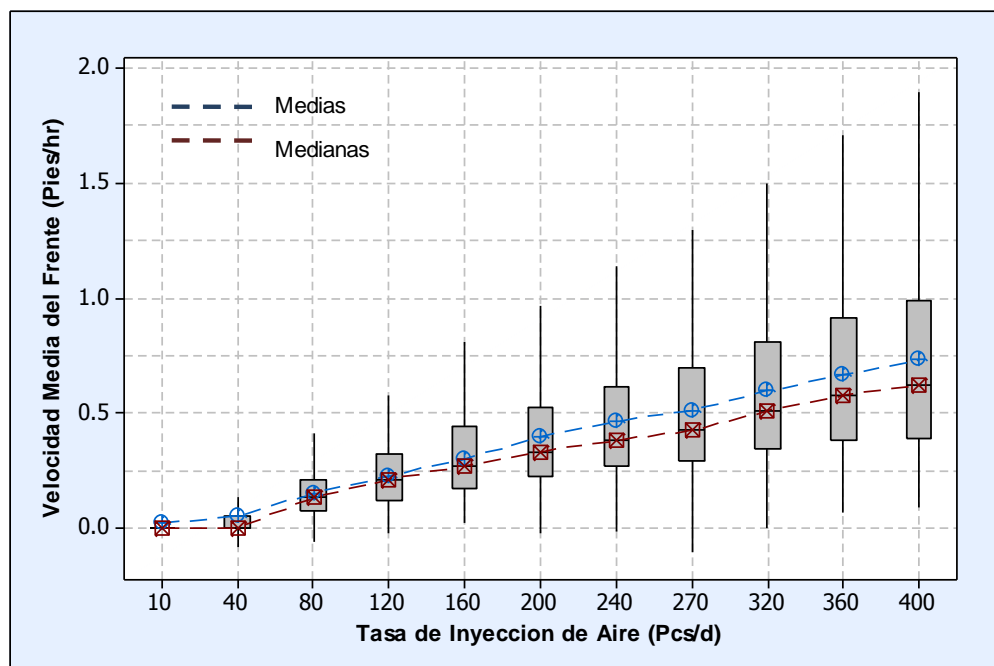


Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

**Análisis Cuantitativo.** La figura 81 presenta el diagrama de cajas para la velocidad media del frente a 848°F en función de las diferentes TIA. Se puede apreciar que las TIA de 10 y 40 Pcs/d simplemente no pudieron generar un frente estable a esta temperatura por lo tanto sus velocidades son muy cercanas a cero.

A partir de la TIA de 80 se generó un comportamiento casi lineal en función de las medias y/o medianas, sin embargo también se puede apreciar que el aumento de las TIA ocasiono que la dispersión en las velocidades fuese mayor, y por lo tanto las medias y medianas no fueron las mismas. Este hecho se puede atribuir a que en la medida que el frente de combustión avanza gracias a la generación y consumo de coque, las velocidades medias no son constantes sino que presentan fluctuaciones. Altas tasas generan altas cantidades de coque y a la vez se consume la mayor parte de este, por lo cual puede ser más rápida la velocidad de consumo pero menor la velocidad de generación. Este hecho se puede soportar con la figura 82.

**Figura 81.** Diagrama de Cajas para la velocidad media del frente para una temperatura de 848°F y a diferentes tasas de inyección de aire.

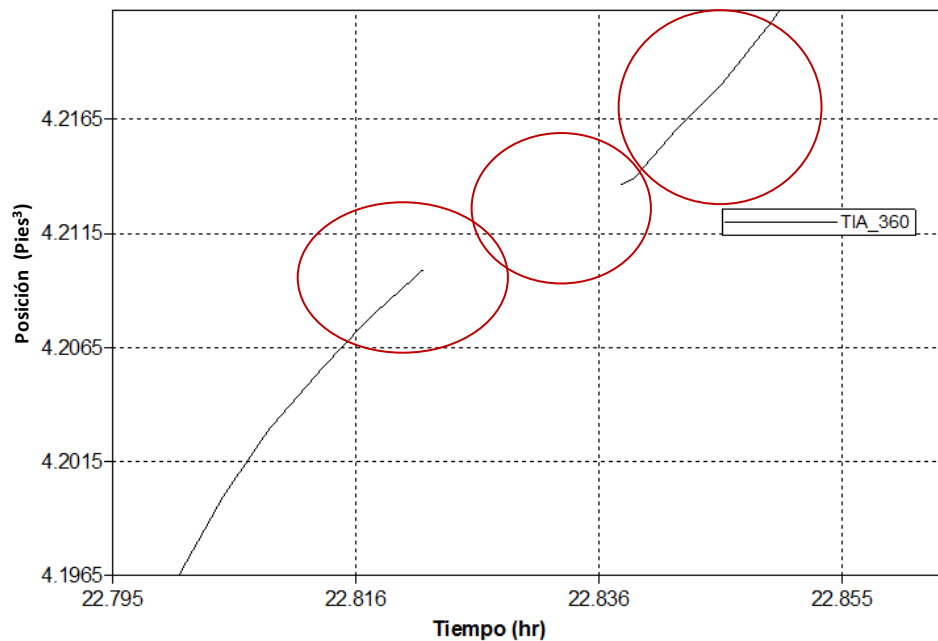


Fuente: Minitab15. Software Estadístico

En la figura 82 se puede apreciar una amplificación de la posición del frente de combustión, cuando este se encuentra a una temperatura de 848°F y en la sección correspondiente entre 4.195 y 4.2165 pies y en un intervalo de tiempo de 22.795 a 22.855 hr.

En estos intervalos de tiempo y espacio se puede apreciar que las velocidades medias están fluctuando (ver círculos rojos) razón por la cual se da la dispersión de esta variable. Según los resultados de la figura 81 esta dispersión es más marcada entre mayor sea la TIA.

**Figura 82.** Posición del frente a 343°F para una TIA de 360. Intervalo de tiempo y posición reducido.



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

De acuerdo al histograma de la figura 83, se puede corroborar que entre mayor es la TIA mayor es la dispersión de los datos, además gracias a la tabla 31 se puede apreciar que la TIA de 400 Pcs/d presenta la mayor varianza por lo tanto la mayor desviación estándar (sin tener en cuenta las TIA de 10 40 las cuales presentan velocidades medias de 0). De igual manera se observa en los histogramas cierta asimetría, donde la mayoría de los datos tienden a la izquierda de la media.

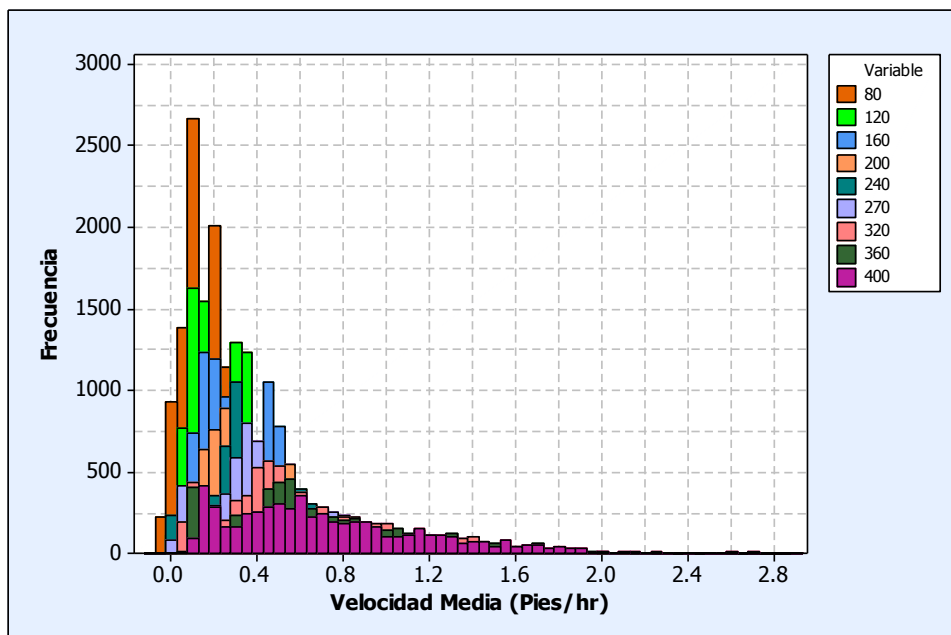
**Tabla 29.** Parámetros estadísticos para la velocidad media del frente a una temperatura de 848°Fy para diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d).

PARAMETRO	TIA 10	TIA 40	TIA 80	TIA 120	TIA 160	TIA 200	TIA 240	TIA 270	TIA 320	TIA 360	TIA 400
Media	0.019	0.051	0.152	0.227	0.303	0.396	0.467	0.511	0.600	0.668	0.732
Mediana	0.000	0.000	0.133	0.211	0.274	0.333	0.382	0.424	0.512	0.579	0.624
Moda	0.000	0.000	0.257	0.065	0.451	0.268	0.000	0.042	0.845	0.783	0.188
Desviación estándar	14.203	37.480	0.114	0.126	0.155	0.256	0.314	0.337	0.391	0.417	0.471
Varianza de la muestra	201.725	1404.725	0.013	0.016	0.024	0.066	0.099	0.114	0.153	0.174	0.222

Fuente: Minitab15. Software Estadístico

Gracias a los diagramas de caja, los histogramas y los parámetros estadísticos básicos (ver tabla 29), fue posible determinar que la distribución de los datos de velocidad fue dispersa y de tipo asimétrica, por lo cual se debe emplear la mediana para describir la relación entre estas variables y para la obtención de la expresión matemática que representa esta relación.

**Figura 83.** Histograma para la velocidad media del frente a un temperatura de 848°F a diferentes tasas de inyección de aire.

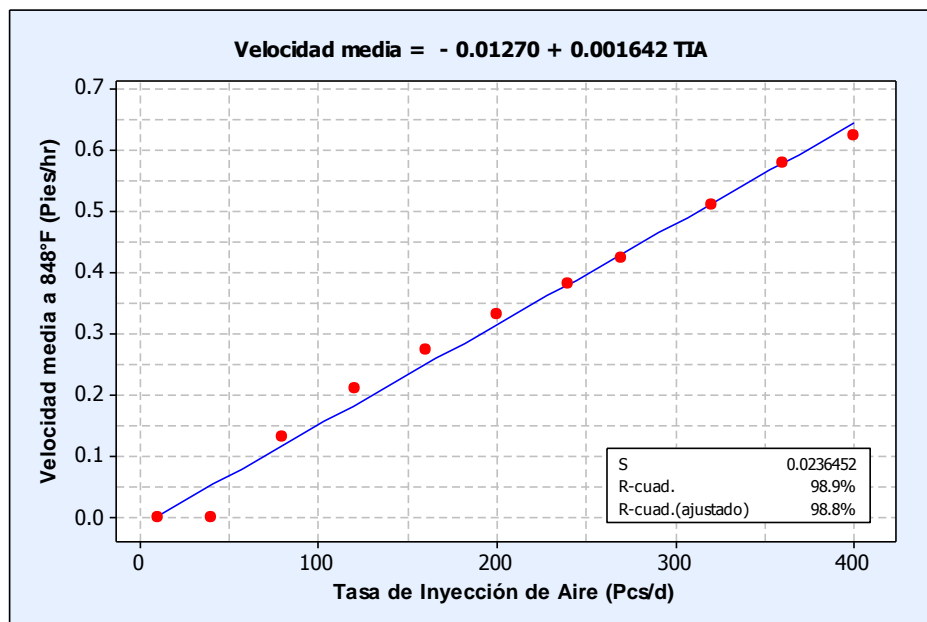


Fuente: Minitab15. Software Estadístico

**Análisis de Regresión.** De la figura 84 se puede concluir que la relación entre la velocidad del frente de combustión y la tasa de inyección de aire es de tipo lineal; TIA bajas no pudieron generar frentes de combustión estables a 848°F.

En esta figura en la parte superior se puede apreciar la correlación o expresión matemática que relaciona la velocidad media con la TIA. A diferencia de las anteriores expresiones es de tipo lineal. Se presentaron parámetros de regresión cercanos a 1 indicando un excelente ajuste, además se obtuvo un error de estimación estándar de 0.0236 pies/hr, lo cual es un valor bajo.

**Figura 84.** Regresión velocidad media del frente de combustión a una temperatura de 848°F para diferentes tasas de inyección de aire.



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

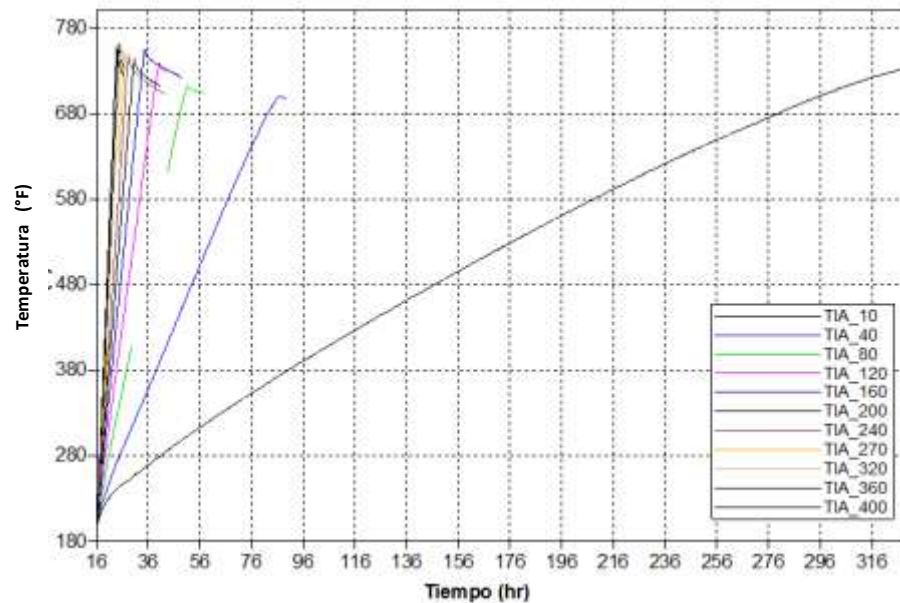
#### 4.2.4 Temperaturas Promedio.

**Análisis Cualitativo.** En la figura 85 se presenta las temperaturas promedio a diferentes TIA, para diferentes tiempos de duración de prueba. Se puede apreciar que a diferencia de las demás TIA, la correspondiente a 10 Pcs/d no presento un comportamiento lineal en cuanto a las temperaturas promedio, pero si presento cierta curvatura hacia al final de la prueba, indicando una mejor distribución de la temperatura a lo largo del tubo de combustión en tiempos finales.

Era de esperarse que entre mayor sea la TIA, mayores serán las temperaturas promedio, gracias a que se presentan los mayores picos de temperatura e

igualmente gracias a que el frente al avanza a mayor velocidad permite una mejor distribución del calor detrás del frente de combustión (ver figura 87). Esto se ve reflejado en mayores temperaturas promedio. Sin embargo la TIA más baja (10 Pcs/d) presenta la mayor temperatura promedio, este es un comportamiento anómalo que se puede explicar mediante el análisis de las figuras 86 y 87.

**Figura 85.** Temperatura promedio para diferentes tasas de inyección de aire. Duración de las pruebas variable

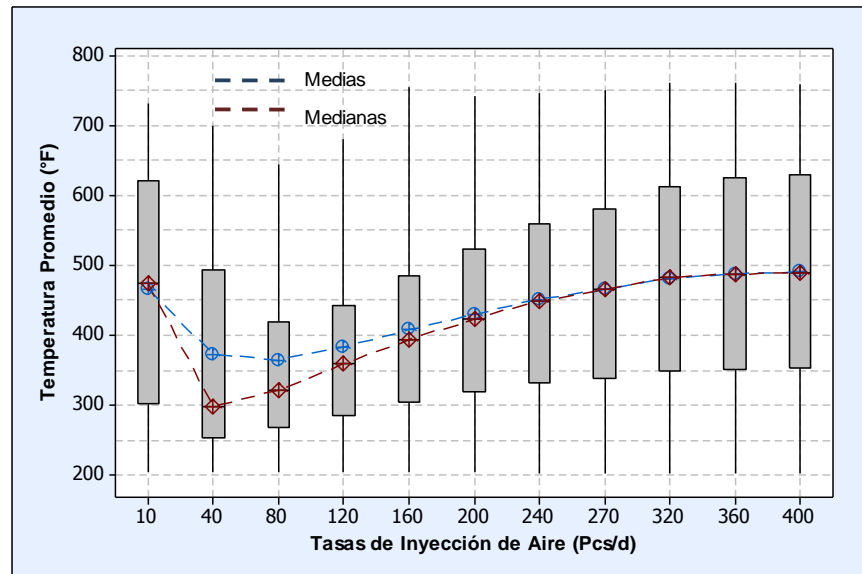


Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

En la figura 86 se presentan el diagrama de cajas para la temperatura promedio. Las medias y medianas presentan diferencias sobre todo en TIA de 40 y 80, indicando asimetría o un tipo de sesgo en los datos, lo cual se corrobora con el análisis del histograma.

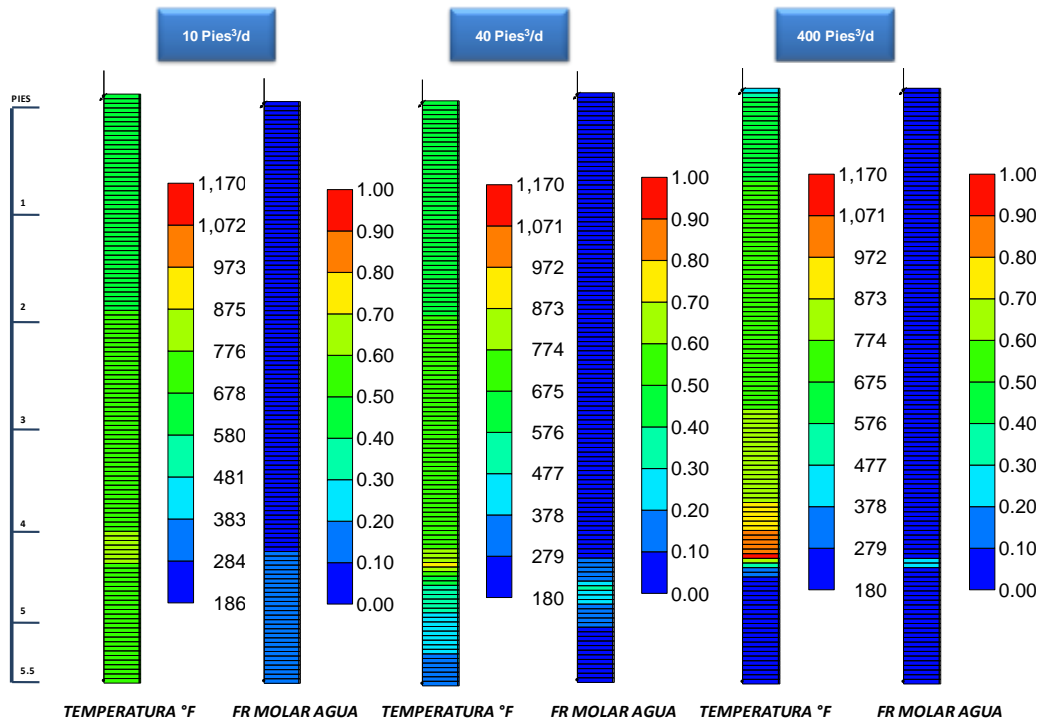
En la figura 87 se presenta un perfil de temperaturas en 2D para TIA de 10, 40 y 400 Pcs/d a un tiempo tal que las máximas temperaturas se presentan en la cercanía de la zona de producción (a 5.5 pies), esto indica a que el frente de combustión está llegando al final del tubo.

**Figura 86.** Diagrama de Cajas para las temperaturas promedio a diferentes tasas de inyección de aire.



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

**Figura 87.** Perfiles de temperatura y fracción molar de agua en 2D a diferentes tasas de inyección de aire.



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Se puede apreciar de la figura 87, que una TIA alta (400 Pcs/d) genero un frente de combustión con las más altas temperaturas, por otro lado inmediatamente delante del frente, las temperaturas son las originales, indicando que la transferencia de calor. A diferencia de la TIA más baja la cual permitió una mejor transferencia de calor delante del frente de combustión pero con los menores picos de temperatura.

Dado que en el presente modelo no se tienen en cuenta las pérdidas de calor axialmente, puesto que no se cuenta con más celdas que permitan representar el fenómeno en dicha dirección, se puede concluir que la temperatura promedio va depender de la eficiencia con que se trasfiera y distribuya el calor delante y detrás del frente y de las máximas temperaturas generadas en el mismo.

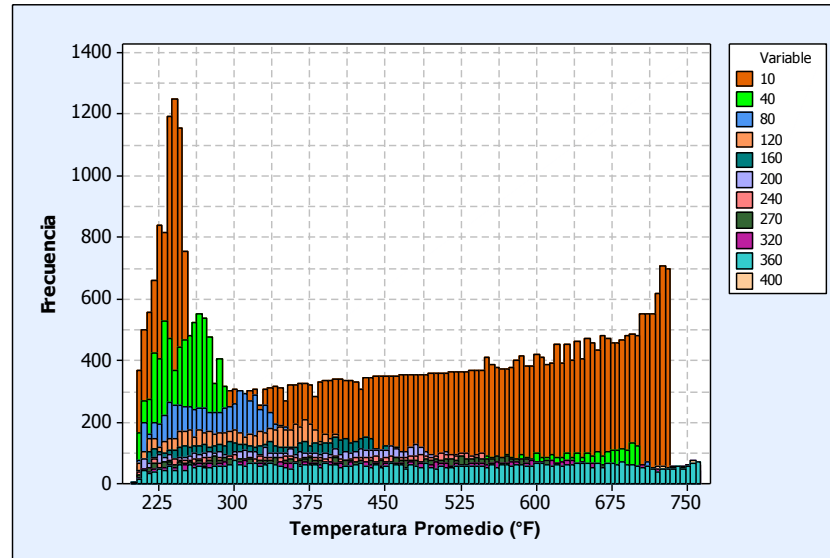
En bajas tasas delante del frente de combustión se presentan cantidades considerables de agua en fase gas, gracias a la combustión incompleta del coque. En altas tasas las cantidades de vapor de agua son muy pequeñas o nulas, esto indica que altos flujos de aire generaron combustiones más eficientes con menos vapor de agua. Gracias a que se disminuyen los tiempos de ruptura, el agua vaporizada avanza más rápidamente, disminuyendo a su vez el flujo de calor que se trasmite delante del frente. Se puede concluir entonces, que en mayores TIA las temperaturas promedio son altas gracias a las temperaturas generadas en el frente y a la mejor distribución de calor detrás de este.

En la figura 88 se evidencia la alta dispersión que presentan los datos para cada TIA. En la medida que aumenta la TIA existe una mayor dispersión gracias a que se incrementan las temperaturas promedio, a excepción de la TIA de 10 Pcs/d, la cual como se explicó anteriormente tiende a presentar valores muy bajos al comienzo de la prueba.

Para la tasa de 10 Pcs/d (ver figura 88), en la medida que fue depositando y consumiendo coque se fue acumulando un banco de vapor de agua el cual se desplazó lentamente gracias a la baja TIA, permitiendo una mejor transferencia de

calor delante del frente. A este mecanismo también se le atribuye la alta depositación de coque en TIA bajas, puesto que a medida que avanza el banco de vapor aumenta la temperatura y genera ciertas cantidades de coque, tal como se presentó en la figura 87.

**Figura 88.** Histograma para las temperaturas promedio a diferentes tasas de inyección de aire.



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

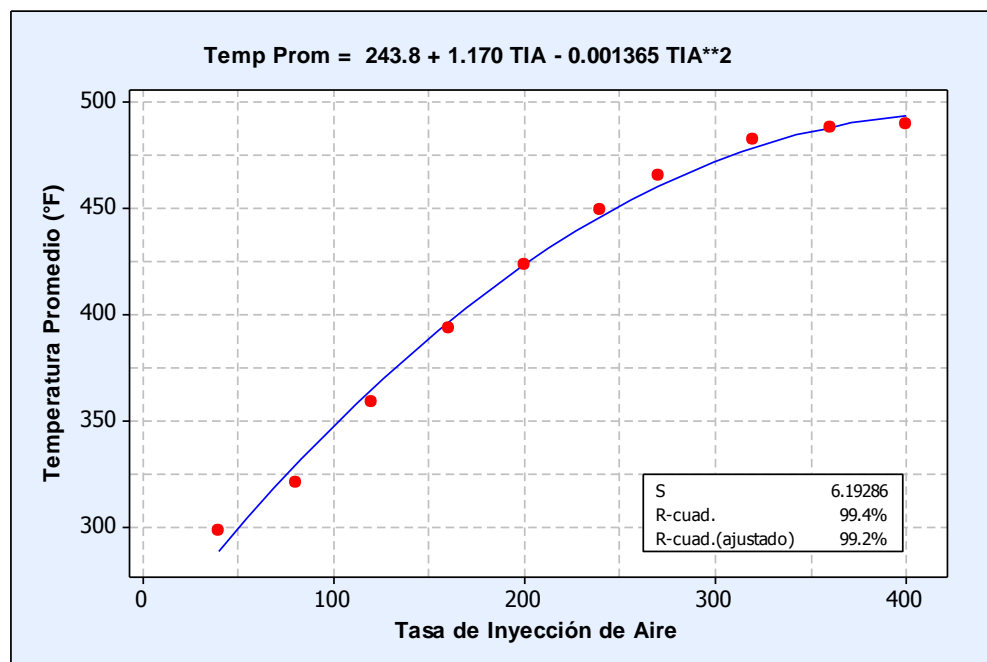
En la tabla 30 se resumen los parámetros estadísticos básicos calculados para las temperaturas promedio en función de las diferentes TIA. Se puede apreciar que las mayores variaciones estándar se dan tanto para la TIA más baja, como para la más alta, indicando la mayor dispersión de los datos, gracias a que estas son las que presentan las mayores temperaturas promedio. La TIA de 10 Pcs/d por la eficiente transferencia de calor delante del frente y la TIA de 400 Pcs/d, por las altas temperaturas del frente producto de la alta depositación y consumo de coque.

**Tabla 30.** Parámetros estadísticos para la temperatura promedio a diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d).

PARAMETRO	TIA 10	TIA 40	TIA 80	TIA 120	TIA 160	TIA 200	TIA 240	TIA 270	TIA 320	TIA 360	TIA 400
Media	466.232	372.908	364.100	383.309	407.631	429.847	451.950	465.111	481.747	487.949	490.545
Mediana	474.056	298.261	320.834	358.367	393.393	423.067	449.323	465.081	482.169	487.792	489.426
Moda	269.207	265.955	280.681	337.349	310.747	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A	#N/A
Desviación estándar	168.998	150.923	132.285	128.770	130.935	134.621	142.330	147.617	155.182	157.701	159.090
Varianza de la muestra	28560.376	22777.823	17499.259	16581.753	17144.051	18122.808	20257.807	21790.772	24081.495	24869.465	25309.490

**Análisis de regresión.** Con el fin de llevar a cabo la regresión y obtener una expresión matemática que capte la relación entre las temperaturas promedio y las TIA, fue necesario eliminar de la regresión la TIA de 10 Pcs/d, ya que este punto no permitía regresión cubica o cuadrática con un coeficiente R superior a 70%. Por esta razón en la figura 91 se presenta la regresión cuadrática aplicada con la respectiva correlación (ubicada en la parte superior de la figura 89) para un intervalo entre 40 a 400 Pcs/d.

**Figura 89.** Regresión temperaturas promedio para diferentes tasas de inyección de aire.



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

### 4.3 GASES DE COMBUSTIÓN

Para la evaluación de los gases de combustión se empleó el mismo procedimiento hasta ahora llevado a cabo para el análisis de los parámetros asociados a los perfiles de temperatura. Se inició con el análisis cualitativo y cuantitativo para el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y posteriormente para el oxígeno (O<sub>2</sub>). La lectura de los gases producidos se llevó a cabo desde el tiempo de ruptura del CO<sub>2</sub> obtenido por

cada TIA hasta el tiempo de finalización de la prueba el cual se presenta cuando la producción de CO<sub>2</sub> disminuye a 0, tal como se muestra en la tabla 31.

**Tabla 31.** Tiempos de duración y ruptura para las pruebas a diferentes TIA

FLUJO (Pcs/pie <sup>2</sup> -hr)	TIA (Pcs/d)	T RUPTURA CO <sub>2</sub> (hr)	DURACION TOTAL (hr)
4.87	10	40.55832672	328.1
19.49	40	20.27945518	86.7
38.97	80	18.26250076	51.3
58.46	120	17.61198425	40.3
77.95	160	17.29583359	34.7
97.43	200	17.11161995	30.7
116.92	240	16.99658966	28.3
131.53	270	16.95411682	27.0
155.89	320	16.87908363	25.5
175.38	360	16.82896996	24.6
194.86	400	16.77742577	23.8

Fuente: El autor

#### 4.3.1 Fracción molar de CO<sub>2</sub> producido

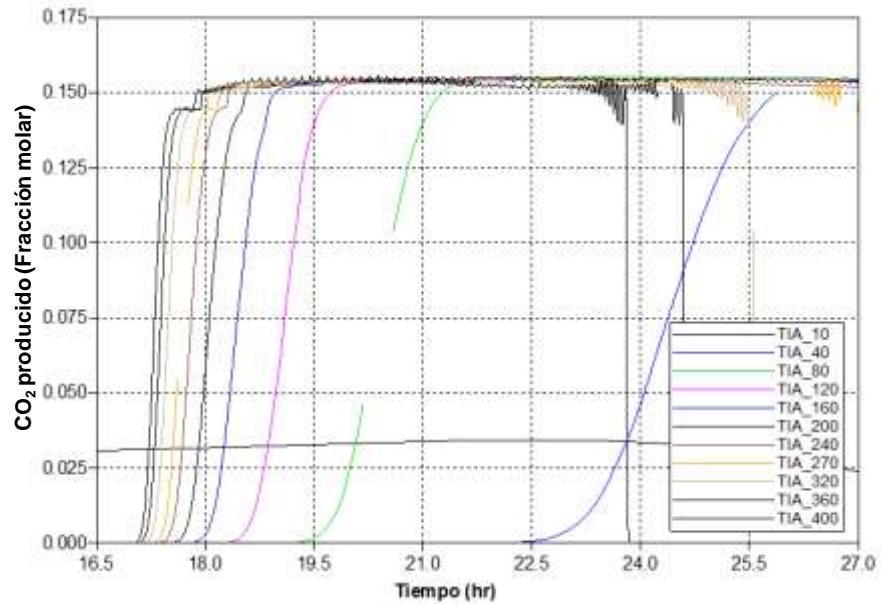
**Análisis Cualitativo.** La figura 91 corresponde a la fracción molar de CO<sub>2</sub> producido a diferentes tasas de inyección de aire pero para un mismo tiempo de duración de la prueba. Se observa que todas las tasas en algún momento de la prueba generaron fracciones molares alrededor de 0.15 a excepción de la tasa más baja (10 pies<sup>3</sup>/d) la cual no superó los 0.025, esto indica que la mayoría de las corridas alcanzó el régimen de alta temperatura.

La gran diferencia entre curvas (ver figura 90) radica en el tiempo de ruptura ya que lógicamente mayores tasas generan rápida formación y consumo de CO<sub>2</sub> y así mismo rápido desplazamiento de este último hacia el sistema de producción.

En la figura 91 se presenta la fracción molar de CO<sub>2</sub> producido a tiempos de duración de las pruebas variable, con el fin de verificar la producción de este gas en TIA más bajas. Se puede apreciar en la figura que inclusive a TIA muy bajas (10 Pcs/d) se generó una cantidad significativa de coque. Esto sugiere que la

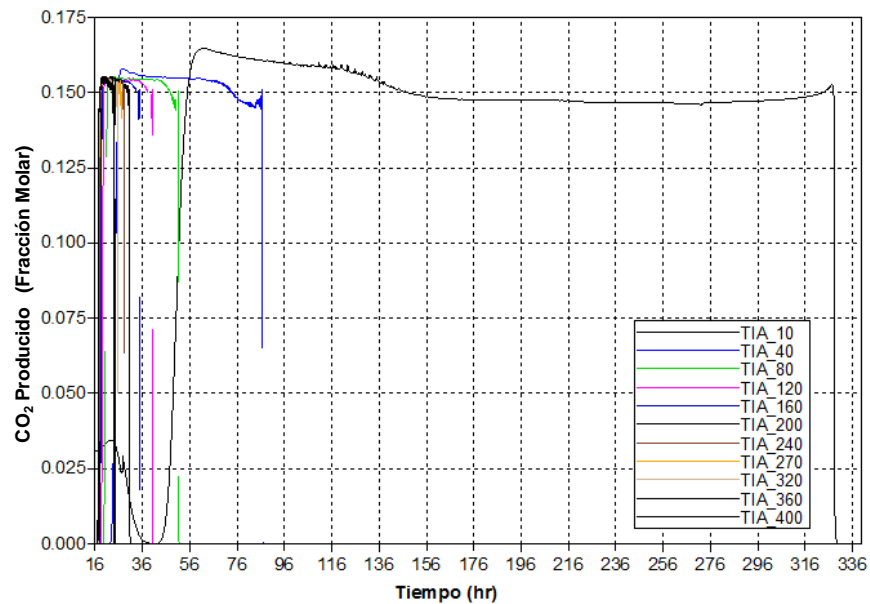
prueba al igual que para las TIA superiores, se llevó a cabo en modo de alta temperatura o HTO.

**Figura 90.** Fracción molar de CO<sub>2</sub> producido para diferentes tasas de inyección de aire. Duración de las pruebas 27 horas



Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

**Figura 91.** Fracción molar de CO<sub>2</sub> producido para diferentes tasas de inyección de aire. Duración de las pruebas variables

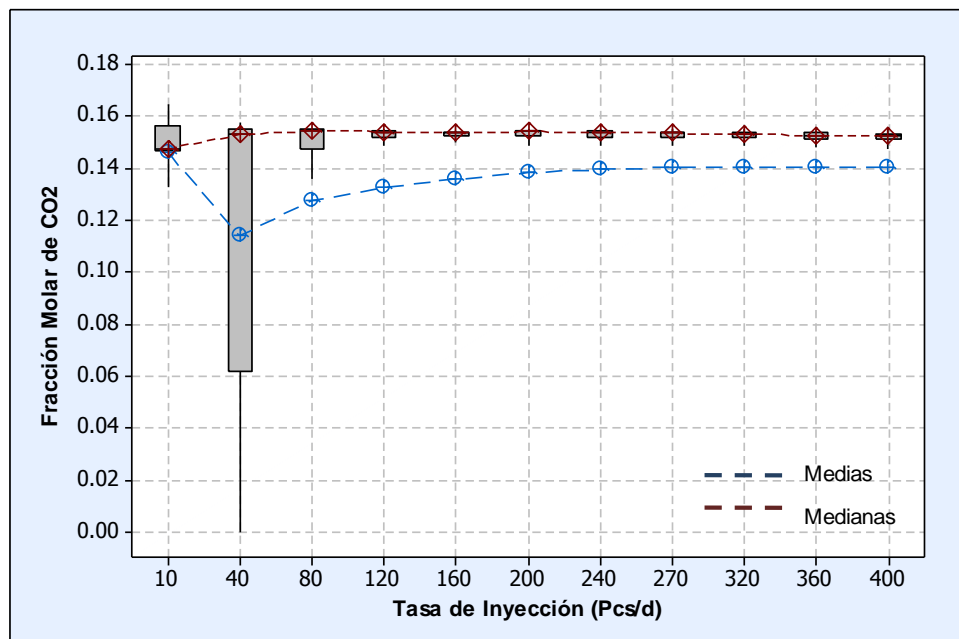


Fuente: Computer Modeling Group, (CMG),

Por otro lado una vez generada la reacción de combustión se obtiene la mayor cantidad de  $\text{CO}_2$  producido (ver figura 91), indicando un alto consumo de coque. Sin embargo en la medida en que transcurre la prueba, la fracción molar de  $\text{CO}_2$  producido decae. Esto se puede atribuir a la acumulación del vapor de agua delante del frente de combustión y a que este banco de vapor se incrementa en la medida que el frente llega al final del tubo tal como se evidencio en la figura 88.

**Análisis Cuantitativo.** En la figura 92 se presenta el diagrama de cajas para la producción de  $\text{CO}_2$ , en función de las TIA. Se puede apreciar que existe una gran diferencia entre las medias y las medianas, indicando una alta asimetría en los datos, tal como se puede comprobar con los histogramas. Además se observa una significativa dispersión en los datos para la TIA de 40 Pcs/ produciendo un punto de inflexión en la tendencia de las medias aritméticas (curva azul).

**Figura 92.** Diagrama de Cajas para la fracción molar de  $\text{CO}_2$  producido diferentes tasas de inyección de aire.



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

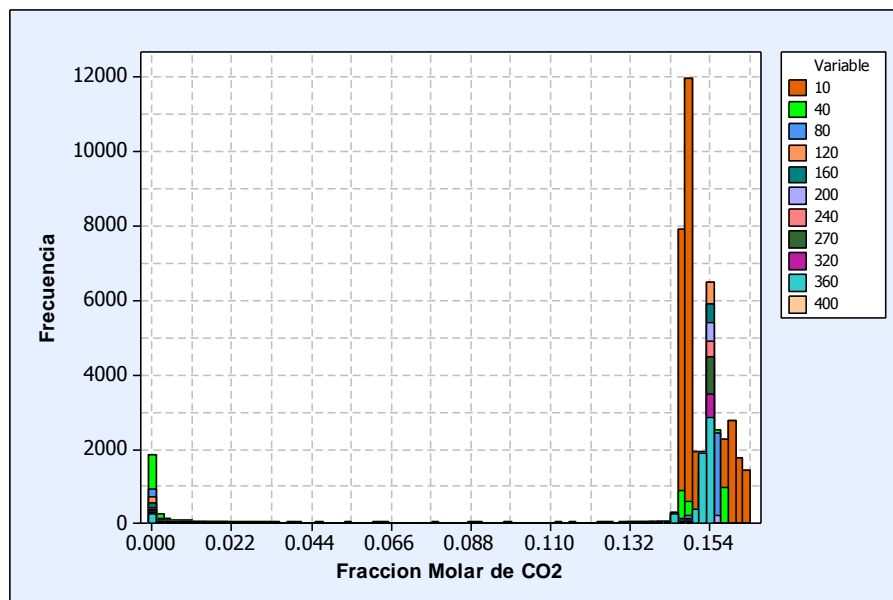
Si se toman en cuenta las medianas como descripción de la producción de  $\text{CO}_2$ , se puede observar que bajas TIA indican bajas concentraciones de  $\text{CO}_2$ , por lo

tanto menor eficiencia de combustión del coque, sin embargo al aumentar la TIA y a partir de los 80 Pcs/d, las producciones de  $\text{CO}_2$  tienden a ser muy similares.

Los histogramas para la producción molar de  $\text{CO}_2$  en función de las TIA se presentan en la figura 93, en la cual claramente se aprecia la alta asimetría de los datos, además de la alta dispersión que presenta la TIA de 40 Pcs/d, indicando que esta tasa tuvo la mayor cantidad de valores con concentraciones alrededor de 0. Esto sugiere que el tiempo entre la ruptura y el tiempo en el cual se obtiene el primer valor cercano a 0.15 fue el mayor comparado con las demás TIA, inclusive con la TIA de 10 Pcs/.

De acuerdo a la forma y ubicación del diagrama de caja y el histograma para TIA de 40 se puede concluir que los datos presentan una distribución de tipo asimétrica negativa sesgada a la izquierda. Los datos tienden a concentrarse hacia la parte superior de la distribución y se extienden más hacia la izquierda. La media suele ser menor que la mediana en estos casos. En el contexto, las concentraciones de  $\text{CO}_2$  se concentran en un valor mayor y las de menor valor están más dispersas.

**Figura 93.** Histograma para las temperaturas promedio a diferentes tasas de inyección de aire.



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

Esta diferencia que existe entre la TIA de 10 y 40 Pcs se puede atribuir a la alta cantidad de coque producido por la TIA de 10 durante la etapa inicial de la prueba generándose alta cantidad de  $\text{CO}_2$  rápidamente. Finalizando la prueba la producción de  $\text{CO}_2$  disminuye dada la disminución del consumo de coque para esta misma TIA.

Dado que se presenta una asimetría bastante marcada en los histogramas y los diagramas de caja, además que la media y la mediana están bastante alejadas, se puede inferir que no es conveniente tomar la media aritmética para la descripción de la relación con la TIA y la determinación de parámetros de combustión, por lo tanto para este fin se empleara la mediana.

En la tabla 32 se presenta el resumen de parámetros estadísticos, donde se puede apreciar que la mayor desviación estándar se presenta para la TIA de 40 Pcs/d.

Una expresión matemática que exprese la relación entre la producción de  $\text{CO}_2$  y las TIA no sería tan conveniente como si lo pueden ser expresiones en función de los parámetros de combustión los cuales involucran tanto la producción de  $\text{CO}_2$  como la producción de oxígeno y nitrógeno.

**Tabla 32.** Parámetros estadísticos para la fracción molar de  $\text{CO}_2$  a diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d).

PARAMETRO	TIA_10	TIA_40	TIA_80	TIA_120	TIA_160	TIA_200	TIA_240	TIA_270	TIA_320	TIA_360	TIA_400
Media	0.146	0.114	0.128	0.133	0.136	0.138	0.139	0.140	0.141	0.141	0.140
Mediana	0.148	0.153	0.155	0.154	0.154	0.154	0.154	0.154	0.153	0.153	0.153
Moda	0.147	0.156	0.155	0.154	0.153	0.152	0.154	0.152	0.154	0.145	0.144
Desviación estándar	0.026	0.063	0.054	0.049	0.046	0.043	0.041	0.039	0.038	0.038	0.038
Varianza de la muestra	0.001	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001

Fuente: Minitab15. Software Estadístico

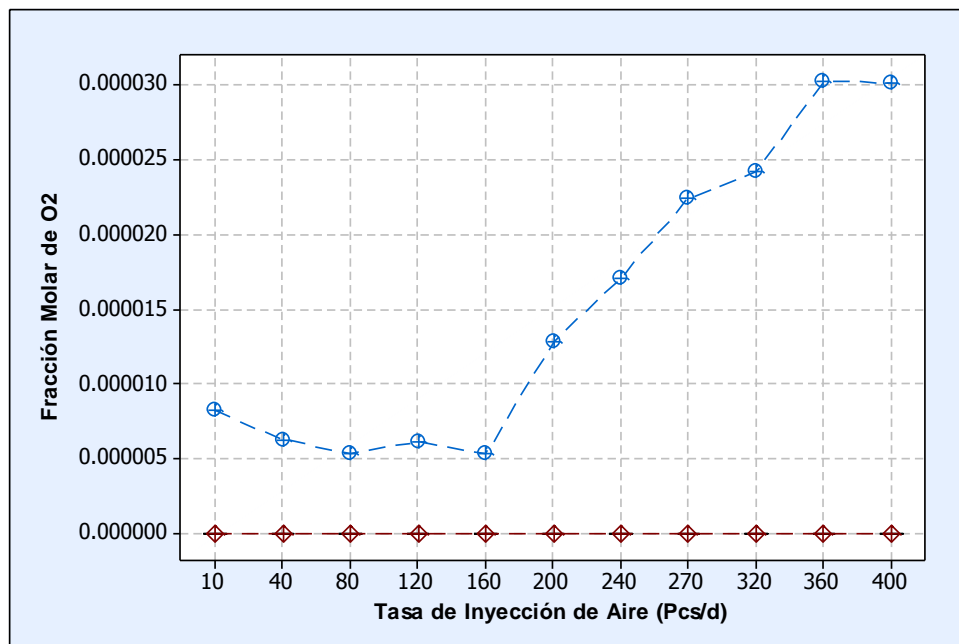
#### 4.3.2 Fracción molar de $\text{O}_2$ y $\text{N}_2$ producido.

Tanto la fracción molar de  $\text{O}_2$  como la fracción de  $\text{N}_2$  producidos, serán evaluados de forma resumida, únicamente a partir del diagrama de cajas ya que las producciones de  $\text{O}_2$  como se presenta a continuación son alrededor de cero para

las diferentes TIA. Por otro lado el  $N_2$  es inerte y por sí solo no ofrece formación importante, sin embargo este será involucrado en los parámetros de combustión.

De acuerdo a la figura 94 se puede concluir, que no se presentaron cajas ya que tanto los límites superior e inferior así como los cuartiles 1 y 3, además de la mediana son cero. Se aprecia que la media es diferente a la mediana pero por muy poco (del orden de  $10^{-4}$ ). Entre mayor es la TIA aparecen valores diferentes de cero que se hacen cada más diferentes gracias a este aumento en la TIA. A pesar de estas variaciones en la media, se trabajara para la determinación de parámetros de combustión, cero.

**Figura 94.** Diagrama de Cajas para la fracción molar de  $O_2$  producido diferentes tasas de inyección de aire.



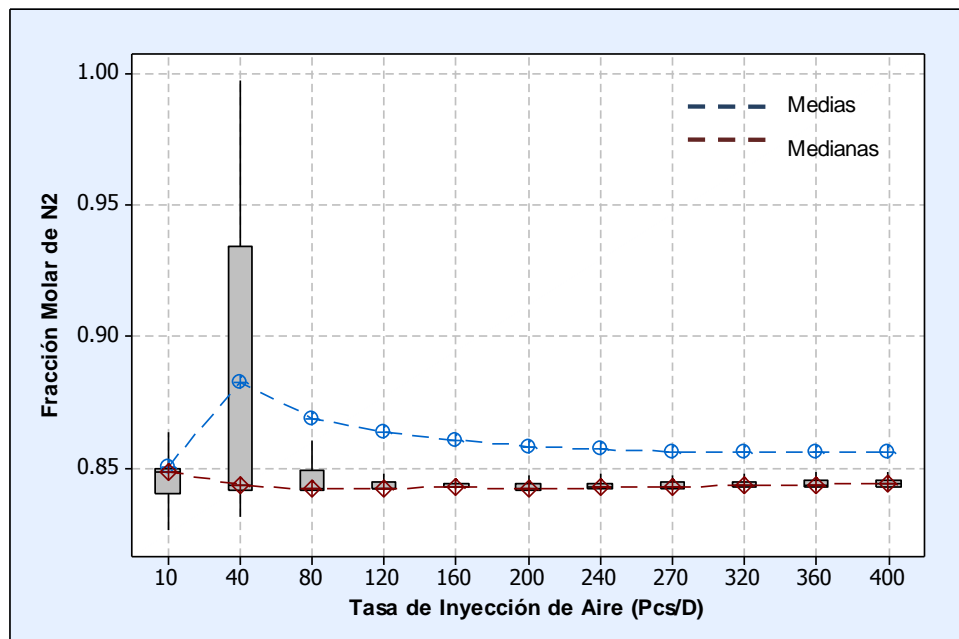
Fuente: Minitab15. Software Estadístico

La eficiencia de consumo de combustión de oxígeno es de aproximadamente 100% tanto a altas como bajas TIA y esta eficiencia puede darse gracias a: homogeneidad del modelo de simulación, ausencia de refinamientos radiales y ausencia de pérdidas de calor en dirección axial. Esto hace que el modelo

presente ciertas limitaciones como es el caso de los altos niveles de consumo de oxígeno a pesar de tener bajas TIA.

Para terminar el análisis de los gases y pasar a la determinación de parámetros de combustión se presenta en la figura 95 el diagrama de cajas de la producción de  $N_2$ , el cual tiene las mismas características que el diagrama de caja presentado para el  $CO_2$ . Los datos presentan una alta dispersión para la TIA de 40 Pcs/d, además de las diferencias claras entre la media y la mediana, por lo tanto no es representativo tomar las medias para la determinación de parámetros de combustión.

**Figura 95.** Diagrama de Cajas para la fracción molar de  $N_2$  producido diferentes tasas de inyección de aire.



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

#### 4.4 PARAMETROS DE COMBUSTIÓN

A partir de las medianas de los gases de combustión establecidas anteriormente y a partir de las formulas presentadas en el capítulo 1 sección 3.1 se calcularon diversos parámetros de combustión, los cuales se presentan en la tabla 33.

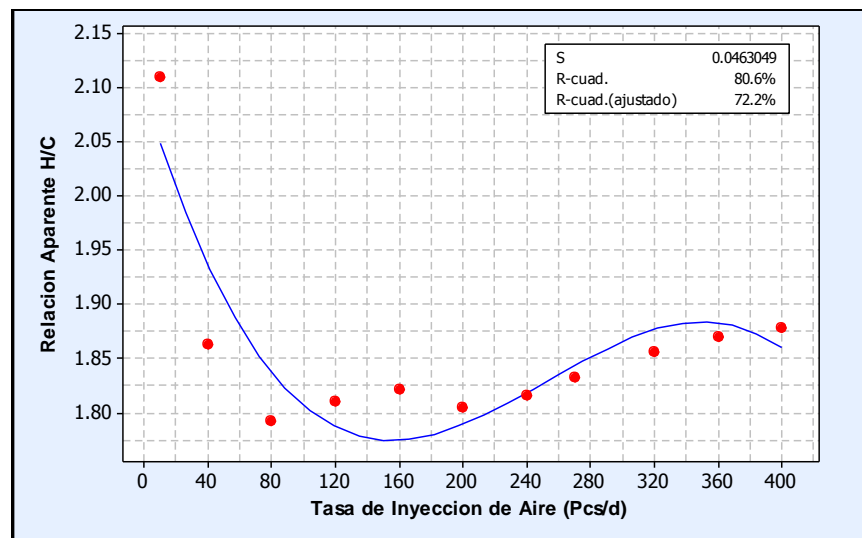
**Tabla 33.** Parámetros de combustión a diferentes tasas de inyección de aire (Pcs/d).

FLUJO AIRE (Pcs/Pie2-hr)	TIA (Pcs/d)	CO2 (Fr molar)	O2 (Fr molar)	N2 (Fr)	CO (Fr molar)	H/C	(CO2+CO)/ N2	FO2R%	RAC (Pcs/lbm)	RA(Pcs/pc)	RC (lbm/pc)
4.872	10	0.148	0.000	0.849	0.000	2.110	0.174	65.471	194.988		
19.486	40	0.153	0.000	0.843	0.000	1.863	0.181	68.221	190.473		
38.973	80	0.155	0.000	0.842	0.000	1.792	0.184	69.063	189.133	293.318	1.551
58.459	120	0.154	0.000	0.842	0.000	1.810	0.183	68.850	189.470	276.773	1.461
77.945	160	0.154	0.000	0.842	0.000	1.822	0.183	68.709	189.693	284.924	1.502
97.432	200	0.154	0.000	0.842	0.000	1.804	0.183	68.914	189.368	292.845	1.546
116.918	240	0.154	0.000	0.842	0.000	1.816	0.183	68.778	189.584	305.696	1.612
131.533	270	0.154	0.000	0.843	0.000	1.832	0.182	68.589	189.884	309.905	1.632
155.891	320	0.153	0.000	0.843	0.000	1.856	0.182	68.311	190.328	304.709	1.601
175.377	360	0.153	0.000	0.843	0.000	1.871	0.181	68.137	190.608	302.912	1.589
194.864	400	0.153	0.000	0.844	0.000	1.879	0.181	68.043	190.759	312.256	1.637

#### 4.4.1 Relación aparente Hidrogenó/Carbono (H/C).

Esta relación tal como se indicó en el capítulo 1, es muy empleada para determinar cómo opera un proceso de combustión in situ. Una menor relación H/C indica que el combustible tiene mayor cantidad de carbono, por lo tanto el rompimiento de estos enlaces y producción de este a partir de combustión será cada vez mayor logrando una mayor eficiencia de reacción. De la figura 96 y la tabla 33 se puede apreciar que la mayoría de los valores de H/C se encuentran por debajo de 2, indicando reacciones en HTO. Por otro lado bajas TIA generaron los valores más altos de H/C indicando menor calidad del combustible o menor eficiencia de combustión.

**Figura 96.** Línea de Tendencia relación aparente H/C para diferentes tasas de inyección de aire.

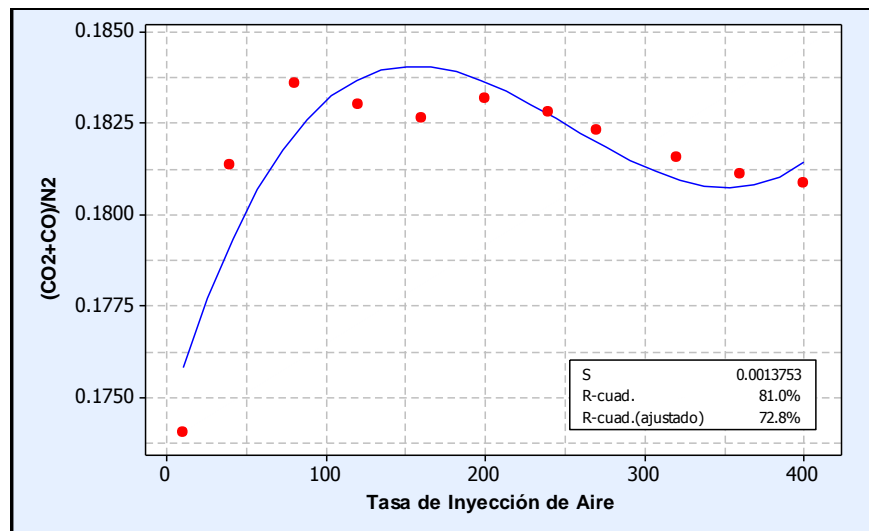


Fuente: Minitab15. Software Estadístico

#### 4.4.2 Relación $(CO_2+CO)/N_2$

Al igual que la relación aparente H/C; esta indica que tan eficiente fue la reacción de combustión a partir de la medición de óxidos de carbono. Entre más óxidos se produzcan, es indicio del rompimiento de los enlaces del coque, por lo tanto se tendrá alta eficiencia en las reacciones de combustión. Altas TIA presentaron bajas relaciones por lo tanto menor eficiencia que las TIA intermedias las cuales fueron las más altas. Mientras que altas TIA presentaron una disminución de la relación indicando disminución en la eficiencia de combustión (ver figura 97).

**Figura 97.** Línea de Tendencia relación  $CO+CO_2/N_2$  para diferentes tasas de inyección de aire.



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

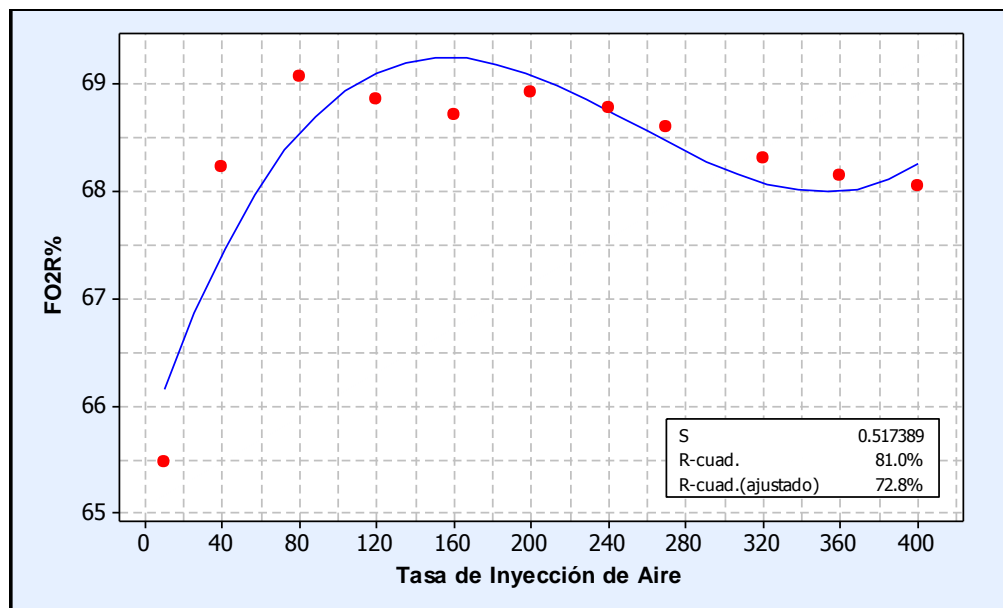
#### 4.4.3 Oxígeno reaccionado convertido a óxidos de carbono (FO2R%).

Un rango entre 60 a 70% es considerado como un proceso eficiente en modo HTO, en la tabla 33 y figura 98 se tienen valores entre 60 y 70 %, esto indica que todas las corridas predominaron en alta temperatura. Por otro lado cabe aclarar que gracias a que reacciona el 100% del oxígeno se puede decir que el restante que no reacciona para formar óxidos, reacciona para formar agua. Mayores cantidades de agua se presentaron a bajas TIA, en comparación con altas TIA.

La eficiencia en altas y bajas tasas fue menor que en TIA intermedias. Esto es debido principalmente a que en altas TIA se observaron leves producción de  $O_2$  (ver figura 94), las cuales a su vez ocasionaron la disminución en la producción de  $CO_2$ .

Al igual que los demás indicadores presentados, los mayores  $FO_2R\%$  se encuentran en tasas intermedias, TIA bajas presentaron % de eficiencia de consumo de oxígeno menores, y altas TIA presentaron % levemente menores con respecto a las TIA intermedias.

**Figura 98.** Línea de Tendencia  $FO_2R\%$  para diferentes tasas de inyección de aire.



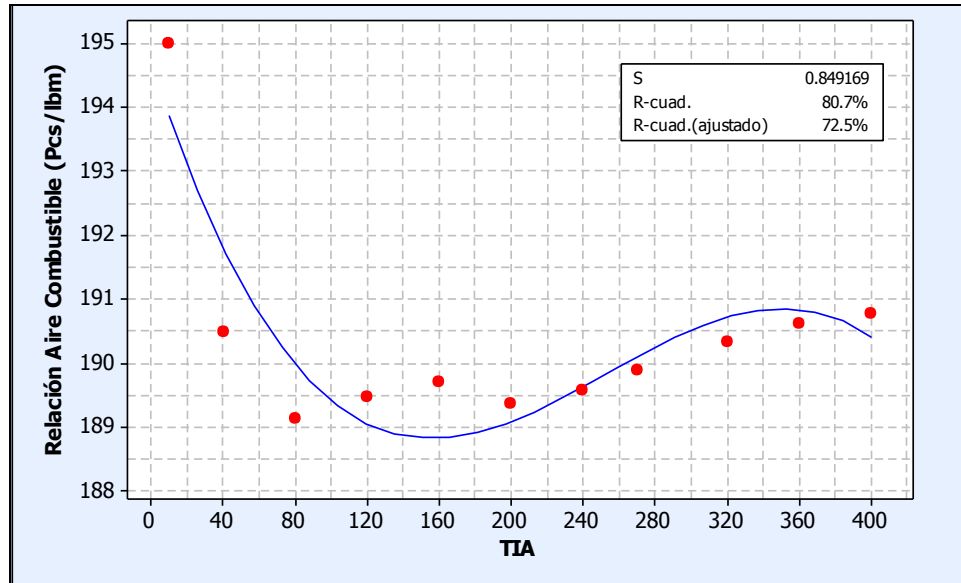
Fuente: Minitab15. Software Estadístico

#### 4.4.4 Relación Aire Combustible RAC (Pcs/lbm).

Se espera que un buen proceso de combustión tenga bajas relaciones aire/combustible RAC (mas producción de óxidos de carbono con menos inyección de aire). En la figura 99 se presenta dicha relación en función de las TIA, la cual tiene el mismo comportamiento que la relación H/C. TIA intermedias (80 Pcs/d) presentan las mejores características ya que para quemar 1 libra masa de combustible se necesitan aproximadamente 189 Pcs de aire.

TIA bajas como se presentó anteriormente en el análisis del coque depositado, generaron altas cantidades de coque, sin embargo gran parte del aire se emplea en este fin y el restante es poco, por lo tanto no se consume eficientemente el combustible y esto se ve reflejado en los mayores H/C y mayores RAC.

**Figura 99.** Línea de Tendencia RAC para diferentes tasas de inyección de aire.



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

#### 4.4.5 Requerimientos de aire RA (Pcs/pc roca).

Tal como se describió en el capítulo 1, el requerimiento de aire RA es el volumen de aire requerido por unidad de volumen de yacimiento, y es calculado de la siguiente manera:

$$RA(Pcs / pc) = \frac{U_{air}}{V_b}$$

El termino  $U_{air}$ , hace referencia al flujo de aire inyectado (Pcs/pc) y  $V_b$  es la velocidad del frente de combustión (pie/h). Los requerimientos de aire controlan gran parte de la economía del proceso, ya que estos representan la cantidad de aire que debe ser inyectado en el yacimiento para barrer un volumen dado.

Gracias a que se cuenta con las medianas de las la velocidades del frente a una temperatura de 848°F (ver figura 81) y que se cuentan con los valores de flujo (ver figura 64) fue posible la determinación de los requerimientos de Aire RA. En la tabla 34 y figura 100 se presentan los resultados obtenidos.

**Tabla 34.** Requerimientos de aire en función de las tasas y flujos de inyección de aire para velocidades promedio del frente a 848°F.

FLUJO AIRE (Pcs/pie <sup>2</sup> -hr)	TIA (Pcs/hr)	VELOCIDAD F (Pies/hr)	RA (Pcs/Pc roca)
41.45	10.00	0.00	
62.17	40.00	0.00	
41.45	80.00	0.13	311.94
62.17	120.00	0.21	294.34
82.89	160.00	0.27	303.01
103.62	200.00	0.33	311.43
124.34	240.00	0.38	325.10
139.88	270.00	0.42	329.58
165.79	320.00	0.51	324.05
186.51	360.00	0.58	322.14
207.23	400.00	0.62	332.08

Fuente: El autor

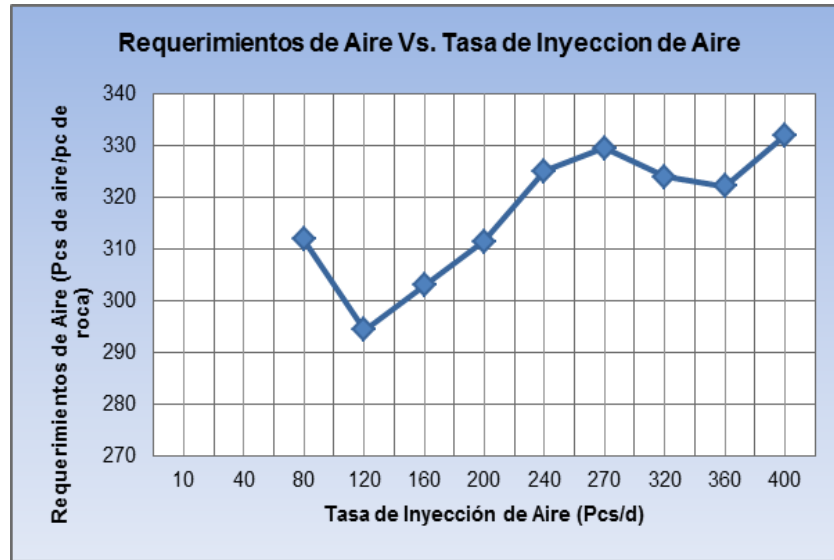
Tal como se puede apreciar en la tabla 34, figura 100, y de acuerdo a los experimentos de Martin et al<sup>76</sup> referenciados en el primer capítulo, se obtienen requerimientos altos en con bajas TIA producto de las bajas velocidades de avance. Tal es el caso de la TIA de 80 Pcs.

Además se debe tener en cuenta que tasas muy bajas producen velocidades iguales o cercanas a cero por lo tanto los requerimientos serian supremamente altos. Por otro lado los requerimientos de aire también se incrementan con altos flujos o TIA gracias a la disminución de la eficiencia de combustión. Al tratar de establecer una regresión, se encontró que era necesario una de tipo cubica en la que no se incluyeran TIA de 320 Pcs/d en adelante ya que generaban valores bajos en el coeficiente de regresión R. Por lo tanto se optó por ajustar la regresión entre el intervalo de tasas de 80 y 270 Pcs/d correspondiente a flujos entre 41 y

<sup>76</sup> MARTIN W. ALEXANDER J, D. Op.Cit. "Process Variables of in situ Combustion" 1957

140 Pcs/Pie<sup>2</sup>-hr. En la parte superior de la figura 101 se encuentra la expresión matemática que describe esta relación.

**Figura 100.**Requerimientos de aire en función de las tasas de inyección de aire.



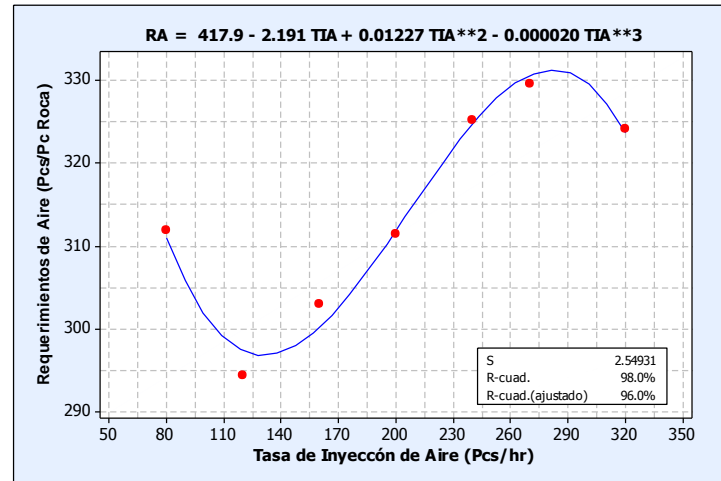
Fuente: El autor

Comparando con los resultados obtenidos por Martin et al<sup>77</sup> y presentados en el primer capítulo, en los cuales obtuvo una correlación grafica entre valores de 5 a 140 Pcs/Pie<sup>2</sup>-hr, se puede concluir que se logró modelar el comportamiento reportado por dicho autor, encontrando un RA óptimo de 294 Pcs/ pc de roca para un flujo de 124.3 Pcs/Pie<sup>2</sup>-hr (TIA de 120 Pcs/d).

Cabe aclarar que los valores de requerimientos óptimos para un flujo optimo reportados, varían gracias a que tanto el esquema experimental como el tipo de crudo cambian y lo más importante los autores consideraron en este reporte velocidades del frente para un auto sostenimiento de este a 600°F a diferencia de la presente investigación sobre la cual se trabajó sobre un temperatura de 848°F, la cual asegura un frente estable en modo de alta temperatura.

<sup>77</sup> MARTIN W. ALEXANDER J, D. Op.Cit. 1957

**Figura 101.** Regresión requerimientos de aire para diferentes tasas de inyección de aire.

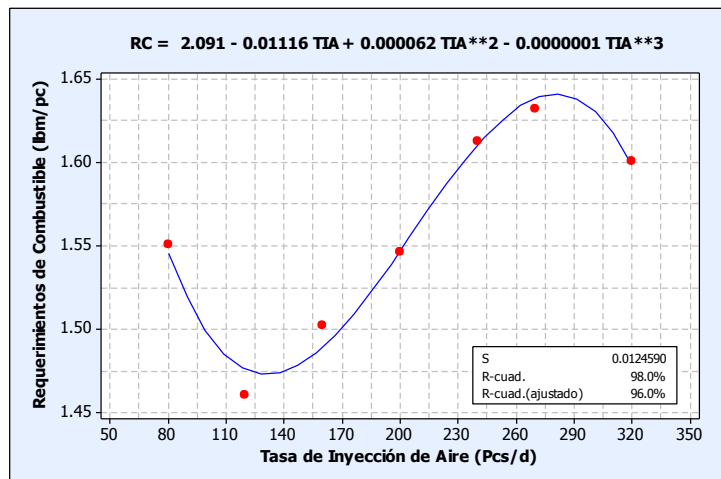


Fuente: Minitab15. Software Estadístico

#### 4.4.6 Requerimientos de combustible RC (lbm/pc roca).

El combustible requerido es teóricamente la masa de hidrocarburo la cual debe ser consumida durante un proceso de combustión y se obtiene dividiendo los requerimientos de aire entre la relación aire combustible. En la figura 102 se presenta los requerimientos de combustible en función de las TIA, el comportamiento de la curva es el mismo al de la curva de requerimiento de aire en función de las TIA.

**Figura 102.** Regresión requerimientos de combustible para diferentes tasas de inyección de aire.



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

## 4.5 ANÁLISIS MULTIVARIABLE

Para terminar el estudio analítico se desarrolló un análisis multivariable que permitió evaluar los picos de temperatura en función de TIA y la energía de activación de la reacción de combustión. Siendo esta última uno de los factores más influyentes en el proceso tal como se presentó durante el análisis de sensibilidad de variables y ajuste histórico. Este tipo de análisis corresponde a un diseño de experimentos de dos factores con tres niveles cada uno tal como se presenta en la tabla 35.

**Tabla 35.** Data empleada y resultados interacción TIA, EA con respecto a los picos de temperatura

TIA (Pcs/d)	EA4 (Btu/lbmol)	Picos de Temperatura (°F)
80	15000	842
80	22000	980
80	27000	1140
270	15000	770
270	22000	1095
270	27000	1230
400	15000	780
400	22000	1110
400	27000	1280

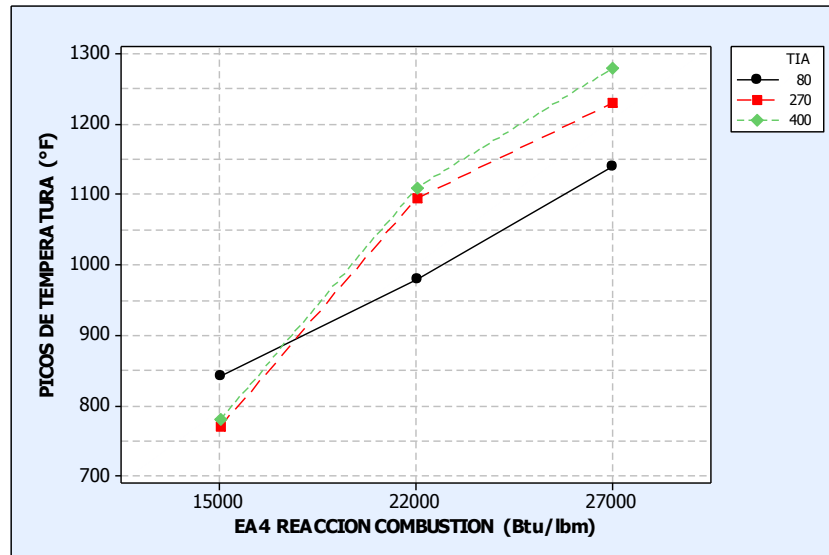
Fuente: El autor

En la tabla 35 se puede observar que se eligieron TIA bajas de 80 Pcs, intermedias de 270 Pcs/d y altas a 400 Pcs/d, mientras que se tomaron valores bajos de EA4 de 15000 los cuales indican un predominio de la combustión del coque más que de la depositación de esta. Ea4 intermedia de 22000, correspondiente al caso base, y EA4 alta de 27000 indicando un predominio de la depositación de coque sobre el consumo de este.

La figura 103 representa la interacción entre la TIA y la energía de activación, con respecto a los picos de temperatura, en esta se puede apreciar dado el cruce de las curvas y que no son paralelas, existe cierta interacción entre variables y esta es más marcada con bajas EA4. Se puede apreciar que los picos de temperatura

aumentan con alta Ea4 independientemente de la TIA, por lo tanto se puede concluir que es necesario que se produzca una alta cantidad de coque para obtener altas temperaturas.

**Figura 103.** Grafica de Interacción TIA, EA y Picos de Temperatura

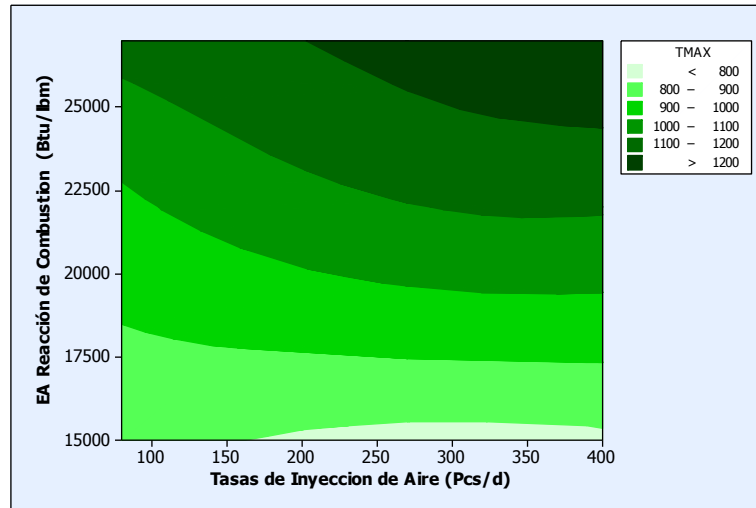


Fuente: Minitab15. Software Estadístico

Si se produce baja cantidad de coque y por el contrario prevalece la reacción de combustión de este (EA4 bajas) resulta conveniente, para alcanzar mayores temperaturas, trabajar con bajas TIA que con altas. Esto gracias a que dado el poco coque generado, a altas tasas la eficiencia de combustión sería mínima. Además esto se puede atribuir a que bajas TIA generan cantidades de coque adicionales producto de la menor caída de presión en el modelo, por lo tanto mayores son las saturaciones de aceite y mayores serán las cantidades de coque depositadas.

En la figura 104 se presenta un mapa de contornos, el cual permite presentar de una manera alterna los valores de interacción a partir de una escala de colores. Según el diagrama para lograr altos picos (colores verdes oscuros) de temperatura son necesarias altas TIA y altas EA4 por lo tanto las temperaturas se favorecen por el predominio de la depositación de coque más que por el consumo.

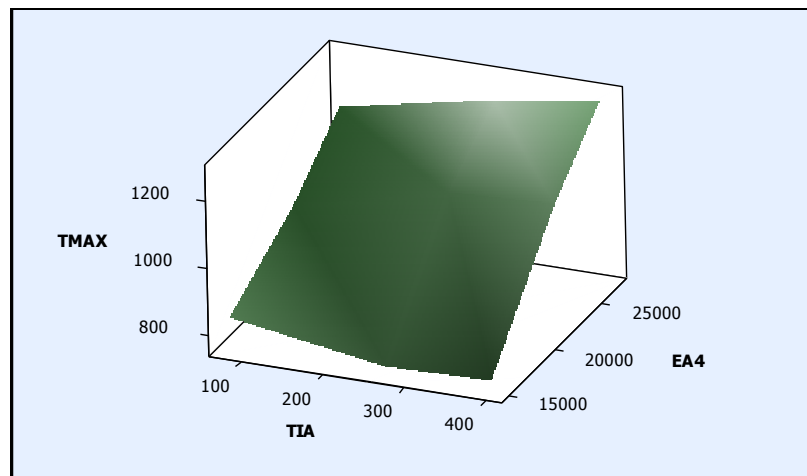
**Figura 104.** Mapa de contorno para la interacción de TIA, Ea y Picos de Temperatura



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

Por último se presenta la superficie de respuesta de la interacción de dichas variables en la figura 105. En esta claramente se observa que independientemente de la TIA se pueden obtener altos picos de temperatura con el favorecimiento de la depositación e coque. Claro está que si se aumenta, la TIA favorece las temperaturas. También se puede observar que se tiene un leve mejoramiento en los picos de temperatura a EA4 bajas, si se trabaja a bajas TIA tal como se explicó anteriormente.

**Figura 105.** Superficie de respuesta 3D para la interacción de TIA, EA4 y Picos de Temperatura



Fuente: Minitab15. Software Estadístico

## CONCLUSIONES

- Las mayores tasas de inyección de aire proporcionaron las temperaturas más altas, producto de la cantidad de coque depositado y de la adecuada distribución del calor. Sin embargo se obtienen altos requerimientos de aire y combustible, gracias a una disminución en la eficiencia de combustión.
- Tasas de inyección de aire intermedias depositaron y consumieron coque de manera eficiente. Razón por la cual presentaron los menores requerimientos de aire y combustible, temperaturas superiores a los 1000°F, alta eficiencia de consumo de oxígeno y las mayores producciones de aceite.
- Tasas de inyección de aire bajas, generaron menores caídas de presión, por lo tanto mayores saturaciones de aceite por celda. Consecuencia de esto se presentaron altas cantidades de coque por celda, pero dado el bajo flujo de oxígeno la combustión no fue eficiente y las temperaturas alcanzadas fueron las menores con respecto a tasas más altas.
- Un efecto significativo, producto de la menor eficiencia de combustión a tasas bajas, fue la generación de un banco de vapor de agua que contribuyó con la depositación de coque delante del frente. Esta excesiva depositación de coque condujo a la obtención de menores factores de recobro comparados con los obtenidos en tasas más altas.
- Desde el punto de vista técnico entre más altas sean las tasas de inyección de aire mayores serán las temperaturas alcanzadas, pero desde el punto de vista económico tasas intermedias (120 Pcs/d) presentaron bajos requerimientos de aire (276 Pcs/pc de roca) con temperaturas por encima de los 1000 °F. Siendo estas últimas las opciones más optimistas a la hora de determinar parámetros de combustión, que pueden ser empleados posteriormente en los diferentes métodos analíticos de predicción.

## RECOMENDACIONES

- Realizar un estudio de la tasa de inyección de aire con respecto a las mismas variables de respuesta trabajadas en esta investigación, para enmallados a escala de campo en 2D y 3D. En este se debe tener en cuenta efectos de heterogeneidad, canalización, refinamientos radiales y cartesianos de celdas, entre otros.
- Llevar a cabo análisis detallados de la influencia de la tasa de inyección de aire sobre variables de respuesta tales como producción de fluidos y eficiencias de barrido volumétrico. En esta investigación se debe involucrar mecanismos tales como variaciones de permeabilidades relativas con la temperatura, fenómenos capilares, fenómenos de absorción del CO<sub>2</sub>, generación de *foamy oil*, entre otros.
- Desarrollar una investigación que permita comparar los efectos de la tasa de inyección de aire en una prueba de tubo seca con respecto a una prueba de tubo en modo húmedo con el fin de analizar los efectos generados sobre las diferentes variables asociadas al proceso.
- Realizar un estudio de factibilidad mediante simulación numérica a escala de campo para este modelo cinético empleado y con las mismas características de yacimiento, a partir de los procedimientos establecidos en la literatura, los cuales parten del modelo de tubo ajustado.
- Implementar un laboratorio asociado al modelamiento de procesos de combustión in-situ, ya que son diversas las pruebas, parámetros y propiedades para tal fin. De esta manera será posible llevar a cabo estudios más profundos y decisivos, los cuales contribuirán significativamente con el desarrollo de la técnica en el país.

## BIBLIOGRAFIA

- ABU I. MOORE R. METHA, R. URSENBACH, M. "A Preliminary Combustion Tube Test Report". University of Calgary. October 2010
- ANAYA, I. CRUZ, R. ALVAREZ, A. GUTIERRE, D. SKOREYKO, F. "Simulation Study for Designing an In-Situ Combustion Pilot In the Orinoco Belt of Venezuela: From Laboratory Studies to the Field Scale. SPE. PDVSA, CMG. SPE- 137491. 2010.
- ARBELAEZ de Moncaleano .Ruby. "El proceso de la Investigación", Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2005
- BAGCI S. "Estimation of combustion zone thickness during in situ combustion process". Petroleum and natural gas engineering department middle east technical university. Ankara Turkey. 1998
- BELGRAVE J, D. MOORE R, G. and BENNION, D. W. "The Thermal Behavior of Vertically Operated Near-Adiabatic In-Situ Combustion Tubes". Journal of Petroleum Science & Engineering. Vol 5. 1990
- BELGRAVE J, MOORE G, URSENBACH M, BENNION W, "A comprehensive Approach in situ combustion modeling. Department of chemical & petroleum engineering. University of Calgary. Calgary Alberta Canada. SPE 20250. Advance technology series. Vol 1. April 1990. pp 751-762
- BELGRAVE, J. Conversación Personal. ECOPEPETROL ICP. Marzo 2011.
- BURGER J. SORIEAU P. "Thermal Methods of oil Recovery". Institut Français du Pétrole Publications, 1985. 247-305 p
- CHICUTA AM. Trevisa O. (2009) "Experimental study combustion in-situ of Brazilian heavy oil". SPE 122036 . June 2009. pp 1-11
- CMG. Computer Modeling Group. Calgary Alberta Canada. User Manual. 2009

COUCH E,J. "Effects of porosity and permeability in-situ combustion fuel consumption". SPE 2873. Houston Texas. October 1970.

CRAWFORD P.B. Chu C. Improve oil Recovery. Interstate oil compact commission.Chapter VI In situ combustion. Oklahoma city. 1983.

FASSIHI R. BRIGHAM W. RAMEY H. "Reaction Kinetics of In-Situ Combustion: Part 1-Observations". SPE, Stamford U. SPE 8907.August 1984. pp 399-407

GATES, C.F. RAMEY Jr., H.J., "A Method for Engineering In Situ Combustion Oil Recovery Projects"; Journal of Petroleum Technology, 32, No. 2. February 1980. pp. 285-294

GARON A,M. WYGAL R,J. "A laboratory Investigation of fired-Water Flooding". SPE 4162. Gulf Research & Development co. Pittsburgh. 1974

GREAVES M, T.J YOUNG, S.R REN. "Air injection into light and medium Heavy oil reservoirs-Combustion Tube studies on west of Shetlands clair oil and light Australian oil". Departament of Chemical Engineering. University of Bath, UK. 2000

GUTIERREZ D, "Air Injection Laboratory Studies". Reservoir Simulation of In-Situ Combustion Processes. ICP Bucaramanga Colombia. September 2009. pp 1-52

GUTIERREZ D, MOORE G, URSENRBACH M, and METHA R. "The challenge of predicting field performance of air injection projects based on laboratory and numerical modeling. JCPT. Vol. 48, No, 4. April 2009. Pp 23-34.

GUTIERREZ D, "Air Injection Based Processes for Improved Oil Recovery". UIS Bucaramanga Colombia. Mayo 3-7 del 2010.

KUMAR, M. "Simulation of laboratory In-Situ Combustion Data and Effect of Process Variations".Chevron Oil Field Research Co, SPE 16027.1987. Pp 343 – 358.

MAHINPEY N. AMBALAE, A. ASGHARI K. "In situ combustion in enhanced oil recovery (EOR): A review". Faculty Engineering, University of Regina. Regina Canadá. Taylor & Francis Group. 2007. pp 995-1021

MAMORA D. "New findings into of crude oil". Texas A&MU.SPE 29324.March 1995. pp 577-592.

MARTIN W. ALEXANDER J,D. "Factors affecting fuel availability and composition during in situ combustion". SPE 296. October 1962.

MARTIN W. ALEXANDER J,D. "Process Variables of in situ Combustion". SPE 914-G. Ponca City. Vol. 213. October 1957. pp 28-35

MONTES, A.R., MOORE, R., MEHTA, R. URSENBACH, M. GUTIERREZ D." Is High Pressure Air Injection (HPAI) Simply a Flue-Gas Flood?" Canadian international petroleum conference. CMG, University of Calgary. Paper 180. June 2008. pp 1-9.

MONTGOMERY D. "Diseño y Análisis de Experimentos", Universidad Estatal de Arizona. LimusaWiley. 2 Edición. 2004.pp 60-115.

MOORE R, G. LAURSHEN M,G. URSENBACH M,G. METHA R. BELGRAVE J,D. "a Canadian perspective on in situ combustion" University of Calgary. JCPT. Vol. 38. No. 13. Special Edition 1999. pp 1-8

MOORE, R.G., LAURESHEN, C.J., MEHTA R. URSENBACH, M.G., Observations and Design Considerations for In Situ Combustion Projects, J. of Canadian Petroleum Technology, Vol. 38, No. 13.1999. pp 1-9

MOORE G, LAURSEN C J, BELGRAVE J, URSENBACH M, METHA R. "In situ Combustion: New Ideas for an Old Process". Department of chemical & petroleum engineering. University of Calgary. Calgary Alberta Canada. Vol. 11. 1994. pp 1-33.

MOORE R.G., MEHTA, S.A., URSENBACH, M.G., LAURESHEN, C.J. Strategies For Successful Air Injection-Based IOR Processes Paper No. 135, October 27-30, 1998. pp 1-6

MOORE R,G. MILLOUR J,P. BENNION D,W. BEST D,A. “Comparison Of Laboratory And Field Performance Of In Situ Combustion”. Proceedings of the 5th Annual Advances in Petroleum Recovery & Upgrading Technology” Conference, Calgary, Alberta, June 14-15 1984.

MOORE R,G. URSENBACH M,G. LAURSHEN C,J. Belgrave J,D. Metha S,A. “Ramped Temperature Oxidation Analysis of Athabasca Oil Sands Bitumen”. University of Calgary. PETSOC 991340. Vol. 38. No. 13. Special Edition 1999. pp 1-10

NELSON T. W. MCNEIL J.S. “How to Engineer a Combustion In Situ Project”, Oil and Gas Journal. N°. 23. June 1961. pp 58-65

REBOLLEDO, A. “El Análisis en investigación Cualitativa”, Universidad Del Bio-Bio.Chie. Tomado de Internet: <http://www.slideshare.net>.

RODRIGUEZ J, R. Experimental and Analytical Study to Model Temperature Profiles and Stoichiometry in Oxygen Enriched In-Situ Combustion. [Phd Thesis]. Universidad de Texas, Mayo 2004.

ROUTIO, P. “Arteología, la ciencia de productos y profesiones, Análisis Cuantitativo”, 2007. Tomado de Internet: <http://www2.uiah.fi/projects/metodi/s00.htm>.

SARATHI S. P. In situ combustion Handbook. Principles and Practices. BDM Petroleum Technologies. National Petroleum Technology Office. Oklahoma. January 1999. pp 2-5

SEQUERA B. MOORE R, G. METHA, R. URSENBACH M.G.” Numerical Simulation Of In-Situ Combustion Experiments Operated Under Low Temperature

Conditions”. Canadian international petroleum conference. University of Calgary. Paper 189. June 2007. pp 1-15

SHEN, C. “Limitations and Potentials of In- Situ Combustion Processes for Heavy Oil Reservoirs”. Canadian International Petroleum Conference. CreSim Technologies. Calgary, Alberta, Canada. Paper 217. June. 2002. pp 1-14

SHOWALTER, W. “Combustion Drive Test”. SPE 456. Union Oil Co. California. March 1963. pp 53-58

URSENBACH, M.G. MOORE, R.G. MEHTA, R. Air Injection in Heavy Oil Reservoirs—A Process Who’s Time Has Come (Again). Canadian International Petroleum Conference. Calgary, Alberta, June 2007. pp 48-54

URSENBACH M.G. An overview of laboratory in situ combustion Behavior of Athabasca oil sands”. [MSc. Thesis]. University of Calgary. 1998.

## ANEXOS

## ANEXO 1. GENERALIDADES DEL MODELAMIENTO NUMERICO DE PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN-SITU

Como es bien sabido a lo largo de los últimos 40 años solamente unos pocos proyectos han resultado satisfactorios, esto debido principalmente a fallas operacionales, carencia de entendimiento del proceso y bajos precios del crudo. Uno de los mayores obstáculos para el mejoramiento de la combustión in situ a lo largo de los últimos cuarenta años ha sido la carencia de un modelo numérico confiable para predecir el desempeño en campo. Esta carencia es una consecuencia de la complejidad inherente del proceso.

### PRINCIPALES FENÓMENOS A MODELAR EN PROCESOS DE COMBUSTIÓN IN-SITU

Los aspectos más importantes y quizás los más complejos, según Islam et al<sup>78</sup>, para modelar la CIS son la formación de coque, la combustión de este y las reacciones de oxidación a baja temperatura. La formación de coque dicta la cantidad de combustible disponible para combustión. Excesiva depositación retarda la velocidad de avance del frente de combustión e insuficiente depositación de combustible puede no proporcionar suficiente calor para el auto sostenimiento de la combustión. El proceso de combustión determina la velocidad del frente. Si la velocidad es muy alta, no todo el combustible residual puede ser quemado, resultando en un proceso ineficiente. Por lo tanto es necesario el mayor entendimiento posible de los mecanismos que intervienen en la formación y combustión del coque con el fin de lograr un mejoramiento en el modelamiento de este tipo de procesos.

**Combustión del coque.** La combustión del combustible en CIS, donde el oxígeno y el combustible deben reaccionar bajo condiciones de flujo en un medio poroso, es esencialmente una reacción de flujo heterogénea que involucra, fase gas,

---

<sup>78</sup> ISLAM M, R. CHAKMA A. FAROUQ A. "State of Art of In Situ Combustion Modeling Operations. SPE 18755. 1989

liquida y sólida. El combustible a ser quemado es normalmente el sólido si la temperatura de combustión es suficientemente alta (>752 °F). Además algo del combustible puede ser depositado en los poros del yacimiento, por lo tanto una serie de fenómenos de transporte tienen lugar antes de que la reacción de combustión ocurra.

El oxígeno debe ser transferido del volumen de gas a la interface del combustible, posiblemente a través de los poros de la roca y luego difundirse dentro del combustible, de esta manera las reacciones pueden ocurrir. Los productos de la reacción son luego desorbidos y finalmente se difunden en la corriente de gas. Por lo tanto el proceso es controlado por el paso más lento. Generalmente las reacciones químicas proceden en velocidades mayores que el proceso de difusión. El hecho de que las reacciones sean cinéticamente limitadas o controladas por la difusión, ha sido un tema muy controversial. Sin embargo es generalmente aceptado que en el proceso, la reacción química es controlada y la tasa de combustión  $R_c$ , de un crudo en un medio poroso puede ser descrita por la siguiente ecuación (Ecuación de velocidad de reacción).

$$R_c = - \frac{dC}{dt} = kC^m P_{O_2}^n$$

Donde

C = Concentración instantánea de combustible

K = Tasa constante

$P_{O_2}$  = Presión parcial del oxígeno

m, n = Ordenes de reacción

Esta ecuación está en función de los reactivos involucrados en procesos de combustión in situ, y es la que se utiliza en el modelamiento de este tipo de procesos. El objetivo de esta expresión es calcular la velocidad de reacción o el

cambio de masa con respecto al tiempo; y como uno de los reactivos es el oxígeno este se puede expresar en función de su presión parcial. El valor del exponente al que está elevada la concentración de un reactivo en la ecuación de velocidad se denomina orden de la reacción con respecto a dicho reactivo. La suma de todos los exponentes se llama orden total o simplemente orden de la reacción.

La energía de activación y las colisiones efectivas, las cuales se ven afectadas por la tasa de inyección están incluidas en la constante de velocidad o también llamada ecuación de Arrhenius, donde se tiene en cuenta el efecto de la temperatura

$$k = A \exp(-Ea / RT)$$

Donde

A = factor de frecuencia

Ea = energía de activación

R = constante universal del gas = 1.987 cal/mol K

T = temperatura absoluta en K (kelvin)

Algunas investigaciones, entre las que se destacan las realizadas por Dabbous et al<sup>79</sup>. Sugirieron que la reacción de combustión puede ser controlada por la difusión. Si este es el caso y si no existe una adecuada tasa de inyección que permita la difusión adecuada entre el oxígeno y el hidrocarburo, el frente de combustión tendera a apagarse en el caso que se forme, o simplemente no se formara.

Por otro lado autores como Farouq Ali<sup>80</sup> mencionan que uno de los principales problemas en la formación y estabilidad de un frente de combustión y que está

<sup>79</sup> DABBOUS M.K. FULTON P.F. "Low Temperature Oxidation Reaction Kinetics and Effects on the In Situ Combustion Process". SPE 4143. June 1974

<sup>80</sup> FAROUQ A. "Current Appraisal of In-situ Combustion Field Test". University Pennsylvania. SPE 3350.1972

relacionado con la difusión es la canalización. Este fenómeno ha sido muy difícil de estudiar y por lo tanto modelar, ya que en pruebas de tubo no se aprecia este efecto tan notoriamente como en campo y por lo tanto todo el oxígeno en el frente de combustión reacciona y de esta manera se considera que los experimentos de laboratorio reproducen condiciones ideales en las que se están despreciando efectos de canalización. Contrario a lo que se cree, que el proceso es principalmente limitado por la velocidad de reacción, Islam y Farouq Ali consideran que la difusión juega un papel importante en las situaciones de campo. Por lo tanto ellos recomiendan un amplio estudio experimental en este tema.

## **DESCRIPCIÓN DEL TÉRMINO DE REACCIONES QUÍMICAS ASOCIADO A MODELOS NUMÉRICOS**

Dado que actuales modelos numéricos están basados en modelos clásicos como el de Coats<sup>81</sup> a continuación se presenta una breve descripción de cómo se involucran las reacciones químicas en los balances de masa y energía basados en dicho modelo.

El autor desarrollo un simulador de combustión capaz de manejar cualquier número de componentes, cualquier cantidad de reacciones químicas con reactantes productos y estequiometria específica a través de la data de entrada. Fuerzas de gravedad y capilaridad fueron incorporadas junto con fenómenos de vaporización/condensación, permitiendo a cualquier componente distribuirse en cualquiera de las fases. La fase solida empleada fue el coque y se permitió que la permeabilidad de la formación fuera variable con los cambios en concentración del coque.

El modelo descrito es totalmente implícito, ya que según la experiencia de los autores el tiempo de cómputo de corridas para modelos térmicos disminuye con el aumento de graos de implícidad. El modelo descrito consiste en un set de ecuaciones de balance de masa y energía y unas ecuaciones de restricción para

---

<sup>81</sup> COATS K,H. Op.Cit 1980

cada celda de la grilla representativa del yacimiento. Las ecuaciones son escritas en términos de diferencias finitas e incluyen un balance de energía, y un balance de masa para cada uno de los componentes. Las ecuaciones de restricción expresan los requerimientos de que la suma de las saturaciones sea igual a uno y que la suma de las fracciones molares de los componentes en cada fase sea igual a uno.

Se pueden utilizar componentes puros o pseudo componentes tales como: oxígeno, aire, nitrógeno, dióxido de carbono, agua, componente de crudo pesado, componente de crudo liviano y componente sólido o coque. El tratamiento y métodos de solución numéricos de los diferentes términos tales como: acumulación de masa y energía, flujo de masa y energía entre bloques, pérdidas de calor, tratamiento de ecuaciones de restricción, tratamiento de termino en pozos, tratamiento de términos asociados a la reacción químicas y funciones de dependencia de las propiedades de roca y fluido, son descritos en la referencia citada. En el presente documento se hará énfasis exclusivamente al tratamiento del término relacionado con las reacciones químicas.

La velocidad  $R_r$  de una reacción química está dada por la ecuación de velocidad modificada para medios porosos de la siguiente manera:

$$R_r = V A_r e^{-\frac{1.8E_r}{RT}} \prod_{j=1, N_{R,r}} (\phi \rho_j S_j X_{IJ})^{n_{j,r}}$$

$R_r$  = Velocidad de reacción  $r$  en la celda (lbmol/día)

$V$  = Volumen de la celda (pies<sup>3</sup>)

$A_r$  = Factor de frecuencia

$E_r$  = Energía de activación (Btu/lbmol)

$R$  = Constante de los gases 1.987(Btu/lbmol-R)

$T$  = Temperatura (°F)

$\rho_j$  = Densidad de la fase  $J$  (lbmol/pie<sup>3</sup>)

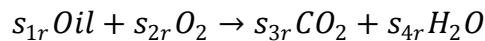
$S_j$  = Saturación de la fase  $J$

$X_{IJ}$  = Fracción molar del componente  $I$  en la fase  $J$

$n_{i,r}$  = orden de reacción  $r$  en el reactante  $J$

Para una mejor comprensión del uso de la ecuación 9 dentro de los balances de masa y energía, se considera una reacción de combustión ( $r$ ), de un componente pesado (denominado como 2) con oxígeno (componente denominado 6).

La estequiometría de reacción es la siguiente:



El coeficiente estequiométrico del primer reactante  $s_{1r}$  es 1 por definición. La velocidad de reacción en moles del primer reactante por día para el grid block es por lo tanto:

$$R_r \left( \frac{\text{moles de 2}}{\text{Dia}} \right) = V A_r e^{-\frac{1.8E_r}{RT}} (\phi \rho_2 S_2 x_{22})^{n_{1,r}} * (\phi \rho_3 S_3 x_{63})^{n_{2,r}}$$

Como se puede apreciar en la ecuación el término de concentración del primer reactante, corresponde a la densidad y saturación de la fase aceite multiplicada por la fracción molar del componente Crudo pesado (componente 2) en la fase aceite (fase 2) y todo elevado al orden de reacción del reactante 1 (Aceite).

Mientras que el término de concentración del segundo reactante, corresponde a la densidad y saturación de la fase gas (fase 3) multiplicada por la fracción molar del componente Oxígeno (componente 6) (Igualmente la concentración de oxígeno puede ser expresada en función de presión parcial) en la fase gas (fase 3) y todo elevado al orden de reacción del reactante 2 (oxígeno).

El calor de reacción estará dado por

$$H_r = R_r H_{r1}$$

$H_r$  = Calor de reacción para cada grid block (Btu/D)

$R_r$  = Velocidad de la reacción r en el grid block (lbmol de 1r reactante/D)

$H_{r1}$  = Calor de reacción del primer reactante, Btu/lbmol

Las velocidades de energía y de aparición de componentes (2-aceite, 6-gas, 3-Dioxido de carbono, 1-Agua) son:

$$q_{2r} = -R_r \left( \frac{mol}{D} \right)$$

$$q_{6r} = -s_{2r} R_r$$

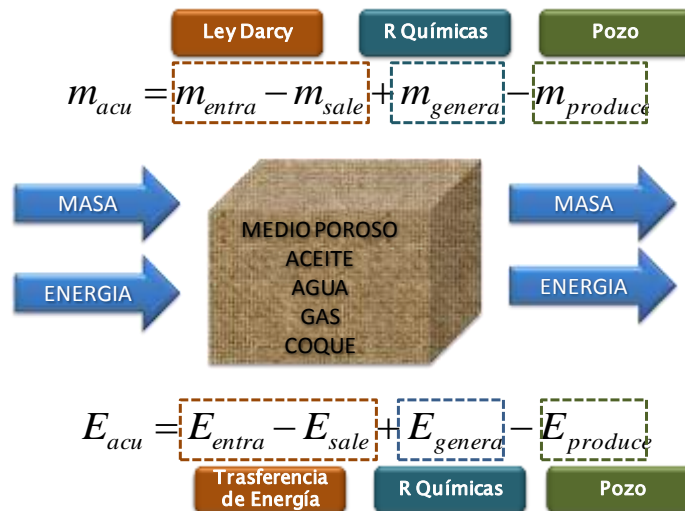
$$q_{3r} = s_{3r} R_r$$

$$q_{1r} = s_{4r} R_r$$

Por lo tanto:

$$q_{Nc+1,r} = H_r$$

**Figura A1.** Balance masa y energía por celdas en modelos numéricos para combustión in-situ



Fuente: el autor

De acuerdo a lo expuesto anteriormente la energía por día y la masa por día proveniente de las reacciones químicas, para cada celda de simulación son

asociadas a los balances y energía tal como se ilustra en los recuadros azules de la A1

## **DESAFIOS DEL MODELAMIENTO NUMERICO EN PROCESOS DE COMBUSTION IN-SITU**

Dentro de los principales problemas se destacan los relacionados con el tamaño del grid, dado que gracias a las reacciones químicas no se obtienen los mismos resultados al aplicar la simulación numérica a escala de laboratorio que a escala de campo, por otro lado los efectos en cuanto a la orientación del grid también juegan un papel importante, sobre todo cuando la relación de movilidades tiende a valores desfavorables.

Un gran desafío para un adecuado modelamiento constituye la elección y determinación del modelo de reacciones, puesto que de este dependerá en gran medida el comportamiento de quema del proceso; además de la representación de los diferentes mecanismos que ocurren en la realidad, tal es el caso de la adecuada representación de los efectos de las reacciones a baja temperatura (Low Temperature Oxidation – LTO) los cuales son causantes de la formación de asfáltenos, emulsiones y eventualmente coque.

Es necesario desatacar la importancia de establecer los parámetros cinéticos con pruebas adecuadas que me permitan obtener valores coherentes, puesto que se han dado casos en la literatura en los cuales por alcanzar un ajuste entre modelos de reacción, se establecen valores de energías de activación, órdenes de reacción y factores de frecuencia erróneos. Por último se recalca la importancia y limitantes que existen a la hora de modelar fenómenos de canalización y de la obtención del mínimo flujo de aire inyectado mediante simulación numérica.

## **IMPORTANCIA DE LA SIMULACIÓN NUMERICA DE PRUEBAS DE TUBO**

En la actualidad la simulación numérica de procesos de combustión in-situ ha adquirido un rol vital para el diseño de este tipo procesos, puesto que se cuentan

con hardware robusto que permite ejecutar métodos iterativos con menores tiempos de cómputo para la solución de ecuaciones de materia y energía que involucran reacciones químicas.

A partir de este tipo de simulaciones a escala de campo se espera tener una idea del desarrollo del frente de combustión y lógicamente realizar predicciones. Unas de las principales variables a predecir y/o determinar son las siguientes: la tasa de aire mínima para sostener el frente, la velocidad del frente, la eficiencia volumétrica de barrido, configuración de los pozos, recobro esperado, entre otras. Sin embargo para obtener y analizar estas variables, es necesario llevar a cabo un arduo y complejo trabajo en el que se ven involucradas las pruebas de tubo.

Para lograr el objetivo de modelar a escala de campo se debe contar con un adecuado modelo de reacciones, sin embargo para eso es necesario llevar a cabo diversas pruebas de laboratorio de tipo cinéticas cualitativas y cuantitativas como la pruebas RTO y ARC, entre otras. Estas permiten estudiar los diferentes régimen de reacción ya sean LTO, pirolisis y HTO; posteriormente se debe crear un modelo de reacciones y establecer parámetros cinéticos como factor de frecuencia y energía de activación necesarios para el modelo numérico el cual involucra la ecuación de velocidad de reacción.

Igualmente se debe contar con una buena caracterización de fluidos que permita agrupar el crudo en pseudo-componentes y de esta manera plantear un adecuado modelo de reacción. Una vez llevadas a cabo las pruebas cinéticas de tipo cualitativas se pueden calibrar mediante la creación de un modelo de simulación de una prueba RTO.

Posteriormente y una vez ajustada la prueba de tipo RTO se crea un modelo de simulación para una prueba de tubo con el fin de ajustar los resultados obtenidos con el modelo numérico y el modelo físico. Claro está que para esto, es necesario contar con un amplio presupuesto que permita llevar a cabo pruebas físicas de

tubo de combustión con la muestra representativa del campo potencial para la aplicación de CIS.

La finalidad de construir un modelo numérico de una prueba de tubo y realizar el ajuste histórico con el modelo físico, radica en que a partir de este y mediante ciertas técnicas expuestas en la literatura<sup>82</sup> es posible adaptar la cinética de la reacción a escala de campo con un menor grado de incertidumbre, que si se planteara un modelo de reacciones para trabajar directamente en campo sin tener ninguna historia de producción que permita realizar el respectivo ajuste de variables a esta escala.

Otro punto a favor de este tipo de modelos es que si bien las pruebas de tubo físicas tienen la finalidad de proporcionar un mayor entendimiento del comportamiento de quema y en general del proceso, dada su inherente complejidad y costo no es fácil contar con estas pruebas en Colombia, por lo tanto la simulación numérica ofrece una importante alternativa para continuar aportando nuevas hipótesis a partir de investigaciones desarrolladas en claustros universitarios y centros de investigación que no cuentan con este tipo de laboratorios.

---

<sup>82</sup> MARJERRISON, D. FASSIHI, M. "A procedure for Scaling Heavy –Oil Combustion Tube Results". Amoco Production Co. SPE 24175. April 1992

## ANEXO 2. DESCRIPCIÓN DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD MEDIANTE DISEÑO FACTORIAL FRACCIONAL $2^{K-P}$

En el análisis de sensibilidad mediante diseño de tipo factorial completo, a cada variable se le asigna un valor mínimo y un máximo, el cual representa el rango en el que se evaluará dicha variable, empleando de esta manera todas las posibles combinaciones dependiendo el número de factores involucrados y el diseño experimental empleado (por esto es llamado diseño factorial de segundo nivel  $2^k$ ). Por ejemplo si se consideran 7 factores, un diseño factorial exigiría la realización de  $2^7 = 128$  experimentos, sin embargo tal volumen de experimentos, en la mayoría de las ocasiones resultaría prohibitivo. Sin embargo los diseños factoriales fraccionales permiten estudiar un elevado número de factores en un número de experimentos mucho menor que lo requeriría un factorial completo.

Un diseño  $2^7$  implica realizar 128 experimentos, por lo tanto se cuenta con 128 grados de libertad que permiten estimar 128 efectos de la siguiente manera: 7 efectos principales, 21 interacciones de 2 factores, 35 interacciones de 3 factores, 35 interacciones de 4 factores, 21 interacciones de 5 factores, 7 interacciones de 6 factores y 1 interacción de 7 factores. En la práctica es poco usual que surjan interacciones de tres o más factores que resulten ser significativas, por lo tanto se pueden llegar a obtener modelos suficientemente aproximados considerando solo los efectos principales y las interacciones de dos factores.

Es posible entonces prescindir de parte de la información que proporciona un diseño  $2^7$  completo y esto permite a su vez prescindir de la realización de algunos experimentos. Para estudiar los efectos de interés, será suficiente llevar a cabo un parte (fracción) del diseño completo. Estos diseños reciben el nombre de: diseños factoriales fraccionales o simplemente diseños fraccionales. Para los diseños fraccionales se utiliza la notación  $2^{k-p}$ , donde 2 sigue siendo el número de niveles, k el número de factores con los que se experimentará y la letra p indica el grado

de fraccionamiento, de tal manera que el resultado de elevar 2 a k-p indica el número de experimentos que se van a realizar. Tomando como ejemplo un experimento fraccional de segundo nivel  $2^{7-1}$ , este permitirá estudiar 7 variables en 64 experimentos. Suponiendo que todas las interacciones de cuarto orden o superior serán cero, permitirá estimar los efectos principales y las interacciones de segundo y tercer orden.

Una justificación importante para la realización de diseños factoriales fraccionales radica en el principio de Pareto, el cual enuncia que cuando en las fases iniciales de una experimentación se incluye un número elevado de factores se suele cumplir que unos pocos son responsables de la mayor parte de variaciones en la respuesta (escasos efectos significativos), mientras que la mayoría de factores producen cambios en la respuesta de menor cuantía. Cuando esto ocurre los diseños fraccionales permiten estudiar de manera completa los efectos de las variables activas.

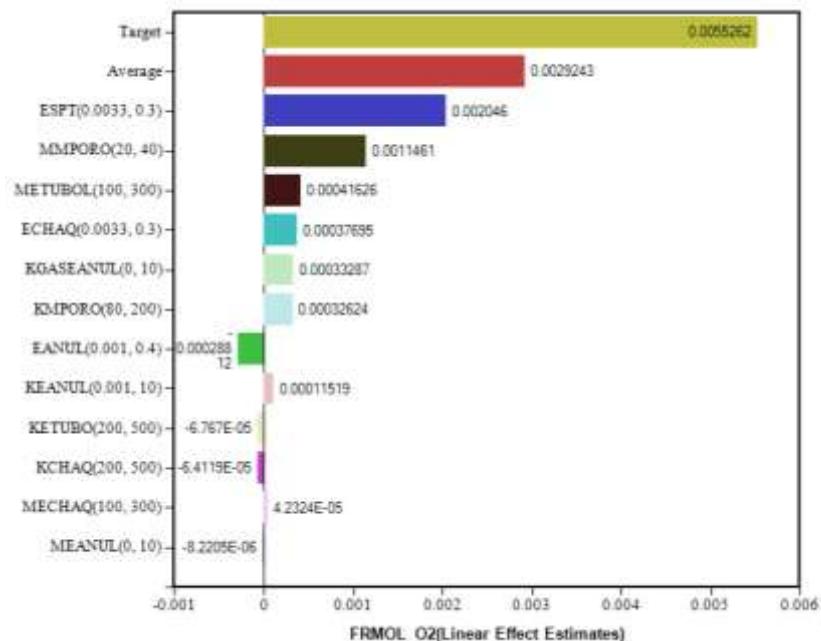
Una vez que se llevan a cabo los diferentes experimentos es posible obtener los resultados en tablas o diagramas de tornado que permiten determinar la influencia de las variables de estudio sobre las funciones objetivo. Por ejemplo si se desea estimar el efecto que tienen 12 variables sobre la función objetivo, fracción molar de oxígeno producido, mediante un diseño experimental factorial fraccional de segundo nivel ( $2^{12-6}$ ) se deberán llevar a cabo 64 corridas experimentales. Como es de segundo nivel el diseño, es necesario que para cada variable de las 12 a evaluar se establezca el rango de evaluación, un valor mínimo y un máximo, denotados por (-x) y (+x) respectivamente, por lo tanto el valor reportado en un diagrama de tornado (y) es calculado por la sustracción del promedio de la función objetivo cuando se utiliza el valor mínimo del parámetro y el promedio del valor de la función objetivo cuando se utiliza el valor máximo del parámetro, tal como se presenta en la siguiente ecuación.

$$y = \text{Funcion Objetivo } (+x) - \text{Funcion Objetivo } (-x)$$

Una diferencia significativa entre las dos medias indica que el parámetro es importante porque genera un cambio significativo en la respuesta de la función objetivo. Si el resultado es negativo (-) el efecto está influenciado por el valor mínimo, pero si el valor es positivo (+) se verá afectado por el valor máximo.

En la figura B1 se presenta un diagrama tornado ejemplo de diseño factorial fraccional del tipo ( $2^{12-6}$ ), para estimar el efecto de 12 variables sobre la fracción molar del oxígeno producido. El valor de cada barra de colores corresponde a  $y$  en la ecuación anterior y se puede observar que en este caso la variable ESPT la cual varía entre un valor mínimo 0.0033 y 0.3 dando resultado un  $y=0.002046$  positivo fue la variable de mayor influencia; además es posible verificar que el valor máximo permitirá un mayor fracción molar de oxígeno, lo contrario sucede con la variable EANUL la cual influye de manera negativa sobre la producción de oxígeno.

**Figura B1.** Ejemplo diagrama de tornado



Fuente: Computer Modelling Group (CMG)

Es importante recalcar que existen diferentes maneras de presentar los resultados y por lo tanto el diagrama de tornado; puesto que si se cuenta con los archivos históricos es posible presentar los diagramas en función del porcentaje de influencia sobre cada variable objetivo. El porcentaje de influencia se obtiene a partir de la diferencia (y) de la función objetivo promedio para el valor mínimo (-x) y máximo (+x) de cada parámetro estudio, con respecto al objetivo o archivo histórico. Lo anterior resulta de gran utilidad para llevar a cabo ajustes históricos. En la presente investigación se presentaron los resultados en función del porcentaje de influencia.