

**EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN DE INYECCIÓN AGUA-AIRE CRÍTICA PARA  
UN PROCESO DE COMBUSTIÓN *IN SITU* HÚMEDA A PARTIR DE PRUEBAS  
DE TUBO DE COMBUSTIÓN**

**NADIA SOFÍA MACÍAS VERA**

**ALBERTO RAÚL PINZÓN DÍAZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELAS DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA  
2015**

**EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN DE INYECCIÓN AGUA-AIRE CRÍTICA PARA  
UN PROCESO DE COMBUSTIÓN *IN SITU* HÚMEDA A PARTIR DE PRUEBAS  
DE TUBO DE COMBUSTIÓN**

**NADIA SOFÍA MACÍAS VERA**

**ALBERTO RAÚL PINZÓN DÍAZ**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero Químico**

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de  
Ingeniero de Petróleos**

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

**Ing. JAIR FERNANDO FAJARDO ROJAS  
Codirector**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELAS DE INGENIERÍA QUÍMICA E INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA  
2015**

## DEDICATORIA

*En primer lugar, a Dios por llenar mi vida de tantas bendiciones, por iluminarme y guiarme por el buen camino, porque con Él siempre se puede contar y es el mejor confidente. Por llenarme de fortaleza, alegría y tranquilidad en todo momento y rodearme siempre de maravillosas personas. A Él Infinitas gracias.*

*A mis padres, Efraín Macias y Lina Margarita Vera, que con mucho esfuerzo y dedicación han logrado hacer de mí una persona con bonitos valores y fuertes principios gracias al ejemplo que me dan día a día. Ustedes son la prueba de que con amor, respeto, honestidad, dedicación y siempre de la mano de Dios se puede lograr cualquier cosa. Creo que no hay en el mundo una pareja de esposos que se ame tanto y hagan tan buen equipo en todo y eso es lo que nos han inculcado. Soy la hija más feliz y orgullosa de sus padres, realmente son un ejemplo de vida, los amo como de aquí hasta el infinito, gracias por llenarme de tanto amor, por consentirme, apoyarme y guiarme en cada decisión. Son los mejores padres que alguien pueda tener, los amo y esto es por ustedes y para ustedes. Espero hacerlos sentir muy orgullosos y felices siempre. Creo que no me alcanzaré la vida para retribuirles todo lo que me han dado y lo que me han enseñado. Enserio son los mejores, los amo, los amo, los Amooooo!!!!!!*

*A mi hermanito, Camilo Alejandro, porque siempre ha estado a mi lado, desde chiquitos para jugar, pelear y molestarme mucho, creo que gracias a eso soy esa persona tan paciente.... Hermano ya así haga lo que haga no me pongo brava con usted, así se ponga cansón y fastidioso, creo que me volví inmune a eso. No imagino mi vida sin usted, hubiese sido muy aburrida. Sabe que puede contar conmigo como siempre. Lo quiero muchísimo y admiro demasiado.... Siempre será mi hermanito menor y estaré pendiente de cualquier cosa que necesite. Un Beso y un súper abrazo.*

*A mis nonos, Edulfo y Jacinta, y Efraín y María, porque son los mejores nonos del mundo. A mis nonos Edulfo y Jacinta les agradezco por acogerme y ser como mis papas en mis dos primeros años de universidad, por prestarme la casa para celebrar los cumpleaños de todos mis amigos o cualquier evento social jaja. A mis nonos Efraín y María por estar siempre pendientes de mí y todos los nietos, porque hacen que ir a Bogotá sea excelente a pesar del frío, por las reuniones familiares viéndolos bailar. A mis cuatro nonos por ser tan alcahuetas y quererme tanto. Los quiero mucho.*

*A todos mis tíos: tío chiqui, tía albita, tía yazmín, siempre han estado conmigo, queriéndome, consintiéndome, cuidándome. Gracias por tanto amor. A mi tío Fabio,*

*tío Fernando y tía Deisy que a pesar de la distancia siempre los siento en mi corazón.*

*A mis primitos: Jotica, el Tomito y Salomé, los bebés de la familia que sin lugar a dudas son la alegría de mi vida y de mi corazón, los amo demasiado a los tres. Y a todos mis primos y a toda mi familia que es bastante grande pero cada uno es una parte importante en mi vida.*

*A mi mejor amigo, que más que mi amigo es como un hermano, mi colega, mi todo.*

*Sabrosky, Melito papacito... bby tienes un espacio gigante en mi mente y en mi corazón, tantas cosas que vivimos en el cole: jugando vóley, estudiando química, rumbeando y lo mejor es que a pesar de que no nos vemos hace más de dos años, nuestra amistad sigue igual. Te amo melito. Ya casi ingenieros químicos... un beso y un abrazo de oso.*

*A todos los amigos que hicieron parte en esta etapa de mi vida, primero que todo a*

*Maloon, mi luz, jised, July, Camilin, Enriqueto, Francitilla y Gisselilla, mis primeros amigos en la U, la amistad que hicimos es única e inquebrantable, una amistad que empezó como un grupo de estudio y finalmente se convirtió en el combo ternura de IQ, que no es por nada pero es el mejor de los combos, una amistad pura, sincera y duradera. Sin ustedes este libro no existiría. Niños los quiero muchísimo a todos. A Giina, la titu, Omitar, Alejin y Chucho, son amigos que llegaron para quedarse, cada uno tiene un pedacito de mi corazón. Bebimos, rumbeamos, molestamos, trasnochamos estudiando y aquí estamos, ingenieros y futuros ingenieros. Los quiero mucho.*

*A todas las niñas que hicieron parte del equipo campeón de interroscas, un campeonato para no olvidar, lleno de alegría, amistad y frases que quedaran por siempre en mi memoria. A enlace universitario (EOU), lugar donde después de una larga semana de estudio nos sentábamos a compartir, reír y disfrutar.*

*Finalmente, quiero dedicarle esto a mi carito, carroloco, karenina, mi pinga hermosa.*

*Diosito te llamó muy rápido para estar con Él, pero siempre estarás presente en mi vida, en cada cosa que haga. Es un vacío grande el que dejaste pero sé que eres el angelito que me cuida, esa risa contagiosa jamás se me va a olvidar. Te amo mi Caro!*

*Nadía Sofía Macías Vera*

## DEDICATORIA

*A Dios primero que todo, por llenarme de bendiciones, de sabiduría, de paciencia y por iluminarme el camino en los momentos difíciles. Gracias por mi vida, mi familia, mis amigos, mi alma máter y por regalarme cada mañana un día más de vida.*

*A mis padres Ana y Miguel, por su total apoyo, sus valiosas enseñanzas y consejos, por todos los esfuerzos y sacrificios que hicieron para que yo estuviera bien a lo largo de estos años. Gracias por el amor y confianza incondicional que me han brindado durante toda mi vida, por estar ahí en cada momento, por educarme con excelentes bases morales, por hacer de mí un hombre de bien, me siento bendecido día a día por tener a unos seres tan maravillosos como ejemplo a seguir y solo espero hacerlos sentir orgullosos con cada logro que alcance en mi vida. Ustedes demuestran día a día que con amor y dedicación se construye una hermosa familia, son unos excelentes padres y una cariñosa e incondicional pareja, los amo.*

*A mi abuelita Anita, quien desde diciembre guía mi camino desde el cielo. Gracias por ser la abuelita consentidora y cariñosa, hoy me siento triste de que no hayas alcanzado a compartir conmigo la alegría de recibir mi título profesional, pero este triunfo es por ti. Te extraño abuelita.*

*A mi hermana Stefanía, la nena, linda e inteligente. Gracias por ser ese ejemplo de hermana mayor, por ser cariñosa en todo momento y corregirme con fortaleza cuando fue necesario, por una infancia llena de risas y alegrías, por ser la mujer que me llena de orgullo. Porque aunque peleábamos de niños, te molestaba y fuera insoportable, siempre fuiste paciente y nunca deje de ser el “neneco” o “nenequín” para ti. No imagino la vida sin ti, porque eres una mujer persistente y que no se da por vencida. Eres mi heroína, mi motivación, la segunda mujer que más amo. Aún lo sigo repitiendo, cuando sea grande quiero ser una persona como tú, te quiero mi china.*

*A mi hermano Miguel, mi mejor amigo, confidente, compañero y rival. Gracias por la maravillosa infancia que tuvimos, por los juegos, las risas, los llantos, por ganarnos juntos tantos correazos de nuestros padres y por hacerme ganar otros a mi solito. Eres la persona más parecida a mí, que comparte mis gustos, el cine, la televisión, el tipo de mujeres, la pasión por el fútbol, el amor por Santa Fé y un sin número de cosas más. Gracias por ser tan comprensivo, porque solo contigo puedo pasar del fastidio a los abrazos, nunca nos dura un mal genio más de cinco minutos. Mi chino te quiero con todo mi corazón, gracias por ser mi hermano del alma.*

*A mi tía Mary, mi segunda mamá, por ser ese ejemplo de lucha y perseverancia. Siempre has sido para nosotros mucho más que una tía. Ni el cáncer pudo contigo, eres una mujer guerrera que siempre vence los obstáculos y supera las adversidades. Te quiero mucho.*

*A mis amigos, Roger, Karoll, Andrés, El negro, Didier, Edson, Sergio, Daniel, El gordo, Jordan, Verano, Xiomara y todos los que se me escapan, porque estando lejos de casa su compañía fue fundamental, hicieron que fuera más fácil vivir solo, ustedes se volvieron mi segunda familia.*

*A Camila, la boba, por esa calidad humana y ternura desbordantes. Gracias por ser una persona incondicional, por apoyarme en todos mis caprichos, por tu compañía y lealtad, porque a pesar de las adversidades siempre puedo contar con que me estarás esperando para darme esos abrazos que solo tú sabes dar. Eres un gran complemento, me siento como tú hermano mayor, brindándote esa rudeza y fortaleza que necesitas y recibiendo de ti ese cariño y ternura. Desde que nos conocimos formamos el trío de “cachanillas” con Julito, realmente extraño esos días de borrachera y estudio, de desorden y de risas, aquellas tardes y noches en que mi cama quedaba corta para los tres y era necesario tirar al piso a Camila, jajaja. A Julito, el que sabía corromperme y dañarme, gracias por compartir conmigo esas tardes de desorden y licor, pero sobre todo porque en los momentos de seriedad estudiábamos de la mejor manera, con nuestras fases saiyajin, fuimos los cachas, con compañerismo y amistad totales. A ustedes dos, gracias por estos cinco años de incondicionalidad.*

*A toda la familia GRM, por permitirme el mejor año de mi vida académica. Fue muy grato trabajar entre risas, porque el bullying se hizo necesario en la oficina. Gracias a todas las personas que con un consejo, una opinión o un ejemplo aportaron ese granito de arena que permitió que el trabajo llegará a buen término. A Fernando por sus valiosas correcciones y guía, por aclararme conceptos y permitirme ser parte de la línea de inyección de aire, gracias por la codirección y las risas. A Xiomara, Sindy, Luis Carlos, por permitirnos el buen ambiente en la oficina. A Chucho, Felipe, Ruben y principalmente a Quiceno, gracias por los valiosos consejos cuando aún no sabía simular ni tenía un conocimiento profundo de CMG. A Andrés “isoconversional” Vargas, por compartir ese gusto por la ingeniería de yacimientos y por crecer como investigadores complementándonos con nuestros respectivos trabajos. En general a todos los integrantes de GRM.*

*Alberto Raúl Pinzón Díaz*

## **AGRADECIMIENTOS**

A nuestros padres por el apoyo incondicional.

A la Universidad Industrial de Santander, nuestra alma máter, por formarnos como excelentes personas y profesionales integrales.

A la planta docente de las escuelas de Ingeniería Química e Ingeniería de Petróleos, por contribuir con sus enseñanzas y conocimientos en nuestra formación académica y personal.

Al Instituto Colombiano del Petróleo y a todos los ingenieros a cargo de la dirección de este proyecto, por su apoyo y colaboración.

Al profesor Samuel Muñoz por su exigencia, sus sugerencias y consejos que permitieron la calidad del trabajo realizado.

A los ingenieros Jorge Palma y Luis Oliveros por sus valiosos aportes en simulación numérica de yacimientos, por sacar unos minutos de su tiempo para escucharnos y aconsejarnos.

De manera especial, agradecemos al Ing. Fernando Fajardo, nuestro codirector por estar siempre presente, apoyándonos, guiándonos y molestando también, haciendo que trabajar en el grupo fuese siempre agradable. Por cada uno de los regaños que recibimos pues también fueron parte importante en nuestra formación. Gracias por todo.

A todos nuestros compañeros del GRM por sus consejos y recomendaciones, por todos los momentos divertidos que hicieron ameno el desarrollo de este trabajo, por su apoyo, colaboración y ánimo cuando las cosas se tornaron difíciles.

Agradecemos sinceramente y de corazón a todas aquellas personas que en algún momento nos dieron un gesto de sincero apoyo e hicieron posible la realización de este excelente proyecto.

Infinitas gracias a todos.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	26
1. FUNDAMENTOS DE LA COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i> HÚMEDA .....	28
1.1. GENERALIDADES DE LA COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i> .....	28
1.2. SCREENING DE APLICACIÓN.....	29
1.3. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE PROCESO DE COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i> .....	31
1.4. CLASIFICACIÓN DE LA COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i> .....	32
1.4.1. Combustión frontal.....	32
1.4.2. Combustión en reversa.....	39
1.5. REACCIONES QUÍMICAS ASOCIADAS AL PROCESO .....	39
1.5.1. Reacciones de oxidación a baja temperatura (LTO).....	40
1.5.2. Reacciones de oxidación a temperatura intermedia (IT) .....	41
1.5.3. Reacciones de oxidación a alta temperatura (HTO) .....	41
1.5.4. Reacciones de acuatermólisis .....	42
1.6. PARAMETROS OPERACIONALES Y DE YACIMIENTO MÁS INFLUYENTES EN UN PROCESO DE COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i> HÚMEDA.....	43
1.6.1. Parámetros operacionales.....	44
1.6.2. Parámetros de yacimiento .....	50
1.7. PRUEBAS DE LABORATORIO.....	56
1.7.1. Prueba de celda cinética.....	57
1.7.2. Prueba RTO.....	59
1.7.3. Prueba de tubo de combustión.....	61
2. PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN HÚMEDA .....	62
2.1. GENERALIDADES DE LA PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN .....	62

2.2. MONTAJE EXPERIMENTAL DE UNA PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN.....	64
2.3. PROCEDIMIENTO GENERAL DE UNA PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN .....	68
2.4. PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN HÚMEDA PARA UN CAMPO COLOMBIANO .....	69
2.4.1. Análisis de resultados.....	69
3. MODELO BASE DE SIMULACIÓN DE UNA PRUEBA DE TUBO PARA UNA MUESTRA REPRESENTATIVA DE UN CAMPO COLOMBIANO.....	76
3.1. CONSTRUCCIÓN CASO BASE DE SIMULACIÓN PARA LA MUESTRA REPRESENTATIVA N&R .....	76
3.1.1. Definición del enmallado del caso base.....	76
3.1.2. Propiedades térmicas y petrofísicas del sistema .....	78
3.1.3. Modelo de fluidos.....	79
3.1.4. Modelo de reacciones.....	82
3.1.5. Propiedades de interacción roca-fluidos.....	84
3.1.6. Definición del calendario de inyección – producción .....	86
3.1.7. Ubicación de termocuplas – caso base .....	88
3.2. VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS – CASO BASE DE SIMULACIÓN .....	89
3.3. UBICACIÓN CALENTADORES ELECTRICOS – CASO BASE .....	94
4. AJUSTE DE LA PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN <i>IN SITU</i> HÚMEDA APLICADA A UN CRUDO COLOMBIANO .....	97
4.1. MODIFICACIÓN DE LA TASA DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE LOS CALENTADORES.....	97
4.2. MODIFICACIÓN DE LAS PERMEABILIDADES ABSOLUTA Y RELATIVA	103
4.3. RESULTADOS DE LA CELDA CINÉTICA AJUSTADA AL MODELO .....	108
4.4. MODIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS CINETICOS DE LA REACCIÓN HTO110	
4.5. RESULTADOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA AJUSTADO A LA PRUEBA.....	112

4.5.1. Perfiles de temperatura .....	112
4.5.2. Temperaturas máximas .....	117
4.5.3. Posición del frente de combustión .....	117
4.5.4. Composición de los gases efluentes .....	121
4.5.5. Factor de recobro .....	124
4.5.7. Cantidad total de gas producido .....	127
4.6. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO .....	128
5. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE INYECCIÓN AGUA – AIRE CRÍTICA PARA LA PRUEBA AJUSTADA.....	134
5.1. AUMENTO DEL CAUDAL DE AGUA .....	135
5.2. DISMINUCIÓN DEL CAUDAL DE AIRE .....	138
5.2.1. Parámetros de desempeño relación crítica.....	141
5.3. OPTIMIZACIÓN DE LA TASA CRÍTICA .....	143
5.3.1. Parámetros de desempeño relación óptima .....	145
5.3.2. Comparación parámetros de desempeño prueba ajustada, relación crítica y relación óptima.....	148
6. CONCLUSIONES.....	151
7. RECOMENDACIONES .....	152
BIBLIOGRAFÍA.....	153
ANEXOS.....	156

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Esquema de la combustión in situ en modo seco .....	34
<b>Figura 2.</b> Diferentes tipos de Combustión Húmeda .....	36
<b>Figura 3.</b> Diagrama combustión in situ húmeda.....	37
<b>Figura 4.</b> Contenido de combustible Vs Grados API.....	45
<b>Figura 5.</b> Contenido de combustible vs temperatura de combustión .....	46
<b>Figura 6.</b> Requerimiento de Aire Vs Grados API.....	47
<b>Figura 7.</b> Tiempo para alcanzar la temperatura de combustión a diferentes caudales .....	48
<b>Figura 8.</b> Propagación del frente en una arena delgada .....	51
<b>Figura 9.</b> Propagación del frente en una arena gruesa.....	51
<b>Figura 10.</b> Canalización del aire.....	52
<b>Figura 11.</b> Buzamiento arriba.....	54
<b>Figura 12.</b> Buzamiento abajo .....	55
<b>Figura 13.</b> Patrones de pozos más usados.....	56
<b>Figura 14.</b> Metodología aplicada para un proceso de combustión in situ húmeda.....	57
<b>Figura 15.</b> Montaje experimental de las pruebas RTO.....	60
<b>Figura 16.</b> Montaje para la prueba de tubo de combustión .....	65
<b>Figura 17.</b> Tubo de combustión .....	67
<b>Figura 18.</b> Caudal de inyección de aire durante la prueba.....	70
<b>Figura 19.</b> Perfiles de temperatura de las termocuplas externas e internas de las 15 zonas del tubo de combustión .....	71
<b>Figura 20.</b> Composición de los gases producidos.....	72
<b>Figura 21.</b> Velocidades de los frentes de combustión.....	73
<b>Figura 22.</b> Configuración del grid de simulación .....	77
<b>Figura 23.</b> Bo Vs Presión .....	81
<b>Figura 24.</b> Densidad Vs Presión .....	81
<b>Figura 25.</b> Viscosidad Vs Temperatura .....	82
<b>Figura 26.</b> Permeabilidad relativa Vs Saturación de aceite .....	86
<b>Figura 27.</b> Calendario inyección - producción .....	87

<b>Figura 28.</b> Tubo de combustión con termocuplas .....	88
<b>Figura 29.</b> Perfiles de temperatura – Caso base.....	90
<b>Figura 30.</b> Comparación perfiles de temperatura TC 1 - caso base – prueba ICP	91
<b>Figura 31.</b> Comparación O <sub>2</sub> producido- caso base- prueba ICP .....	92
<b>Figura 32.</b> Comparación CO <sub>2</sub> producido- caso base- prueba ICP .....	93
<b>Figura 33.</b> Comparación posición del frente en el tiempo- caso base- prueba ICP .....	93
<b>Figura 34.</b> Vista lateral 2D. Tubo de combustión con calentadores .....	96
<b>Figura 35.</b> Comparación perfiles TC 1 – tasas de 50 y 20 Btu/h – Prueba ICP ....	99
<b>Figura 36.</b> Temperaturas máximas tasa 100 Btu/h apagando en inyección de agua .....	100
<b>Figura 37.</b> Comparación perfil de temperatura TC 1 - tasa de 100 Btu/h apagando en 6.5 h – Prueba ICP .....	101
<b>Figura 38.</b> Temperaturas máximas tasa 100 Btu/h apagando en 6.5 h .....	102
<b>Figura 39.</b> Posición del frente de combustión en el tiempo tasa de 100 Btu/h apagando en 6.5 h.....	103
<b>Figura 40.</b> Posición frente de combustión en el tiempo a diferentes permeabilidades .....	104
<b>Figura 41.</b> Visualización de la permeabilidad variable en el grid de simulación .	105
<b>Figura 42.</b> Posición del frente en el tiempo – permeabilidad entre 30 y 12000 md .....	106
<b>Figura 43.</b> Curva permeabilidad relativa Vs Saturación de líquido, caso base ...	107
<b>Figura 44.</b> Curva permeabilidad relativa Vs Saturación de líquido, caso modificado .....	107
<b>Figura 45.</b> Producción de CO <sub>2</sub> en una celda cinética.....	109
<b>Figura 46.</b> Composición de CO en una celda cinética .....	110
<b>Figura 47.</b> Perfiles de temperatura ajuste final.....	113
<b>Figura 48.</b> Perfil de temperatura primera termocupla ajuste final.....	113
<b>Figura 49.</b> Perfil temperatura termocupla 4 ajustada .....	114
<b>Figura 50.</b> Perfil temperatura termocupla 7 ajuste final.....	115
<b>Figura 51.</b> Perfil de temperatura termocupla 10 ajuste final.....	115
<b>Figura 52.</b> Perfil temperatura termocupla 13 ajuste final.....	116

<b>Figura 53.</b> Temperaturas máximas ajuste final .....	117
<b>Figura 54.</b> Posición del frente en el tiempo ajuste final .....	118
<b>Figura 55.</b> Composición CO <sub>2</sub> producido ajustado .....	122
<b>Figura 56.</b> Composición CO producido ajuste final .....	123
<b>Figura 57.</b> Composición O <sub>2</sub> producido ajuste final .....	124
<b>Figura 58.</b> Factor de recobro ajuste final.....	125
<b>Figura 59.</b> Comparación Cantidad aire inyectado prueba ICP – modelo ajustado .....	126
<b>Figura 60.</b> Comparación caudal de aire inyectado prueba ICP, modelo ajustado .....	127
<b>Figura 61.</b> Comparación Cantidad de gas producido prueba ICP, modelo ajustado .....	128
<b>Figura 62.</b> Posición del frente de combustión en el tiempo a diferentes tasas de inyección de agua.....	136
<b>Figura 63.</b> Factor de recobro a diferentes tasas de inyección de agua.....	137
<b>Figura 64.</b> Posición del frente en el tiempo para diferentes tasas de inyección de aire.....	139
<b>Figura 65.</b> Validación de la tasa de 1705 ml/min de aire como tasa crítica.....	140
<b>Figura 66.</b> Posición del frente de combustión en el tiempo para la tasa óptima .	144
<b>Figura 67.</b> Comparación factor de recobro entre relación óptima, crítica y ajuste final .....	146
<b>Figura 68.</b> Ubicación de las termocuplas en el simulador .....	156
<b>Figura 69.</b> Grid de simulación IK-2D .....	158
<b>Figura 70.</b> Heat Transfer Rate .....	159
<b>Figura 71.</b> Tasa de transferencia de calor.....	160
<b>Figura 72.</b> Apagar los calentadores .....	161
<b>Figura 73.</b> Coeficiente de transferencia de calor.....	162
<b>Figura 74.</b> Encendido de los calentadores .....	163
<b>Figura 75.</b> Set Point de temperatura .....	165

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Propiedades de campos con proyectos realizados de combustión <i>in situ</i> . .....	29
<b>Tabla 2.</b> Continuación propiedades de campos con proyectos realizados de combustión <i>in situ</i> . .....	30
<b>Tabla 3.</b> Screening de aplicación para proyectos de combustión <i>in situ</i> . .....	31
<b>Tabla 4.</b> Parámetros cinéticos .....	43
<b>Tabla 5.</b> Procedimiento de la prueba de celda cinética. .....	57
<b>Tabla 6.</b> Cantidad de gases de combustión producidos. .....	74
<b>Tabla 7.</b> Parámetros de desempeño en modo húmedo .....	74
<b>Tabla 8.</b> Masa introducida al reactor .....	75
<b>Tabla 9.</b> Masa recuperada .....	75
<b>Tabla 10.</b> Dimensiones del grid de simulación .....	77
<b>Tabla 11.</b> Descripción del <i>grid</i> de simulación .....	78
<b>Tabla 12.</b> Propiedades térmicas del sistema .....	79
<b>Tabla 13.</b> Propiedades petrofísicas del sistema .....	79
<b>Tabla 14.</b> Composición del aceite .....	80
<b>Tabla 15.</b> Propiedades de los componentes del aceite .....	80
<b>Tabla 16.</b> Parámetros cinéticos caso base .....	84
<b>Tabla 17.</b> End points curvas de permeabilidad relativa .....	85
<b>Tabla 18.</b> Calendario inyección – producción .....	87
<b>Tabla 19.</b> Valores modificados de la permeabilidad relativa .....	108
<b>Tabla 20.</b> Ajuste final parámetros cinéticos reacción HTO .....	112
<b>Tabla 21.</b> Velocidad del frente de combustión prueba ICP .....	119
<b>Tabla 22.</b> Velocidad del frente de combustión modelo ajustado .....	120
<b>Tabla 23.</b> Comparación velocidad del frente de combustión prueba ICP – modelo ajustado .....	121
<b>Tabla 24.</b> Parámetros de desempeño prueba ICP .....	129

<b>Tabla 25.</b> Volumen gases producidos – ajuste .....	130
<b>Tabla 26.</b> Aire inyectado y volumen barrido del reactor – ajuste .....	130
<b>Tabla 27.</b> Parámetros de desempeño prueba ajustada.....	131
<b>Tabla 28.</b> Comparación parámetros de desempeño prueba ICP – prueba ajustada .....	132
<b>Tabla 29.</b> Velocidad del frente de combustión para la tasa crítica antes y después de la falla del controlador.....	141
<b>Tabla 30.</b> Volumen gases producidos – crítica.....	142
<b>Tabla 31.</b> Aire inyectado y volumen barrido del reactor – crítica .....	142
<b>Tabla 32.</b> Parámetros de desempeño relación de inyección crítica .....	142
<b>Tabla 33.</b> Velocidad del frente de combustión relación óptima para antes y después de la falla del controlador .....	145
<b>Tabla 34.</b> Volumen gases producidos – crítica.....	146
<b>Tabla 35.</b> Aire inyectado y volumen barrido del reactor – crítica .....	146
<b>Tabla 36.</b> Parámetros de desempeño tasas de agua y aire óptimas.....	147
<b>Tabla 37.</b> Comparación parámetros de desempeño prueba ICP, Relación crítica, óptima .....	149
<b>Tabla 38.</b> Posición de las termocuplas en el simulador.....	157
<b>Tabla 39.</b> Correlaciones para ajuste de tasa de asentamiento de un cuarto.....	217

## LISTA DE ECUACIONES

	<b>Pág.</b>
<b>Ec 1.</b> Reacción LTO.....	41
<b>Ec 2.</b> Reacción IT .....	41
<b>Ec 3.</b> Reacción HTO .....	42
<b>Ec 4.</b> Reacción acuatermólisis.....	43
<b>Ec 5.</b> Correlación de Chu.....	46
<b>Ec 6.</b> Presión de inyección .....	49
<b>Ec 7.</b> Modelo de reacciones .....	83
<b>Ec 8.</b> Tasa de aumento de calor .....	95
<b>Ec 9.</b> Modelo de reacción con CO .....	111
<b>Ec 10.</b> Carbono quemado.....	166
<b>Ec 11.</b> Gas ideal .....	166
<b>Ec 12.</b> Convertir volumen a moles.....	167
<b>Ec 13.</b> Oxígeno consumido.....	168
<b>Ec 14.</b> Hidrogeno consumido.....	171
<b>Ec 15.</b> Moles de oxígeno consumidas para producir agua .....	171
<b>Ec 16.</b> Agua producida .....	172
<b>Ec 17.</b> Combustible consumido .....	173
<b>Ec 18.</b> Relación H - C .....	174
<b>Ec 19.</b> Requerimiento de combustible .....	174
<b>Ec 20.</b> Requerimiento de aire .....	175
<b>Ec 21.</b> Relación aire - combustible .....	176
<b>Ec 22.</b> Relación oxígeno - combustible.....	177

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO A. PROCEDIMIENTO PARA LA UBICACIÓN DE TERMOCUPLAS Y CALENTADORES ELÉCTRICOS EN EL SIMULADOR STARS .....</b>	<b>156</b>
<b>ANEXO B. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO.....</b>	<b>166</b>
<b>ANEXO C. CONTROLADORES.....</b>	<b>213</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS

<b>CIS</b>	Combustión <i>in situ</i>
<b>WAR</b>	Relación de inyección agua – aire
<b>LTO</b>	Oxidación a bajas temperaturas
<b>IT</b>	Temperatura intermedia
<b>HTO</b>	Oxidación a altas temperaturas
<b>ICP</b>	Instituto Colombiano del Petróleo
<b>CMG</b>	Computer Modelling Group
<b>BS&amp;W</b>	Sedimento Básico y Agua
<b>HEATR</b>	Tasa de transferencia de calor
<b>TMPSET</b>	Set point de temperatura
<b>UHTR</b>	Coeficiente de transferencia de calor
<b>PCS</b>	Pies cúbicos estándar
<b>MMPCS/acre-pie</b>	Millones de pies cúbicos estándar por acre pie
<b>BBL</b>	Barril
<i>CP</i> (l)	Crudo pesado en fase líquida
<i>CL</i> (l)	Crudo liviano en fase líquida

## NOMENCLATURA

$R.A$	Requerimiento de aire, $MMPCS/acre-pie$ ( $m^3/m^3$ )
$h$	Espesor, $pie$ ( $m$ )
$S_o$	Saturación de aceite, <i>fracción</i>
$k$	Permeabilidad, $md$
$P_{iw}$	Presión de inyección, $psia$
$P_w$	Presión del pozo productor, $psia$
$T$	Temperatura, $^{\circ}F$ ( $^{\circ}C$ )
$i_a$	Tasa de inyección de aire, $PCS/día$
$u_a$	Viscosidad del aire, $cp$
$k_a$	Permeabilidad efectiva del aire, $md$
$a$	Espaciamiento entre pozos, $pies$
$r_w$	Radio del pozo, $pies$
$V_b$	Velocidad del frente de combustión, $pie/día$
$t$	Tiempo para alcanzar la máxima tasa de aire, $día$
$n$	Número de moles, $mol$ ( $kmol$ , $gmol$ )
$R$	Constante universales de los gases, $atm*L*mol^{-1}*K^{-1}$
$V$	Volumen, $L$

## RESUMEN

TITULO: EVALUACIÓN DE LA RELACIÓN DE INYECCIÓN AGUA-AIRE CRÍTICA PARA UN PROCESO DE COMBUSTIÓN *IN SITU* HÚMEDA A PARTIR DE PRUEBAS DE TUBO DE COMBUSTIÓN<sup>1</sup>

AUTORES: NADIA SOFIA MACIAS VERA\*\*  
ALBERTO RAÚL PINZÓN DÍAZ\*\*\*

PALABRAS CLAVES: Combustión *in situ* húmeda, prueba de tubo de combustión, relación de inyección agua-aire (WAR), parámetros de ajuste.

La combustión *in situ* húmeda es un método de recobro térmico en el que se inyecta agua y aire en el yacimiento. Dependiendo de la relación de inyección agua-aire (WAR), la combustión puede ser húmeda incompleta, húmeda o súper húmeda. Idealmente, el proceso debe desarrollarse como una combustión normal debido a la ineficiencia mostrada por la combustión incompleta y la posible extinción del frente en la combustión súper húmeda. Por esta razón, la relación WAR es considerada el parámetro operacional más relevante en el proceso.

Para evaluar la influencia de este parámetro, se deben realizar pruebas de tubo de combustión, en las cuales es posible simular el proceso a escala de laboratorio a condiciones aproximadas a las de yacimiento.

En la presente investigación, se realizó el ajuste de una prueba de tubo de combustión húmeda suministrada por ECOPETROL – ICP mediante simulación numérica de yacimientos con el fin de determinar la relación (WAR) crítica a escala de laboratorio. Luego, los parámetros de desempeño del proceso fueron analizados, pues es el primer paso antes de llevar el proceso a escala de campo.

Posteriormente, se optimizó la relación crítica con el fin de determinar las tasas de inyección de agua y de aire óptimas para el proceso, de manera análoga a lo realizado con las tasas críticas. Se calcularon los parámetros de desempeño de esta última corrida y se compararon con los obtenidos en la prueba experimental.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química

\*\*\* Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos.

Director: M.Sc. Samuel Fernando Muñoz Navarro. Co-Director: Ing. Jair Fernando Fajardo Rojas

## ABSTRACT

TITLE: EVALUATION OF CRITICAL WATER-AIR INJECTION RATIO FOR A WET IN SITU COMBUSTION PROCESS FROM COMBUSTION TUBE TESTS\*

AUTHORS: NADIA SOFIA MACIAS VERA\*\*  
ALBERTO RAÚL PINZÓN DÍAZ\*\*\*

KEY WORDS: Wet in situ combustion, combustion tube test, water-air injection ratio (WAR), setting parameters.

Wet in situ combustion is a thermal recovery method based in the injection of air and water in the reservoir. Depending on the water – air injection ratio (WAR), the combustion can be incomplete, normal or super wet. The ideal development of the process is a normal combustion, due to the inefficiency shown by the incomplete combustion and the possible extinction of the combustion front in the super wet combustion. For this reason, the water – air injection ratio is considered the most relevant operational parameter in the process.

The evaluation of the influence of these parameter can be done through tube combustion tests which simulate the process in laboratory scale at approximate conditions of the reservoir.

In this research, the adjustment of a tube combustion test supplied by ECOPETROL – ICP was performed through numerical simulation of reservoirs with the objective of determine the critical water – air injection ratio at laboratory scale. Then, the performance parameters of process were analyzed, due it is the first step before taking the field-scale process.

Subsequently, the critical ratio was optimized in order to determine the injection rates of water and air for the process, analogously to what was done with critical rates. Last run performance parameters were calculated and compared with those obtained in the experimental test.

---

\* Degree project

\*\* Physico-Chemical Engineering Faculty. Chemical Engineering School

\*\*\* Physico-Chemical Engineering Faculty. Petroleum Engineering School

Director: M.Sc. Samuel Fernando Muñoz Navarro. Co-Director: Ing. Jair Fernando Fajardo Rojas

## INTRODUCCIÓN

La combustión *in situ* húmeda es un método de recobro de crudos pesados, que se basa en la inyección de agua y aire en forma alterna o simultánea. El oxígeno contenido en el aire reacciona con una pequeña porción del combustible *in situ*, produciendo  $CO$ ,  $CO_2$  y  $H_2O$  (reacción de combustión), lo más importante de esta reacción es que al ser altamente exotérmica, libera una gran cantidad de energía que se aprovecha para el desplazamiento del crudo; ahora bien, el papel del agua es garantizar el aprovechamiento total del calor para este fin, pues su alta capacidad calorífica le permite absorber todo el calor liberado haciendo que se vaporice y se desplace hacia las zonas frías del yacimiento donde transfiere el calor.

La implementación del método a escala de campo ha presentado inconvenientes debido a su alta complejidad y al pobre estudio del mismo. La principal dificultad al ser implementado es la determinación adecuada de la relación de inyección agua-aire y las tasas de inyección. Este tipo de parámetros operacionales se deben evaluar mediante la utilización de pruebas de tubo de combustión, con las que es posible desarrollar un proceso de combustión a las condiciones del yacimiento que se desea estudiar en reactores tipo flujo pistón; sin embargo, acarrear grandes costos debido a que se deben desarrollar varias pruebas con diferentes relaciones agua-aire y tasas de inyección. Allí radica la importancia de la simulación numérica de yacimientos, pues mediante esta herramienta es posible representar el comportamiento de los fluidos de un yacimiento en el reactor, facilitando la evaluación de diferentes parámetros operacionales sin mayores costos asociados.

Esta investigación se realizó con el fin de determinar la relación de inyección agua- aire crítica en una prueba de tubo de combustión aplicada a una muestra representativa de un campo colombiano. ECOPETROL-ICP suministró los resultados e información adicional de la prueba de tubo realizada. Con estos datos fue posible construir un modelo de tubo de combustión húmedo a la escala de la prueba experimental en la herramienta computacional STARS de la compañía CMG.

Para la construcción y ajuste del modelo de simulación se debe tener en cuenta que en el desarrollo de un proceso de combustión *in situ* húmeda ocurren una serie de reacciones en diferentes rangos de temperaturas entre el oxígeno presente en el aire y una porción del hidrocarburo, la cinética de estas reacciones determina el comportamiento y el buen desarrollo de la combustión, y depende de las características y de la reactividad del crudo. Para la presente investigación, los parámetros cinéticos de las reacciones involucradas no fueron suministrados, por tal motivo, se planteó un método para su estimación mediante simulación numérica en una celda cinética a fin de representar el comportamiento del frente de combustión observado en la prueba experimental.

Con el comportamiento y la velocidad del frente de combustión se ajusta la composición de gases efluentes y la temperatura durante toda la prueba con la ayuda de calentadores eléctricos que favorecen el inicio y desarrollo de la combustión. Una vez logrado el ajuste del modelo de simulación, fue posible evaluar diferentes relaciones de inyección agua – aire hasta encontrar la relación crítica.

La relación de inyección agua – aire es el parámetro operacional más influyente en un proceso de combustión in situ húmeda debido a que determina la eficiencia del proceso. La determinación de la relación crítica permite conocer la cantidad límite de agua y aire que se debe inyectar en un yacimiento para que el frente permanezca críticamente encendido, es decir, a estas condiciones, una gota más en la inyección de agua o una burbuja menos de aire provocan la extinción del frente de combustión. En la presente investigación se determinó la relación de inyección crítica a escala de laboratorio, lo cual es el primer paso para la determinación de la misma a escala de campo.

## 1. FUNDAMENTOS DE LA COMBUSTIÓN *IN SITU* HÚMEDA

Se presenta la revisión bibliográfica del proceso de combustión *in situ* húmeda como técnica para aumentar el factor de recobro en yacimientos de crudo pesado, dando a conocer las generalidades del proceso y su clasificación haciendo especial énfasis en la modalidad húmeda, teniendo en cuenta los aspectos químicos involucrados, los parámetros operacionales y de yacimiento más influyentes además de las limitaciones del método.

### 1.1. GENERALIDADES DE LA COMBUSTIÓN *IN SITU*

“La combustión *in situ* es considerado el proceso de recobro mejorado más eficiente térmicamente a escala de laboratorio”<sup>2</sup>, sin embargo, la aplicabilidad del método se ha visto influenciada por numerosos problemas que presenta tanto en subsuelo como en superficie, provocando que el método sea pobremente implementado, dichos problemas son causados principalmente por el control poco eficiente del frente de combustión y el desconocimiento de los fenómenos químicos que en él ocurren, lo que lo ha relegado, prefiriendo la implementación de la inyección de vapor aun cuando la combustión *in situ* puede ser factible.

Dado que en el mundo aún hay cuantiosas reservas de crudo pesado, es necesario estudiar la combustión *in situ* como un método de recobro térmico que puede aplicarse inicial o posteriormente a otros métodos térmicos, y enfatizar en las ventajas que posee la combustión húmeda sobre la combustión frontal seca.

“La combustión *in situ* es un método térmico de recobro mejorado de crudos pesados en el que se quema cerca del 10%”<sup>3</sup> del petróleo a causa de la reacción con oxígeno o cualquier gas oxidante, con el fin de liberar energía en forma de calor, evitando las pérdidas de la misma por la tubería y logrando disminuir la viscosidad del crudo facilitando su desplazamiento. En este proceso, generalmente se inyecta aire (21% O<sub>2</sub> y 79% N<sub>2</sub>) al yacimiento dando lugar a una serie de reacciones de oxidación y pirolisis como consecuencia del contacto del material oxidante con el hidrocarburo y una fuente de ignición que puede ser natural o artificial.

“En el proceso de combustión, el material oxidante reacciona con el aceite del yacimiento (*in situ*) provocando inicialmente las reacciones de baja temperatura (LTO, *Low Temperature Oxidation*) o reacciones de adición, las cuales, dado que son exotérmicas, se encargan de aumentar la temperatura y jugar un papel

---

<sup>2</sup> BOBERG, Thomas. Thermal Method of Oil Recovery. WILEY, 1998. p. 266-267.

<sup>3</sup> RUIZ CAÑAS, María. “Desarrollo de un modelo cinético para un proceso de Combustión *in situ* a partir de pruebas ramped temperatura Oxidation (RTO)”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2013. p 26

importante en la ignición del crudo. A medida que aumenta la cantidad de aire en el yacimiento y una vez se dé un aumento de temperatura considerable, ocurren las reacciones endotérmicas de pirólisis (IT, *Intermediate Temperature*), estas producen el coque o combustible necesario para que se den el tercer tipo de reacciones denominadas de rompimiento o de oxidación a alta temperatura (HTO, *High Temperature Oxidation*) en las cuales se consume el combustible, generando un frente de combustión estable, estas reacciones liberan gran cantidad de energía por lo que son las responsables de reducir la viscosidad del crudo”<sup>4</sup>.

## 1.2. SCREENING DE APLICACIÓN

Para la selección de yacimientos candidatos al proceso de combustión *in situ*, se tuvieron en cuenta las propiedades de los principales campos en los que se ha aplicado exitosamente la técnica o se encuentran como proyectos piloto. Fueron considerados proyectos de combustión *in situ* en modalidad seca y húmeda. Las propiedades consideradas para el screening son mostradas en las tablas 1 y 2.

**Tabla 1.** Propiedades de campos con proyectos realizados de combustión *in situ*.

	Santhal	Balol	Bare	Suplaco de Barcau	Balaria
Localización	India	India	Venezuela	Rumania	Rumania
Litología	Arenisca	-	-	Arenisca	Arenisca
Profundidad (pies)	-	3248	200 - 11400	164 - 656	2625
Espesor (pies)	-	-	10 - 200	33	3 – 15
Temperatura (°F)	158	158	-	64	113 – 118
Φ (fracción)	0,28	-	0,28	0,32	0,3
k (darcies)	3 - 5	3 – 8	0,1	1,7	0,5
Presion (psi)	1422	1422	40 - 5100	870	1015
Gravedad (°API)	17	15 - 18	-	16	19
μ (cp)	50 - 200	50 - 450	< 30000	2000	120

**Fuente:** RODRÍGUEZ P., Ruddy. “Efecto de los minerales y los metales pesados sobre las reacciones asociadas a las técnicas de combustión *in situ* y HPAI”. GRM 2014.

<sup>4</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

**Tabla 2.** Continuación propiedades de campos con proyectos realizados de combustión *in situ*.

	Băbeni	Ochiuri Sud	Moreni Sud	Slătioarele	Deaulul Batrin Drăder	Videle
Localización	Rumania	Rumania	Rumania	Rumania	Rumania	Rumania
Litología	-	-	-	-	-	-
Profundidad (pies)	3281	984	3609	2789	1148	2297
Espesor (pies)	39	39	17	16	33	7 – 33
Temperatura (°F)	108	77	113	95	68	127
Φ (fracción)	0,2	0,34	0,33	0,3	0,35	0,3
k (darcies)	2	0,6	0,1 - 1,5	0,113	0,1	0,1 - 0,3
Presion (psi)	2030	435	1595	1233	508	986
Gravedad (°API)	32	31	29	24	22	19
μ (cp)	2	6	4	28	30 - 120	120

**Fuente:** RODRÍGUEZ PATIÑO, Ruddy. “Efecto de los minerales y los metales pesados sobre las reacciones asociadas a las técnicas de combustión *in situ* y HPAI”. GRM 2014.

**Tabla 3.** *Screening* de aplicación para proyectos de combustión *in situ*.

Criterios	Screening CIS
Litología	Arenisca
Profundidad (pies)	500 - 3800
Espesor (pies)	3 - 40
Temperatura (°F)	60 - 170
$\Phi$ (fracción)	0,2 - 0,35
k (darcies)	0,1 - 8
Presión (psi)	400 - 2100
Gravedad (°API)	15 - 32
$\mu$ (cp)	2 - 2500

**Fuente:** RODRÍGUEZ PATIÑO, Ruddy. “Efecto de los minerales y los metales pesados sobre las reacciones asociadas a las técnicas de combustión *in situ* y HPAI”. GRM 2014.

### 1.3. VENTAJAS Y LIMITACIONES DE PROCESO DE COMBUSTIÓN *IN SITU*

Dentro de las principales ventajas de la Combustión *in situ* en el modo seco se encuentran:

- Es el proceso de recobro térmicamente más eficiente a escala de laboratorio.
- Alta disponibilidad del fluido de inyección (aire).
- “Alta eficiencia de barrido microscópica”<sup>5</sup>.
- Puede ser aplicada en casos en los que la inyección de vapor y la inyección de agua no son efectivas.
- Puede ser aplicado donde se han desarrollado otras técnicas EOR como inyección de químicos e inyección de  $CO_2$
- “Mejora la calidad del crudo gracias a la pirolisis del crudo”<sup>6</sup>.

<sup>5</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>6</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]

Sin embargo, este método presenta varios inconvenientes y/o limitaciones, entre ellas están:

- Costos de compresión elevados.
- Flujo multifásico.
- Requiere de pruebas de laboratorio especiales.
- Riesgo de explosión.
- Difícil control del frente de Combustión.
- Ineficiente transferencia de calor.

La principal limitante del proceso es que parte del calor liberado en las reacciones de combustión se almacena en la zona que ya ha sido quemada del yacimiento haciendo que no se aproveche todo el calor para el desplazamiento del crudo.

La combustión *in situ* húmeda surge para dar solución a la ineficiente transferencia de calor que se evidencia en la modalidad seca del proceso aprovechando la alta capacidad calorífica del agua con respecto a la del aire. El agua absorbe el calor que se libera en las reacciones de combustión, se vaporiza y lo transporta hacia las zonas frías del yacimiento, de esta manera se mejora en gran medida el aprovechamiento del calor para lograr la disminución de la viscosidad del crudo y facilitar su desplazamiento.

Aunque esta modalidad de la combustión *in situ* permite desplazar una mayor cantidad de crudo, a escala de campo es más implementada la combustión frontal seca, debido a que la húmeda ha sido poco estudiada y presenta otras limitaciones que la pueden hacer inviable como las que se plantean a continuación:

- Determinación de la relación de inyección agua-aire: una elección errónea puede incluso extinguir el frente.
- Se pueden presentar reacciones de acuatermólisis en las cuales se produce  $H_2S$ .

#### **1.4. CLASIFICACIÓN DE LA COMBUSTIÓN *IN SITU***

La combustión *in situ* presenta dos modificaciones con respecto a la dirección de propagación del frente de combustión, combustión frontal y combustión en reversa, la primera a su vez se clasifica en dos, combustión frontal seca y combustión frontal húmeda.

##### **1.4.1. Combustión frontal**

Se denomina combustión frontal debido a que la propagación del frente de combustión se mantiene en la misma dirección del fluido de inyección hasta el

pozo productor, esta puede ser seca o húmeda dependiendo del fluido o fluidos de inyección.

### **Combustión frontal seca**

En este proceso se inyecta generalmente aire o en ocasiones aire enriquecido con oxígeno al yacimiento, que al entrar en contacto con el hidrocarburo desencadenan una serie de reacciones de oxidación que liberan energía en forma de calor y propician la formación del frente de combustión con la ayuda de una fuente de ignición como calentadores eléctricos, quemadores a gas, inyección de agentes pirofóricos o inyección de vapor, cabe resaltar que si la temperatura en el yacimiento es lo suficientemente alta “(superior a 180°F)”<sup>7</sup> y los fluidos son suficientemente reactivos, no es necesaria una fuente de ignición externa pues en el momento en que el aire entra en contacto con el hidrocarburo se da una ignición espontánea generando el frente de combustión.

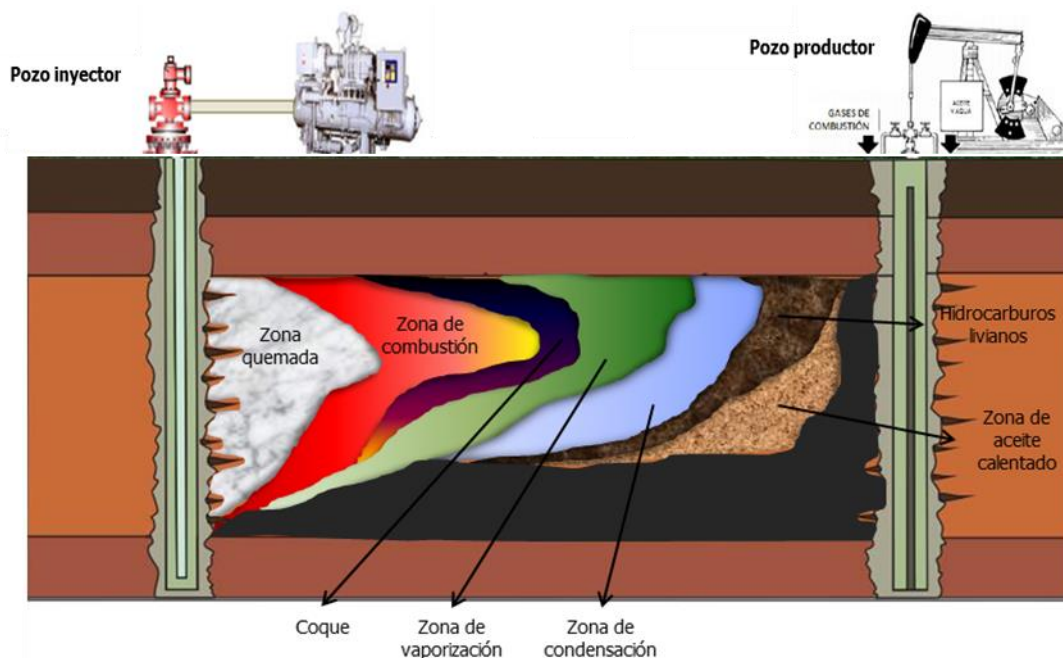
“Después de la ignición, el frente de combustión se propaga a través del yacimiento mediante un flujo continuo de aire, a medida que el frente se mueve, se evidencian una serie de zonas dentro del yacimiento comenzando desde el pozo inyector hasta el productor, estas se crean debido al calor, transporte de masa y reacciones químicas que tienen lugar en el yacimiento”<sup>8</sup>. En la Figura 1 se observan las siete zonas más comúnmente descritas que se pueden diferenciar en un proceso CIS, cabe aclarar que en un proceso real no es posible diferenciarlas con claridad pues se presenta traslape y transición entre las mismas, la idealización de las zonas se realiza con fines explicativos.

---

<sup>7</sup> SARATHI, Partha. *In situ* Combustion Handbook- Principles and Practices. Oklahoma: 1999, 25 p.

<sup>8</sup> ORDOÑEZ CARVAJAL, Andrea Paola. PALACIO OLIVARES, Carlos. “Evaluación de Yacimientos Prospectos para la Implementación de Procesos de Combustión *in situ* Mediante Analogías”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2010. P16-31.

**Figura 1.** Esquema de la combustión *in situ* en modo seco



**Zona quemada.** “La zona adyacente al pozo inyector, corresponde al volumen poroso ya quemado del yacimiento y por la cual circula el aire para sostener el frente de combustión, esta zona contiene rastros de residuos orgánicos no quemados que al contacto con el flujo continuo de aire hace que la temperatura del mismo aumente debido a la transferencia de energía a medida que se acerca al frente”<sup>9</sup>.

**Zona de combustión.** Es la zona de mayor temperatura “(600°F-1200°F)”<sup>10</sup>, donde se presenta la principal liberación de energía, es en esta región donde el oxígeno reacciona con el hidrocarburo residual, también llamado coque para producir óxidos de carbono y agua (oxidación de alta temperatura). El coque es un hidrocarburo con razón atómica H/C que varía entre 0,6 y 2,0, este combustible se forma en la zona de craqueo térmico en el límite del frente de combustión y es depositado en la matriz de la roca.

<sup>9</sup>REYES NAVAS, Yorleth, MÉNDEZ BOHÓRQUEZ, Gilberto. “Metodología integrada para el monitoreo y seguimiento de yacimientos sometidos a procesos de combustión *in situ*”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2009.

<sup>10</sup> RUIZ CANAS, María. “Desarrollo de un modelo cinético para un proceso de Combustión *in situ* a partir de pruebas ramped temperatura Oxidation (RTO)”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2013. p 26.

**Zona de craqueo y vaporización.** “En esta zona, los compuestos más livianos del crudo se vaporizan debido a las altas temperaturas alcanzadas por la combustión y los compuestos más pesados sufren un proceso de pirólisis produciendo  $CO_2$ ,  $CO$ , gases hidrocarburos y combustible sólido orgánico (coque) depositado en la roca”<sup>11</sup>.

**Zona de condensación.** En esta sección del yacimiento definida por temperaturas casi constantes en el rango de 350 a 600 °F, se presenta la condensación del gas de hidrocarburo liberado en las zonas precedentes para reincorporarse o disolverse en el crudo a causa de los bajos gradientes de presión establecidos.

**Banco de agua.** Una vez la temperatura ha descendido por debajo del punto de condensación del vapor, se forma un banco de agua caliente con mayor saturación de agua que la saturación inicial.

**Banco de aceite.** En la zona de banco de aceite está contenida la mayor parte del aceite desplazado, incluyendo la mayor parte de los componentes livianos resultantes del craqueo térmico.

**Zona inalterada.** Más allá del banco de crudo se encuentra la sección del yacimiento no alterado o con leve aumento en saturación de gases de combustión.

La combustión *in situ* seca presenta varios inconvenientes y limitaciones entre las que se destacan las altas deposiciones de coque en el yacimiento ocasionando el taponamiento de las gargantas de poro, además el aprovechamiento del calor que se libera en las reacciones de combustión no es eficiente debido a la limitada capacidad calorífica del aire que le impide transportar todo el calor emitido en las reacciones, por lo que gran parte de la energía se almacenada en la zona del yacimiento que ha sido quemada y no es aprovechada para el desplazamiento del crudo.

### **Combustión frontal húmeda**

La Combustión *in situ* húmeda surge para dar solución a los inconvenientes que presenta la combustión seca, esta técnica consiste en la inyección simultanea o en forma alternada de aire y agua, con el fin de aprovechar la alta capacidad calorífica del agua y así tener mayor eficiencia en el aprovechamiento del calor que es liberado por las reacciones de combustión, haciendo que el agua se vaporice y transporte el calor a las zonas frías del yacimiento mejorando en gran medida el aprovechamiento del mismo para el desplazamiento del crudo. Aunque esta modalidad de la combustión *in situ* permite desplazar una mayor cantidad de

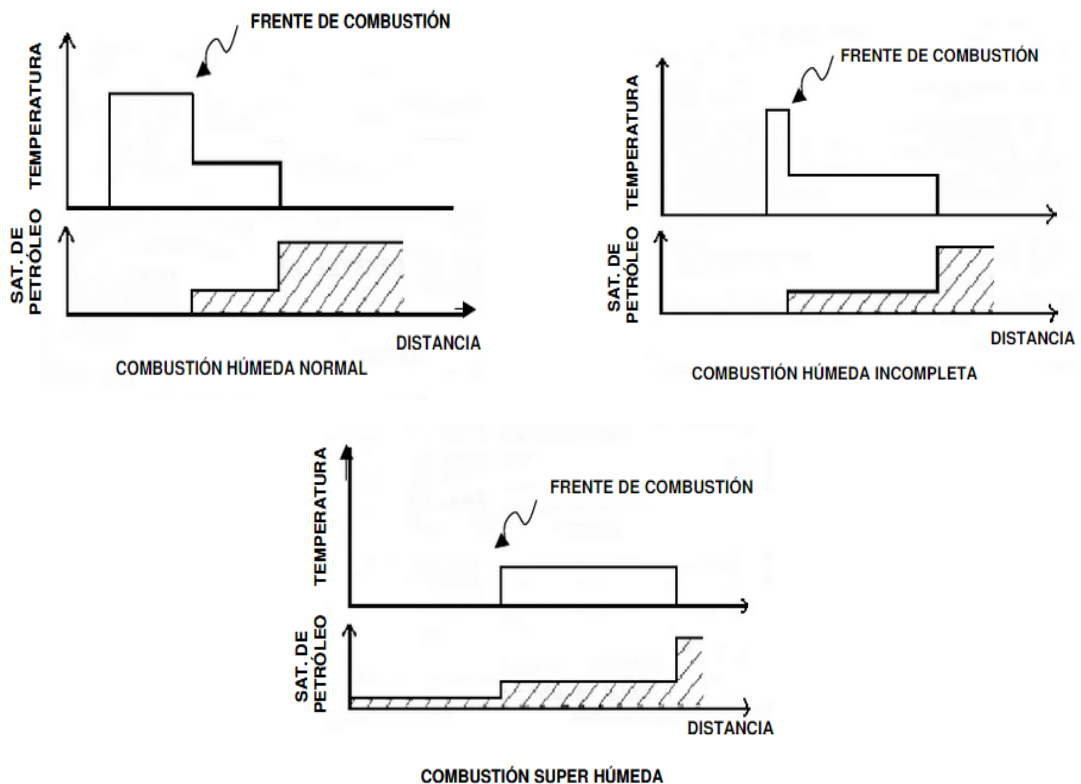
---

<sup>11</sup> PALACIO OLIVARES, Carlos. “Evaluación de Yacimientos Prospectos para la Implementación de Procesos de Combustión *in situ* Mediante Analogías”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2010. P16-31.

crudo, a escala de campo es más implementada la combustión frontal seca, pues la húmeda no ha sido muy estudiada y presenta otras limitaciones que la pueden hacer inviable. Su principal limitación es la determinación adecuada de la relación de inyección agua-aire en el yacimiento, debido a que si el agua inyectada es mayor a la necesaria, la temperatura del frente de combustión disminuye y puede llegar a darse su extinción, por el contrario si el agua inyectada es insuficiente no absorbe todo el calor liberado en las reacciones de combustión y por lo tanto no tendrá un efecto determinante sobre el proceso.

Dependiendo de la relación aire-agua inyectada, la combustión *in situ* húmeda puede ser incompleta, normal o súper húmeda. En la Figura 2. Se observan los perfiles de temperatura y saturación de aceite originados durante el proceso.

**Figura 2.** Diferentes tipos de Combustión Húmeda



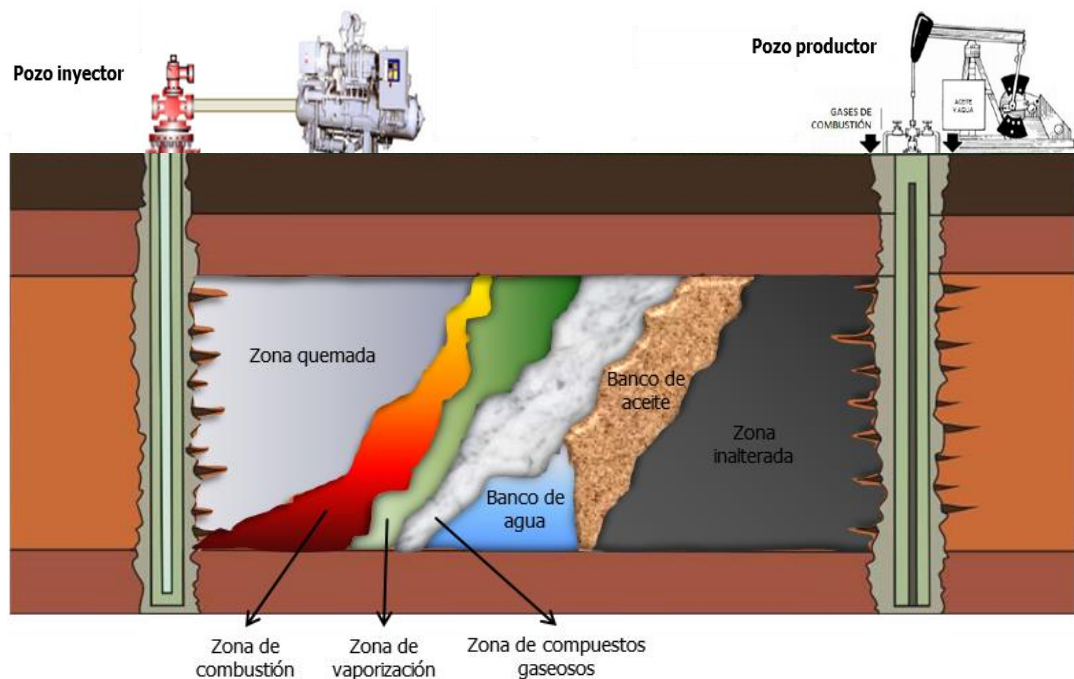
**Fuente:** ALVARADO, Douglas, BANZER, Carlos. Recuperación Térmica de Petróleo. Disponible en: <http://es.scribd.com/doc/56668472/Alvarado-D-A-and-Banzer-C-Recuperacion-Termica-de-Petroleo#scribd>. Mayo 30-2011.

“En la combustión incompleta la velocidad de inyección de agua es baja y no se recupera todo el calor almacenado en la zona quemada; en la combustión normal la velocidad de inyección de agua es mayor y se logra recuperar todo el calor de la

zona quemada; finalmente en la combustión súper húmeda la velocidad de inyección de agua es aún mayor ocasionando que la temperatura máxima del frente de combustión disminuya, esto no aumenta la velocidad de recuperación de crudo pero si incrementa la velocidad del frente de combustión y causa que la temperatura de la parte posterior del mismo disminuya a una temperatura menor de la necesaria para que se produzca la quema, por esta razón, disminuye la capacidad de combustión y parte del oxígeno no reacciona, disminuyendo en igual proporción la cantidad de combustible quemado o en el peor de los casos se puede ocasionar la extinción del frente de combustión”<sup>12</sup>.

En la combustión *in situ* húmeda se pueden diferenciar 7 zonas que están representadas en la Figura 3, al igual que en el caso de la combustión seca, la representación de las zonas se hace con fines explicativos pues en un proceso real no se diferencian con tal claridad.

**Figura 3.** Diagrama combustión *in situ* húmeda



**Zona quemada:** Esta zona representa el volumen ya quemado del yacimiento, se presenta también un flujo bifásico debido a que una parte del agua inyectada no

<sup>12</sup> GONZALEZ, Ana. Diseño de dos equipos experimentales (tubular y tridimensional) para pruebas de laboratorio de Combustión *in situ* a condiciones de yacimiento. Caracas, 2007. Universidad Central de Venezuela. p. 18-19.

se vaporiza debido a la disminución de la temperatura a medida que transcurre la inyección.

**Zona de combustión:** “En esta zona se comienza a observar la estabilización del frente de vaporización, por esta razón y por las altas temperaturas presentes en esta zona, toda el agua se encuentra en forma de vapor”<sup>13</sup>.

**Zona de vaporización:** Esta zona está asociada a la formación del coque debida al craqueo térmico que sufren los componentes más pesados del hidrocarburo y sus componentes más livianos se vaporizan debido a las altas temperaturas de esta zona.

**Zona de compuestos gaseosos:** Debido a la inyección de agua y vapor, esta zona se caracteriza por la presencia de muchos componentes gaseosos principalmente vapor que ayuda a aumentar la eficiencia de la transferencia del calor generado en las zonas anteriores.

**Banco de agua:** La cantidad de agua presente en esta zona depende totalmente de la tasa de inyección de agua con la cual se desarrolle el proceso.

**Banco de aceite:** Debido al efecto del aumento de la temperatura se observa una reducción de la viscosidad del crudo en esta zona mucho mayor a la que se observa en la combustión seca.

**Zona aceite frio:** “Esta zona se ve disminuida en comparación con la combustión seca debido a un aumento en la eficiencia del transporte del calor”<sup>14</sup>.

“La principal ventaja de la combustión *in situ* húmeda frente a la seca es que reduce la cantidad de combustible que se debe quemar”<sup>15</sup> y por lo tanto la cantidad de crudo que se puede desplazar es mayor, además el requerimiento de aire es menor disminuyendo los costos de compresión. “Al aprovechar todo el calor generado en la combustión el factor de recobro es mayor y la eficiencia del proceso puede aumentar en un 25%”<sup>16</sup>, por otra parte, la determinación de la razón de inyección agua-aire es muy compleja pues depende de las heterogeneidades del yacimiento, una elección errónea de la relación de inyección, como se ha dicho anteriormente, podría ocasionar la extinción del frente de llama sacrificando los beneficios del proceso pues no se daría la reacción de combustión, en esto radica la importancia del presente proyecto, en el que se

---

<sup>13</sup> SARATHI, Partha S. *In situ* Combustion Handbook. Principles and Practices. Tulsa, Oklahoma: January 1999. (BDM Petroleum Technologies) NIPER/BDM-0374.

<sup>14</sup> GARCÍA MONTEJO, Maylin Dayana & PATIÑO RAMIREZ, Christian David. “Evaluación del efecto de la presencia de arcilla y minerales en un yacimiento sobre el desarrollo de un proceso de combustión *in situ*”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. p 17-23.

<sup>15</sup> PALACIO OLIVARES, Carlos. “Evaluación de Yacimientos Prospectos para la Implementación de Procesos de Combustión *in situ* Mediante Analogías”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2010. P16-31.

<sup>16</sup> SARATHI, Partha S. *In situ* Combustion Handbook. Principles and Practices. Tulsa, Oklahoma: January 1999. (BDM Petroleum Technologies) NIPER/BDM-0374.

busca determinar la relación de inyección crítica para un campo Colombiano, es decir, la máxima cantidad de agua que se puede inyectar antes de que se extinga el frente.

#### **1.4.2. Combustión en reversa**

La combustión frontal usualmente presenta problemas de inyectividad, debido a que el aceite debe fluir desde la zona calentada hacia las regiones más frías del yacimiento, por lo cual el aceite viscoso se hace menos móvil y tiende a crear barreras de flujo. Este fenómeno se presenta principalmente en crudos muy viscosos y en arenas bituminosas. “Por esto, surge el proceso de la combustión en reversa, en el cual, la zona de combustión se inicia en el pozo productor y se mueve hacia el inyector, en contra corriente al flujo del aire, esto con el fin de mantener la mayor parte del calor entre el pozo productor y el aceite cuando se moviliza, de esta manera se produce muy poco enfriamiento delante del aceite, lo que facilita su desplazamiento”<sup>17</sup>.

Al igual que en la combustión frontal son necesarias tres cosas para que se lleve a cabo el proceso de combustión; oxígeno, combustible y altas temperaturas. En la combustión en reversa el oxígeno está presente desde el pozo inyector hasta la zona de combustión, el combustible está presente a través de toda la formación y finalmente el factor que determina el lugar donde ocurre la combustión son las altas temperaturas, las cuales se presentan en el pozo productor en el momento de la ignición. “A medida que el calor que genera la combustión eleva la temperatura del yacimiento hacia el inyector, el frente de combustión se desplaza en esta dirección, este no se desplazará nunca hacia el pozo productor siempre y cuando todo el oxígeno del aire se consuma en el frente, de igual manera la velocidad del mismo depende de que tan rápido el calor pueda generar elevadas temperaturas”<sup>18</sup>.

Este proceso solo se ha desarrollado a escala de laboratorio, no se ha implementado en campo y presenta dos grandes inconvenientes, el primero es que como todo el aceite desplazado debe pasar a través del frente de combustión la porción de combustible quemado es mucho mayor comparado con la combustión frontal en donde únicamente se quema el coque, además de que se corre el riesgo de que se produzca ignición espontánea en el pozo inyector.

### **1.5. REACCIONES QUÍMICAS ASOCIADAS AL PROCESO**

---

<sup>17</sup> GARCÍA MONTEJO, Maylin Dayana & PATIÑO RAMIREZ, Christian David. “Evaluación del efecto de la presencia de arcilla y minerales en un yacimiento sobre el desarrollo de un proceso de combustión *in situ*”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. p 22-23.

<sup>18</sup> SARATHI, Partha S. *In situ* Combustion Handbook. Principles and Practices. Tulsa, Oklahoma: January 1999. (BDM Petroleum Technologies) NIPER/BDM-0374.

El proceso de Combustión *in situ* depende principalmente de las reacciones químicas que ocurren entre el o los fluidos de inyección y el hidrocarburo, la existencia y naturaleza de estas reacciones dependen de las características del sistema roca-fluidos. Es importante tener en cuenta los aspectos químicos del proceso para el diseño e interpretación del desempeño del mismo.

Las reacciones químicas asociadas al proceso de combustión *in situ* son numerosas y ocurren en un amplio rango de temperaturas, con el fin de simplificar su estudio se han agrupado en tres clases: reacciones de oxidación a baja temperatura (LTO), las cuales son heterogéneas (gas/líquido) y producen compuestos parcialmente oxigenados y pequeñas cantidades de óxidos de carbono, el segundo grupo son las reacciones de oxidación a temperatura intermedia (IT) son reacciones de craqueo o pirolisis del hidrocarburo para formar coque y finalmente las reacciones de oxidación a alta temperatura (HTO), son reacciones altamente exotérmicas, heterogéneas de rompimiento de los enlaces H/C donde el oxígeno reacciona con el combustible (coque) para producir óxidos de carbono y agua.

#### **1.5.1. Reacciones de oxidación a baja temperatura (LTO)**

“Estas reacciones ocurren a temperaturas inferiores a los 400°F, son exotérmicas, heterogéneas, también son conocidas como reacciones de adición de oxígeno debido a que producen agua y compuestos orgánicos parcialmente oxigenados como ácidos carboxílicos, aldehídos, cetonas, alcoholes e hidroperóxidos, son causadas por la disolución de oxígeno en el crudo”<sup>19</sup>.

Las reacciones LTO son indeseables en el proceso de Combustión *in situ* pues se conoce que aumentan la fracción de asfáltenos, la densidad y la viscosidad del crudo, lo que afecta directamente y de manera negativa el recobro, por otra parte también aumentan la cantidad de combustible destinado para la combustión con lo que se reduce la fracción de crudo recuperable, a pesar de esto, son necesarias pues al ser altamente exotérmicas son consideradas reacciones de preparación para el proceso de ignición, ahora bien, una vez alcanzada la ignición se deben evitar debido a que afectan de manera negativa el desarrollo del proceso.

Es importante tener un buen control en la temperatura para garantizar que durante el proceso el régimen LTO no sea predominante. “Entre los factores que propician estas reacciones están la baja tasa de aire que contacta el crudo debido a heterogeneidades en el yacimiento y la canalización del oxígeno”<sup>20</sup>.

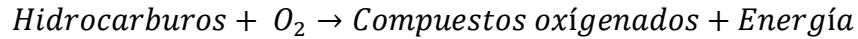
La siguiente es la expresión general para las reacciones en el régimen LTO:

---

<sup>19</sup> MAMORA, D.D. New findings in Low Temperature Oxidation of Crude Oil; Society of Petroleum Engineers Journal, SPE 29324.1995.

<sup>20</sup> CASTANIER. L.M., BRIGMAN, W.E. Upgrading of Crude Oil via *in situ* Combustion; Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol. 39, pp. 125-126, 2003.

## Ec 1. Reacción LTO



### 1.5.2. Reacciones de oxidación a temperatura intermedia (IT)

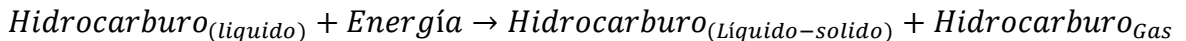
Una vez la temperatura ha aumentado lo suficiente se producen este tipo de reacciones, las cuales cumplen un papel muy importante en el proceso de combustión. Son reacciones homogéneas (gas-gas), endotérmicas e involucran tres tipos diferentes de reacciones: deshidrogenación, craqueo y condensación, las cuales dependen de la composición del crudo *in situ*. Estas reacciones son las responsables de la producción el combustible (coque) destinado para la quema.

“Las parafinas, en un rango de 700 a 1250°F sufren deshidrogenación y/o craqueo térmico, esto depende del tamaño de las moléculas, si son moléculas de cadena corta desde metano hasta butano sufren deshidrogenación en donde los átomos de hidrógeno son removidos de las cadenas de hidrocarburos, posteriormente las moléculas deshidrogenadas se recombinan con moléculas más pesadas que eventualmente sufren craqueo térmico, es decir, se rompen los enlaces carbono-carbono para producir cadenas más cortas, formando coque (80-90% C y 3-9% H<sub>2</sub>) y considerables cantidades de hidrocarburos volátiles”<sup>21</sup>.

Por otro lado, los compuestos aromáticos sufren condensación en rangos de 1200 y 3000 °F, en estas reacciones los enlaces C-H de las moléculas cíclicas se rompen y reemplazan por enlaces C-C para formar moléculas poliaromáticas menos hidrogenadas.

La siguiente es la expresión general para las reacciones en el régimen IT:

## Ec 2. Reacción IT



### 1.5.3. Reacciones de oxidación a alta temperatura (HTO)

“Las reacciones en el régimen HTO se dan entre el oxígeno contenido en el aire que se inyecta y el hidrocarburo residual (Coque) a temperaturas superiores a los 650°F produciendo monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y agua (H<sub>2</sub>O), son reacciones heterogéneas, altamente exotérmicas y son las responsables de sostener y propagar el frente de combustión pues el calor que generan provee la energía térmica necesaria para hacerlo, por este motivo son las reacciones más importantes en un proceso de combustión *in situ*, una vez se genera el frente de combustión se debe tratar de mantener el proceso en el

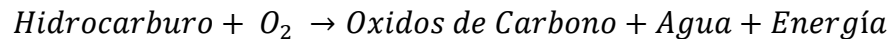
---

<sup>21</sup> CASTANIER. L.M., BRIGMAN, W.E. “*In situ* Combustion”. Chapter 16. Reservoir Engineering Section. Society of Petroleum Engineers Handbook. Society of Petroleum Engineers. Richardson Texas.

régimen HTO y así garantizar que se consuma todo o casi todo el oxígeno inyectado”<sup>22</sup>.

La siguiente es la expresión general para las reacciones en el régimen HTO:

### **Ec 3. Reacción HTO**



#### **1.5.4. Reacciones de acuatermolisis**

Estas reacciones ocurren entre el vapor de agua a altas temperaturas y algunos componentes del crudo pesado. Son de gran interés para tener una mejor comprensión de los procesos térmicos de recuperación de petróleo aplicados a yacimientos que tengan presencia de acuíferos, pues estos procesos se dan a altas temperaturas y altas presiones con lo que el agua se puede vaporizar y reaccionar con el crudo, cabe resaltar que el posible desarrollo de estas reacciones es una de las desventajas principales del proceso de Combustión *in situ* húmeda.

“Condiciones de alta temperatura y alta presión favorecen las reacciones entre el agua y compuestos no polares, esto se debe a que la constante dieléctrica del agua disminuye considerablemente con el aumento de la temperatura; la constante dieléctrica del agua a temperatura ambiente es 78.5, es una constante dieléctrica bastante elevada lo que indica una gran polaridad y por ende los hidrocarburos no son solubles en el agua pues son sustancias apolares, ahora bien, a 572 °F (300 °C) la constante dieléctrica del agua disminuye a 2 lo que hace que los compuestos orgánicos sean solubles en ella. Además, el producto logarítmico iónico negativo del agua a 482 °F (250 °C) es 11 y el del óxido deutérico es 12, ambos comparados con 14 y 15, respectivamente (a 68°F (20 °C)). Esto significa que el agua actúa como ácido y base fuerte a la vez, por lo tanto, además del incremento natural que ocasiona el aumento de temperatura en la velocidad de reacción, la catálisis tanto ácida como básica se ve mejorada”<sup>23</sup>.

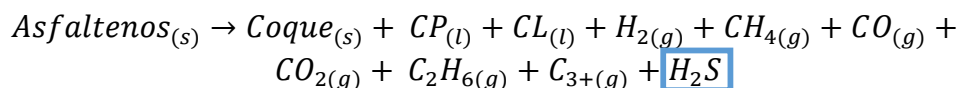
En 1994 Belgrave y col. Plantearon un modelo de reacción para la termólisis de los asfaltenos en medios acuosos:

---

<sup>22</sup> MOORE R.G., LAURESHEN, C.J., MEHTA, S.A., URSENBACH, M.G. Observations and Design Considerations For In situ Combustion Projects. University of Calgary. Calgary, 1997.

<sup>23</sup> BARRIOS GOICETTY, Jose Luis. Estimación de la formación de sulfuro de hidrógeno bajo condiciones de inyección de vapor para la faja petrolífera del Orinoco. Universidad de Oriente. Barcelona. Octubre (2009).

#### Ec 4. Reacción acuatermolisis



Donde,

CP: crudo pesado y CL: crudo liviano

La estructura de este esquema de reacción está basado en una serie de experimentos realizados con 5 muestras de crudo pesado en Canadá. Los parámetros cinéticos de cada uno de los experimentos realizados se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 4.** Parámetros cinéticos

Muestra	A(1/h)	Ea (KJ/Kmol)
1	$3.509 * 10^{15}$	209.454
2	$1.149 * 10^{15}$	181.041
3	$1.456 * 10^7$	102.790
4	$2.052 * 10^{23}$	327.499
5	$1.202 * 10^6$	97.881

**Fuente:** BARRIOS GOICETTY, Jose Luis. Estimación de la formación de sulfuro de hidrógeno bajo condiciones de inyección de vapor para la faja petrolífera del Orinoco. Universidad de Oriente. Barcelona. Octubre (2009).

#### 1.6. PARAMETROS OPERACIONALES Y DE YACIMIENTO MÁS INFLUYENTES EN UN PROCESO DE COMBUSTIÓN *IN SITU* HÚMEDA.

Antes de pensar en la implementación de un proceso de combustión *in situ*, en cualquiera de sus modalidades, es necesario establecer los parámetros que tienen una influencia significativa en las características de desempeño del proceso de combustión.

Se hace necesario, realizar un análisis de los parámetros más importantes, enfatizando en los parámetros operacionales y de yacimiento; los parámetros operacionales permiten establecer la forma de aplicación de la técnica más idónea de acuerdo a las características del yacimiento, además de ser las variables que pueden modificarse para controlar el avance del frente de combustión. Por otra parte, los parámetros de yacimiento permiten realizar una valoración del mismo, y establecer si es apto para la aplicación del proceso de combustión *in situ* húmeda.

### 1.6.1. Parámetros operacionales

El estudio de este tipo de parámetros se centra en determinar las condiciones adecuadas de operación para que el frente de combustión pueda generar un factor de recobro incremental, además de que proveen los mecanismos de control del proceso desde superficie.

Entre los parámetros operacionales se destacan el contenido de combustible (coque), el requerimiento de aire, tasa y presión de inyección de aire y agua, y el parámetro clave a determinar, la relación agua-aire (WAR), cabe resaltar que la presión de fondo fluyendo del pozo productor es un parámetro operacional que está directamente relacionado con la cantidad de fluido que puede ser extraído, sin embargo no se considerara porque es un parámetro que se controla con herramientas del sistema de levantamiento artificial y no un parámetro que tenga influencia directa en el proceso de combustión *in situ* húmeda.

#### Contenido de combustible

Es la cantidad de coque depositado por unidad de volumen de roca (lb/pie<sup>3</sup>), que proviene de las fracciones más pesadas del crudo, resultantes de las reacciones de craqueo térmico. La cantidad de coque por unidad de volumen de yacimiento, determina:

- La cantidad de calor liberado.
- La cantidad de aire requerido.
- La velocidad de avance del frente de combustión.
- Estimativos del tiempo de vida del proyecto
- El aceite potencialmente recuperable.

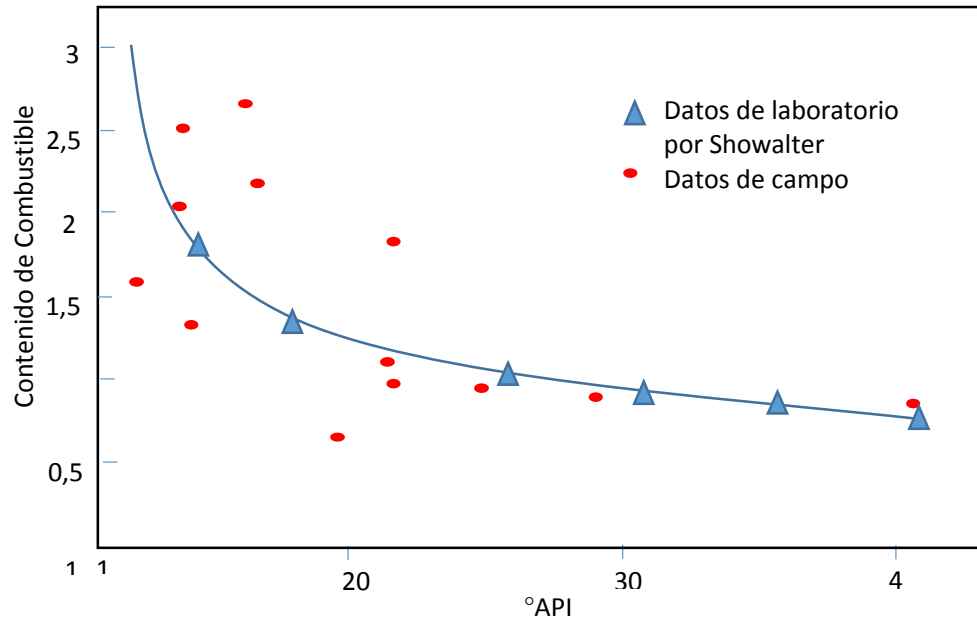
“Un rango de contenido de combustible depositado reportado en la literatura tomando en cuenta las aplicaciones del proceso de combustión tanto exitosas como fallidas se encuentra entre 1.5 y 2.5 lb/pie<sup>3</sup>, siendo mayor en crudos pesados y viscosos.”<sup>24</sup>

En 1963, Showalter mostró a partir de la comparación de pruebas de laboratorio y datos de campo, el efecto que tiene la gravedad API del crudo sobre el contenido de combustible, en la Figura 4. Se muestra esta correlación.

---

<sup>24</sup> ALEXANDER, Jhon, MARTIN, L., DEW, Jhon. Factors Affecting Fuel Availability and Composition during *In situ* Combustion. SPE 296, 1962.

**Figura 4.** Contenido de combustible Vs Grados API

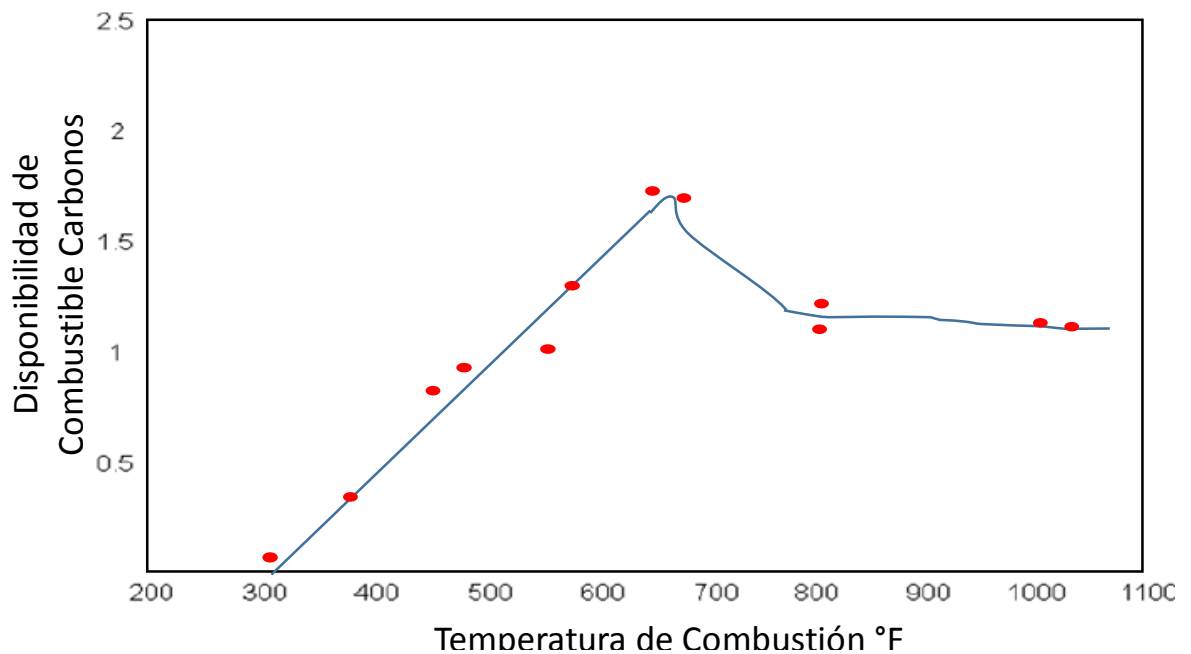


**Fuente:** Modificado de CHU, Chieh. State of The Art Review of Fireflooding Field Projects. SPE 9772, 1982.

Por otra parte, en 1962, Alexander mostró el efecto que tiene la temperatura de combustión sobre el contenido de combustible (Figura 5). “Los resultados obtenidos mostraron un incremento lineal en la disponibilidad de combustible, desde cero con temperatura de 300 °F hasta un porcentaje en peso máximo de 1.75 % a 650°F, y una disminución asintótica alrededor de 1.15% a 1000 °F”<sup>25</sup>.

<sup>25</sup> ALEXANDER, Jhon, MARTIN, L., DEW, Jhon. Factors Affecting Fuel Availability and Composition during *In situ* Combustion. SPE 296, 1962.

**Figura 5.** Contenido de combustible vs temperatura de combustión



**Fuente:** ALEXANDER, Jhon, MARTIN, L., DEW, Jhon. Factors Affecting Fuel Availability and Composition during *In situ* Combustion. SPE 296, 1962.

### Requerimiento de aire

“El requerimiento de aire es el volumen de aire requerido en m<sup>3</sup> estándar para quemar el combustible depositado en un m<sup>3</sup> de roca de yacimiento”<sup>26</sup>.

Generalmente se usa 180 PCS de aire / lb de combustible cuando no se dispone de datos de laboratorio, este valor está basado en las correlaciones de Chu.

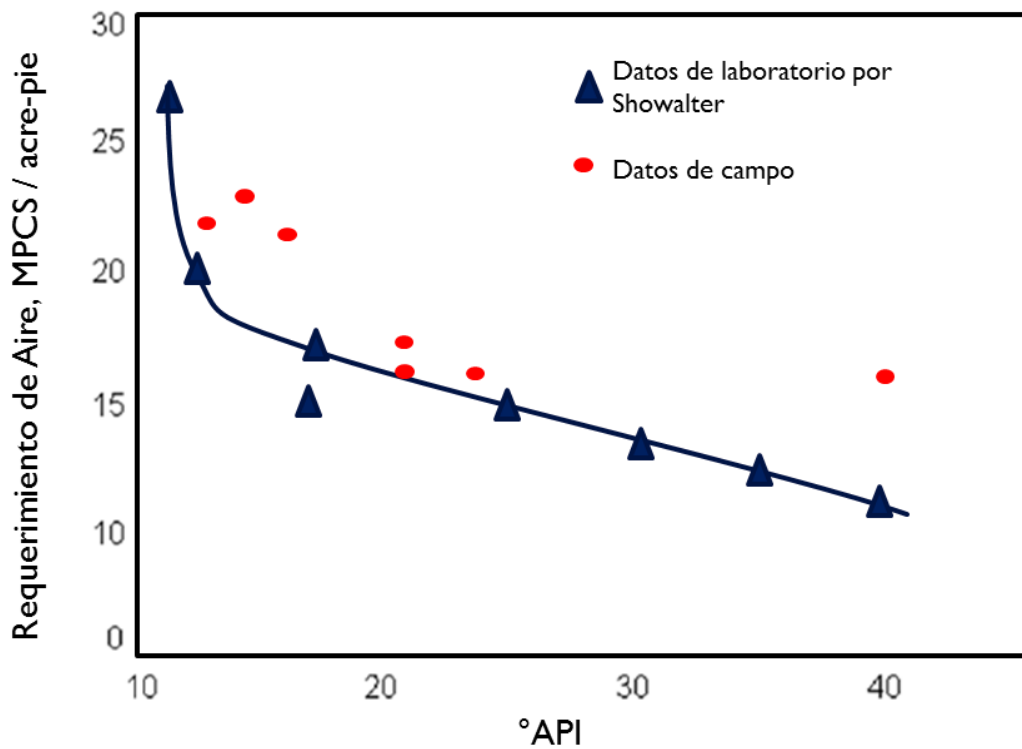
### Ec 5. Correlación de Chu

$$A = 4.72 + 0.03656 h + 9.996 S_o + 0.000691 k$$

En 1963, Showalter también analizó el efecto de la °API sobre el requerimiento de aire, como se muestra en la Figura 6.

<sup>26</sup> OLIVEROS GÓMEZ, Luis. “Evaluación Técnica de la Implementación de un Proceso de Combustión *in situ* Posterior a Procesos de Inyección de Vapor en Yacimientos Estratificados de Crudo Pesado con Arenas Delgadas”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2013. P37-50.

**Figura 6.** Requerimiento de Aire Vs Grados API



**Fuente:** Modificado de CHU, Chieh. State of The Art Review of Fireflooding Field Projects. SPE 9772, 1982.

### Tasa de inyección de agua y aire

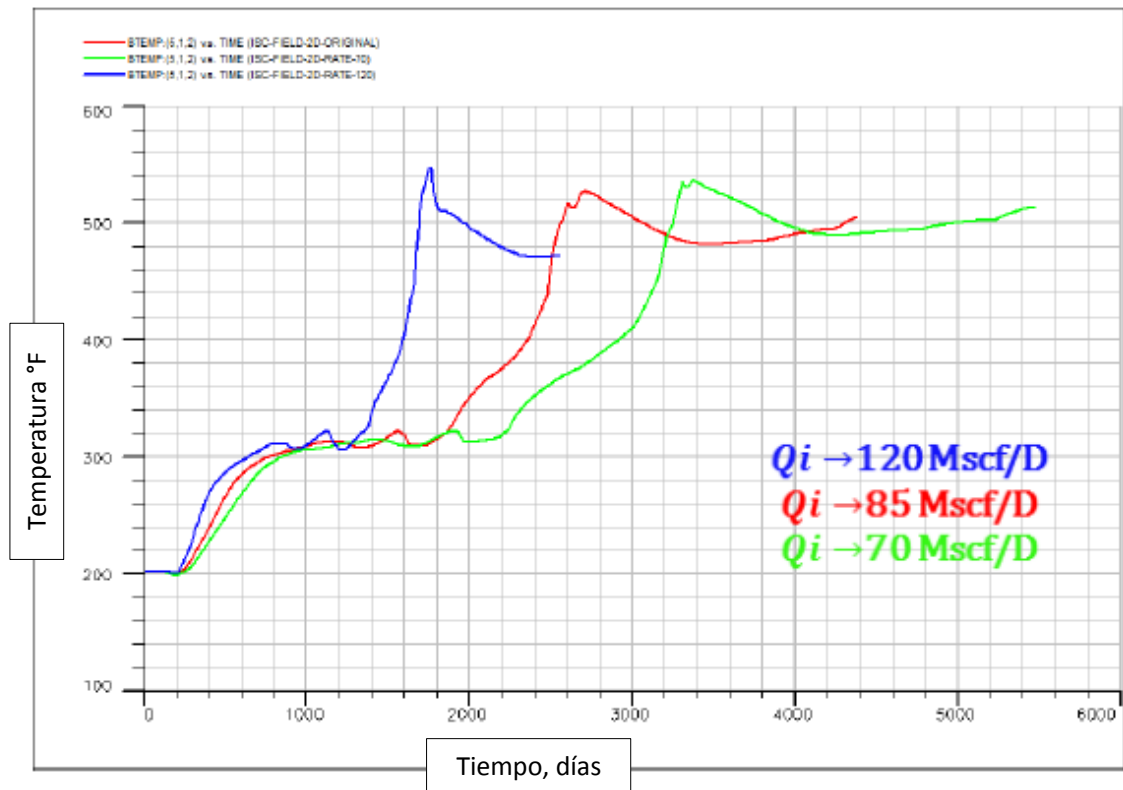
Es el parámetro de mayor importancia en la producción de crudo. Esta determina la velocidad de la zona de combustión, la tasa de producción de fluidos y el radio de extensión de la zona de combustión. Se expresa en PCS/día, (pies cúbicos estándar por día). Se esperaría que una alta tasa de inyección 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”<sup>27</sup>.

<sup>27</sup> YATTE GARZÓN, Fabián Camilo. “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”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander - GRM. 2011. p205.

Diferentes estudios realizados a partir de datos de simulación numérica de yacimientos han mostrado que al incrementarse las tasas de inyección de aire y agua, se altera la velocidad del frente de combustión, por ello, para muchos especialistas en Combustión *In situ*, este parámetro es el más importante pues es un mecanismo de control del proceso desde superficie.

En la Figura 7 se muestra el tiempo para alcanzar la temperatura de combustión a diferentes caudales de inyección.

**Figura 7.** Tiempo para alcanzar la temperatura de combustión a diferentes caudales



**Fuente:** Modificado de SANTAFÉ PÁEZ, Samuel. “Análisis de incertidumbre aplicado a un modelo de simulación de combustión *in situ*”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander - GRM. 2013.

### Presión de inyección de agua y aire

Es un parámetro importante involucrado en los costos de compresión de aire. En crudos pesados, la alta viscosidad del aceite presenta gran resistencia al flujo, de manera que es importante tener altos gradientes de presión entre el pozo inyector y productor para permitir el movimiento del frente de combustión, igualmente es

necesario mantener dicha presión para la recuperación de fluidos, lo cual incide directamente en la presión de descarga del compresor.

“Cabe resaltar que la presión de inyección no debe exceder la presión de fractura de la formación, debido a que la existencia de fracturas permite la canalización del aire evitando que entre en contacto con el combustible”<sup>28</sup>.

“Nelson y McNeil con base a varias pruebas de campo, propusieron una fórmula para determinar la presión de inyección (psia) que permita mover los fluidos desde el pozo inyector al pozo productor, la cual está relacionada con la temperatura del yacimiento (°F), el espesor de la formación (pie), el radio del pozo (pie), la viscosidad del aire (cp), tasa de inyección del aire (scf/día), espaciamento entre pozos (pie), permeabilidad efectiva al aire (md), presión del pozo productor (psia), velocidad del frente de combustión (pie/día) y tiempo para alcanzar la máxima tasa de aire (día)”<sup>29</sup>.

#### **Ec 6. Presión de inyección**

$$P_{iw}^2 = P_w^2 + \frac{i_a u_a (T + 460)}{0,703 k_a h} \left[ \ln \left( \frac{a^2}{r_w V_b t} \right) - 1,238 \right]$$

#### **Relación de inyección agua-aire (WAR)**

Es otro de los parámetros más influyentes en un proceso de combustión *in situ* húmeda. El agua tiene una capacidad calorífica 100 veces mayor que la del aire, lo que contribuye al mejoramiento del transporte de energía desde la zona quemada hacia el crudo. Además este parámetro influye en la utilización de oxígeno, en la deposición de combustible y en la velocidad del frente de combustión.

“La relación agua/aire reportada en la mayoría de los proyectos para combustión se encuentra entre 0 y 2.8 bbl de agua/kpie<sup>3</sup> de aire (unidades de campo) o entre 0 y 15.72 L de agua / m<sup>3</sup> de aire. La escogencia de este valor depende de la disponibilidad de agua, calidad de la misma, inyectividad del pozo, y factores económicos”<sup>30</sup>.

---

<sup>28</sup> REYES NAVAS, Yorleth, MÉNDEZ BOHÓRQUEZ, Gilberto. “Metodología integrada para el monitoreo y seguimiento de yacimientos sometidos a procesos de combustión *in situ*”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2009. P35-53.

<sup>29</sup> SARATHI, Partha S. *In situ* Combustion Handbook. Principles and Practices. Tulsa, Oklahoma: January 1999. P-157.

<sup>30</sup> OLIVEROS GÓMEZ, Luis. “Evaluación Técnica de la Implementación de un Proceso de Combustión *in situ* Posterior a Procesos de Inyección de Vapor en Yacimientos Estratificados de Crudo Pesado con Arenas Delgadas”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2013. P37-50.

Al estudiar la modalidad húmeda del proceso de combustión *in situ*, es necesario realizar un estudio de las reacciones involucradas y, aunque los estudios cinéticos pueden proveer una aproximación cercana de las reacciones de combustión *in situ*, los experimentos con tubos de combustión son obligatorios en la determinación de los parámetros operacionales como lo es la relación agua-aire.

### **1.6.2. Parámetros de yacimiento**

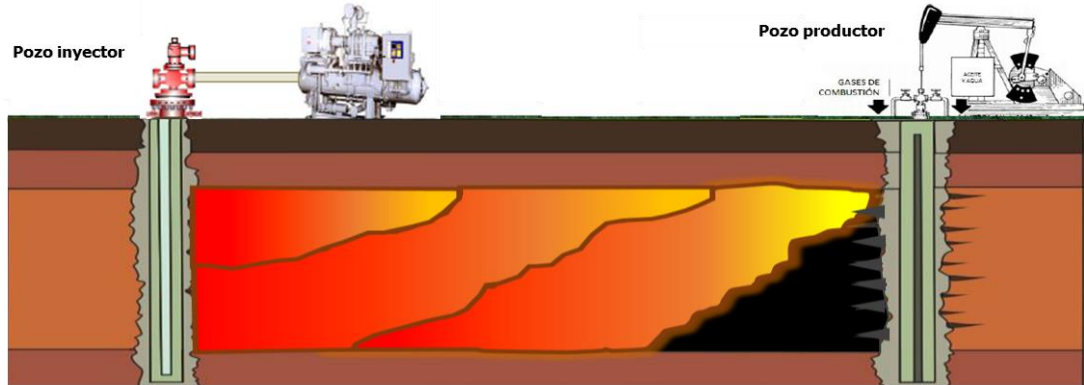
A la hora de implementar un proceso de combustión *in situ* húmeda es necesario conocer algunos factores o parámetros de los yacimientos candidatos con el fin de identificar si son o no aptos para implementar este método de recobro debido a que varios factores tienen gran influencia en el desarrollo eficiente del proceso como el espesor de la arena productora, la extensión lateral y vertical, viscosidad, permeabilidad, porosidad, buzamiento, espaciamiento entre los pozos, acuífero y el patrón de inyección.

#### **Espesor de la arena productora**

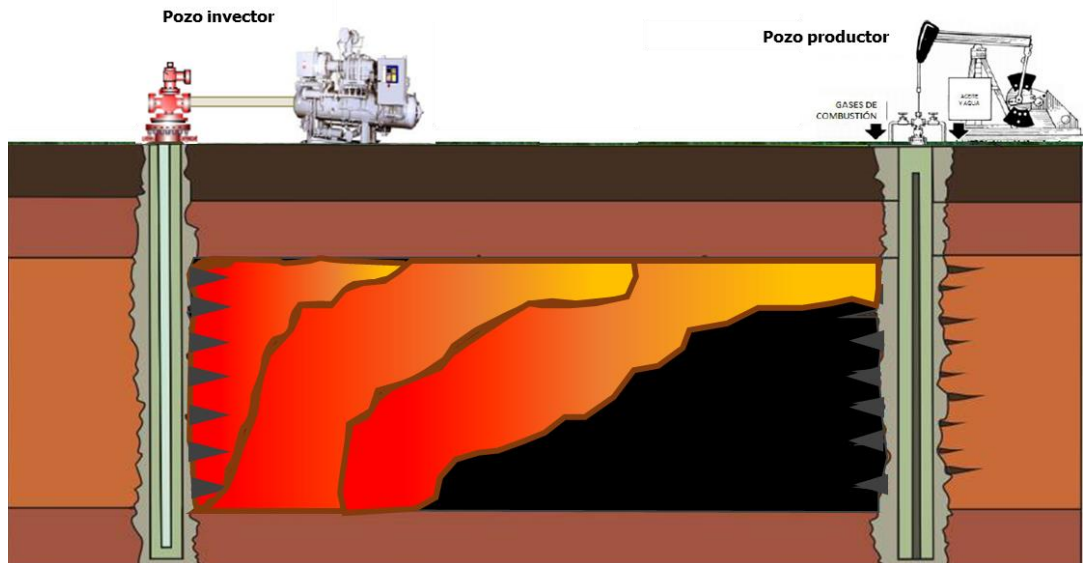
Es un parámetro importante debido a que determina que tan uniforme es el desplazamiento del frente. Una arena delgada (aproximadamente entre 8 pies y 50 pies) permite la conducción más rápida de calor hacia la base de la formación haciendo que el desplazamiento del frente sea uniforme y por ende la eficiencia de barrido volumétrico es alta, por el contrario, en una arena de espesor grueso se presenta el fenómeno que se conoce como *overriding*, en donde el fluido menos denso, es decir, el aire tiende a irse por arriba de la formación haciendo que el desplazamiento del frente no sea uniforme y en consecuencia el barrido volumétrico sea ineficiente.

Sin embargo, la arena tampoco debe ser muy delgada (espesor < 8 pies) pues si bien es cierto que se logra la uniformidad del frente de combustión, al ser tan delgada inevitablemente se pierde calor hacia las capas adyacentes, esta pérdida de calor hace que la temperatura del frente disminuya y por tanto se promuevan las reacciones de oxidación a bajas temperaturas en lugar de las reacciones HTO y en consecuencia se disminuye la recuperación de hidrocarburos. Por otra parte cuando la arena es muy delgada pero presenta intercalaciones de arcillas, estas actúan como ladronas de calor e impiden las pérdidas hacia las capas adyacentes manteniendo las altas temperaturas del frente de combustión.

**Figura 8.** Propagación del frente en una arena delgada



**Figura 9.** Propagación del frente en una arena gruesa



### **Extensión lateral y vertical**

Las arenas bien sorteadas y homogéneas tienden a tener una buena continuidad lateral y vertical lo que permite el libre movimiento de los fluidos hacia los pozos productores, dicha continuidad se puede ver afectada por la deposición de partículas finas, presencia local de arcilla y materiales cementantes.

Una buena continuidad tanto lateral como vertical es fundamental para que la implementación de un proceso de combustión *in situ* tenga éxito a tal punto que

aunque un yacimiento presente alta porosidad, permeabilidad y saturación de aceite, el proceso puede fallar si presenta una continuidad pobre pues el flujo de los fluidos hacia los pozos productores se dificulta. En yacimientos de espesor delgado este parámetro está directamente relacionado con la cantidad de aceite *in situ*, por ende incide en la viabilidad económica del proceso.

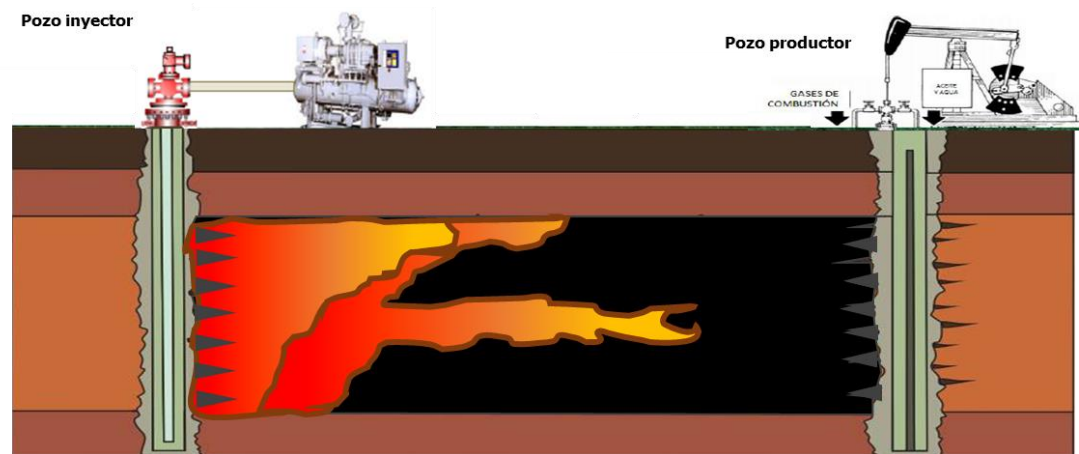
## Permeabilidad

Este parámetro no repercute significativamente en los fenómenos fisicoquímicos de la combustión, sin embargo, tiene relación con la economía del proceso por lo tanto es importante tenerlo en cuenta.

La baja permeabilidad en un yacimiento de crudos pesados aumenta el flujo mínimo de aire requerido para sostener la combustión por tal razón los requerimientos de presión aumentan y consigo los costos de compresión, además se prolonga el tiempo de la operación.

Ahora bien, cuando la permeabilidad es alta el avance del frente es uniforme debido a que se generan caminos de flujo preferenciales que compensan los efectos gravitacionales, por otra parte, “estos caminos de flujo provocan la canalización del aire que trae consigo una posible irrupción rápida en los pozos productores. Sin embargo, si se hace un estudio geológico del yacimiento se pueden ubicar los pozos en dirección favorable a la permeabilidad y así maximizar el recobro de aceite”<sup>31</sup>.

**Figura 10.** Canalización del aire



<sup>31</sup> PALACIO OLIVARES, Carlos. “Evaluación de Yacimientos Prospectos para la Implementación de Procesos de Combustión *in situ* Mediante Analogías”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2010. P16-31.

## **Porosidad**

“A la hora de implementar un proceso de combustión *in situ*, un yacimiento con baja porosidad presenta dos inconvenientes: primero, la cantidad de aceite contenido en la roca y segundo, el almacenamiento de calor en el yacimiento, una baja porosidad implica baja cantidad de aceite a extraer y un mayor almacenamiento de calor lo que significa un ineficiente aprovechamiento del mismo. Sin embargo, en un proceso de combustión *in situ* húmeda el segundo aspecto no es importante pues este calor almacenado es absorbido por el agua inyectada y posteriormente se utiliza para el desplazamiento del crudo”<sup>32</sup>.

## **Acuífero**

La presencia de un acuífero en el yacimiento no es deseable desde el punto de vista anisotrópico, sin embargo, es favorable pues ayuda a mantener la presión en el yacimiento. Al implementar el método de combustión *in situ* húmeda en un yacimiento que cuenta con un acuífero activo o medianamente activo, el agua del mismo ayuda a recuperar el calor almacenado en la zona quemada del yacimiento por ende el agua que se debe inyectar al mismo disminuye.

## **Viscosidad**

“Una viscosidad alta del aceite en un yacimiento dificulta el desplazamiento del crudo hacia los pozos productores debido a que el aire tiende a irse por el camino de menor resistencia ocasionando el fenómeno de overriding que como se ha dicho anteriormente hace que el desplazamiento del frente no sea uniforme disminuyendo la cantidad de crudo desplazado. Para facilitar el flujo de los fluidos hacia los pozos, la arena del yacimiento se calienta para que se dé una transferencia de calor y la viscosidad del crudo disminuya”.<sup>33</sup>

## **Buzamiento**

---

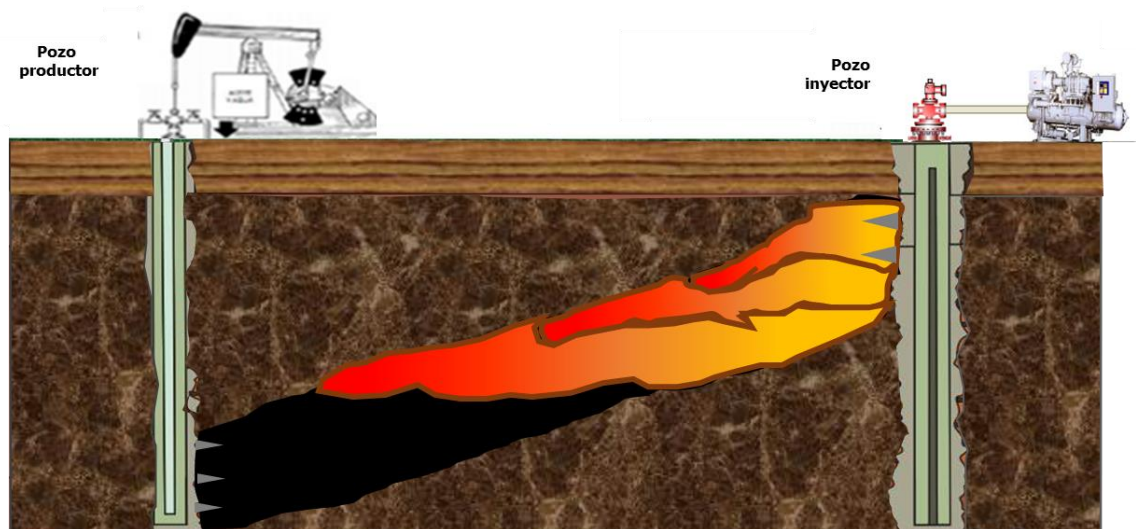
<sup>32</sup> PALACIO OLIVARES, Carlos. “Evaluación de Yacimientos Prospectos para la Implementación de Procesos de Combustión *in situ* Mediante Analogías”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2010. P16-31.

<sup>33</sup> REYES NAVAS, Yolet, MÉNDEZ BOHÓRQUEZ, Gilberto. “Metodología integrada para el monitoreo y seguimiento de yacimientos sometidos a procesos de combustión *in situ*”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2009. P35-53.

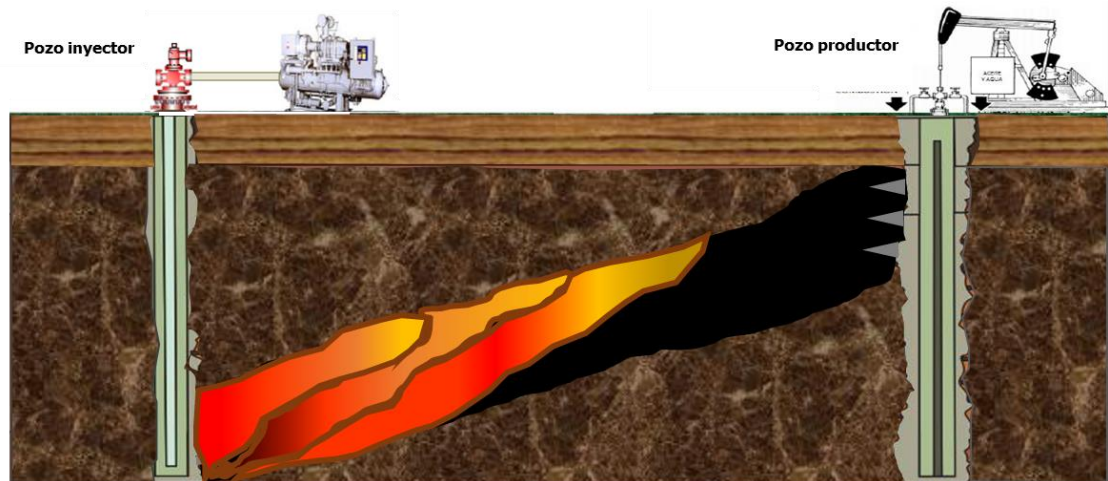
El buzamiento se refiere al grado de inclinación que tiene la formación con respecto a la horizontal, es un parámetro de gran importancia a la hora de localizar los pozos inyectoros y productores con el fin de obtener un mayor barrido volumétrico.

Si el buzamiento es grande, es más importante el efecto gravitacional que el fenómeno de overriding, por ende, en este caso el pozo inyector se ubica en la parte superior de la formación y el productor en la parte inferior pues los fluidos por el efecto de la gravedad tienden a desplazarse hacia abajo, esto es lo que se conoce como buzamiento arriba. Por el contrario, si el buzamiento es pequeño el efecto gravitacional no es tan importante comparado con la tendencia del aire a desplazarse hacia arriba (overriding), por esta razón el pozo inyector se ubica en la parte inferior del yacimiento y el productor en la parte superior, esto se conoce como buzamiento abajo.

**Figura 11.** Buzamiento arriba



**Figura 12. Buzamiento abajo**



### **Espaciamiento entre pozos**

El espaciamiento entre los pozos necesario para implementar el proceso debe ser la distancia óptima para maximizar la recuperación de aceite. Si el espaciamiento entre los pozos es pequeño se presenta la irrupción temprana de los gases en el pozo productor y se obtiene un factor de recobro bajo, pero si el espaciamiento es muy grande la recuperación de aceite es lenta lo que perjudica la economía del proceso.

“En arenas de alta permeabilidad donde la movilidad del aire no está restringida, es más conveniente usar un amplio espaciamiento entre pozos para evitar daños tempranos en las tuberías de producción y en el *casing* asociadas con las altas temperaturas”<sup>34</sup>.

### **Patrón de inyección**

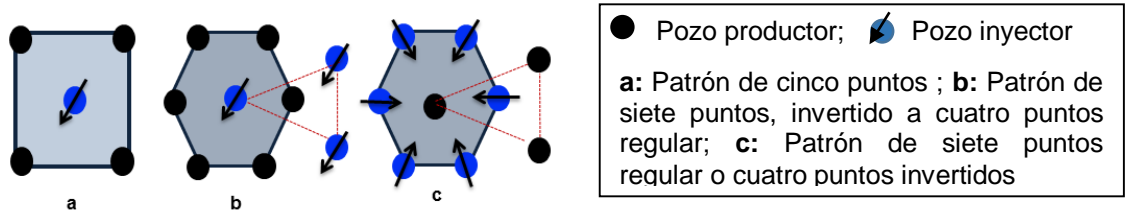
“La configuración de los pozos es una de las variables más importantes para la estrategia de planeación y explotación de un yacimiento. Dependiendo de la configuración o patrón de los pozos, el proceso tiene un tiempo de respuesta, un límite económico, una eficiencia térmica y de barrido y un factor de recobro. El patrón escogido debe tener en cuenta la continuidad del yacimiento, las

---

<sup>34</sup> OLIVEROS GÓMEZ, Luis. “Evaluación Técnica de la Implementación de un Proceso de Combustión *in situ* Posterior a Procesos de Inyección de Vapor en Yacimientos Estratificados de Crudo Pesado con Arenas Delgadas”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2013. P37-50.

propiedades del medio poroso y de los fluidos”<sup>35</sup>. Los patrones más usados son los modelos de cinco puntos y de siete puntos normal o invertido que se muestran en la Figura 13.

**Figura 13.** Patrones de pozos más usados



Fuente: 34.

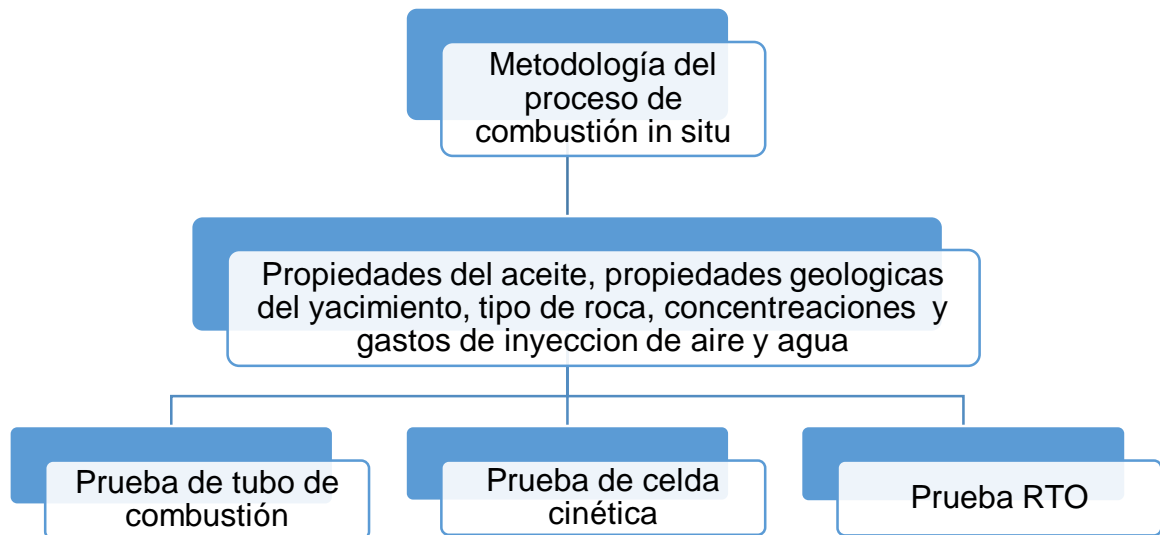
## 1.7. PRUEBAS DE LABORATORIO

A todo proceso de recuperación de hidrocarburos se le deben de hacer diferentes pruebas de laboratorio antes de ser puesto en marcha en campo. Estas pruebas se basan en una metodología, la cual es propuesta para que el proceso tenga éxito al ser aplicado en campo.

Para el estudio del proceso de combustión *in situ* se toman en cuenta dos experimentos principales, los cuales son: experimento de celda cinética y el del tubo de combustión. Estos experimentos, se llevan a cabo sobre muestras de aceite, arenas, arcillas y en las mezclas que se dan al combinar estos componentes entre sí. La figura 14 muestra un procedimiento general de la metodología aplicada en el estudio de la combustión *in situ* a escala de laboratorio.

<sup>35</sup> GONZALO G.L.: “Recuperación Mejorada de Hidrocarburos: Inyección Cíclica y Continua de Vapor”. Capítulo 1. Noviembre de 1989.

**Figura 14.** Metodología aplicada para un proceso de combustión *in situ* húmeda



**Fuente:** Modificado de HERNÁNDEZ DÍAZ, Daniel. “Análisis y metodología del proceso de combustión *in situ*”. México D.F. Universidad Nacional Autónoma de México. 2011.

### 1.7.1. Prueba de celda cinética

Para la realización óptima de esta prueba, es aconsejable seguir una serie de pasos lógicos, que son mostrados en la tabla 5.

**Tabla 5.** Procedimiento de la prueba de celda cinética.

Experimento Cinético.
Calibrar el analizador
Determinar las proporciones de arena, aceite y agua de yacimiento.
Mezclar las proporciones de arena, aceite y agua núcleos de yacimiento.
Introducir la mezcla homogénea en la celda cinética.
La celda cinética se pone dentro del horno que va conectado en la línea experimental.
Probar la celda a presión.
Inyectar aire.
Medir los valores de concentración y temperaturas para determinar la energía de activación.

**Fuente:** Modificado de HERNÁNDEZ DÍAZ, Daniel. “Análisis y metodología del proceso de combustión *in situ*”. México D.F. Universidad Nacional Autónoma de México. 2011.

- El analizador de gas se calibra de acuerdo a las especificaciones de manufactura. Las concentraciones de oxígeno, metano y los óxidos de carbono en los efluentes de gases se miden una vez cada minuto y se registran en el computador.
- Las pruebas cinéticas se realizan en mezclas de arena, aceite y agua o en trozos de núcleos de yacimiento. Esta mezcla se utiliza para simular un medio poroso que produce aceite. La mezcla se hace en proporciones que van de 50g- 85g de arena o en su defecto para poder lograr un mejor entendimiento del proceso se utilizan trozos de núcleos de yacimientos carbonatados o arenosos, 2g-4g de agua y 2g-12g de aceite. El rango para el contenido de aceite depende de los requerimientos de la saturación de aceite y de la reactividad del aceite. Aunque algo que no se puede dejar de lado es la importancia de la mineralogía de la matriz de los núcleos en dicho proceso, se dice esto porque una matriz de un carbonato comparándolo con una matriz de una arena favorece de mejor manera a la reacción de oxidación a baja temperatura y hay un consumo de oxígeno sin una generación significativa de CO<sub>2</sub>.
- El aceite, agua y arena o trozos de núcleos se mezclan con una espátula hasta que una mezcla homogénea sea obtenida.
- La mezcla se debe aplastar dentro del acople de la celda cinética. Después de llenar la celda, el tapón de la misma se aprieta.
- La celda cinética se pone dentro del horno conectada a la línea experimental.
- La celda debe de ser probada a presión inyectando nitrógeno a 100 psi.
- Al ser activado el horno se inyecta aire a 0.5 litros por minuto estándar (SLPM) o 1.55 LPM dependiendo del experimento. En el momento de estar inyectando aire se va a generar una contrapresión, la cual depende de la presión suministrada a la celda.
- Entonces el analizador de gas va midiendo la concentración del componente en el efluente de gas y los datos son registrados simultáneamente en una computadora. La temperatura es medida con un termocupla que se encuentra en un termopozo. El termopozo termina en el centro de la celda. Por lo tanto, los valores de temperatura son leídos desde el centro de la celda.

A partir del experimento de la celda cinética se pueden obtener resultados favorables que ayudan a determinar la energía de activación la temperatura a la cual se puede originar tanto la oxidación a alta temperatura así como la oxidación a baja temperatura, aunque cada una de estas temperaturas se obtendrían

analizando el consumo de oxígeno y la energía de activación que se puede lograr durante el proceso.

### 1.7.2. Prueba RTO

“La prueba *Ramped Temperature Oxidation* RTO es una técnica de análisis cuantitativo que se basa en el calentamiento controlado a una velocidad de aumento de temperatura (20-40°C por hora) de núcleos saturados con una mezcla de arena y crudo en un reactor tubular tipo flujo pistón, a través del cual fluye una corriente de aire hasta que no se vea ningún cambio en la concentración del gas a la salida. Durante la prueba el calentamiento es continuo hasta alcanzar la temperatura máxima permitida a partir de la cual el proceso se lleva a cabo a esta temperatura”<sup>36</sup>. Con esta prueba se puede determinar el comportamiento de la oxidación y los parámetros cinéticos de la reacción de combustión necesarios para evaluar la razón de inyección agua-aire mediante la simulación numérica de yacimientos. El montaje experimental de las pruebas RTO se muestra en la figura 15.

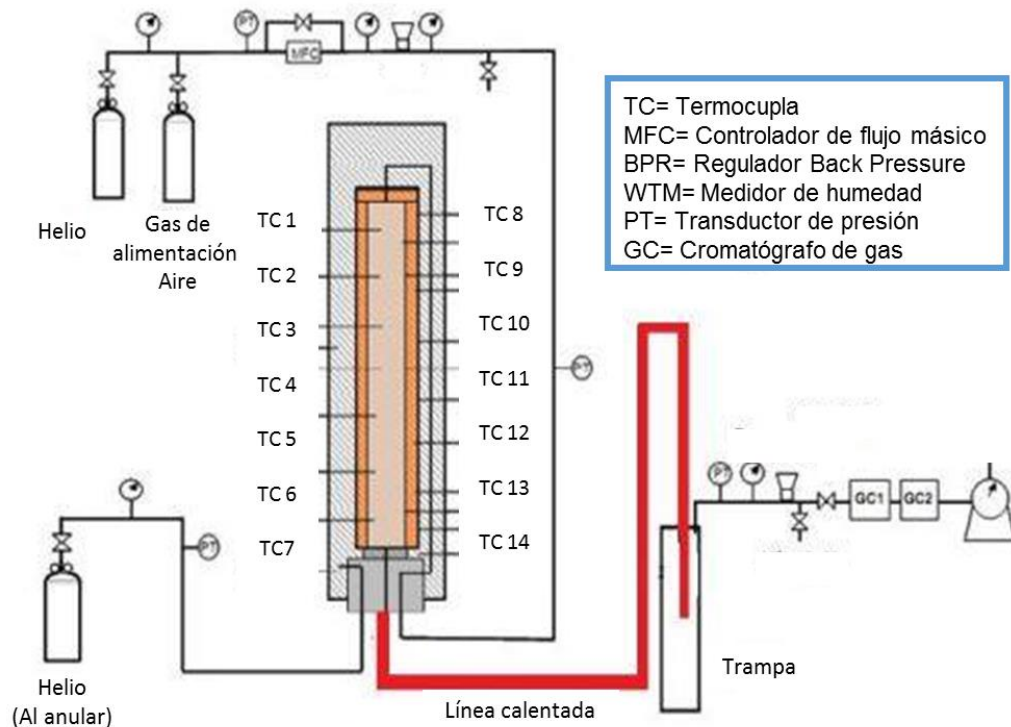
Consta de dos reactores tipo flujo pistón PFR, uno de ellos es el reactor activo que contiene un núcleo saturado con aceite y agua, el otro es el reactor de referencia el cual esta empacado con un núcleo limpio. “Ambos reactores se encuentran sobre un bloque de calentamiento común, el proceso de combustión ocurre en el reactor activo en el cual se inyecta aire, mientras en el reactor de referencia se inyecta gas inerte, a lo largo de la prueba se comparan las temperaturas mediante una serie de termocuplas ubicadas a lo largo de los reactores con el fin de determinar los eventos exotérmicos y endotérmicos que ocurren en el reactor activo, además a la salida del reactor activo se ubica una trampa para líquidos y posteriormente el gas pasa a un cromatógrafo para ser analizado y determinar su composición”<sup>37</sup>.

---

<sup>36</sup> OLIVEROS GÓMEZ, Luis. “Determinación de parámetros de diseño y evaluación técnica de procesos de combustión *in situ* a partir de pruebas de tubo de combustión”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2011. p6-8.

<sup>37</sup> RUIZ CAÑAS, María. “Desarrollo de un modelo cinético para un proceso de Combustión *in situ* a partir de pruebas ramped temperatura Oxidation (RTO)”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2013.

**Figura 15.** Montaje experimental de las pruebas RTO



**Fuente:** RUIZ CAÑAS, María. “Desarrollo de un modelo cinético para un proceso de Combustión *in situ* a partir de pruebas ramped temperatura Oxidation (RTO)”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2013.

“El procedimiento experimental de la prueba RTO se desarrolla mediante los siguientes pasos”<sup>38</sup>:

- Presurización del sistema: se inyecta un gas inerte (helio o nitrógeno) en ambos reactores para presurizar el sistema y desarrollar la prueba a las condiciones de presión del yacimiento.
- Se interrumpe la inyección de gas inerte en el reactor activo y se empieza a inyectar aire, en el momento en que este entra en contacto con el núcleo saturado y debido a que durante la prueba se mantiene una tasa de calentamiento constante, se genera la ignición y empieza la combustión.

<sup>38</sup> D.G. MALLORY, R.G. MOORE, S.A. METHA, M.G. URSENBACH, I.I. ABU. High pressure Ramped temperature Oxidation study of a heavy oil and core test #2- whole oil. HOT-TEC Energy Inc. April 2011.

- Se comparan las temperaturas en las diferentes zonas de los reactores mediante las termocuplas que están ubicadas a lo largo de los mismos, esto permite conocer el comportamiento térmico del crudo dentro del yacimiento, el momento en que se presentan los diferentes tipos de reacciones (LTO, IT y HTO).
- A lo largo de la prueba se realiza un análisis del gas efluente cada 30 minutos mediante cromatografía de gases.
- Se analiza el líquido contenido en las trampas mediante un análisis SARA el cual es un método de caracterización de crudos pesados basado en fraccionamiento que permite determinar la concentración de compuestos saturados, aromáticos, resinas y asfáltenos.
- En el momento en que la composición del gas efluente se mantenga constante se interrumpe la inyección de aire en el reactor activo y de gas inerte en el de referencia y se despresuriza el sistema.
- Terminada la prueba se analiza el núcleo activo de hidrocarburos residuales (crudo extraíble y coque) y agua mediante un análisis SARA, el análisis del núcleo del reactor activo también se hace antes de iniciar la prueba.

### **1.7.3. Prueba de tubo de combustión**

El objetivo de estas pruebas es representar un pequeño volumen del yacimiento en un reactor tipo flujo pistón, permiten la simulación de la propagación del frente de combustión y de las reacciones químicas a condiciones aproximadas a las del yacimiento, proveen información cuantitativa sobre la combustión y sobre el desarrollo de la recuperación de aceite que se puede lograr en campo, pero no dan información sobre la cinética de las reacciones que ocurren en el yacimiento. Los experimentos con tubos de combustión son obligatorios para determinar los parámetros necesarios para diseñar, implementar y hacer predicciones del desempeño en proyectos de campo. En el siguiente capítulo se hará una explicación más detallada de estas pruebas.

## 2. PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN HÚMEDA

En este capítulo se explica la importancia, el montaje experimental y el procedimiento de una prueba de tubo de combustión ya que dichas pruebas son el primer paso en el diseño de un proceso de combustión *in situ* en cualquiera de sus modalidades. Además se estudia y analiza una prueba de tubo suministrada por el Instituto colombiano de petróleo-ICP para determinar las variables más relevantes en el proceso.

### 2.1. GENERALIDADES DE LA PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN

Para el estudio del proceso de combustión *in situ* se toman en cuenta dos experimentos principales, los cuales son: experimento del tubo cinético y el del tubo de combustión. Estos experimentos, se llevan a cabo sobre muestras de aceite, arenas, arcillas y en las mezclas que se dan al combinar estos componentes entre sí.

Aunque los estudios cinéticos pueden proveer una aproximación cercana de las reacciones de combustión *in situ*, los experimentos con tubos de combustión son obligatorios en la determinación de los parámetros necesarios para diseñar e implementar proyectos de campo.

El objetivo de las pruebas de tubo es representar un pequeño volumen del yacimiento simulado a escala de laboratorio mediante un reactor tubular, permiten la simulación de la propagación del frente de combustión y de las reacciones químicas a condiciones aproximadas a las del yacimiento, además proveen información cuantitativa sobre la combustión y sobre el desarrollo de la recuperación de aceite que se puede lograr en campo, pero no dan información sobre la cinética de las reacciones que ocurren en el yacimiento.

Este tipo de pruebas están desarrolladas para crudos con gravedades que varían entre 6 y 45° API, entre un rango de presiones entre 1 y 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. En este tipo de pruebas, el proceso más común que se desarrolla es la combustión *in situ* seca, aunque también se pueden llevar a cabo pruebas de combustión húmeda y súper húmeda.

“Mediante las pruebas de tubo se puede obtener la siguiente información”<sup>39</sup>:

- Cantidad de combustible quemado.
- Cantidad de aire que se requiere para quemar cierto volumen del yacimiento.
- Relación aire-combustible.
- Aceite recuperado.
- Cantidad de aire inyectado y la proporción de agua inyectada en la combustión *in situ* húmeda.
- Composición de los fluidos producidos.
- Velocidad de avance del frente de combustión.
- Relación atómica H/C del combustible quemado.
- Exceso de aire y utilización de oxígeno.

La principal desventaja de las pruebas de tubo de combustión es que son experimentos no escalables, por lo tanto, no es correcto hacer correlaciones directas de los datos que se obtienen en los experimentos al yacimiento, sin embargo, dichos experimentos se hacen con el crudo y la arena proveniente del mismo bajo condiciones de operación apropiada, esto permite que las reacciones químicas y la estequiometría de reacción en el tubo sea muy parecida a la que ocurre en el yacimiento pues es controlada por la temperatura, presión y características químicas del crudo.

Además, para el caso de las pruebas de tubo de combustión húmeda es posible determinar la relación de inyección agua-aire (WAR) óptima y crítica, la cual como se dijo en el capítulo anterior, es el parámetro operacional más importante en un proceso de combustión *in situ* húmeda debido a que determina la eficiencia del mismo al punto de que la elección errónea de este parámetro puede conllevar al fracaso del proceso. Sin embargo, se debe tener cuidado en usar esta información a escala de campo pues la relación de inyección agua-aire es sensible a las características de transferencia de calor en tubos de combustión.

En otras palabras, las pérdidas de calor en el tubo de combustión son distintas a las que se dan en el yacimiento, esto se debe a que el yacimiento está naturalmente aislado por los estratos adyacentes y las pérdidas de calor son mínimas, por el contrario, en un tubo de combustión las pérdidas de calor son altas debido a que está hecho de metal y la cantidad de calor liberado es limitado, sin embargo, esto se soluciona ubicando calentadores en la parte superior del tubo y un material de aislamiento poroso que se ubica alrededor del mismo con lo que disminuyen las pérdidas de calor y se ayuda a mantener el frente de

---

<sup>39</sup> YATTE GARZÓN, Fabián Camilo. “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”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander - GRM. 2011. p205.

combustión, cabe aclarar que las propiedades de la transferencia térmica y el perfil de temperatura no se distorsionan con la presencia de los calentadores. Ahora bien, se pueden presentar dos escenarios extremos, el primero es que las pérdidas de calor en el tubo sean excesivas y apenas se logre mantener el frente de combustión; el segundo escenario es que se mantengan temperaturas demasiado altas durante todo el proceso mediante los calentadores haciendo que toda el agua inyectada se vaporice instantáneamente y por ende el nivel energía no disminuye de manera significativa siendo prácticamente una combustión seca. Las condiciones reales en el yacimiento están en alguna parte entre estos dos extremos, lo que se puede representar con un buen manejo de la tasa de transferencia de calor de los calentadores, de esta forma, se cree que las condiciones mantenidas en el tubo de combustión representan lo que prevalece en el campo. “Para concluir, según lo mencionado anteriormente, la extrapolación de la relación de inyección agua-aire (WAR) a las condiciones de campo no es tan confiable debido a que no es posible representar exactamente las pérdidas de calor que ocurren en el yacimiento, sin embargo, si es posible observar cómo se ve afectada la eficiencia de la combustión en función de la cantidad de agua que se inyecta y se puede tener una idea aproximada de la relación de inyección agua-aire en yacimiento a partir de la obtenida en laboratorio”<sup>40</sup>.

## **2.2. MONTAJE EXPERIMENTAL DE UNA PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN**

En la figura 16 se muestra un esquema del montaje experimental de las pruebas de tubo de combustión, en el cual se destacan cinco partes principales: el sistema de inyección de fluidos, tubo de combustión, sistema de producción de fluidos, sistema de análisis de gases y sistema de control y registro de datos.

- Sistema de inyección de fluidos: Para el caso de una prueba de tubo de combustión seca se inyecta Nitrógeno y aire, el propósito de inyectar Nitrógeno es drenar el sistema antes de iniciar la prueba y en la parte final de la misma para enjuagar y enfriar el tubo, además se inyecta para presurizar el sistema y realizar el experimento a las condiciones de presión del yacimiento. “Durante la inyección de Nitrógeno al inicio de la prueba, la composición del gas producido se monitorea continuamente y se recoge cualquier líquido desplazado, una vez se dejen de producir líquidos se inicia el calentamiento de la parte superior del tubo mediante una serie de calentadores hasta aproximadamente 650°F, en este punto se suspende la inyección de Nitrógeno y se inicia la inyección de

---

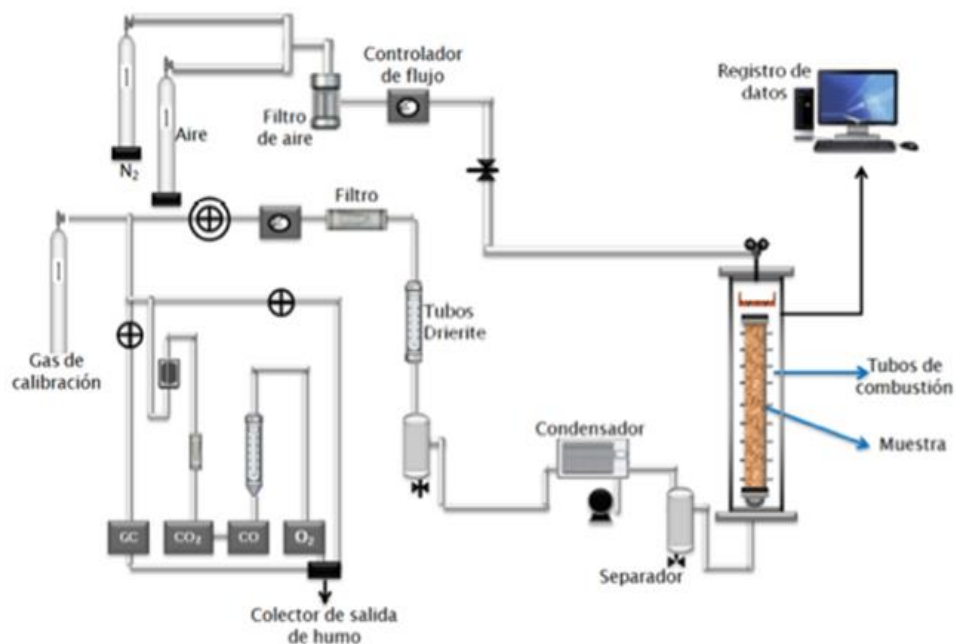
<sup>40</sup> GONZALEZ, Ana. Diseño de dos equipos experimentales (tubular y tridimensional) para pruebas de laboratorio de Combustión *in situ* a condiciones de yacimiento. Caracas, 2007. Universidad Central de Venezuela. p. 56-58.

aire el cual al entrar en contacto con la muestra dentro del reactor genera la ignición<sup>41</sup>.

Ahora bien, si se trata de una prueba de combustión húmeda se inyecta Nitrógeno, aire y agua. La inyección de Nitrógeno tiene el mismo propósito que en el modo seco, se realiza al principio y al final de la prueba, en el inicio de la prueba cuando ya no se produce ningún líquido se suspende la inyección de Nitrógeno, se encienden los calentadores para elevar la temperatura hasta 500°F (temperatura de ignición deseada) y se inicia la de aire, en el momento en el que se genera la combustión, es decir, cuando empiece a verse producción de Dióxido de Carbono, se inyecta agua gradualmente hasta alcanzar la relación de inyección agua-aire deseada.

“Los fluidos se dejan de inyectar cuando el frente de combustión alcanza el fondo del tubo, momento en el cual se vuelve a inyectar nitrógeno”<sup>42</sup>.

**Figura 16.** Montaje para la prueba de tubo de combustión



**Fuente:** SARATHI, Partha S. *In situ* Combustion Handbook. Principles and Practices. Tulsa, Oklahoma: January 1999. (BDM Petroleum Technologies) NIPER/BDM-0374.

<sup>41</sup> GONZALEZ, Ana. Diseño de dos equipos experimentales (tubular y tridimensional) para pruebas de laboratorio de Combustión *in situ* a condiciones de yacimiento. Caracas, 2007. Universidad Central de Venezuela. p. 56-58

<sup>42</sup> BAGCI, Suat., VERSAN KOK, Mustafa. *In situ* Combustion laboratory studies of Turkish heavy oil reservoirs. In: Fuel processing technology. Paper No 74. June 23, 2001. pp 65-79.

- Sistema de inyección de fluidos: “Para el caso de una prueba de tubo de combustión seca se inyecta nitrógeno y aire, el propósito de inyectar nitrógeno es drenar el sistema antes de iniciar la prueba y en la parte final de la misma para enjuagar y enfriar el tubo, además se inyecta para presurizar el sistema y realizar el experimento a las condiciones de presión del yacimiento. Durante la inyección de nitrógeno al inicio de la prueba, la composición del gas producido se monitorea continuamente y se recoge cualquier líquido desplazado, una vez se dejen de producir líquidos se inicia el calentamiento de la parte superior del tubo mediante una serie de calentadores hasta aproximadamente 650°F, en este punto se suspende la inyección de nitrógeno y se inicia la inyección de aire el cual al entrar en contacto con la muestra dentro del reactor genera la ignición”<sup>43</sup>.

Ahora bien, si se trata de una prueba de combustión húmeda se inyecta nitrógeno, aire y agua. La inyección de nitrógeno tiene el mismo propósito que en el modo seco, se realiza al principio y al final de la prueba, en el inicio de la prueba cuando ya no se produce ningún líquido se suspende la inyección de nitrógeno, se encienden los calentadores para elevar la temperatura hasta 500°F (temperatura de ignición deseada) y se inicia la de aire, en el momento en el que se genera la combustión, es decir, cuando empiece a verse producción de dióxido de carbono, se inyecta agua gradualmente hasta alcanzar la relación de inyección agua-aire deseada.

“Los fluidos se dejan de inyectar cuando el frente de combustión alcanza el fondo del tubo, momento en el cual se vuelve a inyectar nitrógeno”<sup>44</sup>.

- Tubo de combustión: Es un simulador físico no escalable que representa una parte del yacimiento a escala de laboratorio con la limitante de flujo unidimensional. La figura 17 es la representación de un tubo de combustión con sus partes principales.

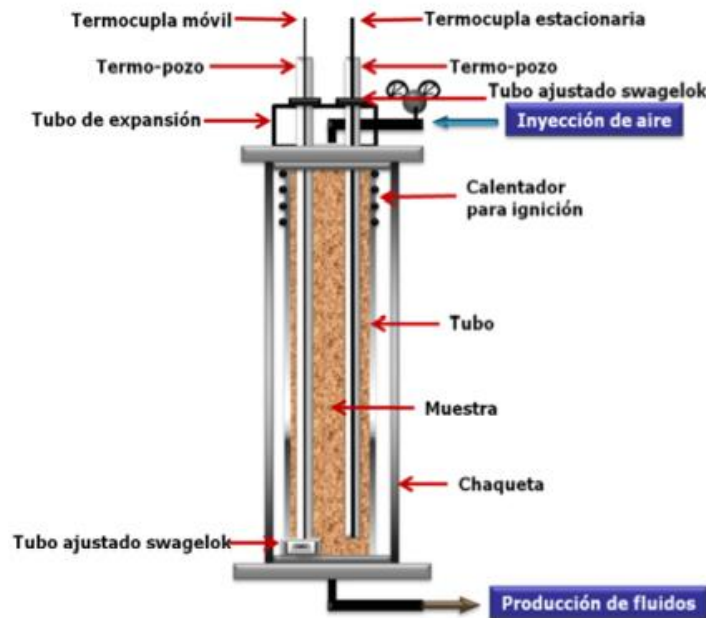
En el extremo superior tiene una tubería para la inyección de aire, después de la cual hay un bache de arena limpia para homogeneizar el aire inyectado, posteriormente se encuentran unas resistencias colocadas en la parte superior del tubo que elevan la temperatura del sistema para garantizar la ignición en el momento en que el oxígeno entre en contacto con la muestra. A lo largo del tubo de combustión se ubican una serie de termocuplas insertadas dentro de los termopozos para registrar las temperaturas.

---

<sup>43</sup> GONZALEZ, Ana. Diseño de dos equipos experimentales (tubular y tridimensional) para pruebas de laboratorio de Combustión *in situ* a condiciones de yacimiento. Caracas, 2007. Universidad Central de Venezuela. p. 56-58

<sup>44</sup> BAGCI, Suat., VERSAN KOK, Mustafa. *In situ* Combustion laboratory studies of Turkish heavy oil reservoirs. In: Fuel processing technology. Paper No 74. June 23, 2001.pp 65-79.

**Figura 17.** Tubo de combustión



**Fuente:** SARATHI, Partha S. *In situ* Combustion Handbook. Principles and Practices. Tulsa, Oklahoma: January 1999. (BDM Petroleum Technologies) NIPER/BDM-0374.

“La chaqueta presurizada suele ser fabricada en acero de carbono y está diseñada para soportar la presión de operación deseada. Entre el tubo y la chaqueta hay un espacio anular que se llena con un material de aislamiento poroso que se presuriza con gas inerte (Nitrógeno). En el extremo inferior del tubo, se encuentra la salida de los fluidos producidos que está conectado a un sistema de separación de dos etapas, los líquidos son atrapados en una trampa de alta presión y el aceite y el agua son separadas y determinadas en la historia de producción”<sup>45</sup>.

El caudal de aire se regula mediante un estrangulador de caudal crítico y el aire alcanza la velocidad sónica en la punta, la tasa de inyección de aire se mantiene constante en toda la prueba aunque la presión de inyección en el tubo de combustión fluctúa, la presión a la salida del mismo se mantiene constante mediante un regulador de contrapresión. Los gases de escape también son analizados para conocer el contenido de oxígeno, monóxido de carbono y dióxido de carbono mediante cromatografía de gases.

- Sistema de producción de fluidos: Los fluidos producidos son separados mediante un sistema de dos etapas, en la primera etapa los gases son separados del agua y del aceite y en la segunda etapa se separa el agua del

<sup>45</sup> SARATHI, Partha S. *In situ* Combustion Handbook. Principles and Practices. Tulsa, Oklahoma: January 1999. (BDM Petroleum Technologies) NIPER/BDM-0374.

aceite; el líquido se recoge en botellas graduadas y se pesa cada 15 minutos y el gas pasa a una etapa de condensación para recuperar el líquido que aún queda en dicha corriente, posteriormente el gas pasa a un cromatógrafo para su análisis.

- Sistema de análisis de gases: Mediante cromatografía se determina la composición de Dióxido de Carbono, Oxígeno, Nitrógeno, Monóxido de Carbono, Hidrógeno y metano con un detector de conductividad térmica cada 15 o 20 minutos, antes del cromatógrafo se instala un medidor de prueba de humedad que permite la medición de los gases de combustión producidos la cual es registrada en un computador.
- Sistema de control y registro de datos: “Se usan dos registradores y dos computadores para registrar tiempo, temperaturas en la chaqueta, temperatura en la termocupla móvil, tasa de inyección de gas, tasa de gas producido y tasa de gas acumulada. Estos parámetros son registrados cada 30 segundos y son presentados en los computadores para su monitoreo”<sup>46</sup>.

### **2.3. PROCEDIMIENTO GENERAL DE UNA PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN**

El procedimiento de las pruebas de tubo de combustión no es estándar para cualquier prueba al igual que el montaje experimental, sin embargo, la idea general o la secuencia de pasos a seguir no difiere de manera significativa. A continuación se describirá el procedimiento realizado en la Universidad de Texas A&M por José Rodríguez<sup>47</sup>.

En primer lugar se realiza una mezcla de arena, arcilla, agua y aceite en un recipiente con una pala pequeña, esta muestra se introduce en el tubo el cual fue asegurado previamente en posición vertical, la muestra es aprisionada en el tubo mediante un émbolo metálico hasta que la muestra se encuentre a aproximadamente 10 cm del tope del tubo, el resto del tubo se llena con un bache de arena limpia.

Posteriormente se instala el sistema de inyección y se inyecta Nitrógeno con el fin de testear el sistema y asegurar que no se presente ninguna fuga a 400 psi de presión durante media hora, para ello el sistema de producción de fluidos debe permanecer cerrado. Una vez desarrollada esta pequeña prueba de manera satisfactoria, es decir, que no se haya presentado ninguna fuga, se abre levemente el sistema de producción de fluidos para que la presión en el tubo

---

<sup>46</sup> SARATHI, Partha S. *In situ* Combustion Handbook. Principles and Practices. Tulsa, Oklahoma: January 1999. (BDM Petroleum Technologies) NIPER/BDM-0374.

<sup>47</sup> RODRIGUEZ, Jose Ramón. Experimental and analytical study to model temperature profiles and stoichiometry in Oxygen-enriched *in situ* Combustion. Texas A&M University. May (2004).

disminuya a la atmosférica. Seguido a esto se ubica la chaqueta presurizadora alrededor del tubo y la conexión de salida del tubo se ensambla al sistema de producción de fluidos, además de esto se ubican las termocuplas a lo largo del tubo y los calentadores eléctricos se instalan en la parte superior del tubo, se ajustan en aproximadamente 140°F (60°C) durante toda una noche para calentar y estabilizar la temperatura del bache de arena ubicado previamente en esta misma posición. En ese momento se inicia la inyección de Nitrógeno para presurizar el sistema a 300 psi, posteriormente se incrementa gradualmente la corriente en los calentadores eléctricos hasta alcanzar una temperatura de aproximadamente 570°F (300°C) y se inicia la inyección del aire.

Ahora bien, desde el momento en que se inicia la inyección de aire hasta el final de la prueba se deben tomar una serie de datos para tener un control eficiente de la misma. La composición de gases efluentes se mide cada 15 o 20 minutos al igual que los líquidos producidos, se deben registrar perfiles de temperatura cada 6 pulgadas aproximadamente (esto depende de las dimensiones del tubo). La prueba se acaba cuando ya no se presente producción de aceite, es decir, cuando la arena haya sido quemada desde el inicio hasta el final del tubo.

## **2.4. PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN HÚMEDA PARA UN CAMPO COLOMBIANO**

Se realizó el ajuste de una prueba de tubo suministrada por el Instituto Colombiano de Petróleo (ICP) mediante simulación numérica de yacimientos con el fin de evaluar la relación de inyección agua-aire y determinar la relación crítica. La prueba suministrada se hizo para una muestra de un campo colombiano.

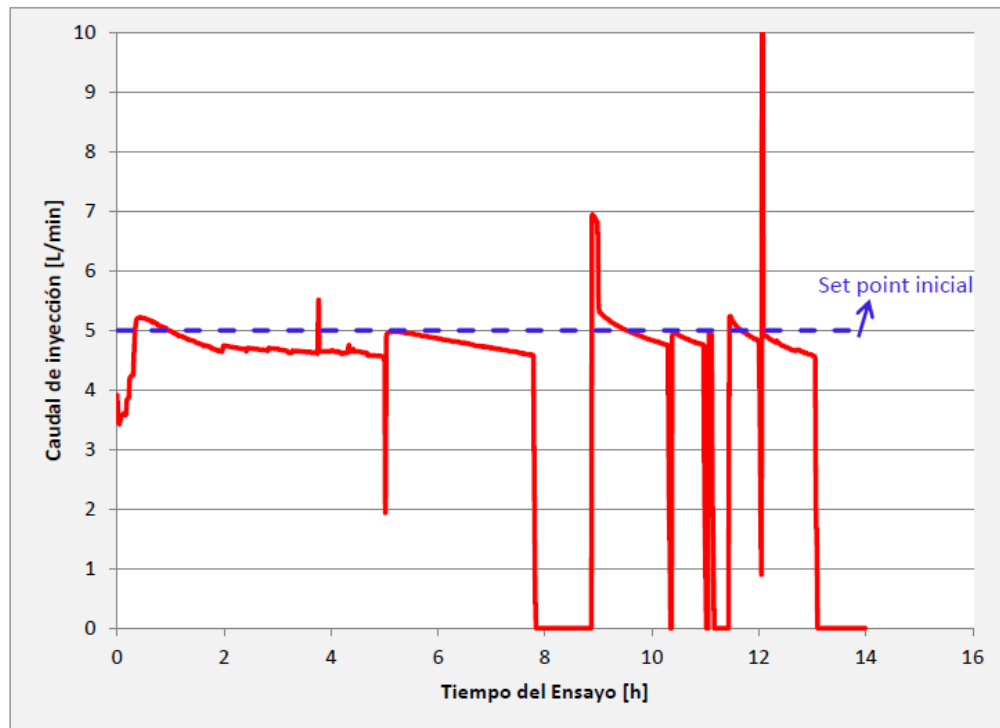
En la fundamentación de la CIS húmeda detallada en el capítulo 1, se referenciaron las propiedades y los parámetros en el sistema inglés de unidades, ya que se definieron para proyectos de campo. Sin embargo, las pruebas de tubo de combustión se realizan a escala de laboratorio; por ello, en adelante se referencian las propiedades y parámetros en las unidades del sistema internacional.

### **2.4.1. Análisis de resultados**

Durante la corrida de la prueba hubo una falla en el controlador de flujo másico de aire y se detuvo su inyección durante una hora mientras se solucionó la falla del controlador, durante este tiempo la temperatura en cada una de las zonas del reactor disminuyó considerablemente a tal punto que casi se da la extinción del frente de combustión.

En la figura 18 se puede observar que hasta la hora 7.8 el caudal de inyección de aire se mantuvo casi estable en el *set point* de 5 L/min, en esta hora se generó la falla en el controlador de flujo de aire por lo que el caudal de inyección cayó a cero hasta la hora 8.8, en este momento se reanudó la inyección de aire y se trató de estabilizar nuevamente en el *set point* inicial.

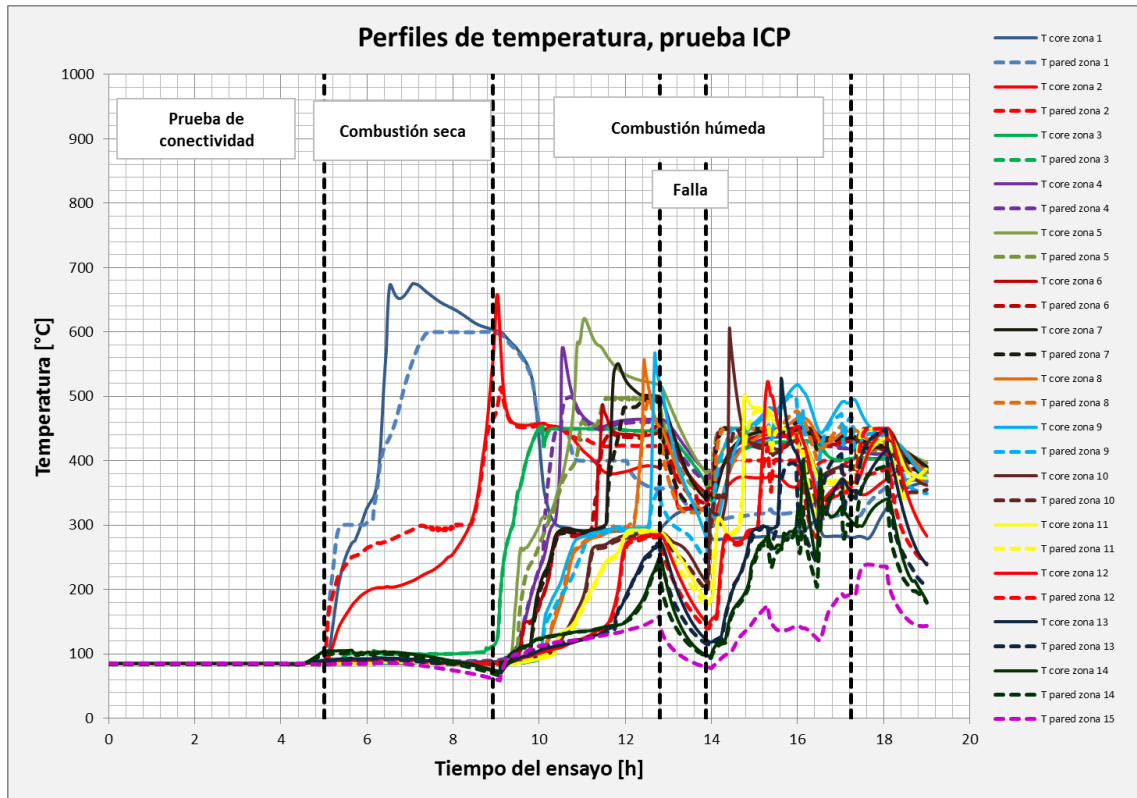
**Figura 18.** Caudal de inyección de aire durante la prueba.



**Fuente:** Tomado de NIÑO HERRERA, Luis. "Determinación de los parámetros de desempeño de la combustión *in situ* para un campo Colombiano", Ecopetrol (2013).

Durante la corrida de la prueba se tomaron las temperaturas en cada una de las zonas del reactor mediante 15 termocuplas externas (miden la temperatura de la pared del tubo) e internas (miden la temperatura de la muestra) ubicadas a lo largo del tubo con el fin de identificar el momento en el cual se dan los diferentes regímenes de reacción. Los siguientes fueron los resultados obtenidos al terminar la prueba.

**Figura 19.** Perfiles de temperatura de las termocuplas externas e internas de las 15 zonas del tubo de combustión



De la gráfica anterior se puede destacar que en la hora cero se da inicio al calentamiento de la zona de ignición, es decir, de la primera zona del reactor mientras se inyecta aire. Se observa que en el momento en que la temperatura en esta zona alcanza aproximadamente los 280°C, se presenta un aumento rápido de la misma, esto indica que se da inicio a la ignición. La primera línea negra punteada vertical indica el tiempo en el cual se da inicio a la inyección de agua (combustión húmeda) con un caudal de 8ml/min lo que resulta en una relación agua/aire de 1,6 Kg/m<sup>3</sup>(ST), la segunda línea punteada indica el momento en el que se suspendió la inyección de agua.

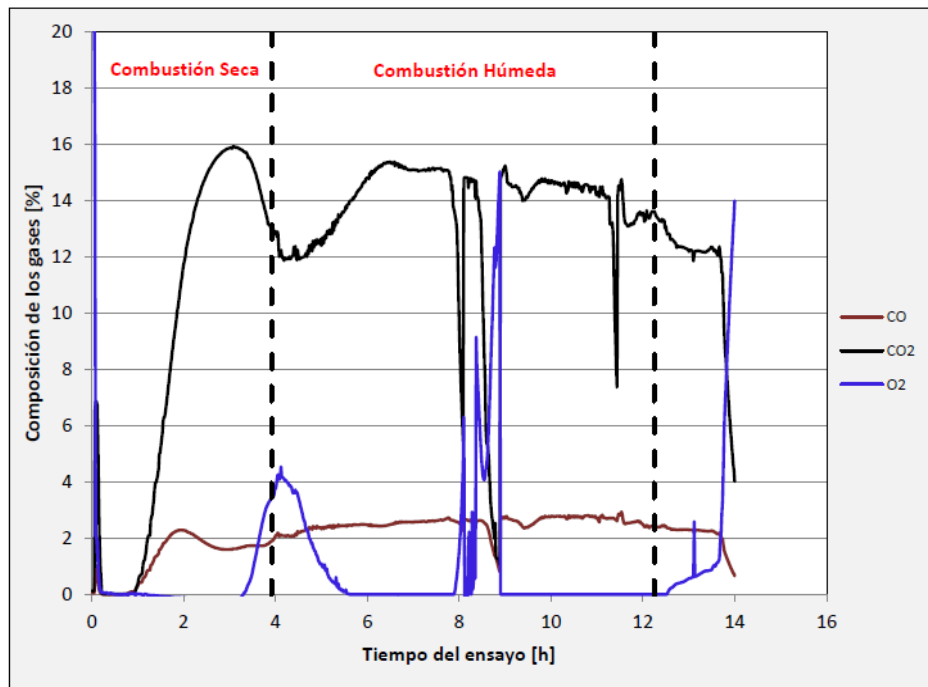
Cabe aclarar, que la inyección de aire se suspende a las 13,05 horas, momento en el cual tanto las válvulas de producción como de inyección del reactor se cierran, sin embargo, una vez cerradas siguen ocurriendo reacciones dentro del reactor debido al oxígeno que queda almacenado en la zona quemada del reactor.

Finalmente, en la gráfica anterior se observa que en la hora 7,8 la temperatura en todas las termocuplas cae rápidamente, esto es debido a la falla del controlador del flujo de aire, pues como se dijo anteriormente, en ese momento se dejó de

inyectar aire y al haber insuficiencia de material oxidante el frente de combustión casi llega a su extinción, sin embargo, en la hora 8,8 donde se reanuda la inyección de aire, inmediatamente la temperatura en todas las zonas del reactor vuelve a aumentar y el frente de combustión sigue estable.

Durante la prueba también se analizan los gases producidos a la salida del tubo de combustión. En la siguiente figura se muestra la composición de los gases producidos durante la prueba.

**Figura 20.** Composición de los gases producidos



**Fuente:** Tomado de NIÑO HERRERA, Luis. "Determinación de los parámetros de desempeño de la combustión *in situ* para un campo Colombiano", Ecopetrol (2013).

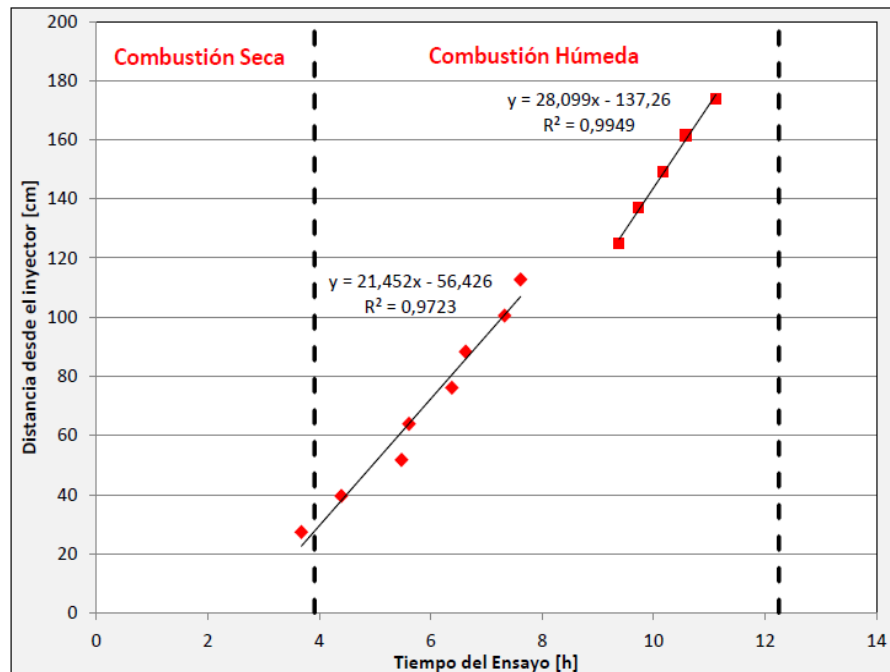
En la gráfica anterior se observa que en el inicio de la prueba hay un pico de producción de oxígeno, esto es normal mientras se da inicio a la combustión pues antes de ello no hay consumo de oxígeno. Una vez se da inicio a la combustión, la producción de oxígeno cae a cero durante la mayor parte de la prueba lo que significa que la tasa de inyección de aire fue la necesaria para mantener la prueba en el régimen HTO, esto también se evidencia al observar la curva de producción de CO<sub>2</sub> la cual se mantuvo entre un 12 y 16% durante todo el ensayo.

Sin embargo, hay dos puntos durante la prueba en que la producción de oxígeno aumenta, el más relevante se presenta entre la hora 7.8 y 8.8 que como es sabido en este momento se presentó la falla en el controlador de flujo de aire, esto explica el pico de producción de oxígeno que se observa, pues al dejar de inyectar

aire la temperatura en el todo el reactor cae significativamente lo que evita que el oxígeno se consuma. El otro pico se presenta entre la hora 3.3 y 5.3 esto se debe posiblemente a heterogeneidad del medio poroso.

Ahora bien, también es posible conocer la velocidad del frente de combustión durante la prueba teniendo en cuenta el tiempo que tarda el frente en llegar a cada zona de reactor y la distancia de cada zona al inyector. La distancia de cada zona al inyector está dada por la ubicación de las termocupas, por otra parte, el tiempo que tarda el frente en llegar a cada zona se determina como el tiempo que tarda cada una de ellas en llegar a 400°C debido a que a esta temperatura se garantiza que las reacciones se dan en el régimen HTO. Haciendo una regresión lineal con las distancias de cada termocupla al inyector y los datos de tiempo que se registraron se halla la velocidad del frente de combustión. Se calcularon dos velocidades para el frente, una antes de la falla del controlador de flujo de aire y otra después de arreglar dicha falla. En la siguiente gráfica se muestran las velocidades del frente de combustión.

**Figura 21.** Velocidades de los frentes de combustión



**Fuente:** Tomado de NIÑO HERRERA, Luis. “Determinación de los parámetros de desempeño de la combustión *in situ* para un campo Colombiano”, Ecopetrol (2013).

Se obtuvo que desde que se empezó a inyectar agua hasta la falla del controlador, la velocidad del frente de combustión fue de 21.452 cm/h y después de solucionar la falla del controlador la velocidad del frente de combustión fue de 28.099 cm/h.

Después de la corrida de la prueba se obtuvieron resultados de la composición de los gases de combustión para antes y después de la falla del controlador, también se calcularon los parámetros de desempeño del modo húmedo antes y después de la falla, igualmente se realizó el balance de masa de toda la prueba donde se muestra la cantidad de masa inyectada y recuperada en la prueba. En las tablas 6, 7, 8 y 9 se presentan estos resultados.

**Tabla 6.** Cantidad de gases de combustión producidos.

Componente	Modo húmedo (3,92h-7,8h)	Modo húmedo (8,8h-11,12h)
CO <sub>2</sub>	160,2 L	84,8 L
CO	27,5 L	15,6 L
O <sub>2</sub>	11,6 L	0 L
Total aire inyectado	1165 L	644 L
Total gas producido	1150 L	583 L

**Fuente:** Tomado de NIÑO HERRERA, Luis. “Determinación de los parámetros de desempeño de la combustión *in situ* para un campo Colombiano”, Ecopetrol (2013).

**Tabla 7.** Parámetros de desempeño en modo húmedo

Parámetro	Modo húmedo (3,92h-7,8h)	Modo húmedo (8,8h-11,12h)
Velocidad del frente de combustión [cm/hr] @ 400 °C	0.2145	0.281
Velocidad del frente de evaporización [cm/hr] @ 240 °C	0.2145	0.281
Velocidad del frente de condensación [cm/hr] @ 240 °C	0.3648	NR
Carbono Consumido [Kg]:	0.10	0.05
Oxígeno Consumido [L]:	231.8	134.5
Oxígeno Consumido [%]:	95.2	100.0
Hidrogeno que reacciona [Kg]:	0.010	0.007
Agua formada [Kg]:	0.088	0.064
Combustible Consumido [Kg]:	0.105	0.058
Relación H/C:	1.23	1.67
Requerimiento de Combustible [Kg/m <sup>3</sup> ]:	14.520	10.804
Requerimiento de Aire [m <sup>3</sup> (S)/m <sup>3</sup> ]:	177.36	136.37
Relación Aire/Combustible [m <sup>3</sup> (S)/Kg]:	12.21	12.62

**Fuente:** Tomado de NIÑO HERRERA, Luis. “Determinación de los parámetros de desempeño de la combustión *in situ* para un campo Colombiano”, Ecopetrol (2013).

**Tabla 8.** Masa introducida al reactor

Componente	Cantidad
Masa de crudo de la pre-mezcla [Kg]	3.465
Masa de agua de la pre-mezcla [Kg]	1.006
Masa agua introducida durante la combustión húmeda [Kg]	4
Masa de oxígeno introducido [Kg]	0.970
Total masa introducida [Kg]	9.442

**Fuente:** Tomado de NIÑO HERRERA, Luis. “Determinación de los parámetros de desempeño de la combustión *in situ* para un campo Colombiano”, Ecopetrol (2013).

Al analizar el desarrollo y los resultados de la prueba de tubo de combustión realizada por el ICP, se concluye que la variable operacional más relevante e influyente en el proceso es la relación de inyección agua-aire pues esta tiene un efecto importante en la temperatura del frente de combustión y afecta directamente el factor de recobro, por otra parte, la variable de control de mayor cuidado es la temperatura durante toda la prueba y en cada zona del reactor debido a que dependiendo del valor de esta variable, se puede conocer el régimen de reacción que predomina durante la corrida, es por esto que se deben ubicar varias termocuplas a lo largo de todo el tubo para tener un control más discretizado de la misma.

**Tabla 9.** Masa recuperada

Componente	Cantidad
Masa de crudo y agua en el tanque de recolección de líquidos y volumen muerto de líneas [Kg]	8.228
CO <sub>2</sub> producido [Kg]	0.740
CO producido [Kg]	0.083
O <sub>2</sub> producido [Kg]	0.031
CH <sub>4</sub> producido en fase gaseosa [Kg]	0.010
H <sub>2</sub> O producida en fase gaseosa [Kg]	0.021
Masa de oxígeno remanente de oxígeno después del experimento [Kg]	0.184
Total masa recuperada [Kg]	9.297

**Fuente:** Tomado de NIÑO HERRERA, Luis. “Determinación de los parámetros de desempeño de la combustión *in situ* para un campo Colombiano”, Ecopetrol (2013).

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

El ajuste se realizó a fin de determinar la relación de inyección agua-aire crítica y óptima mediante la evaluación de diferentes escenarios de inyección. Para ello, el primer paso a seguir es la construcción de un caso base de simulación de un tubo de combustión construido a partir de una muestra representativa del campo colombiano N&R (Denominado N&R por acuerdos de confidencialidad), donde se define el *grid* de simulación, modelo de fluidos, modelo de reacciones, propiedades de interacción roca-fluidos, la definición del calendario de inyección-producción y la ubicación de termocuplas y calentadores en el tubo de combustión.

#### **3.1. CONSTRUCCIÓN CASO BASE DE SIMULACIÓN PARA LA MUESTRA REPRESENTATIVA N&R**

Las herramientas empleadas para simular la prueba de tubo de combustión *in situ* húmeda fue CMG, pues la herramienta STARS está diseñada para simular procesos térmicos y procesos de recobro avanzados. Así mismo, el modelo de fluidos se construyó en la herramienta WINPROP.

Para la construcción del caso base de simulación se debe definir:

- Enmallado del caso base
- Propiedades térmicas y petrofísicas del sistema
- Modelo de fluidos
- Modelo de reacciones
- Propiedades de interacción roca-fluidos
- Calendario inyección-producción
- Ubicación de termocuplas y calentadores

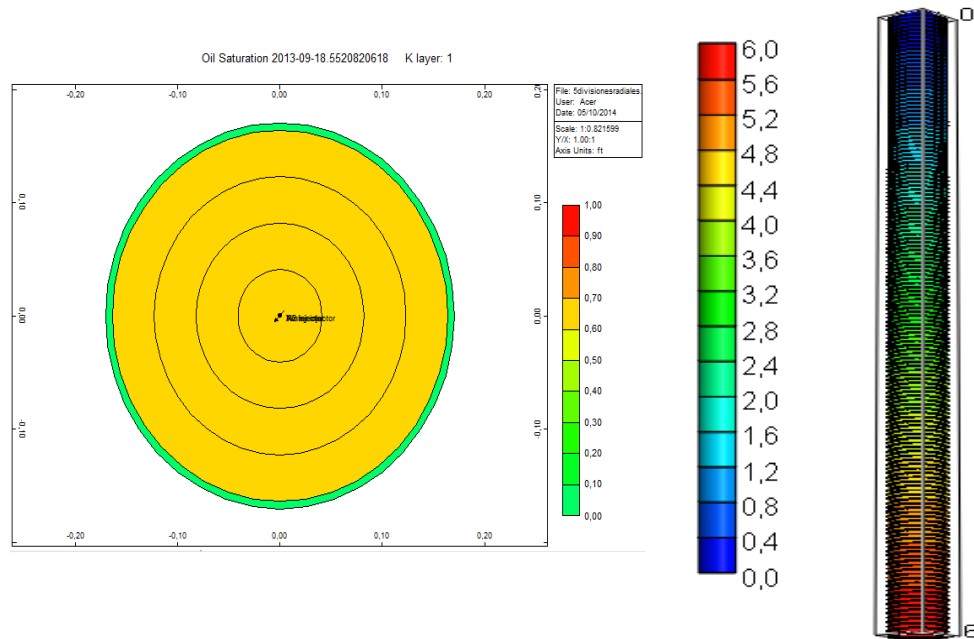
##### **3.1.1. Definición del enmallado del caso base**

“Para el modelo base del tubo de combustión solo es necesario representar la muestra y el tubo que la recubre, pues al especificar las condiciones iniciales de presión y temperatura de la muestra en el modelo numérico es posible simular una combustión controlada a través del tubo en condiciones adiabáticas sin necesidad del diseño de la chaqueta presurizadora y del espacio anular”<sup>48</sup>.

---

<sup>48</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.

**Figura 22.** Configuración del *grid* de simulación



**Fuente:** Computer Modeling Group (CMG)

Las dimensiones del *grid* corresponden a las dimensiones del tubo de combustión utilizado para realizar la prueba de laboratorio y se muestran en la tabla 10.

**Tabla 10.** Dimensiones del *grid* de simulación

Dimensiones del <i>grid</i>	
Longitud del tubo (cm)	183
Diámetro interno del tubo (cm)	10
Espesor del acero (cm)	0.2
Diámetro externo del tubo (cm)	10.2
Radio de la muestra (cm)	5

**Fuente:** Tomado de “NIÑO HERRERA, Luis. Determinación de los parámetros de desempeño de la combustión *in situ* para un campo Colombiano, Ecopetrol, 2013”.

Debido a que se va a simular un tubo, la geometría del *grid* es cilíndrica con 5 divisiones en dirección radial, una corresponde al radio del tubo y las otras dividen la muestra en cuatro zonas; esto, para refinar el modelo radialmente y minimizar el error de balance de materia. La coordenada  $\Theta$  corresponde al ángulo, en esta dirección se hizo una división que barriera  $360^\circ$  debido a que la porosidad y permeabilidad son las mismas a lo largo del empaquetamiento. La dirección K, que representa la longitud del tubo, se dividió en 15 zonas debido a que a lo largo

del mismo están ubicadas 15 termocuplas que monitorean la temperatura; con el fin de obtener una mayor sensibilización en los resultados de la simulación, cada zona se subdividió en 10 partes dando como resultado un total de 150 divisiones en la coordenada k. La descripción del grid se resume en la tabla 11.

**Tabla 11.** Descripción del *grid* de simulación

Descripción del <i>grid</i>	
Geometría	Cilíndrica
Divisiones en r	5
Divisiones en $\Theta$	1
Divisiones en k	150

### 3.1.2. Propiedades térmicas y petrofísicas del sistema

Las propiedades térmicas de la roca y del acero se tomaron del modelo de la prueba de tubo desarrollado por Yatte<sup>49</sup> que son los mismos empleados por Gutierrez<sup>50</sup> y por Kumar<sup>51</sup> pues no se reportan en la información suministrada de la muestra N&R, por otra parte, las propiedades petrofísicas del sistema corresponden a datos suministrados por el ICP de la prueba realizada. Dichas propiedades se muestran en las tablas 12 y 13. En pruebas de laboratorio de tubo de combustión, el espesor neto deja de ser una propiedad petrofísica relevante en el proceso, por otra parte, la porosidad y la permeabilidad de la muestra son los parámetros más influyentes durante la prueba.

---

<sup>49</sup> YATTE GARZÓN, Fabián Camilo. “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”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander - GRM. 2011. P-69.

<sup>50</sup> GUTIERREZ D. Air Injection Laboratory Studies. Reservoir Simulation of In-Situ Combustion Processes. ICP Bucaramanga Colombia. September 2009.

<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.

**Tabla 12.** Propiedades térmicas del sistema

Propiedades térmicas del sistema	
Cp muestra	$2,2251 \cdot 10^{-3}$ BTU/cm <sup>3</sup> °C
Cp tubo	0,0108 BTU/cm <sup>3</sup> °C
K agua	0,645 BTU/pie*h*°C
K gas	0,048 BTU/pie*h*°C
K aceite	0,135 BTU/pie*h*°C
K roca	2,85 BTU/pie*h*°C
K tubo	30 BTU/pie*h*°C

**Fuente:** YATTE GARZÓN, Fabián Camilo. “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”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander - GRM. 2011. P-70.

**Tabla 13.** Propiedades petrofísicas del sistema

Propiedades petrofísicas del sistema	
Presión referencia poro	1800 psig
Permeabilidad muestra	1180 md
Porosidad muestra	40%
Porosidad tubo	0%

**Fuente:** Tomado de “NIÑO HERRERA, Luis. Determinación de los parámetros de desempeño de la combustión *in situ* para el campo Colombiano N&R, Ecopetrol, 2013”.

### 3.1.3. Modelo de fluidos

Para la construcción del modelo de fluidos se fraccionó el crudo original en pseudocomponentes como se muestra en la tabla 14, lo que será necesario para el desarrollo posterior del modelo de reacciones y se definieron algunas propiedades de dichos componentes que se resumen en la tabla 15.

**Tabla 14.** Composición del aceite

Composición del aceite		
Componente	Fracción molar	%
$CO_2$	0,0626	6,26
$N_2$	0,0099	0,99
$CH_4$ a $NC_4$	0,154	15,4
$C_5$ a $C_{19}$	0,2638	26,38
$C_{20}$ a $C_{36}$	0,5097	50,97

**Fuente:** Tomado de CORE LAB Petroleum Services. "Informe de estudio de fluidos de yacimiento para Ecopetrol, N&R". Bogotá (2009).

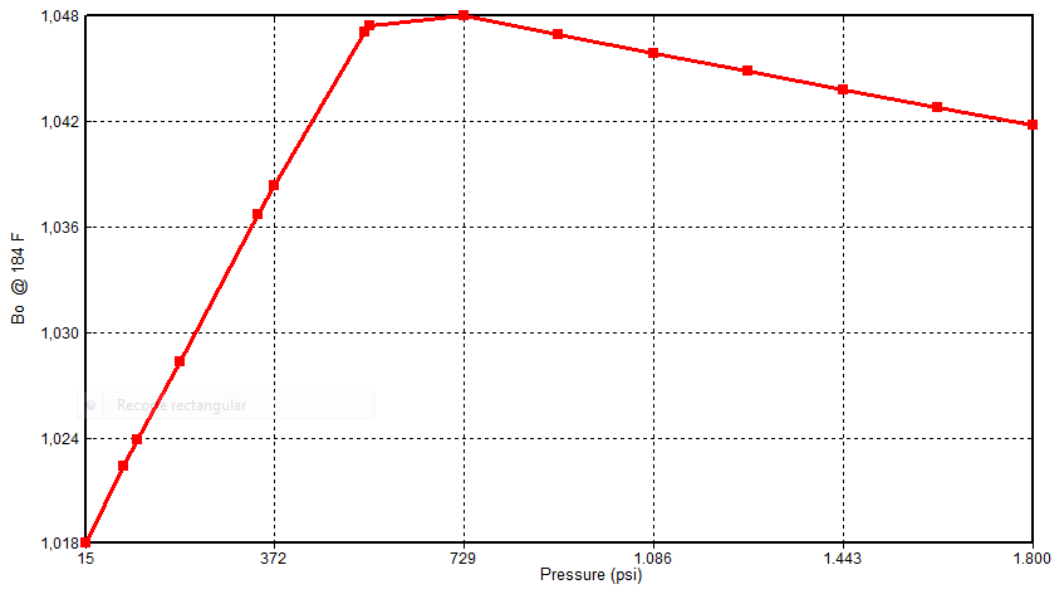
**Tabla 15.** Propiedades de los componentes del aceite

Propiedades de los componentes del aceite				
Componente	Pc (atm)	Tc (K)	Factor acéntrico	Peso molecular
$CO_2$	72,8	304,2	0,225	44,01
$N_2$	33,5	126,2	0,04	28,013
$CH_4$ a $NC_4$	46,262	180,7588	0,0428	23,347
$C_5$ a $C_{19}$	19,9166	650,61	0,5861	188,514
$C_{20}$ a $C_{36}$	11,5172	484,8657	1,188	673,238

**Fuente:** Tomado de CORE LAB Petroleum Services. "Informe de estudio de fluidos de yacimiento para Ecopetrol, N&R". Bogotá (2009).

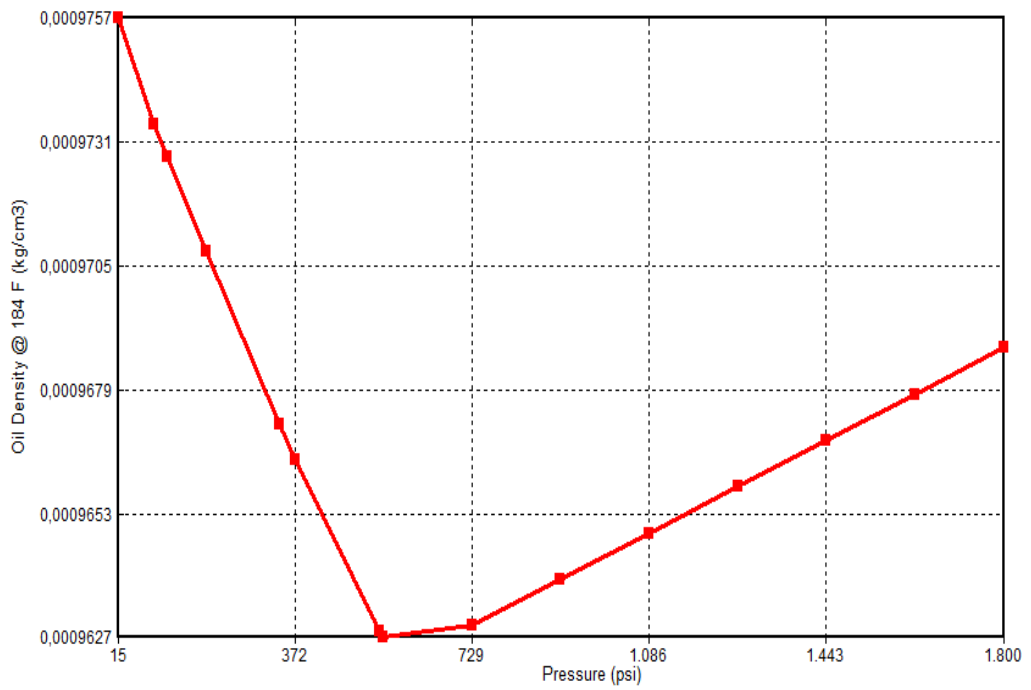
Las figuras 23 y 24 presentan comportamientos anormales en los puntos más próximos al valor de la presión de saturación (583 psi), pues no siguen las tendencias características que se invierten a partir de dicho punto. El comportamiento se debe a que el *step* de presión que se tiene no es lo suficientemente bajo para dar al simulador una mayor cantidad de puntos que tiendan tanto por derecha como por izquierda al valor de la presión de saturación, lo que provoca que el simulador una estos puntos siguiendo ignorando las tendencias que se tienen antes y después. Sin embargo, solo es un error de visualización en el entorno del *builder* de CMG y una extrapolación de las rectas permite la lectura correcta del valor de presión de saturación.

**Figura 23. Bo Vs Presión**



**Fuente:** Computer Modeling Group (CMG). 2013

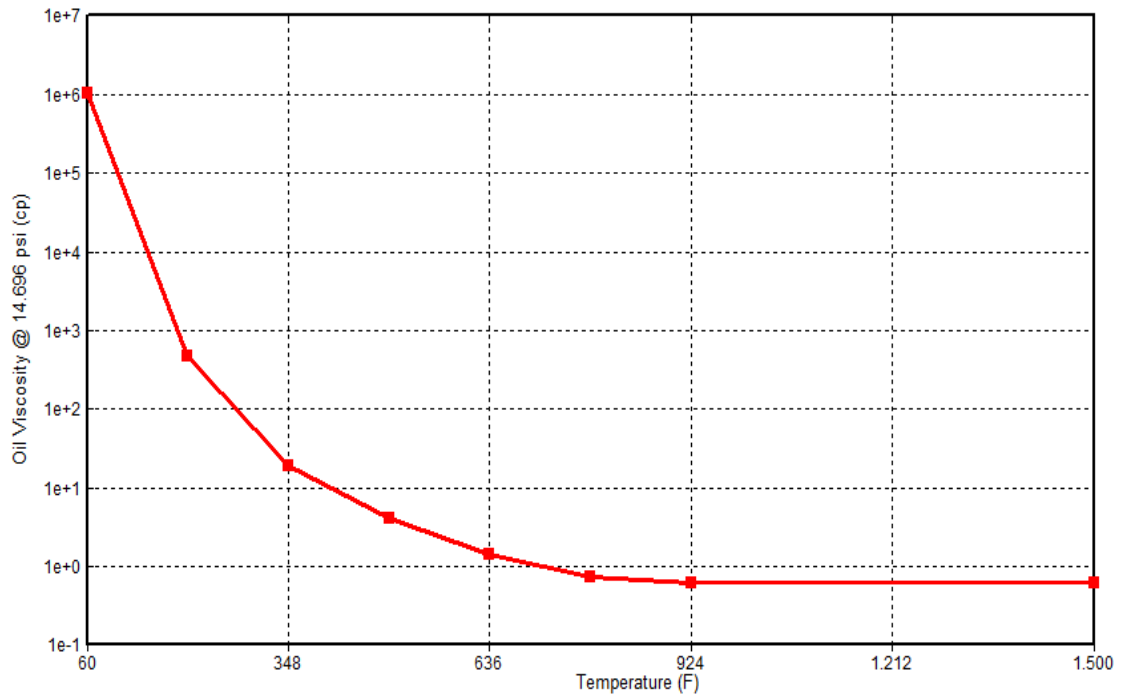
**Figura 24. Densidad Vs Presión**



**Fuente:** Computer Modeling Group (CMG). 2013

La figura 25 muestra la gráfica de viscosidad vs temperatura, la cual muestra una tendencia normal exponencial decreciente con el aumento de la temperatura.

**Figura 25.** Viscosidad Vs Temperatura



**Fuente:** Computer Modeling Group (CMG). 2013

### 3.1.4. Modelo de reacciones

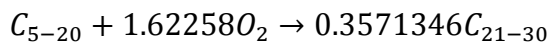
El modelo de reacción utilizado con sus respectivos parámetros cinéticos correspondientes a la energía de activación; energía mínima necesaria para que ocurra una reacción entre dos moléculas; y el factor de frecuencia; constante de proporcionalidad que tiene en cuenta la frecuencia de colisión y la orientación de las partículas reaccionantes, al igual que la entalpía y órdenes de cada reacción no fue suministrado por el ICP.

“Debido a que los parámetros cinéticos son propios y característicos de cada reacción, deben ser correctamente determinados mediante pruebas de laboratorio RTO (*Ramped temperatura oxidation*, por sus siglas en ingles), sin embargo, se tomaron como datos iniciales para el caso base de simulación, el modelo de reacción y los parámetros cinéticos de otro estudio realizado en pruebas de tubo de combustión, cabe aclarar que los parámetros utilizados en el caso base no son definitivos y deben ser sometidos a un análisis de sensibilidad y a una

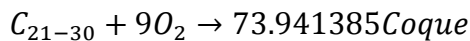
modificación posterior dentro de rangos coherentes para obtener un buen ajuste”<sup>52</sup>.

A continuación se muestra el modelo de reacción utilizado como base, el cual está en función de pseudocomponentes y consta de dos reacciones de oxidación a baja temperatura LTO, una reacción de craqueo o deposición de combustible IT y una reacción de combustión a altas temperaturas HTO.

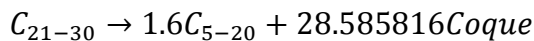
### Ec 7. Modelo de reacciones



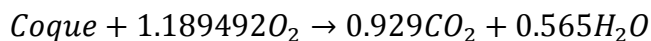
LTO



LTO



IT



HTO

**Fuente:** Cita 52

Los coeficientes estequiométricos de las reacciones del modelo se ajustaron empleando el simulador STARS mediante prueba y error hasta obtener un error de balance de masa menor a  $1 * 10^{-5}$  y los parámetros cinéticos de cada una de las reacciones se presentan en la tabla 16, en la que los colores azul, morado, verde y naranja corresponden a las reacciones presentadas en la ecuación 7.

---

<sup>52</sup> YATTE GARZÓN, Fabián Camilo. “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”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander - GRM. 2011. P-72

**Tabla 16.** Parámetros cinéticos caso base

Parámetros cinéticos	
Factor de frecuencia (A)	70,83
Energía de activación (Ea)	56,86728 Btu/gmol
Entalpía (h)	643,88228 Btu/gmol
Factor de frecuencia (A)	114090
Energía de activación (Ea)	72,69621 Btu/gmol
Entalpía (h)	2464,16446 Btu/gmol
Factor de frecuencia (A)	3,34e16
Energía de activación (Ea)	198,56481 Btu/gmol
Entalpía (h)	0 Btu/gmol
Factor de frecuencia (A)	6,619e12
Energía de activación (Ea)	32,22443 Btu/gmol
Entalpía (h)	470,47619 Btu/gmol

**Fuente:** YATTE GARZÓN, Fabián Camilo. “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”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander - GRM. 2011. P-72.

### 3.1.5. Propiedades de interacción roca-fluidos

Las curvas de permeabilidades relativas se generaron a partir de los End Points que se muestran en la tabla 17 mediante la correlación de Stone.

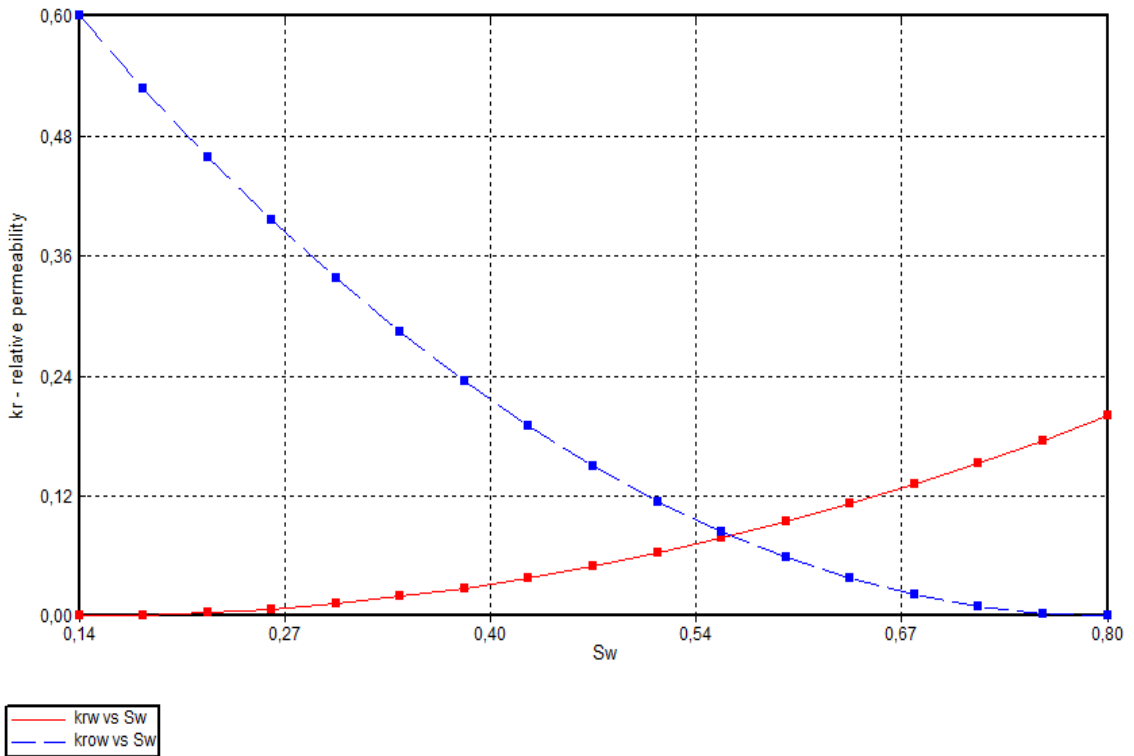
**Tabla 17.** End points curvas de permeabilidad relativa

End Points curvas de permeabilidad relativa	
Propiedad	Valor
Saturación de agua connata	0,14
Saturación de agua crítica	0,14
Saturación aceite irreducible (Curva agua-aceite)	0,2
Saturación aceite residual (Curva agua-aceite)	0,2
Saturación aceite irreducible (Curva gas-líquido)	0,15
Saturación aceite residual (Curva gas-líquido)	0,15
Saturación de gas connata	0,05
Saturación crítica 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 líquido connata	0,2
Exponentes n para las correlaciones de Stone	2

**Fuente:** YATTE GARZÓN, Fabián Camilo. “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”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander - GRM. 2011. P-73.

A continuación se muestran las curvas de permeabilidad relativa generadas en el simulador.

**Figura 26.** Permeabilidad relativa Vs Saturación de aceite



**Fuente:** Computer Modeling Group (CMG). 2013

### 3.1.6. Definición del calendario de inyección – producción

La prueba de tubo de combustión proporcionada por el ICP cuenta con varias etapas que se mencionan a continuación: se comenzó con una prueba de conectividad inyectando nitrógeno durante 5 horas, posteriormente se suspendió la inyección de nitrógeno para dar inicio a la inyección de aire (combustión seca). Al cabo de un tiempo cuando el frente de combustión estaba estable, se inició la inyección de agua (combustión húmeda) durante aproximadamente 8 horas. Este proceso se vio afectado por una falla en el controlador de flujo de aire que ocasionó una interrupción en la inyección del mismo durante una hora, momento en el cual se solucionó la falla en el controlador y se reanudó la inyección de aire hasta el final de la prueba. Esta falla en el controlador produjo una disminución significativa de la temperatura en todas las zonas del reactor ocasionado que el frente llegara casi a su extinción. En la tabla 18 se muestra el tiempo en el que se desarrolló cada una de estas etapas.

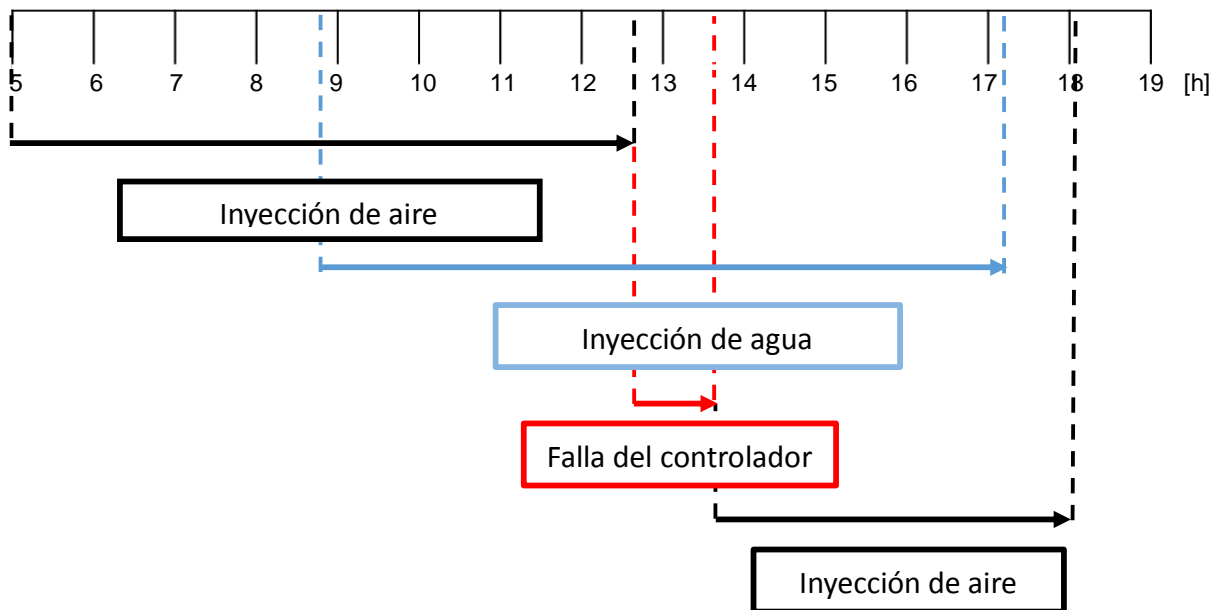
**Tabla 18.** Calendario inyección – producción

Actividad	Intervalo de tiempo	Duración
Inyección de nitrógeno (prueba de conectividad)	0 - 5 h	5 h
Inyección de aire (inicio de la combustión en modo seco)	5 – 8.92 h	7,8 h
Inyección de agua (inicio de la combustión en modo húmedo)	8,92 – 17,25 h	8,33 h
Falla del controlador de flujo másico del aire	12,8 – 13,88 h	1,08 h
Reanudación de la inyección de aire	13,88 – 18,05 h	4,17 h

**Fuente:** Tomado de “NIÑO HERRERA, Luis. Determinación de los parámetros de desempeño de la combustión *in situ* para el campo Colombiano T2, Ecopetrol, 2013”

En la siguiente línea de tiempo se ubicó cada una de las etapas de la prueba.

**Figura 27.** Calendario inyección - producción

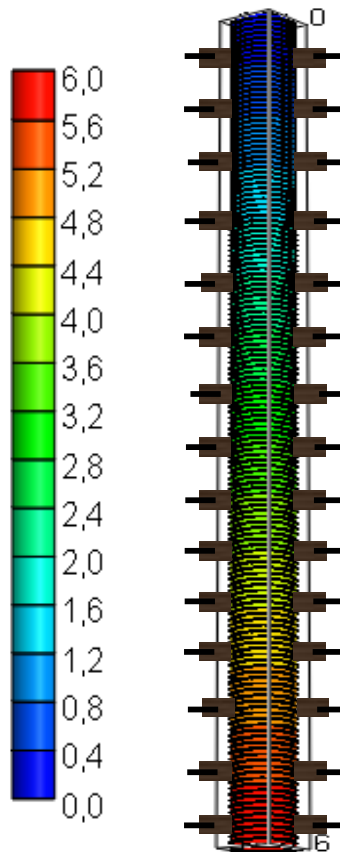


### 3.1.7. Ubicación de termocuplas – caso base

A la hora de simular un proceso de tubo de combustión una de las herramientas claves y/o esenciales para un buen control del proceso son las termocuplas, sensores de temperatura que se usan para monitorear la temperatura en el reactor durante toda la corrida de la prueba, de esta manera es posible obtener los perfiles de temperatura de todas las zonas del reactor y así conocer el régimen de que predomina durante la prueba, el cual se espera que sea HTO.

Con el fin de tener un control eficiente de la temperatura, el tubo de combustión del caso base de simulación se dividió en 15 zonas en dirección K, cada una de las cuales se subdividió en 10 para un total de 150 divisiones en dicha dirección obteniendo un modelo de simulación bien discretizado. Al final de cada una de las 15 zonas se ubica un par de termocuplas, una para medir la temperatura en la muestra y otra que mide la temperatura en la pared del tubo, esto para tener un control de las condiciones adiabáticas del proceso.

**Figura 28.** Tubo de combustión con termocuplas



**Fuente:** Modificado de Computer Modeling Group (CMG). 2013

La ubicación de las termocupas en el simulador STARS se describe detalladamente en el anexo A.

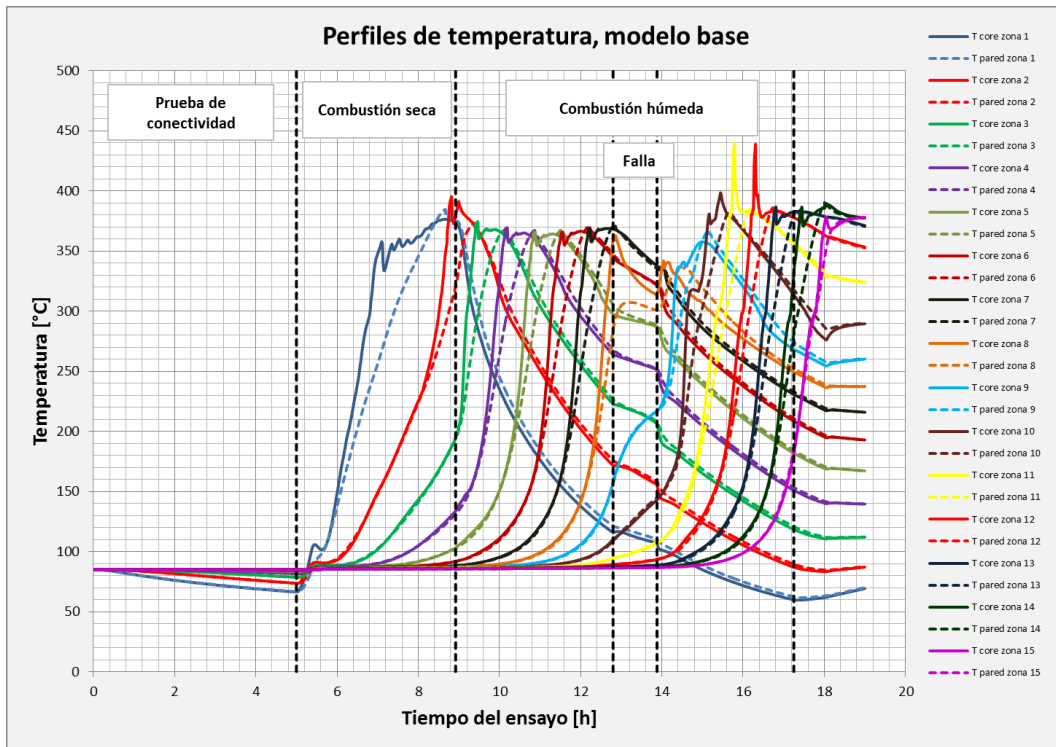
### **3.2. VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS – CASO BASE DE SIMULACIÓN**

Una vez terminada la construcción del caso base de simulación se procede a visualizar los resultados para observar que tan alejados están de los obtenidos en la prueba experimental. Estos primeros resultados deben ser analizados con el fin de entender el comportamiento físico y químico que presentan los fluidos dentro del tubo e identificar los parámetros o variables que se pueden modificar para conseguir que dicho comportamiento se asemeje lo más posible al de la prueba real, para así, posteriormente plantear una estrategia que permita ajustar la misma.

Como se mencionó anteriormente, en una prueba de tubo de combustión, es importante tener un control de la temperatura a lo largo de toda la prueba para saber si en el proceso predomina el régimen HTO, lo que garantiza un frente de combustión estable, es por esto que se determinó la temperatura como la variable de salida de mayor importancia, esta variable se visualiza mediante los perfiles de temperatura medidos por medio de las termocupas de cada una de las 15 zonas del reactor y de las temperaturas máximas alcanzadas en toda la prueba. Sin embargo, para lograr una mayor representatividad de la misma, la temperatura no es la única variable que se debe ajustar, por ello, se visualiza también, la composición de los gases efluentes  $CO$ ,  $CO_2$  y  $O_2$  con lo que se evidencia el comportamiento de la combustión durante toda la corrida; también se visualiza la posición del frente de combustión en el tiempo con lo que se puede conocer la velocidad con que se mueve el mismo o si en algún momento se extingue.

A continuación se presentan los perfiles de temperatura, temperaturas máximas, composición de gases efluentes y posición del frente en el tiempo del caso base de simulación.

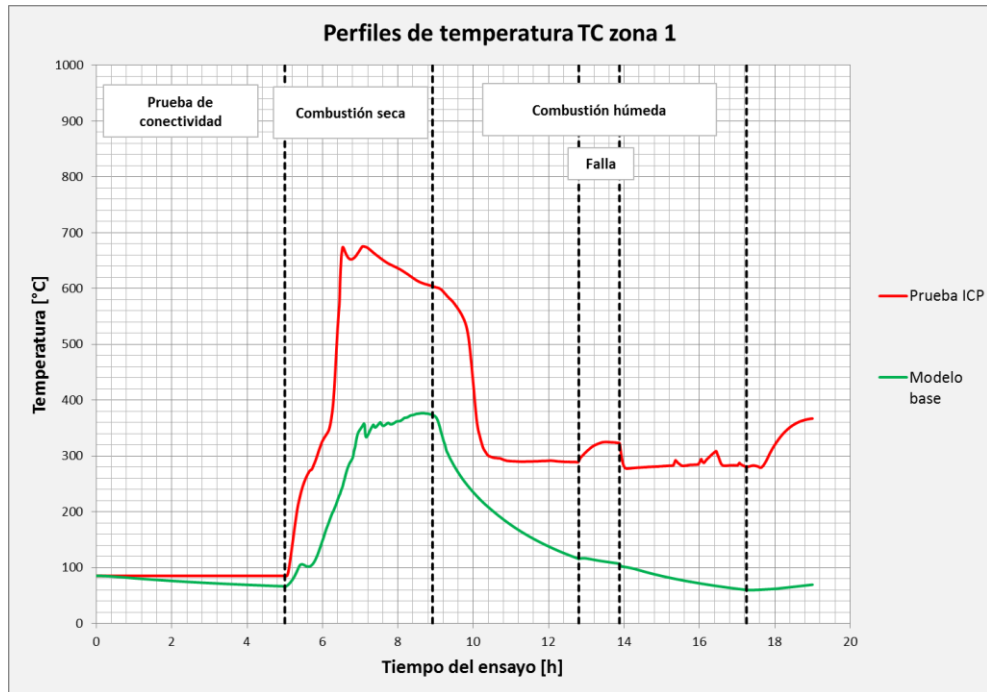
Figura 29. Perfiles de temperatura – Caso base



En la figura anterior se observan los perfiles de temperatura de registrados por cada una de las termocuplas que se ubicaron en el tubo, las líneas continuas representan los perfiles de temperatura registrados en la muestra y las punteadas en la pared, por otra parte, las líneas negras verticales punteadas dividen la gráfica en las diferentes etapas de la prueba; prueba de conectividad (inyección de Nitrógeno), combustión seca, combustión húmeda y falla del controlador.

A continuación se presenta la comparación del perfil de temperatura registrado por la primera termocupla entre el caso base de simulación y la prueba experimental. Es importante lograr un buen ajuste de este primer perfil de temperatura debido a que en la primera zona del reactor es donde se da la ignición del crudo y por consiguiente el pico de temperatura alcanzado en esta etapa se debe obtener en la simulación.

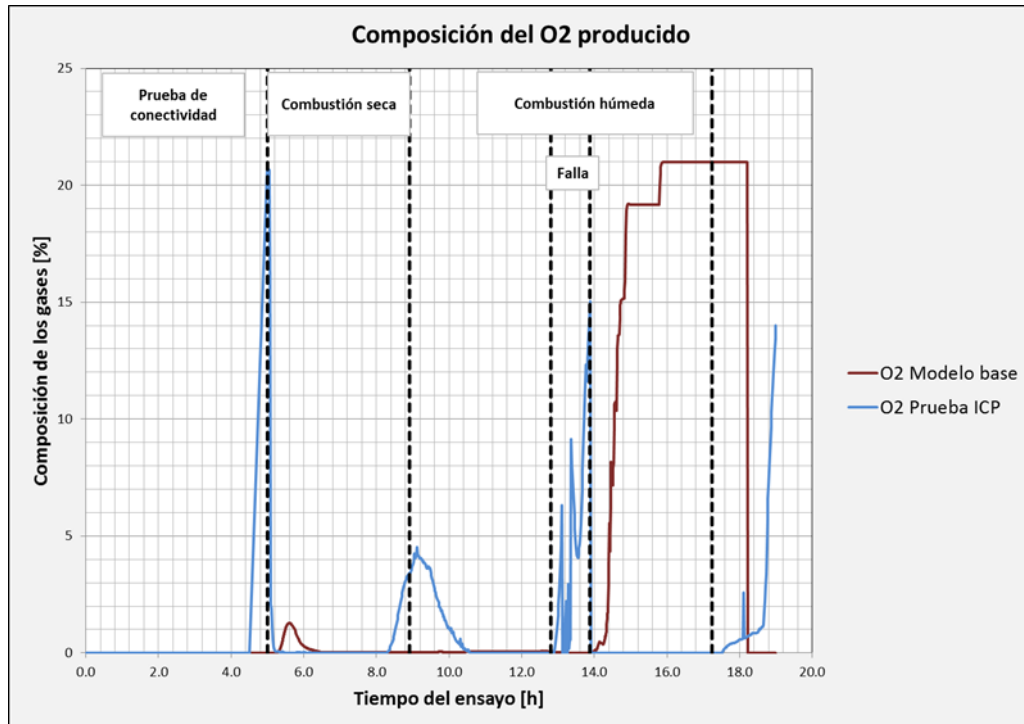
**Figura 30.** Comparación perfiles de temperatura TC 1 - caso base – prueba ICP



Se puede observar que la temperatura máxima alcanzada en el caso base de simulación es aproximadamente 380°C en la primera zona del reactor que es donde ocurre la ignición, esta temperatura no es lo suficientemente alta pues el proceso nunca alcanza el régimen HTO. La temperatura máxima registrada en la primera zona del reactor de la prueba suministrada por el ICP es aproximadamente 665°C, esto indica una necesidad térmica mayor que se suple con la implementación de calentadores en la simulación para aumentar la temperatura de la muestra en el momento de la inyección del aire.

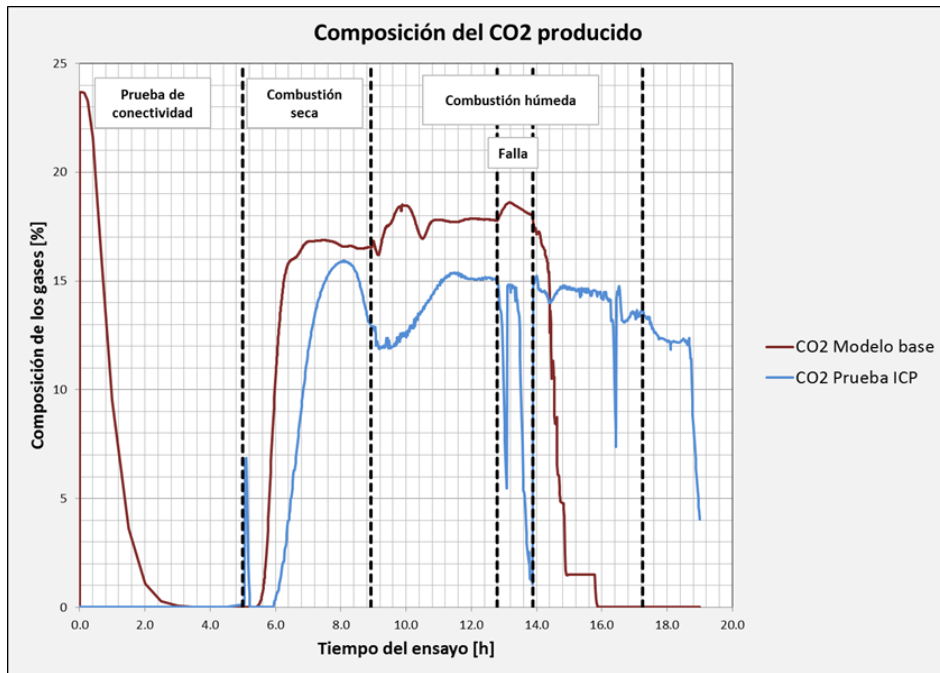
A continuación se presentan gráficas comparativas de producción de oxígeno y producción de dióxido de carbono de la prueba suministrada por el ICP y el caso base de simulación sin calentadores.

**Figura 31.** Comparación O<sub>2</sub> producido- caso base- prueba ICP

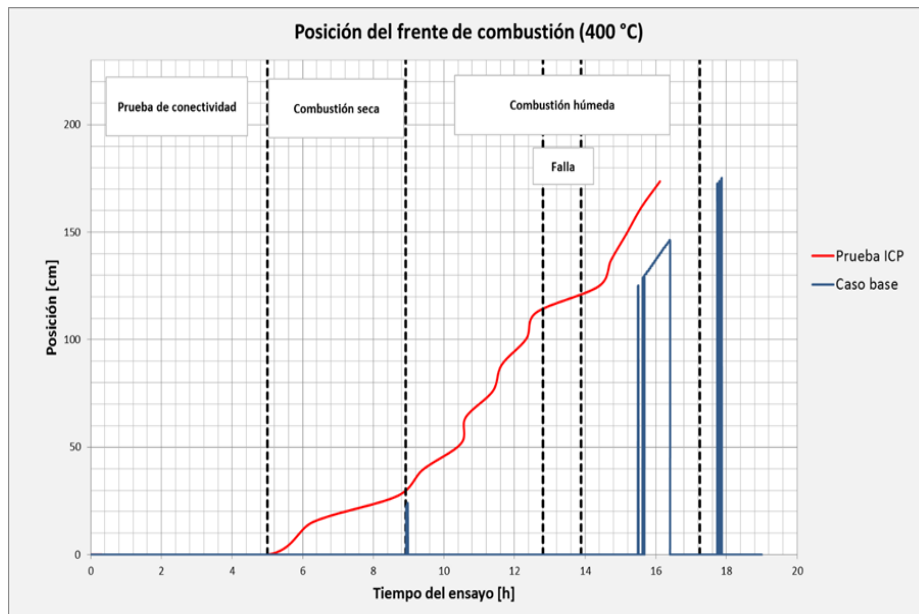


Analizando el caso base, se puede ver que en la hora 14 aproximadamente hay un pico en la producción de oxígeno y una consecuente caída en la producción de Dióxido de Carbono lo que indica que en ese momento el oxígeno pasa a través del tubo sin reaccionar debido a las bajas temperaturas alcanzadas, por lo cual, el frente de combustión se extingue. En la prueba del ICP se observa que la producción de oxígeno durante la mayor parte de la misma es cero, lo que indica la estabilidad del frente, solo en el momento de la falla del controlador de flujo de aire hay un incremento en la producción de oxígeno que se debe a que la falta de material oxidante debilita el frente de combustión esto hace que la temperatura en el tubo disminuya a tal punto que parte del oxígeno aún presente en el mismo se produzca sin reaccionar.

**Figura 32.** Comparación CO<sub>2</sub> producido- caso base- prueba ICP



**Figura 33.** Comparación posición del frente en el tiempo- caso base- prueba ICP



Para la simulación se definió que existe frente de combustión cuando se registran temperaturas iguales a 400°C pues esta temperatura es lo suficientemente alta para mantener el frente estable. Durante la mayor parte de la corrida del caso base, las temperaturas registradas son muy bajas, a pesar de esto, existe frente de combustión pues se evidencia producción de Dióxido de Carbono hasta la hora 14, justo en ese momento, donde finaliza la falla del controlador, el frente se extingue, sin embargo al inyectarse aire nuevamente, el frente revive en la hora 15.8 aproximadamente, registrando temperaturas elevadas aunque sigue comportándose como un frente de combustión inestable.

Una vez analizados los resultados se concluye que es indispensable la implementación de calentadores eléctricos durante la prueba para garantizar en primer lugar que la temperatura de la muestra en el momento de la inyección de aire sea lo suficientemente alta para que se produzca la ignición y la cantidad de energía liberada sea suficiente para elevar de manera relevante la temperatura en el tubo, además de esto, con los calentadores es posible controlar que el proceso se desarrolle en régimen HTO y que el frente se mantenga estable.

### **3.3. UBICACIÓN CALENTADORES ELECTRICOS – CASO BASE**

En una prueba de tubo de combustión, los calentadores eléctricos son una herramienta esencial para el buen desarrollo del proceso pues su papel es elevar la temperatura de la muestra para que en el momento de la inyección del aire en el reactor se genere la ignición, adicionalmente ayudan a mantener elevada la temperatura durante la corrida de la prueba y así garantizan que el proceso de lleve a cabo en el régimen HTO. La no utilización de los calentadores eléctricos puede ocasionar que el frente se extinga o que sencillamente no encienda pues además del combustible (coque) y del material oxidante (Oxígeno), el otro elemento clave para que se generen las reacciones de combustión son las altas temperaturas dentro del reactor.

Para ubicar los calentadores en el simulador STARS de la compañía CMG, es necesario definir tres parámetros: coeficiente de transferencia de calor, set-point de temperatura que varía en el tiempo y una tasa de transferencia de calor.

- *Set point* de temperatura: En el simulador se define como TMPSET, mediante este comando se establece el calendario de temperatura para los calentadores utilizando los valores de temperatura en el tiempo de la primera termocupla suministrados por la prueba experimental del ICP, se toman los valores de la primera termocupla debido a que los calentadores se ubican en la primera zona del reactor. El valor del *set point* corresponde a la temperatura máxima que se puede alcanzar un tiempo establecido, en caso tal, que la temperatura del tubo alcance la temperatura del *set point*, los calentadores se apagan.

- Coeficiente de transferencia de calor: En el simulador se define como UHTR, tiene unidades de Btu/h°C, corresponde al coeficiente de aumento de temperatura en el calentador y en conjunto con la diferencia de temperatura entre el *set point* y la temperatura en el tubo en un tiempo determinado, representan la tasa de aumento de calor en el tubo (Btu/h). Como se muestra en la siguiente ecuación:

**Ec 8.** Tasa de aumento de calor

$$\text{Tasa de aumento de calor} = \text{UHTR} * (\text{TMPSET} - T)$$

- Tasa de transferencia de calor: En el simulador se define como HEATR, corresponde a una tasa de transferencia de calor constante a los bloques del enmallado, tiene unidades de Btu/h y se agrega a la parte proporcional determinada por el coeficiente de transferencia de calor (UHTR) y el *set point* de temperatura (TMPSET).

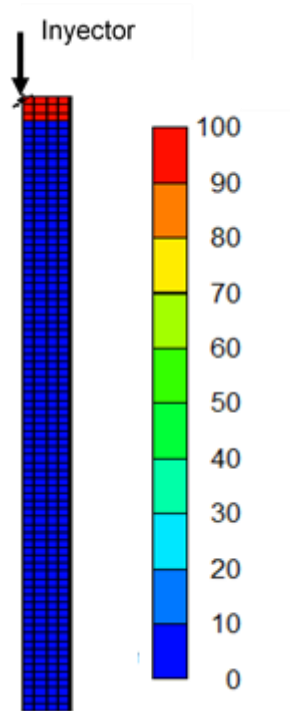
En la simulación del caso base se ubicaron los calentadores en las primeras tres celdas del tubo, esto debido a que en la primera zona del reactor es donde debe ocurrir la ignición, así que la muestra debe estar lo suficientemente caliente en esta zona en el momento de la inyección de aire.

Los calentadores se encendieron en el inicio de la inyección de aire y se mantuvieron encendidos durante toda la corrida de la prueba, el valor del coeficiente de transferencia de calor se seleccionó en 100 Btu/h°C a partir de la literatura<sup>53</sup>, el *set point* de temperatura variable se definió como se mencionó anteriormente, mediante el archivo histórico del perfil de temperatura de la primera termocupla registrado en la prueba experimental y finalmente se definió una tasa de transferencia de calor inicial de 100 Btu/h, esta tasa será uno de los parámetros principales para ajustar los perfiles de temperatura.

---

<sup>53</sup> YATTE GARZÓN, Fabián Camilo. “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”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander - GRM. 2011. P-75.

**Figura 34.** Vista lateral 2D. Tubo de combustión con calentadores



**Fuente:** Modificado de Computer Modeling Group (CMG). 2013

En el Anexo A. Se describe el procedimiento paso a paso para ubicar los calentadores eléctricos en el simulador.

#### **4. AJUSTE DE LA PRUEBA DE TUBO DE COMBUSTIÓN *IN SITU* HÚMEDA APLICADA A UN CRUDO COLOMBIANO**

El ajuste de una prueba de combustión *in situ* mediante simulación numérica de yacimientos depende de diversos factores para garantizar su representatividad, por ello, se propone la siguiente jerarquía de parámetros de ajuste, clasificados de mayor a menor importancia:

1. Perfiles de temperatura registrados por cada termocupla.
2. Temperaturas máximas.
3. Velocidad del frente de combustión.
4. Composición de gases efluentes.
5. Factor de recobro.
6. Cantidad total de aire inyectado.
7. Cantidad total de gas producido.

Una vez ajustados estos parámetros clave en el proceso de combustión, se calculan a partir de los datos arrojados por el simulador los parámetros de desempeño del proceso como lo son: carbono consumido, oxígeno consumido, hidrogeno consumido, agua formada, total de combustible consumido, relación hidrogeno/carbono, requerimiento de combustible, requerimiento de aire y relación aire/combustible, con el fin de compararlos con los valores presentados en la prueba ICP y de esta manera evaluar el ajuste final de la misma.

También se proponen algunas estrategias para modificar variables asociadas al proceso de CIS húmeda a fin de lograr el ajuste, de esta manera es posible proceder a realizar modificaciones cuando los parámetros jerarquizados anteriormente determinen que el ajuste aún no se ha logrado.

1. Modificar la tasa de transferencia de calor de los calentadores.
2. Modificar las permeabilidades absolutas y relativas para ajustar la velocidad del frente de combustión.
3. Realizar una prueba de celda cinética ajustada al modelo.
4. Modificar todos los parámetros cinéticos asociados a las reacciones HTO (energía de activación, factor de frecuencia y entalpia), teniendo en cuenta la energía de activación encontrada a partir de la celda cinética.

##### **4.1. MODIFICACIÓN DE LA TASA DE TRANSFERENCIA DE CALOR DE LOS CALENTADORES**

Dado que en los perfiles de temperatura que se obtuvieron a partir del modelo base de simulación no se alcanzaron los valores presentados en la prueba ICP, se hace necesario determinar los valores de las variables asociadas a los

calentadores. Se estableció un coeficiente de transferencia de calor de 100 BTU/h-°C y un *set point* de temperatura variable entre 185 y 1200 °C (basados en los valores de temperatura registrados en la primera zona del reactor de la prueba experimental).

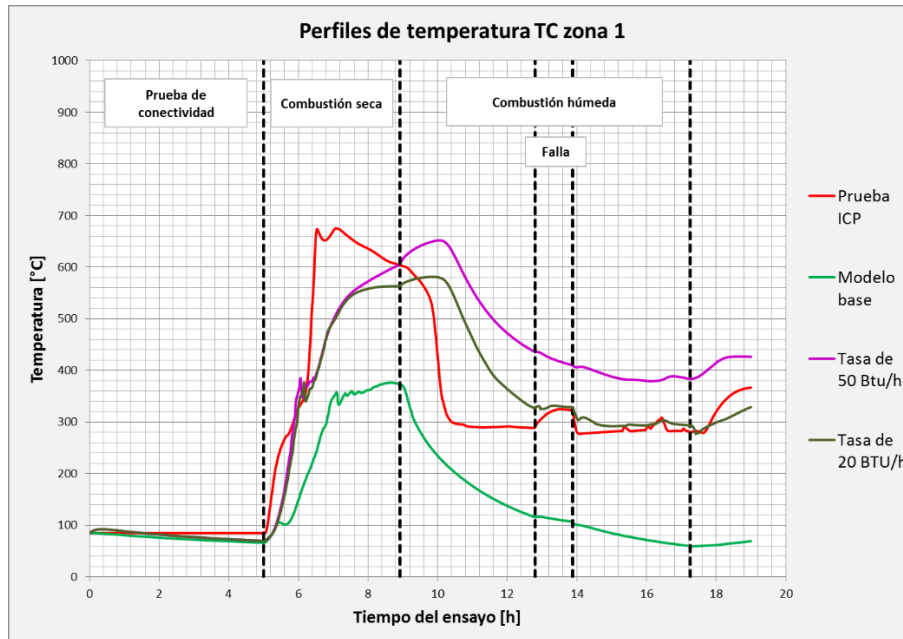
Para definir la tasa de transferencia de calor se probaron diferentes escenarios, entre los que se destacan:

- Tasa de 100 BTU/h
- Tasa de 80 BTU/h
- Tasa de 50 BTU/h
- Tasa de 20 BTU/h

Las tasas anteriormente mencionadas se mantuvieron desde el inicio de la inyección de aire al tubo de combustión hasta que se detuvo la misma, en el tiempo comprendido entre las horas 8.92 y 18.05 del ensayo.

Las tasas de 100 y 80 Btu/h mostraron un incremento significativo en la temperatura, que aunque es lo que se buscaba con la implementación de los calentadores, la temperatura alcanzada sobreestima la temperatura registrada durante toda la corrida en la prueba experimental, debido a esto, se probaron las tasas de 50 y 20 Btu/h, con las cuales el comportamiento de la temperatura en la primera zona del reactor se ajusta más a la temperatura registrada en la prueba experimental, siendo la tasa de 20 Btu/h la que ofrece un mejor ajuste principalmente durante la combustión húmeda. Sin embargo, la temperatura alcanzada en el momento de la ignición es de 560°C, que en comparación al pico alcanzado en la prueba experimental (665°C) es muy baja. En la siguiente figura se observa lo mencionado anteriormente, en ella se muestra el perfil de temperatura de la primera zona del reactor para la prueba experimental (curva roja), modelo base de simulación sin calentadores (curva verde claro), modelo con tasa de 50 Btu/h (curva morada) y modelo con tasa de 20 Btu/h (curva verde oscuro).

**Figura 35.** Comparación perfiles TC 1 – tasas de 50 y 20 Btu/h – Prueba ICP



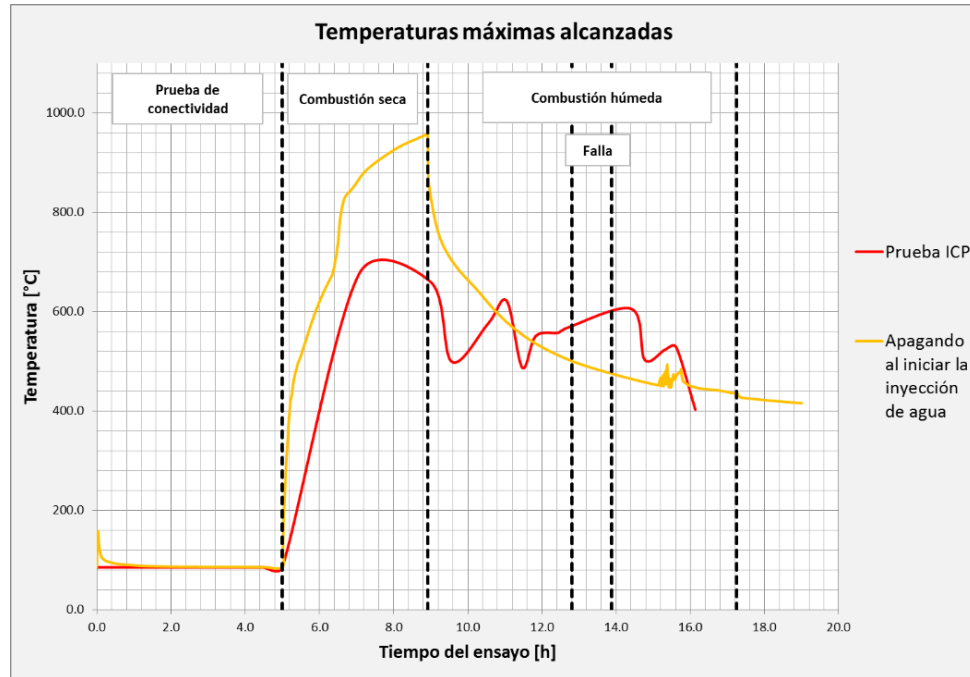
En base a lo anterior, se requiere elevar la temperatura alcanzada en el momento de la ignición y el pico de temperatura alcanzado en esta etapa debe darse 1.4 horas antes. Para ello, se proponen 2 escenarios alternos tomando como base la tasa de 100 BTU/h con la que se alcanzaron temperaturas elevadas:

- Tasa de 100 BTU/h apagando al iniciar la inyección de agua.
- Tasa de 100 BTU/h apagando en la hora 6.5.

Tomando en cuenta que en el escenario propuesto anteriormente a una tasa de 100 BTU/h, la temperatura durante la combustión húmeda es sobreestimada, se decide apagar los calentadores exactamente 8.92 horas después de iniciada la prueba, tiempo correspondiente a la inyección de agua. Se espera que al apagar los calentadores la temperatura no continúe aumentando y que la inyección de agua provoque una disminución considerable a fin de acercarse al comportamiento de la curva ICP. Con este escenario, la temperatura durante la combustión húmeda muestra un buen comportamiento, sin embargo, el pico de temperatura alcanzado en el momento de la ignición supera al alcanzado en la prueba experimental y la ignición se da en un tiempo tardío. Es importante analizar también las temperaturas máximas alcanzadas durante toda la corrida para la elección de la tasa de calentamiento. En la siguiente figura se comparan las temperaturas máximas alcanzadas con el escenario tasa de 100 Btu/h apagando

en el inicio de la inyección de agua con las temperaturas máximas alcanzadas en la prueba experimental.

**Figura 36.** Temperaturas máximas tasa 100 Btu/h apagando en inyección de agua

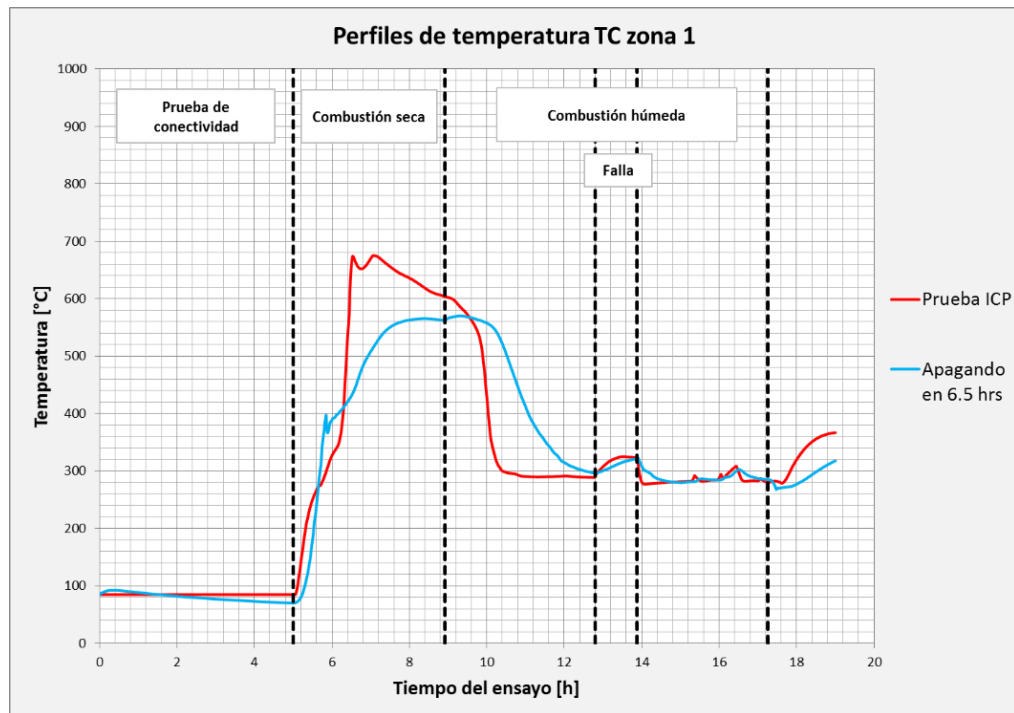


En la figura 36 se observa que las temperaturas máximas alcanzadas con la tasa analizada exceden los valores registrados por el ICP, y el máximo absoluto se encuentra en 960 °C, muy por encima de los 700 °C de la curva roja.

Hay que resaltar que la temperatura se eleva drásticamente en la hora 6.5, por ello se decide analizar el segundo escenario propuesto en el cual los calentadores se apagan a dicho tiempo.

La figura 37 muestra el perfil de temperatura de la termocupla situada en la zona 1 para este escenario.

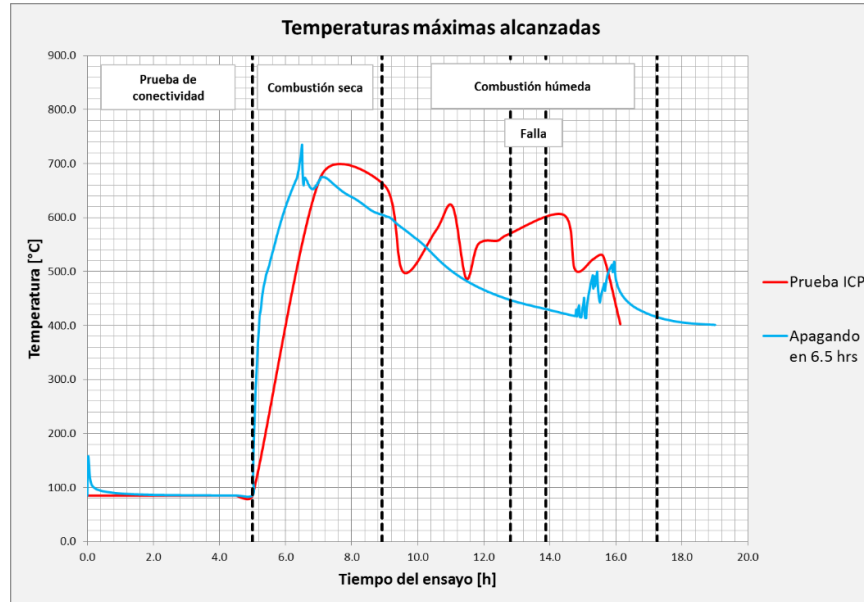
**Figura 37.** Comparación perfil de temperatura TC 1 - tasa de 100 Btu/h apagando en 6.5 h – Prueba ICP



Se obtuvo una mejora en el último valor de temperatura registrado durante la combustión seca, y la curva celeste se acerca más a la curva roja durante la combustión húmeda. Sin embargo, aún es necesario hacer que la curva celeste aumente durante la combustión seca para alcanzar el pico de combustión de 665°C.

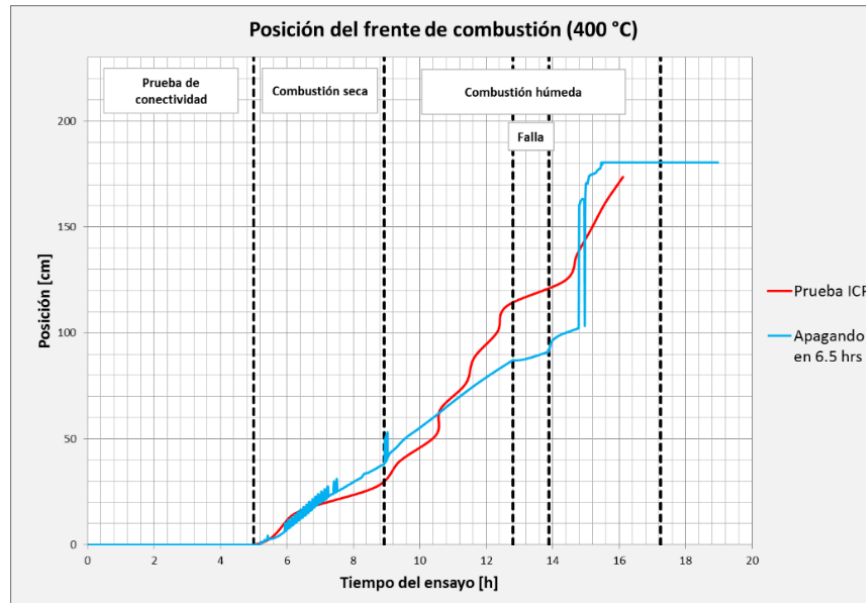
Por otra parte, el comportamiento de las temperaturas máximas presenta una notable mejora en comparación al caso anterior, pues ya no sobreestima el máximo absoluto de la curva. Así puede apreciarse en la figura 38.

**Figura 38.** Temperaturas máximas tasa 100 Btu/h apagando en 6.5 h



El comportamiento del frente de combustión también debe ser observado, la figura 39 muestra una comparación entre la posición del frente de la última corrida de simulación con la de la prueba experimental.

**Figura 39.** Posición del frente de combustión en el tiempo tasa de 100 Btu/h apagando en 6.5 h

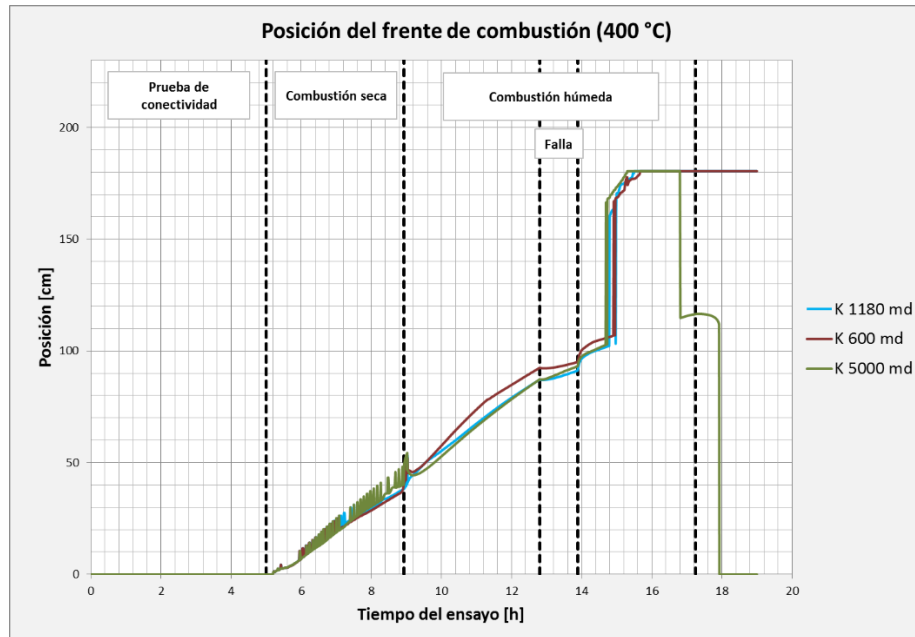


Se presentan comportamientos anómalos en esta variable luego de que se retoma la inyección de aire, pues en el tiempo 14.4 horas el frente avanza 60 centímetros en un *step* que corresponde a 0.01 horas, lo cual es físicamente imposible, sin embargo, la tasa elegida fue esta última (100 Btu/h apagando en 6.5 horas) pues muestra un buen ajuste de temperatura. Para el ajuste de la velocidad se procedió a realizar la modificación de las permeabilidades en el tubo para dificultar o facilitar el avance del frente.

#### 4.2. MODIFICACIÓN DE LAS PERMEABILIDADES ABSOLUTA Y RELATIVA

Se modificó la permeabilidad absoluta inicial presentada en el modelo base, aumentándola hasta 5000 md y disminuyéndola a 600 md desde el valor base de 1180 md a fin de visualizar el efecto que tiene sobre la velocidad del frente de combustión. La figura 40 muestra una comparación entre las posiciones del frente de combustión para la tasa de 100 BTU/h apagando los calentadores en 6.5 horas con permeabilidades absolutas de 1180 md, 5000 md y 600 md.

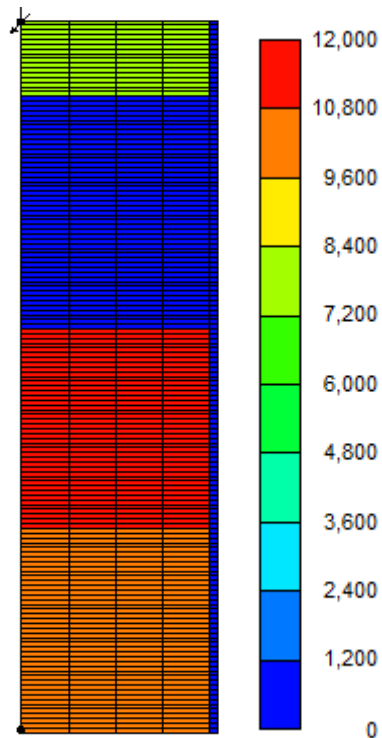
**Figura 40.** Posición frente de combustión en el tiempo a diferentes permeabilidades



Es posible visualizar que las curvas descritas para cada escenario de permeabilidad tienen un comportamiento muy aproximado y casi superpuesto hasta la hora 15.6, que es el momento en el cual se termina de barrer la totalidad del tubo de combustión, sin embargo, después de reanudada la inyección de aire se siguen presentando comportamientos anómalos para el tiempo posterior a la reanudación de la inyección de aire.

De la figura 40 se puede concluir que el valor de la permeabilidad absoluta de la arena no tiene un efecto considerable sobre la velocidad del frente de combustión, pues al aumentar su valor, se facilita el movimiento de todos los fluidos presentes en el tubo, y al disminuirlo se dificulta dicho movimiento, por lo que no hay una variación en la velocidad del frente. Adicional a ello, se probó también un escenario en el que se varió la permeabilidad a lo largo del tubo con valores entre 30 y 12000 md (figuras 41 y 42) y se obtuvieron resultados similares a los casos anteriormente probados.

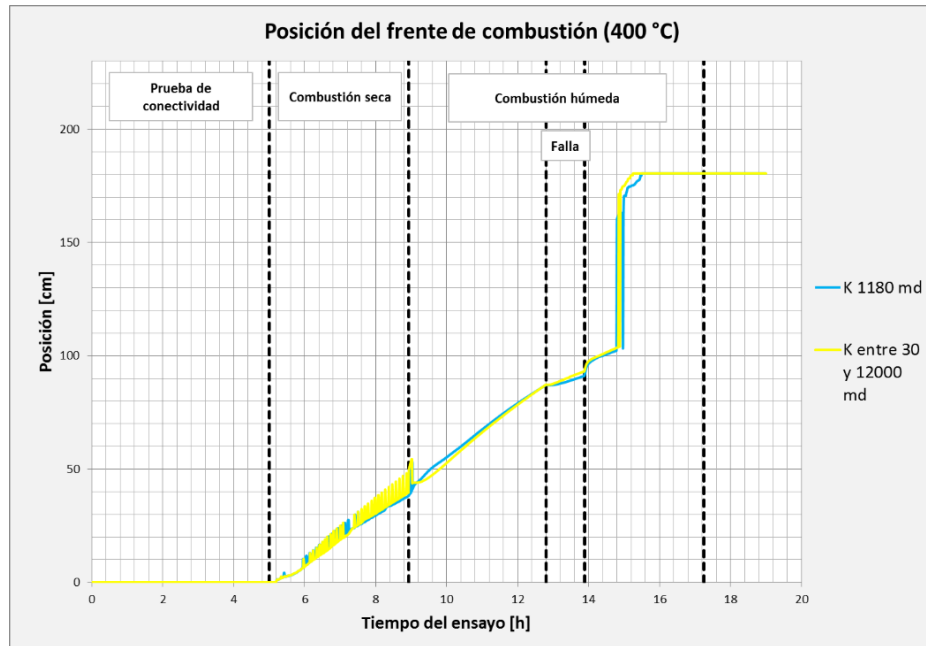
**Figura 41.** Visualización de la permeabilidad variable en el grid de simulación



**Fuente:** Computer Modeling Group (CMG). 2013

El valor de permeabilidad se modificó teniendo en cuenta los resultados obtenidos anteriormente, pues se estableció un menor valor a las zonas en las que la velocidad debía disminuir y un valor mayor a las zonas donde se buscaba aumentarla.

**Figura 42.** Posición del frente en el tiempo – permeabilidad entre 30 y 12000 md



Los resultados obtenidos se deben principalmente a que, al tratarse de un ensayo a escala de laboratorio y dado el pequeño diámetro del tubo de combustión utilizado, no es posible la formación de canales de flujo preferencial que permitan al frente moverse con mayor o menor velocidad y tampoco la canalización del mismo. También, se benefician las condiciones para que se dé el efecto pistón y exista un frente estable que se mueve barriendo el tubo en la totalidad de su diámetro durante todo el tiempo del ensayo.

En base a lo anterior, se plantea la modificación de la permeabilidad relativa al gas, a fin de dificultar únicamente el flujo de aire y provocar así que llegue menos aire al frente de combustión y disminuya la velocidad de avance del mismo.

Las figuras 43 y 44 muestran las curvas de permeabilidad relativa para el caso base y el caso modificado respectivamente, y la tabla 19 muestra los valores de los parámetros modificados.

**Figura 43.** Curva permeabilidad relativa Vs Saturación de líquido, caso base



**Figura 44.** Curva permeabilidad relativa Vs Saturación de líquido, caso modificado



**Tabla 19.** Valores modificados de la permeabilidad relativa

	Permeabilidad relativa del gas en liquido connato	Permeabilidad relativa del aceite al gas en gas connato	Saturación de líquido connato	Saturación de gas connato
Base	0.2	0.6	0.29	0.95
Modificado	0.1	0.6	0.29	0.95

Igual que en los casos de permeabilidad absoluta, no se observó una variación en la curva que describe la posición del frente de combustión ya que de manera análoga, las dimensiones del tubo de combustión no permiten evidenciar un cambio al modificar estos parámetros.

De acuerdo a la metodología propuesta, la siguiente estrategia es realizar una celda cinética ajustada al modelo.

#### **4.3. RESULTADOS DE LA CELDA CINÉTICA AJUSTADA AL MODELO**

“En una celda cinética el tamaño de muestra es pequeño en comparación al tamaño usado en el tubo de combustión, los valores de temperatura son mayores que los observados en el tubo de combustión con excepción de la zona de ignición donde la temperatura se incrementa con un calentador y todo el coque es quemado en la celda dejando atrás la arena limpia”<sup>54</sup>. En este sentido, los perfiles de temperatura y gases producidos difieren entre una prueba y otra. A pesar de esto, se puede construir una celda cinética con el modelo de reacciones de la prueba de tubo para confirmar si dicho modelo proporciona una combustión con comportamiento oxidativo normal.

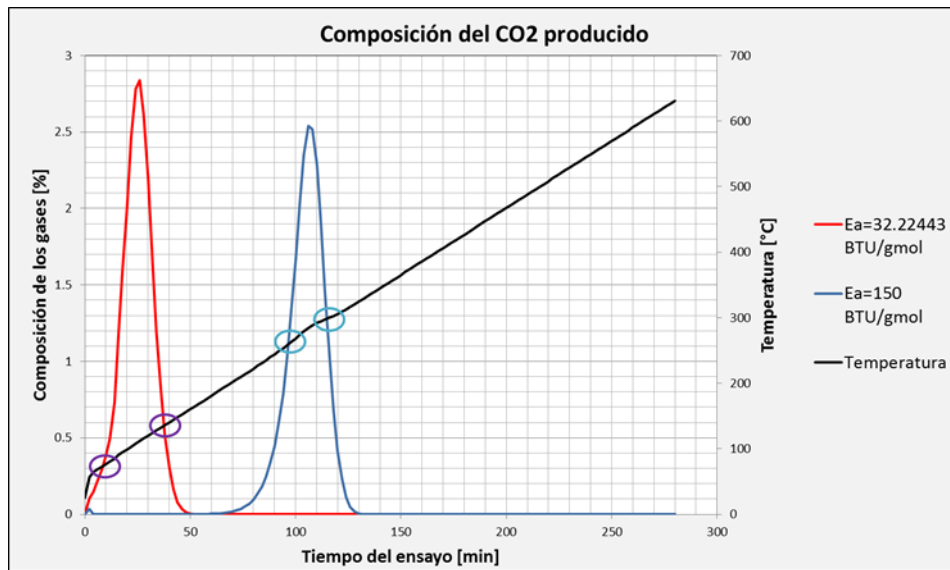
En base a lo anterior, se construyó una celda cinética ajustada a los modelos de fluidos y reacciones, pero no a los parámetros operacionales usados para el ensayo de tubo de combustión, sino siguiendo la metodología propuesta por los investigadores Cinar y Chen<sup>55</sup>.

La figura 45 muestra los resultados obtenidos para la producción de CO<sub>2</sub> en la celda cinética, comparando los parámetros cinéticos de la reacción HTO inicialmente propuestos con un escenario en el cual se aumentó la energía de activación de 32.22443 a 150.

<sup>54</sup> CINAR, Murat. Kinetics of crude oil combustion in porous media interpreted using isoconversional methods. A Dissertation. August. (2011).

<sup>55</sup> CHEN, Bo. Investigation of in situ combustion kinetics using the isoconversional principle. A Dissertation. November. (2012)

**Figura 45.** Producción de CO<sub>2</sub> en una celda cinética

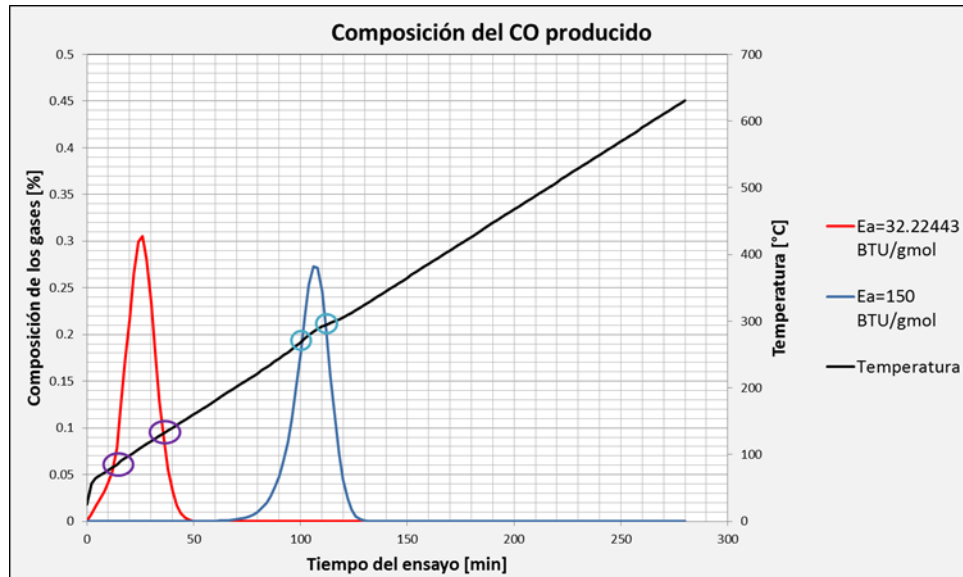


Los puntos de análisis de la gráfica son los encerrados con los cuatro óvalos. Con el valor de los parámetros cinéticos inicialmente propuestos se observa que las reacciones se están dando a una temperatura entre 77 y 136 °C, valores muy bajos para considerarse como régimen HTO. Por otra parte, los valores de tiempo corresponden al inicio de la inyección de aire, entre 0 y 50 minutos, valores que resultan inusuales en comparación a los resultados experimentales reportados en la literatura. Dado que la energía de activación para la reacción HTO tiene un valor muy bajo, la reacción es más fácil de alcanzar.

Por otro lado, el comportamiento de la curva azul, correspondiente a una energía de activación de 150 BTU/gmol muestra intervalos más lógicos y acordes a los datos de la literatura, pues la temperatura a la que se desarrolla la reacción está entre 270 y 300 °C y se desarrolla entre los 70 y 130 minutos, evidenciando que la reacción no es tan fácil de lograr sino que se da hacia los tiempos intermedios del ensayo.

De manera análoga, la figura 46 muestra los resultados obtenidos para la producción de CO, que muestra la reactividad en los mismos intervalos para los casos tanto inicial como modificado.

**Figura 46.** Composición de CO en una celda cinética



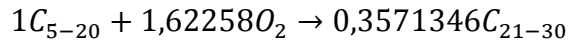
Aunque los resultados obtenidos de la producción de los gases efluentes de CO y CO<sub>2</sub> no corresponden exactamente a los valores de temperatura y tiempo reportados en la prueba de tubo de combustión, si dan una base conceptual fuerte para probar el escenario con energía de activación con valor de 150 BTU/gmol, dado que los valores de temperatura obtenidos corresponden a los reportados en la literatura y la reacción no se da inmediatamente se inicia la prueba, pues ello supondría que el coque se estaría depositando en los tiempos tempranos y consumido a temperaturas inferiores a 150 °C.

#### **4.4. MODIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS CINÉTICOS DE LA REACCIÓN HTO**

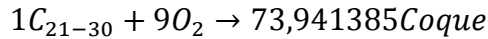
Es necesario aclarar que la estequiometría del modelo de reacciones fue modificado incluyendo el CO como producto en la última reacción que corresponde a la reacción HTO, debido a que como estaba planteada inicialmente se establece como una combustión completa en la que los productos obtenidos son CO<sub>2</sub> y agua, constituyendo una reacción idealizada. Por ello, se decidió añadir el CO como producto de la reacción HTO dado que es un parámetro reportado en la prueba ICP.

El modelo de reacciones definitivo se muestra a continuación.

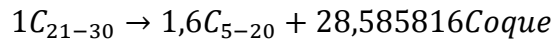
## Ec 9. Modelo de reacción con CO



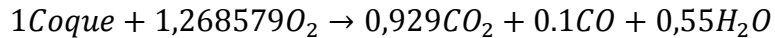
LTO



LTO



IT



HTO

Para modificar los parámetros cinéticos, se realizó un análisis de sensibilidad con el fin de observar en qué medida influye cada parámetro en la combustión, de ello se pudo evidenciar que el factor de frecuencia es el parámetro que tiene menor efecto sobre los perfiles de temperatura y velocidad del frente de combustión; por ello, se modificó el valor presentado en el modelo base de reacciones disminuyéndolo solo en un orden de magnitud (de 6.619e12 a 6.619e11), además, a partir de los resultados obtenidos en la celda cinética, se comprobó que un valor de energía de activación que permita tener una combustión con reactividad normal debe ser cercano a 150 BTU/gmol. En este sentido, se modificaron los parámetros cinéticos dejando en un valor fijo el factor de frecuencia, el valor de la energía de activación se varió en un pequeño intervalo, con lo que básicamente solo es necesario modificar el valor de la entalpía de la reacción.

Se probaron diferentes escenarios con diferentes combinaciones de parámetros cinéticos, haciendo que cada escenario mejorara en base al anterior, hasta determinar la combinación de parámetros con los que se logra el mejor ajuste

Se estableció que la combinación de parámetros cinéticos para la reacción HTO mostrada en la tabla 20 ofrece el mejor ajuste y logra que se alcance el buscado equilibrio entre las curvas de los perfiles de temperatura registrados en cada termocupla del tubo, las temperaturas máximas alcanzadas, la velocidad del frente de combustión y la composición de los gases efluentes, a partir de los datos arrojados para el tiempo del ensayo.

**Tabla 20.** Ajuste final parámetros cinéticos reacción HTO

	Valores base	Ajuste logrado
<b>Energía de activación</b>	32.22443 BTU/gmol	150 BTU/gmol
<b>Factor de frecuencia</b>	6.619e12	6.619e11
<b>Entalpia</b>	470.47619 BTU/gmol	500 BTU/gmol

#### **4.5. RESULTADOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN NUMÉRICA AJUSTADO A LA PRUEBA**

Los resultados obtenidos para todos los parámetros de ajuste jerarquizados al inicio del capítulo son mostrados a continuación, y en cada uno de ellos se muestra la comparación respectiva con la curva de la prueba ICP.

##### **4.5.1. Perfiles de temperatura**

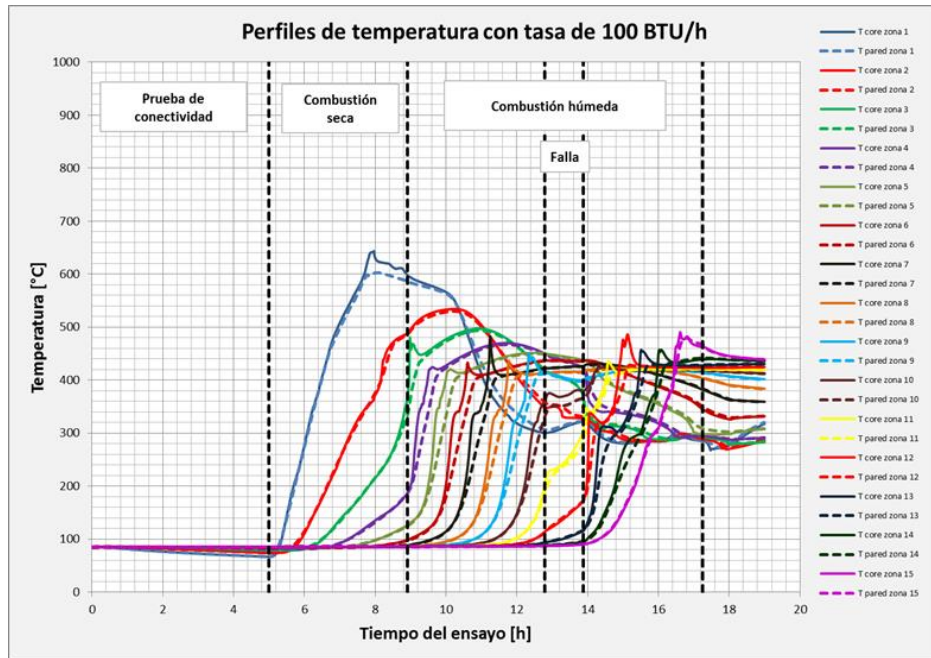
La figura 47 muestra los perfiles de temperatura definitivos para todas las zonas del tubo de combustión con las 30 termocuplas ubicadas a lo largo del mismo tanto en el núcleo como en la pared. Los perfiles de temperatura de la prueba experimental habían sido mostrados anteriormente en la figura 19.

Se observa un comportamiento más aproximado a las curvas de la prueba experimental, se evidencian caídas en los valores de las temperaturas entre las horas 12.8 y 13.88 que corresponde al tiempo en el cual se dejó de inyectar aire al tubo.

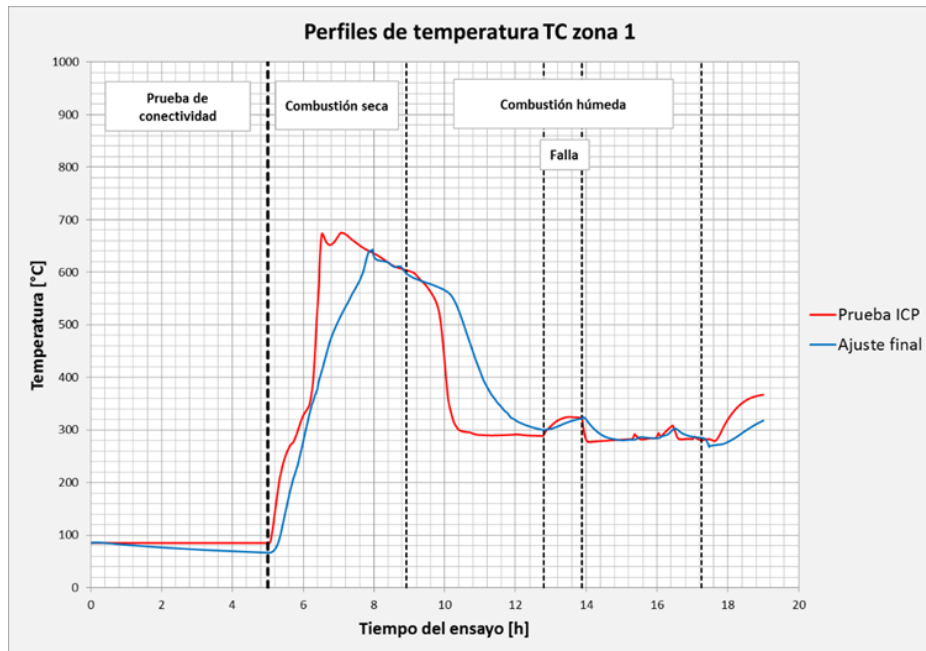
Teniendo en cuenta que se tienen 15 termocuplas ubicadas en el núcleo a lo largo del tubo, se seleccionaron 5 de ellas para compararlas con los resultados de la prueba experimental.

La figura 48 muestra los perfiles de temperatura correspondientes a la primera zona del tubo de combustión.

**Figura 47.** Perfiles de temperatura ajuste final



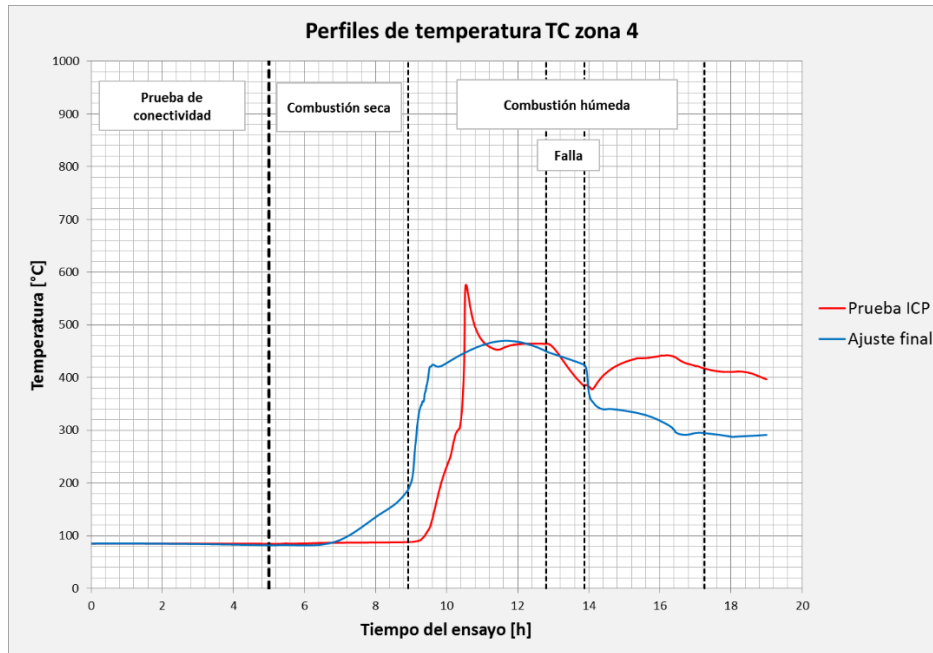
**Figura 48.** Perfil de temperatura primera termocupla ajuste final



Se observa un desfase en la curva azul de un valor cercano a media hora hasta el inicio de la falla y la superposición de las curvas a partir del inicio de la falla, con lo que se da el ajuste del perfil de temperaturas más importante, pues es en la que se manifiesta con mayor intensidad el efecto de la tasa de transferencia de calor.

A continuación se muestra el perfil de temperatura de la termocupla 4.

**Figura 49.** Perfil temperatura termocupla 4 ajustada



El comportamiento descrito por la curva azul de la figura 49 da un indicio de que la velocidad del frente de combustión antes de la falla es ligeramente mayor a la de la prueba experimental, pues se alcanza la temperatura de 400 °C en un tiempo anterior al de la curva ICP.

La figura 50 muestra el perfil de temperatura de la termocupla 7. En ella se observa un comportamiento de la curva azul que sigue la tendencia de la curva roja, describiendo una trayectoria intermedia a las variaciones de la curva roja. Este tipo de ajuste se considera como un ajuste de equilibrio o proporcional.

Figura 50. Perfil temperatura termocupla 7 ajuste final

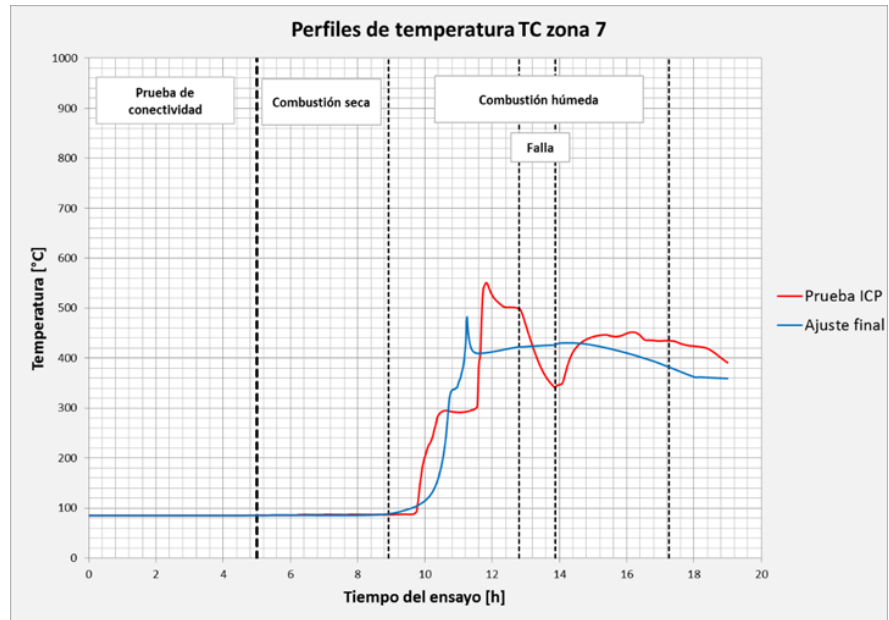
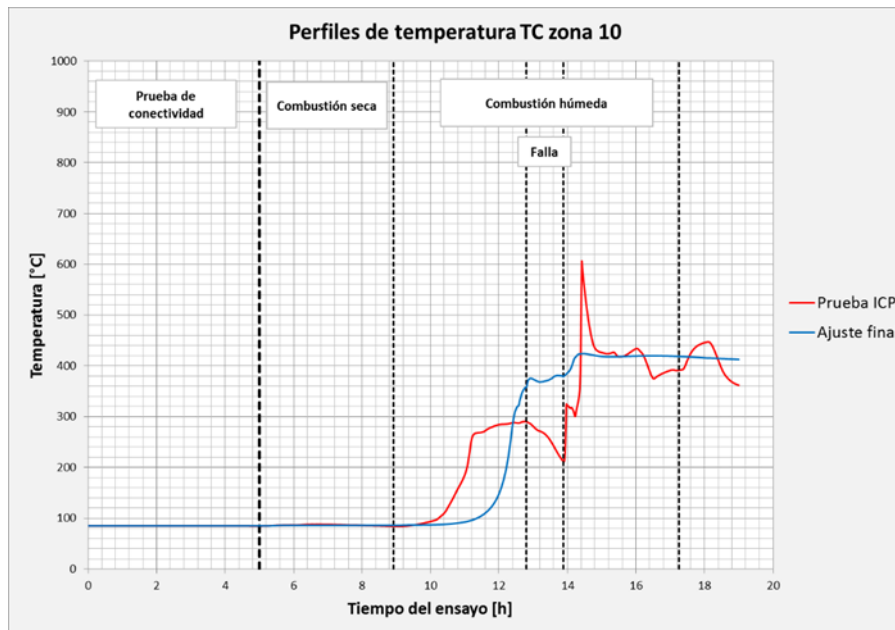


Figura 51. Perfil de temperatura termocupla 10 ajuste final

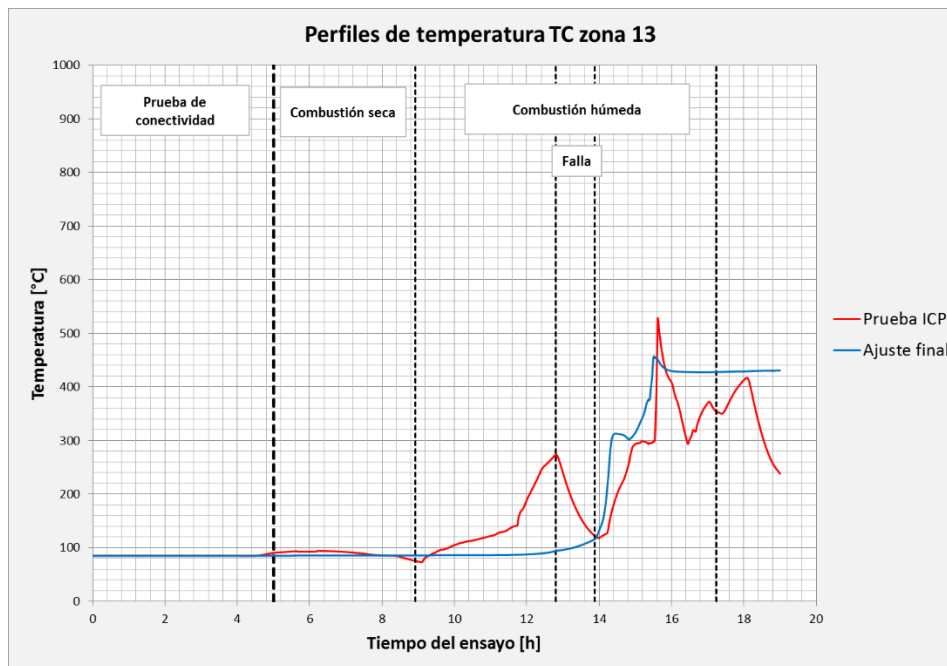


La figura 51 muestra un ajuste proporcional al igual que la termocupla 7. Este tipo de ajuste, si bien sigue una tendencia promediada del comportamiento de la curva

ICP, desconoce la caracterización de máximos y mínimos relativos descritos por la curva base; sin embargo es un ajuste aceptable cuando no se trata de curvas de gran extensión y los picos intermedios no representan un fenómeno físico de relevancia.

Finalmente, la figura 52 muestra los perfiles de temperatura de la termocupla 13, que es representativa del comportamiento que se tiene al final del tubo.

**Figura 52.** Perfil temperatura termocupla 13 ajuste final

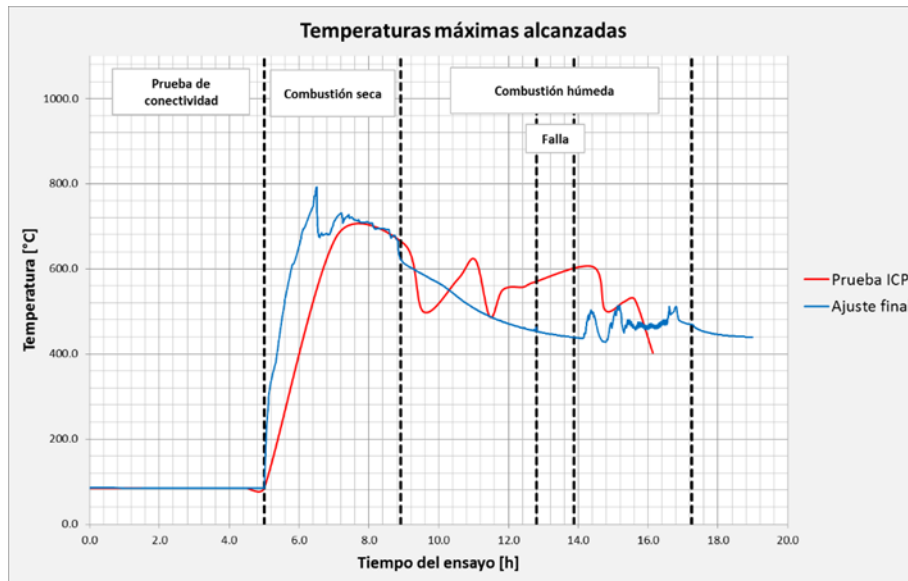


La curva descrita para la termocupla 13 demuestra el denominado efecto de cola, que básicamente hace referencia al poco o nulo efecto que tienen los calentadores en las zonas más lejanas del tubo, pues el calor ganado por el aire es cedido antes de llegar al final del arreglo por lo que no se evidencia un incremento en la temperatura antes de la falla.

#### 4.5.2. Temperaturas máximas

Teniendo en cuenta la jerarquía de parámetros en la que se ha hecho énfasis a lo largo del capítulo, se prosigue a analizar la gráfica de las temperaturas máximas son mostradas en la figura 53.

**Figura 53.** Temperaturas máximas ajuste final

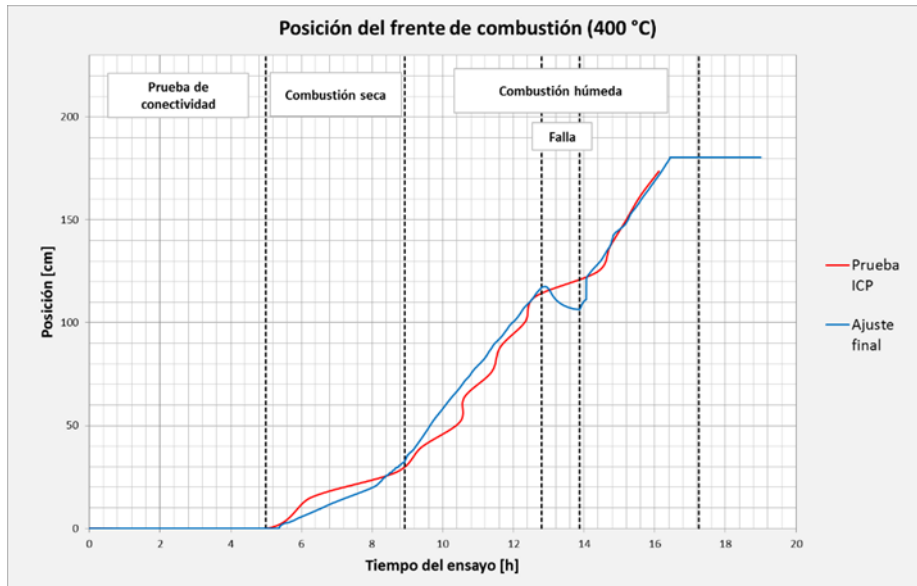


La curva de ajuste (azul) describe un comportamiento aproximado a la curva ICP durante la totalidad del ensayo. Es importante resaltar el hecho de que los valores de temperatura máxima del modelo ajustado siempre están por encima del valor de los 400 °C indicando que existió una combustión eficiente durante la prueba.

#### 4.5.3. Posición del frente de combustión

El principal parámetro de ajuste que se pretendió ajustar mediante la modificación de los parámetros cinéticos es la posición del frente de combustión, el cual se muestra en la figura 54.

**Figura 54.** Posición del frente en el tiempo ajuste final



La curva mostrada en la figura anterior muestra el mejor ajuste entre los principales parámetros objetivos jerarquizados para el ajuste final de la prueba, y describe un comportamiento aproximadamente igual a la curva ICP.

Alcanzar una velocidad de frente de combustión igual al de la prueba ICP garantiza que la reactividad del proceso es idónea, además que la producción de fluidos sea cercana a la real. En la figura 54 se visualiza un comportamiento lineal en los 3 intervalos en los que se presenta el avance del frente de combustión, la combustión seca, la combustión húmeda sin apagón y la combustión húmeda después del apagón. La tendencia lineal demuestra que efectivamente el frente se movió de manera uniforme y se desarrolló de manera estable durante el tiempo del ensayo, describiendo un barrido con el efecto pistón.

La gráfica de posición vs tiempo presenta implícitamente la variable velocidad. La velocidad instantánea puede ser calculada realizando la lectura del valor de tiempo y posición en un punto específico de la curva y efectuando el cociente entre los dos valores, y la expresión que describe el comportamiento de velocidad a lo largo de cada uno de los 3 intervalos descritos anteriormente puede hallarse con el criterio de la primera derivada, con la cual puede hallarse la recta tangente a la curva de posición para luego reemplazar el valor de tiempo en el que se desea para conocer la velocidad instantánea en ese punto temporal específico.

Sin embargo, el valor de interés en un proceso de combustión in situ es la velocidad promedio del frente de combustión que no se calcula mediante artificios matemáticos sino mediante un análisis termodinámico y físico desde el punto de

vista de la reactividad del proceso. Para medir esta velocidad se debe trazar una línea horizontal en la gráfica de perfiles de temperatura del experimento, la línea se debe trazar en un valor de temperatura mayor a 300 °C de forma que se garantice que se está en el régimen HTO. Con los valores de corte de temperatura con la línea trazada y las distancias de separación de las termocupas se obtiene la velocidad del frente. Luego de hallar la velocidad del frente de combustión en cada termocupla, se halla un promedio ponderado con el tiempo que tarda el frente en atravesar la termocupla, y este valor va a constituir el valor final de la velocidad promedio del frente de combustión.

Para el caso del ensayo realizado, se analizó la velocidad del frente de combustión a 400 °C, pues a esta temperatura se garantiza que existe un avance frontal estable y que se está alcanzando el régimen HTO.

La tabla 21 muestra los valores calculados para la velocidad en cada zona y el valor promedio de la velocidad del frente para los valores reportados en la prueba ICP. Los valores con fondo azul corresponden al avance del frente durante la combustión húmeda antes de la falla, mientras que los valores con fondo verde corresponden al avance del frente durante la combustión húmeda después de la falla.

De igual manera y con el mismo esquema de colores, la tabla 22 muéstralos valores calculados para la velocidad del frente y su valor promedio para el modelo de simulación numérica propuesto por los autores.

**Tabla 21.** Velocidad del frente de combustión prueba ICP

Tiempo del ensayo (horas)	Posición del frente (cm)	Velocidad en cada zona (m/h)	Promedio ponderado (m/h)
6.283333333	15.14475		
8.683333333	27.33675	0.0508	
9.4	39.52875	0.17012093	
10.48333333	51.72075	0.112541538	0.2145
10.61666667	63.91275	0.9144	
11.38333333	76.10475	0.159026087	
11.63333333	88.29675	0.48768	
12.33333333	100.48875	0.174171429	

12.61666667	112.68075	0.430305882	
14.38333333	124.87275	0.069011321	
14.73333333	137.06475	0.348342857	0.281
15.16666667	149.25675	0.281353846	
15.58333333	161.44875	0.292608	
16.11666667	173.64075	0.2286	

**Tabla 22.** Velocidad del frente de combustión modelo ajustado

<b>Tiempo del ensayo (horas)</b>	<b>Posición del frente (cm)</b>	<b>Velocidad en cada zona (m/h)</b>	<b>Promedio ponderado (m/h)</b>
6.47481966	12.192		
8.156843185	24.384	0.072484123	
8.95855999	36.576	0.152073649	
9.479003906	48.768	0.234261553	0.2615
9.992736816	60.96	0.237321763	
10.55930042	73.152	0.215192079	
11.17940044	85.344	0.196613443	
11.72699928	97.536	0.222644738	
12.27654076	109.728	0.221857684	
14.12791157	121.92	0.065853906	
14.51660347	134.112	0.313667457	
14.86676407	146.304	0.348183091	
15.43340302	158.496	0.215163465	
15.95012283	170.688	0.235949924	
16.42993164	182.88	0.254101212	

Así, la tabla 23 muestra una comparación entre los valores de velocidad promedio obtenidos para tanto para la prueba ICP como para el modelo ajustado.

**Tabla 23.** Comparación velocidad del frente de combustión prueba ICP – modelo ajustado

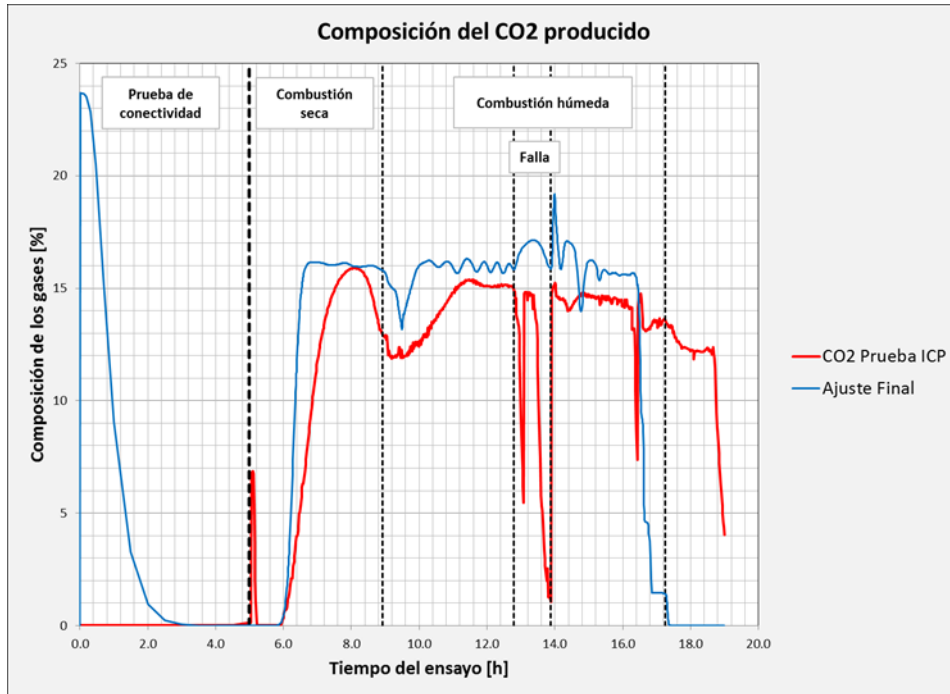
	Combustión húmeda antes de la falla	Combustión húmeda después de la falla
Velocidad del frente, prueba ICP (m/h)	0.2145	0.281
Velocidad del frente, modelo ajustado (m/h)	0.2615	0.3178
% Error	21.91	13.10

#### 4.5.4. Composición de los gases efluentes

La figura 55 muestra la composición de CO<sub>2</sub> del gas efluente. Cabe resaltar que algunos autores reportan que un valor específico de composición de CO<sub>2</sub> en el gas efluente garantiza que se está dando una combustión en régimen HTO. “El dióxido de carbono es un buen indicador del tipo de combustión que se está experimentando; un valor por encima del 12% indicará una combustión eficiente”.<sup>56</sup>

<sup>56</sup> PALMA B., Jorge. “Procedimiento para el ajuste de variables involucradas en procesos de combustión in situ”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2011. P-102

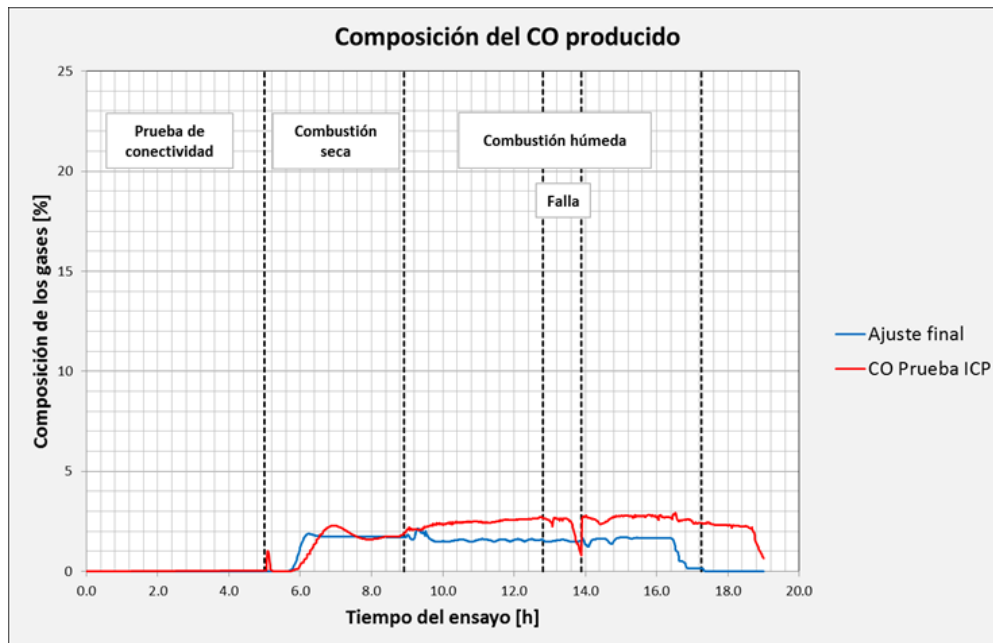
**Figura 55.** Composición CO<sub>2</sub> producido ajustado



En la figura 55 se puede observar que durante la mayoría del tiempo del ensayo hay una producción de CO<sub>2</sub> por lo que la combustión efectivamente se está desarrollando en régimen HTO. Existe un pico de producción al inicio de la prueba, pero se debe al CO<sub>2</sub> que está presente en el crudo y se produce a bajos caudales durante la prueba de conectividad y no al producto de la combustión puesto que a ese tiempo aún no se ha generado la combustión porque carece del material oxidante.

La composición de CO se muestra en la figura 56. En ella se evidencia que efectivamente existe producción de este gas, reafirmando y dando validez al hecho de modificar el modelo de reacciones para incluirlo como producto en la reacción HTO. La curva descrita se consolida como un parámetro ajustado a la prueba ICP.

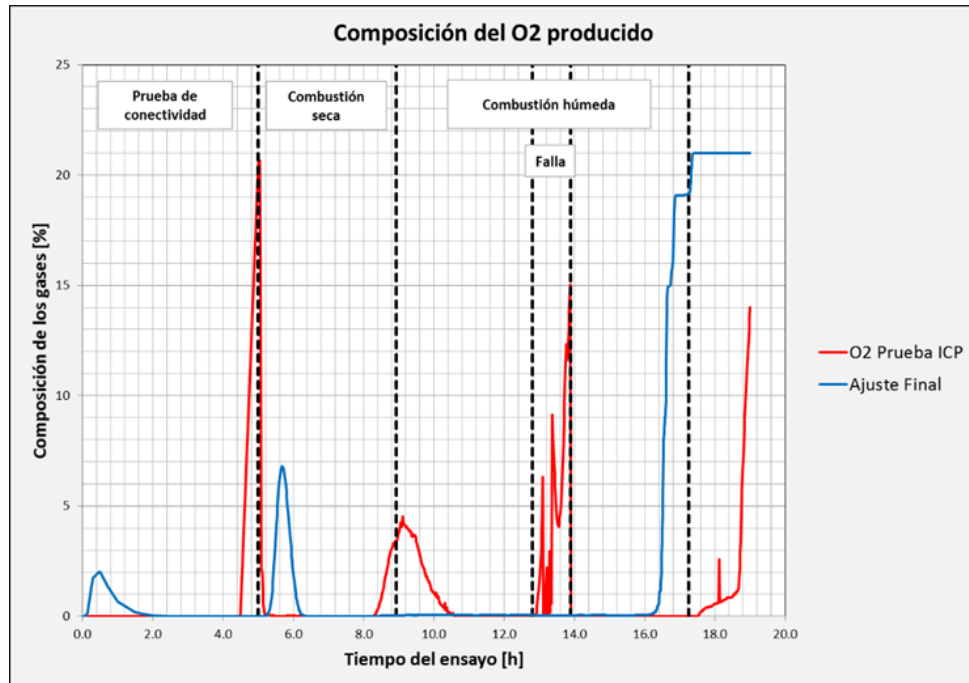
**Figura 56.** Composición CO producido ajuste final



Es importante visualizar también la composición de oxígeno en el gas efluente ya que da un estimado de en qué medida se está presentando o no una combustión completa con consumo de oxígeno del 100%. Se espera que exista un consumo total indicando la reacción de este.

En la figura 57, en la curva de la prueba experimental se observa que existe un pico en la producción de oxígeno cuando inicia la inyección de aire. La curva azul muestra el pico, pero no con un valor tan alto, indicando que hay una combustión más eficiente en el modelo de ajuste propuesto, lo cual es perfectamente normal dadas las suposiciones hechas al momento de simular. También existe un pico de producción durante la falla del controlador de flujo másico de aire que indica un debilitamiento del frente de combustión, sin embargo no es descrito por la curva azul, lo que indica que en el modelo propuesto la combustión se siguió desarrollando durante la falla.

**Figura 57.** Composición O<sub>2</sub> producido ajuste final



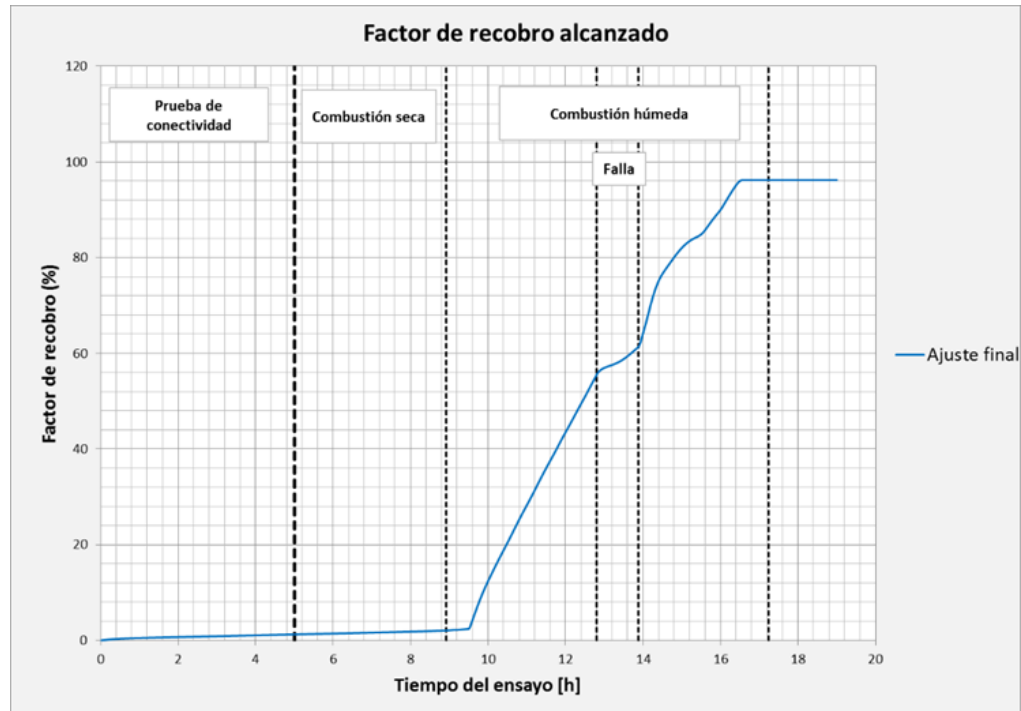
#### 4.5.5. Factor de recobro

El factor de recobro es la principal función objetivo que tiene una prueba escada a laboratorio o un modelo de simulación numérica a escala de campo ajustado para cualquier método de recuperación mejorada, y su valor es determinante para establecer si un proceso de recobro es viable tanto técnica como financieramente. Sin embargo, no constituye un parámetro clave en el estudio de las pruebas de combustión, pues las dimensiones del tubo de combustión y las suposiciones idealizadas para el proceso provocan que se obtengan valores muy cercanos al 100% y se aleje de los resultados reales en los que se alcanzan factores de recobro de 80%, llegando a valores cercanos a 90% en el mejor de los casos con una formación muy homogénea.

Para el caso de la prueba ajustada, el factor de recobro solamente representa un parámetro para el ajuste, y el procedimiento realizado para su cálculo a partir de los datos de prueba facilitados por el ICP es explicado detalladamente en el anexo B.

La figura 58 muestra el comportamiento del factor de recobro para la duración total del ensayo ajustado con el modelo de simulación numérica ya que el factor de recobro no fue determinado para cada *step* de tiempo en la prueba ICP.

**Figura 58.** Factor de recobro ajuste final



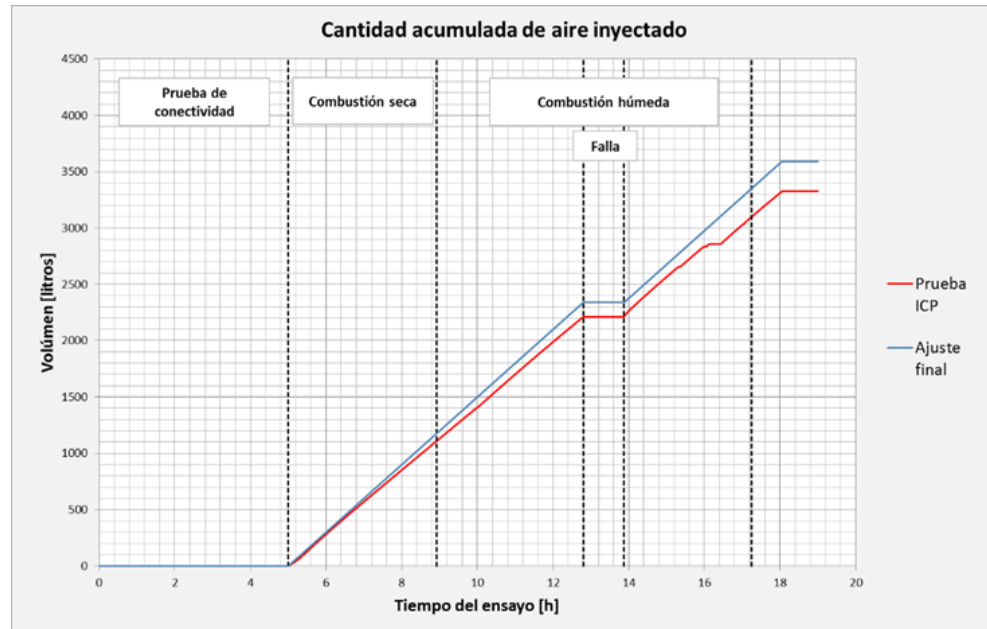
Se observa que el factor de recobro final alcanzado en el modelo de simulación numérica fue 96.22%, el cuál será la base para comparar con el valor de factor de recobro final de la prueba ICP.

#### 4.5.6. Cantidad total de aire inyectado

Este parámetro tiene gran relevancia para lograr un ajuste representativo, pues si existe una diferencia en el caudal de aire que alimente al frente de combustión se tendrán eficiencias de combustión variables. Cabe resaltar que en la medida en que llegue mayor cantidad de aire al frente y se disponga de combustible, se tendrá una combustión más eficiente, y que disminuir drásticamente su caudal puede derivar en la extinción total del frente.

La figura 59 muestra los comportamientos para este parámetro y la comparación con la prueba ICP.

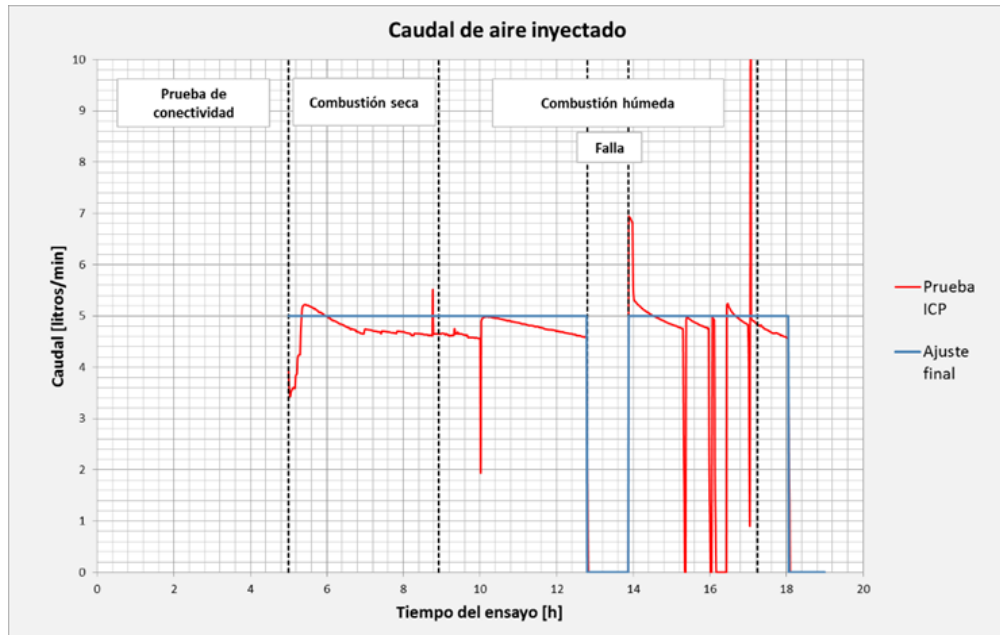
**Figura 59.** Comparación Cantidad aire inyectado prueba ICP – modelo ajustado



Como se puede apreciar, el volumen total de aire inyectado en el modelo propuesto es superior al inyectado en la prueba ICP, ello se debe a que en el modelo de simulación se mantiene estable el caudal de inyección de 5 L/min, mientras que en la prueba ICP no se hizo énfasis en las características del controlador de flujo de aire, o no cumplía con los requerimientos debidos para la prueba ya que incluso presentó una falla en un intervalo cercano a una hora.

La figura 60 muestra una comparación entre el valor de los caudales de inyección y en ella puede apreciarse que no se logró estabilizar la tasa de inyección de la prueba ICP.

**Figura 60.** Comparación caudal de aire inyectado prueba ICP, modelo ajustado



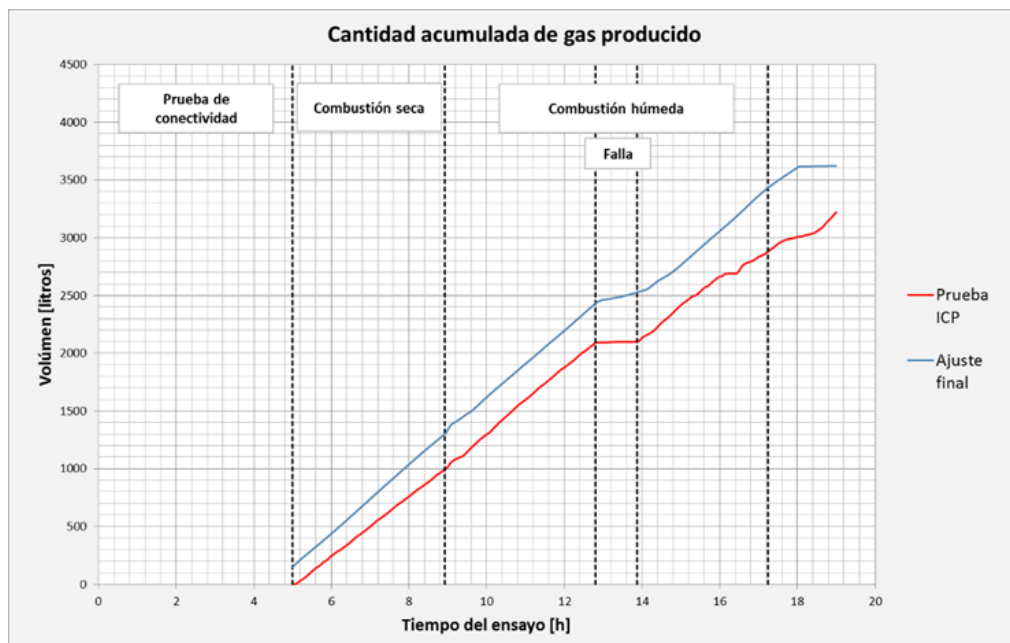
La exactitud y representatividad de los resultados obtenidos en cualquier proceso depende del control efectivo del mismo. Se recomienda remitirse al anexo B en el que se hace énfasis en los tipos de controladores que existen, cuál es el idóneo para el proceso estudiado y el procedimiento adecuado para ajustarlo.

No fue posible recrear la prueba realizada por el ICP de una manera más exacta mediante simulación numérica de yacimientos, debido principalmente a las fallas presentadas con el controlador, pues la cantidad de aire es determinante en la reacción de combustión. El efecto que tienen estas diferencias de inyección de aire es descrito a profundidad en la sección de cálculos, pues hay consecuencias directas en los resultados.

#### 4.5.7. Cantidad total de gas producido

Este parámetro es totalmente dependiente de la cantidad total de aire inyectado, por consiguiente se ve afectado también por el controlador de flujo másico de aire.

**Figura 61.** Comparación Cantidad de gas producido prueba ICP, modelo ajustado



La figura 61 muestra la cantidad de gas producido acumulada, pero no tiene en cuenta el volumen de nitrógeno producido durante la prueba de conectividad porque no fueron cuantificados dichos volúmenes. Así, la producción de gas solo se presenta desde el inicio de la inyección de aire y como era de suponer, los volúmenes del ajuste son mayores que los de la prueba ICP dado que la cantidad de aire inyectado también fue mayor.

Todos los resultados presentados anteriormente, son la base para efectuar el procedimiento de evaluación del tubo de combustión a partir de ciertos parámetros de desempeño calculados en el anexo B.

#### **4.6. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO**

Se calcularon los parámetros de desempeño de la prueba experimental para todo el tiempo en que se desarrolló la combustión húmeda y donde la velocidad del frente de combustión se mantuvo estable, es decir, se hicieron dos cálculos de parámetros de desempeño, uno para la combustión húmeda antes de la falla en el controlador y otro para la combustión húmeda después de la misma. De igual manera, se realizan estos mismos cálculos para la prueba ajustada con el fin de comparar los resultados y determinar qué tan bueno fue el ajuste obtenido.

El procedimiento para el cálculo de los parámetros de desempeño se encuentra detallado en el anexo B.

**Tabla 24.** Parámetros de desempeño prueba ICP

PARÁMETROS DESEMPEÑO PRUEBA ICP		
	Antes de la falla	Después de la falla
Carbono quemado	0.0912 kg	0.0509 kg
Oxígeno consumido	0.3 kg	0.1829 kg
% $O_2$ que reaccionó	95.68 %	100 %
Hidrógeno consumido	0.0093 kg	0.0072kg
Agua formada	0.0841 kg	0.0648 kg
Combustible consumido	0.1005 kg	0.0582 kg
Relación atómica H/C	1.2284	1.6962
Requerimiento de combustible	$16.209 \frac{kg \text{ combustible}}{m^3 \text{ reactor}}$	$12.3199 \frac{kg \text{ combustible}}{m^3 \text{ reactor}}$
Requerimiento de aire	$177.9677 \frac{m^3 \text{ aire}}{m^3 \text{ reactor}}$	$136.377 \frac{m^3 \text{ aire}}{m^3 \text{ reactor}}$
Relación aire/combustible	$10.9795 \frac{m^3 \text{ aire}}{kg \text{ combustible}}$	$11.0696 \frac{m^3 \text{ aire}}{kg \text{ combustible}}$
Relación oxígeno/combustible	$2.3057 \frac{m^3 \text{ oxígeno}}{kg \text{ combustible}}$	$2.3246 \frac{m^3 \text{ oxígeno}}{kg \text{ combustible}}$
WAR	$1.6884 \frac{ml \text{ agua}}{L \text{ aire}}$	$1.6703 \frac{ml \text{ agua}}{L \text{ aire}}$
Factor de recobro	95.42%	

#### 4.6.1. Parámetros de desempeño prueba ajustada

A partir de los datos obtenidos de la simulación y presentados en las tablas 25 y 26, se hace el cálculo de los parámetros de desempeño de la misma manera a como se realizó para la prueba experimental.

**Tabla 25.** Volumen gases producidos – ajuste

	Combustión húmeda antes de la falla del controlador	Combustión húmeda antes de la falla del controlador
Componente	Volumen (L)	
$CO_2$	178.5	104.2
$CO$	18.1	10.7
$O_2$	0.5	0.5

**Tabla 26.** Aire inyectado y volumen barrido del reactor – ajuste

	Combustión húmeda antes de la falla del controlador	Combustión húmeda antes de la falla del controlador
Aire inyectado	1167.9 L	764.9 L
Volumen barrido del reactor	7.6 L	6.08 L

Los parámetros de desempeño de la prueba ajustada son resumidos en la tabla 27, de igual manera, los cálculos detallados se encuentran en el anexo B.

**Tabla 27.** Parámetros de desempeño prueba ajustada

PARÁMETROS DESEMPEÑO PRUEBA AJUSTADA		
	Antes de la falla	Después de la falla
Carbono quemado	0.0998 kg	0.0583 kg
Oxígeno consumido	0.3312 kg	0.2167 kg
% $O_2$ que reaccionó	99.79%	96.69%
Hidrógeno consumido	0.0093 kg	0.0086kg
Agua formada	0.0871 kg	0.077 kg
Combustible consumido	0.1095 kg	0.0668 kg
Relación atómica H/C	1.1639	2.015
Requerimiento de combustible	$14.407 \frac{kg \text{ combustible}}{m^3 \text{ reactor}}$	$10.9868 \frac{kg \text{ combustible}}{m^3 \text{ reactor}}$
Requerimiento de aire	$153.671 \frac{m^3 \text{ aire}}{m^3 \text{ reactor}}$	$125.805 \frac{m^3 \text{ aire}}{m^3 \text{ reactor}}$
Relación aire/combustible	$10.666 \frac{m^3 \text{ aire}}{kg \text{ combustible}}$	$11.4506 \frac{m^3 \text{ aire}}{kg \text{ combustible}}$
Relación oxígeno/combustible	$2.399 \frac{m^3 \text{ oxígeno}}{kg \text{ combustible}}$	$2.4046 \frac{m^3 \text{ oxígeno}}{kg \text{ combustible}}$
WAR	$1.6 \frac{ml \text{ agua}}{L \text{ aire}}$	$1.6 \frac{ml \text{ agua}}{L \text{ aire}}$
Factor de recobro	96.22%	

#### 4.6.2. Comparación parámetros de desempeño prueba ICP – prueba ajustada

En la siguiente tabla se muestran los parámetros de desempeño calculados previamente para la prueba experimenta y para la prueba ajustada.

**Tabla 28.** Comparación parámetros de desempeño prueba ICP – prueba ajustada

	PRUEBA ICP		PRUEBA AJUSTADA	
	Antes de la falla	Después de la falla	Antes de la falla	Después de la falla
Carbono quemado (Kg)	0.0912	0.0509	0.0998	0.0583
Oxígeno consumido (Kg)	0.3	0.1829	0.3312	0.2167
% $O_2$ que reaccionó	95.68 %	100 %	99.79%	96.69%
Hidrógeno consumido (Kg)	0.0093	0.0072	0.0093	0.0086
Agua formada (kg)	0.0841	0.0648	0.0871	0.077
Combustible consumido (Kg)	0.1005	0.0582	0.1095	0.0668
Relación atómica H/C	1.2284	1.6962	1.1639	2.015
Requerimiento de combustible ( $\frac{kg\ combustible}{m^3 reactor}$ )	16.209	12.3199	14.407	10.9868
Requerimiento de aire ( $\frac{m^3\ aire}{m^3 reactor}$ )	177.967 7	136.377	153.671	125.805
Relación aire/combustible ( $\frac{m^3\ aire}{kg\ combustible}$ )	10.9795	11.0696	10.666	11.4506
Relación oxígeno / combustible ( $\frac{m^3\ oxigeno}{kg\ combustible}$ )	2.3057	2.3246	2.399	2.4046
WAR ( $\frac{ml\ agua}{L\ aire}$ )	1.6884	1.6703	1.6	1.6
Factor de recobro	95.42%		96.22%	

En la tabla anterior se puede observar que el ajuste de la prueba es aceptable, sin embargo, se presenta cierta discrepancia en todos los parámetros, principalmente en el requerimiento de aire, requerimiento de combustible y la relación atómica  $\frac{H}{C}$ , esto se debe a que en la prueba experimental, el controlador de flujo de aire no estaba bien ajustado y por consiguiente el caudal de inyección de aire osciló alrededor del punto de control de 5 L/min durante toda la prueba pero nunca se logró estabilizar en dicho punto, por el contrario, en la prueba ajustada mediante el simulador, se estableció un caudal de inyección de 5 L/min que permaneció estable durante toda la corrida. Esto se ve reflejado en la cantidad total de aire inyectado, que en la prueba experimental fue de 1103.4 L y en la prueba ajustada fue de 1167.9L durante la combustión húmeda antes de la falla de controlador y de 643.7 L (prueba experimental) y 764.9 L (prueba ajustada) durante la combustión húmeda después de la falla del mismo.

Al ser la cantidad de aire inyectado uno de los parámetros operacionales más relevante en un proceso de combustión húmeda tanto a escala de campo como de laboratorio, el comportamiento del proceso y por consiguiente los resultados obtenidos se ven afectados, es por esto que no es posible alcanzar un ajuste perfecto de la prueba.

## 5. DETERMINACIÓN DE LA RELACIÓN DE INYECCIÓN AGUA – AIRE CRÍTICA PARA LA PRUEBA AJUSTADA

Una vez ajustado el modelo de simulación numérica a la prueba experimental, puede garantizarse la representatividad del mismo y proceder a modificar parámetros operacionales, específicamente las tasas de inyección de agua y aire para calcular la relación de inyección crítica.

Es necesario aclarar que cuando se hace referencia a relación crítica es aquella que permite al frente de combustión continuar encendido, tal que al aumentar en una gota la inyección de agua o disminuir en una burbuja la inyección de aire se presente una extinción definitiva del frente de combustión.

La determinación de este parámetro es de gran importancia para el estudio de la combustión *in situ* húmeda a partir de pruebas de tubo de combustión. En un proceso a escala de campo, se tendrán los valores de las tasas de inyección extremos que permitan mantener encendido el frente, ya que si este se llegase a extinguir podría comprometer la viabilidad técnica del proceso con un método de recuperación mejorada de petróleo.

En el capítulo 1, se mencionó que en la literatura se encuentra reportado un valor de relación de inyección agua-aire (WAR por sus siglas en inglés) que oscila “entre 0 y 2.8 barriles de agua por kilopie cúbico de aire (unidades de campo) o entre 0 y 15.72 litros de agua por metro cúbico de aire inyectado (unidades de laboratorio)”<sup>57</sup>.

El valor de inicial de WAR que es calculado a partir de los caudales utilizados para la prueba es 1.6 en unidades de laboratorio y 0.285 en unidades de campo, puede ser modificado a fin de buscar una extinción del frente de 2 maneras diferentes: aumentando el caudal de inyección de agua o disminuyendo el caudal de inyección de aire.

Dado que pueden existir valores infinitos que permiten obtener la misma relación WAR, los escenarios mencionados anteriormente se probaron manteniendo el caudal que se modifica acorde al valor base.

---

<sup>57</sup> OLIVEROS GÓMEZ, Luis. “Evaluación Técnica de la Implementación de un Proceso de Combustión *in situ* Posterior a Procesos de Inyección de Vapor en Yacimientos Estratificados de Crudo Pesado con Arenas Delgadas”. Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2011. P37-50.

## 5.1. AUMENTO DEL CAUDAL DE AGUA

Al incrementar la cantidad de agua inyectada mientras se mantiene constante el caudal de aire inyectado, se espera que el frente llegue a extinguirse por efecto del intercambio de calor que ocurre cuando el agua entra en contacto con el frente de combustión y hay un flux energético desde el frente hacia el agua, es decir que el agua gana la energía cedida por el frente, lo cual se traduce en una disminución en la temperatura del frente y un aumento proporcional en la del agua.

Para lograr este objetivo es necesario inyectar un volumen considerable de agua, tal que el calor liberado en el frente de combustión no sea suficiente para vaporizar el agua y se produzca un efecto comparado a cuando se extingue un incendio usando agua para ello.

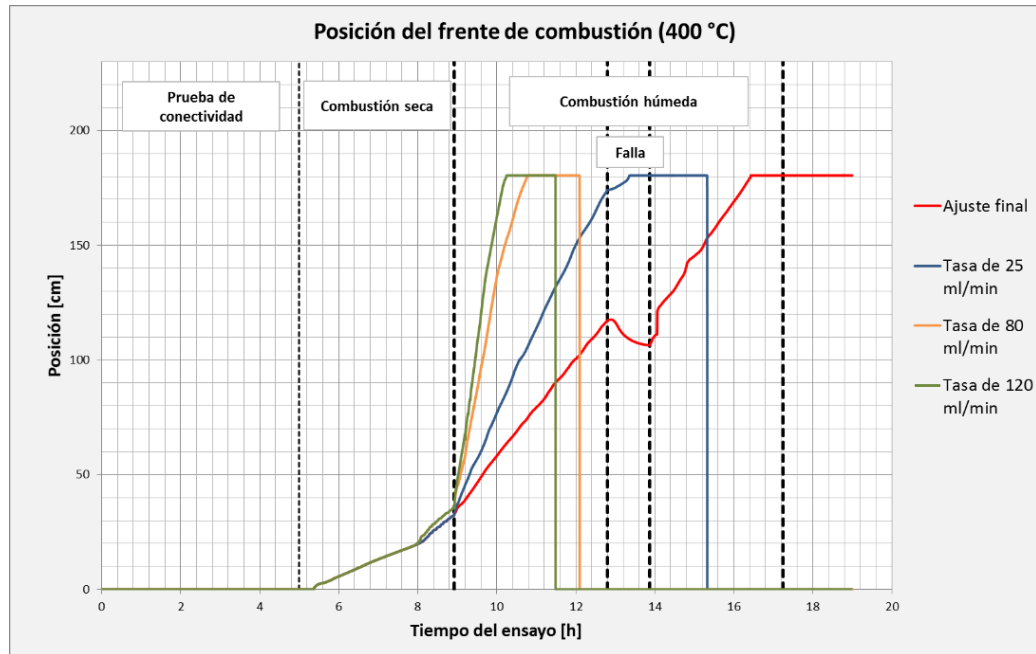
Diversos escenarios fueron probados aumentando gradualmente el valor del caudal de inyección de agua y se estableció el análisis de la curva de posición como el parámetro para determinar que el frente efectivamente se extinguió; pues cuando existe un retroceso en el valor de la posición que toma el valor de cero se dice que no se registra un valor de temperatura en el tubo mayor a 400 °C por lo que el frente de combustión está extinto.

Teniendo en cuenta que el valor base del caudal inyectado es de 8 ml/min, se presentan resultados para:

- 25 ml/min
- 80 ml/min
- 120 ml/min

La figura 62 muestra las posiciones de los frentes de combustión para los casos mencionados, en comparación con la curva descrita por el modelo ajustado en el cual se utilizó una tasa de 8 ml/min, que es una variable operacional definida a partir del reporte de la prueba desarrollada por el ICP.

**Figura 62.** Posición del frente de combustión en el tiempo a diferentes tasas de inyección de agua

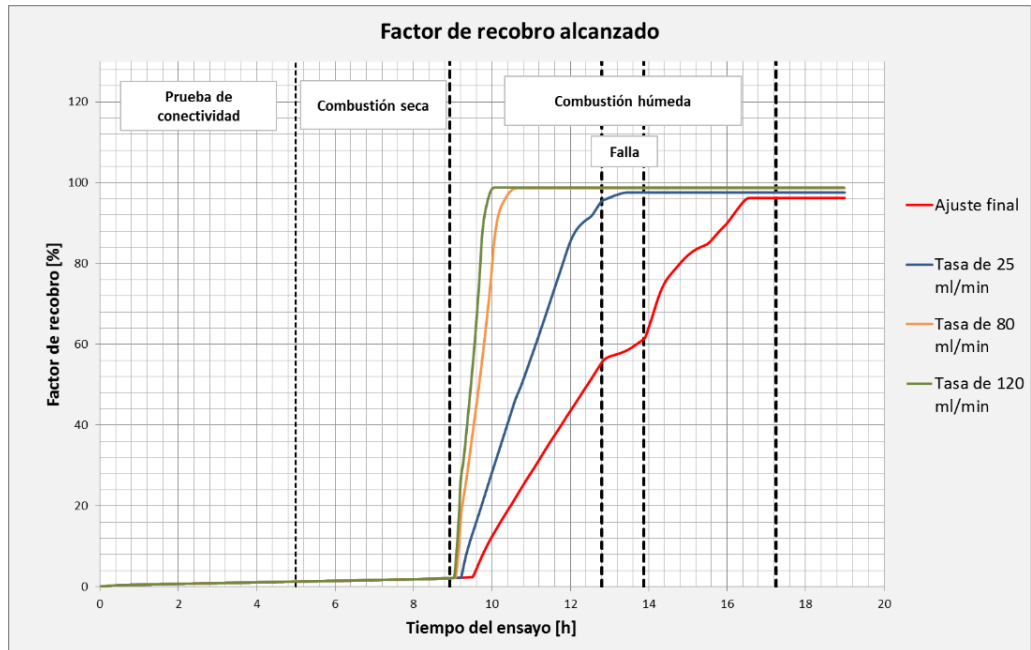


En la figura puede observarse que se alcanza la extinción del frente de combustión para todos los casos propuestos. Sin embargo, el frente se extingue un tiempo después de alcanzar los 183 cm que es la longitud total del tubo. Este hecho demuestra que la extinción del frente no se debe al efecto del caudal incremental de agua inyectado, sino a que el combustible que había dentro del tubo ya ha sido totalmente drenado, dejando al frente sin combustible para continuar encendido.

También se muestra que además de no lograrse la extinción se está logrando un efecto contrario, pues el tubo de combustión está siendo drenado en un tiempo mucho menor, por tanto se mueve a una velocidad mucho mayor a la calculada para el caso del modelo ajustado.

La figura 63 muestra los factores de recobro alcanzados para cada escenario.

**Figura 63.** Factor de recobro a diferentes tasas de inyección de agua



Evidentemente no se observa una tendencia del frente por extinguirse, todo lo contrario, se está alcanzando un barrido total del tubo de combustión en menor tiempo y factores de recobro más altas al comparar un caso con el anterior.

La inyección de un caudal 15 veces mayor al caudal inyectado en el modelo ajustado no es suficiente para quitar el calor suficiente al frente de combustión y lograr la extinción del mismo. El calor del frente de combustión eleva la temperatura en la muestra, hace que el agua se vaporice y transporte el calor a las zonas frías del reactor, pero las altas temperaturas también hacen que el agua reaccione con el hidrocarburo y se produzca ácido sulfhídrico (reacción de acuatermólisis), de esta manera, a medida que se aumenta el caudal de inyección de agua se aumenta también la posibilidad de que se generen dichas reacciones, por lo tanto, el aprovechamiento del calor para disminuir la viscosidad del crudo se ve disminuido. Sin embargo, el modelo de reacciones utilizado en el modelo de simulación no tiene en cuenta la reacción de acuatermólisis por tal motivo el calor liberado únicamente contribuye a la vaporización del agua favoreciendo cada vez más el aprovechamiento del calor para el desplazamiento del crudo, lo que causa un incremento del factor de recobro.

Puede pensarse en aumentar la tasa de inyección de agua a fin de obtener factores de recobro que se acerquen mucho más al 100%, sin embargo no se debería al efecto del método de recobro evaluado, sino que se trataría de un efecto combinado con desplazamiento con agua caliente y con vapor; además al tener caudales de inyección tan altos, el yacimiento puede presurizarse hasta

exceder el valor de presión de fractura de la formación generando un grave problema que puede derivar en la pérdida del yacimiento inclusive.

Además, la WAR obtenida al aumentar la tasa de agua hasta 15 veces el caudal inicial es de 24 L/m<sup>3</sup>, que excede el valor límite reportado en la literatura como 15.72 L/m<sup>3</sup>.

Por estos motivos, además del alto requerimiento de agua, es posible afirmar que modificar la relación WAR mediante el aumento de la tasa de inyección de agua constituye un escenario que difícilmente logrará la extinción del frente de combustión dadas las condiciones reactivas del hidrocarburo, además del hecho que la inyección de agua comienza cuando ya se ha desarrollado un frente de combustión estable en modo seco.

En base a lo anterior, se decidió evaluar el segundo escenario propuesto, buscando sacar provecho de una de las ventajas que ofrece la combustión *in situ* húmeda en comparación con la seca, la disminución en el requerimiento de aire.

## **5.2. DISMINUCIÓN DEL CAUDAL DE AIRE**

Teniendo en cuenta que se requieren 3 condiciones para que pueda presentarse una combustión (combustible, oxígeno y calor para alcanzar la temperatura de ignición); se busca debilitar la combustión presentada disminuyendo la cantidad de oxígeno que va a alimentar el frente, a fin de lograr una tendencia a la extinción del frente.

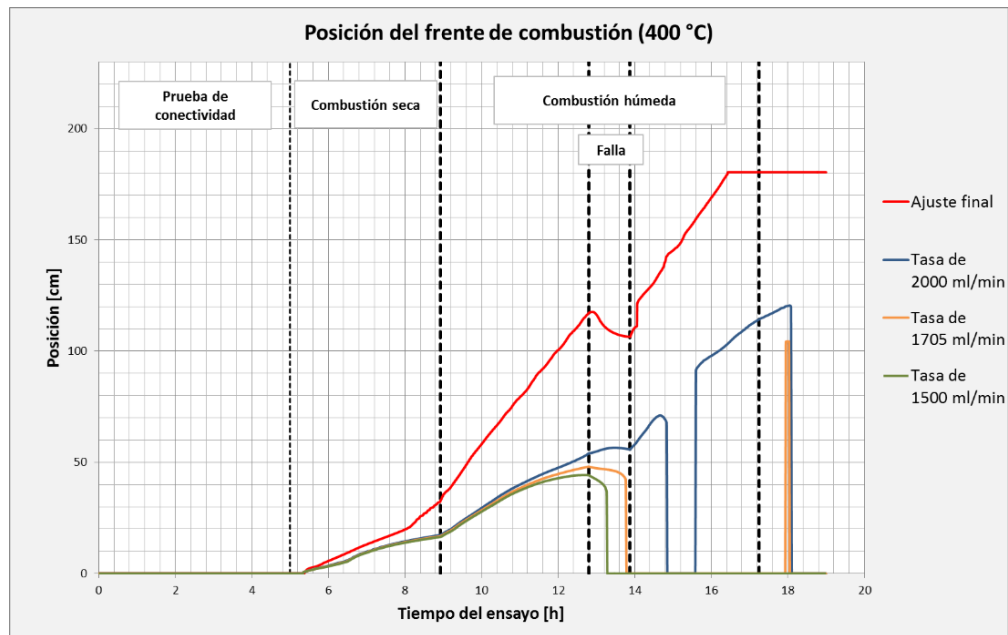
El caudal de aire fue disminuido gradualmente desde el valor base de 5000 ml/min manteniendo la tasa de inyección de agua constante.

Se probaron diferentes escenarios entre los que se destacan:

- 2000 ml/min
- 1705 ml/min
- 1500 ml/min

La figura 64 muestra la posición de los frentes de combustión para los escenarios planteados en comparación con la curva descrita por el modelo ajustado en el cual se utilizó una tasa de 5000 ml/min, que es una variable operacional definida a partir del reporte de la prueba experimental.

**Figura 64.** Posición del frente en el tiempo para diferentes tasas de inyección de aire

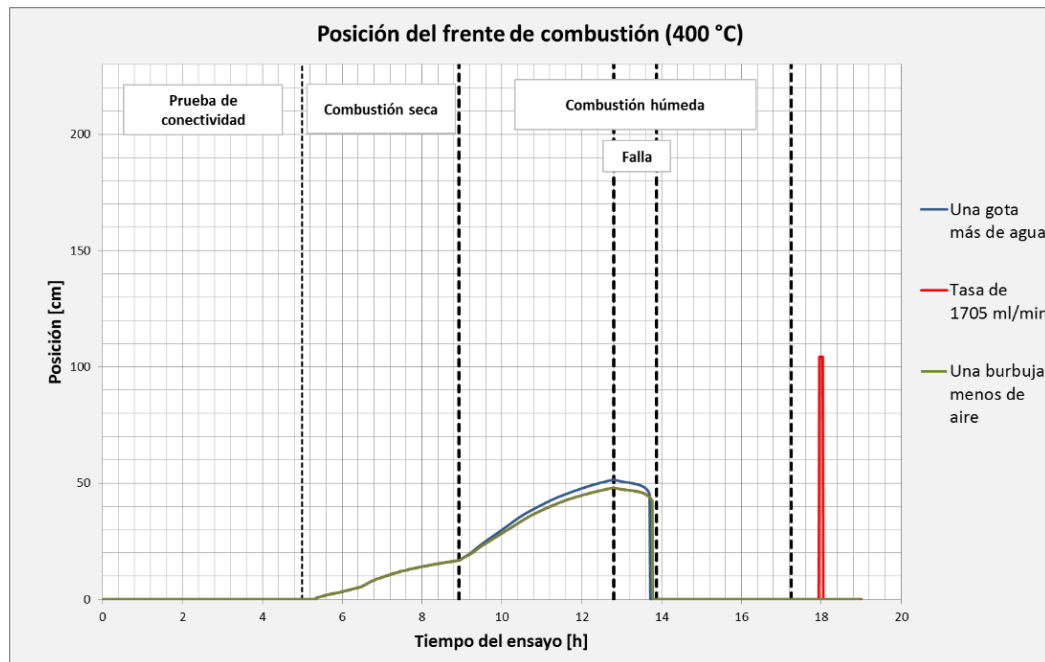


En base a la definición dada de tasa crítica, se buscó el valor que debilite el frente de combustión pero que permita al frente estabilizarse o aumentar su temperatura durante un *step* antes de finalizada la inyección de aire. Se aprecia que al disminuir la tasa de inyección a 2000 ml/min se da una extinción parcial del frente, evidenciando el efecto tardío de la falla, sin embargo, la temperatura del frente durante la extinción se mantuvo muy cercana a los 400°C por lo que se reaviva en el momento en que retorna aire al frente. La tasa de 1500 ml/min es muy baja y provoca la extinción definitiva del frente de combustión cuando inicia la falla. Por otra parte, la tasa de 1705 ml/min permite al frente reavivarse en un tiempo cercano a la finalización de la inyección de aire, manteniéndose encendido durante 5 minutos hasta su extinción total.

A fin de validar el valor de 1705 ml/min como tasa crítica es necesario analizar inyectando una burbuja menos de aire (1704 ml/min), manteniendo el agua constante (8 ml/min) e inyectando una gota más de agua (9 ml/min), dejando el aire constante (1705 ml/min).

La figura 65 muestra la comparación de los frentes obtenidos inyectando “una gota más de agua” y “una burbuja menos de aire”.

**Figura 65.** Validación de la tasa de 1705 ml/min de aire como tasa crítica



Teniendo en cuenta que los escenarios “una gota más de agua” y “una burbuja menos de aire” provocan la extinción total del frente de combustión, se establece que la tasa de 1705 ml/min es efectivamente el valor de tasa crítica que permite al frente reavivarse en un pequeño intervalo de tiempo antes de suspender la inyección de aire.

Para concluir, el proceso presenta un comportamiento crítico con tasas de inyección de agua y aire de 8 ml/min y 1705 ml/min respectivamente, lo que representa una relación de inyección agua – aire crítica igual a  $4.692 \frac{ml \text{ de agua}}{L \text{ de aire}}$ .

Una vez obtenida la relación crítica, se calculan los parámetros de desempeño del proceso (ver anexo B) a fin de observar en qué medida se ve desmejorado con respecto a la prueba ajustada.

### 5.2.1. Parámetros de desempeño relación crítica

La tabla 29 muestra los valores calculados para la velocidad en cada zona y el valor promedio de la velocidad del frente para los valores arrojados por el simulador para la tasa crítica. Los valores con fondo azul corresponden al avance del frente durante la combustión húmeda antes de la falla, mientras que los valores con fondo verde corresponden al avance del frente durante la combustión húmeda después de la falla, combustión que solo se mantuvo estable durante los últimos 5 minutos de inyección de aire.

**Tabla 29.** Velocidad del frente de combustión para la tasa crítica antes y después de la falla del controlador

Tiempo del ensayo (horas)	Posición del frente (cm)	Velocidad en cada zona (m/h)	Promedio ponderado (m/h)
6.950122833	12.192		
9.360815048	24.384	0.05057469	0.128073174
10.48340321	36.576	0.1080617	
12.21668243	48.768	0.070334066	
17.95004272	104.247139		0.005888873
18.03332138	104.296181	0.00588887	

A partir de los datos obtenidos de la simulación y presentados en las tablas 30 y 31, se hace el cálculo de los parámetros de desempeño de la misma manera a como se realizó para la prueba experimental.

**Tabla 30.** Volumen gases producidos – crítica

	Combustión húmeda antes de la falla del controlador	Combustión húmeda antes de la falla del controlador
Componente	Volumen (L)	
$CO_2$	71.9	62.2
$CO$	7.4	5.7
$O_2$	0.0	0.1

**Tabla 31.** Aire inyectado y volumen barrido del reactor – crítica

	Combustión húmeda antes de la falla del controlador	Combustión húmeda antes de la falla del controlador
Aire inyectado	397.2 L	424.9 L
Volumen barrido del reactor	3.7 L	0.18 L

Los demás parámetros de desempeño para la relación de inyección crítica, fueron calculados de manera análoga a los casos de la prueba experimental y la prueba ajustada, y de igual manera, el procedimiento de cálculo detallado se encuentra en el anexo B.

La tabla 32 muestra de manera resumida los valores de los parámetros de desempeño para este escenario.

**Tabla 32.** Parámetros de desempeño relación de inyección crítica

PARÁMETROS DESEMPEÑO RELACIÓN DE INYECCIÓN CRÍTICA		
	Antes de la falla	Después de la falla
Carbono quemado	0.0402 kg	0.034457 kg
Oxígeno consumido	0.1129 kg	0.1206 kg
% $O_2$ que reaccionó	100 %	99.89 %
Hidrógeno consumido	0.0013 kg	0.0041kg
Agua formada	0.0119 kg	0.0367 kg
Combustible consumido	0.0416 kg	0.0385 kg
Relación atómica H/C	0.3942	1.4189

Requerimiento de combustible	$11.2324 \frac{kg \text{ combustible}}{m^3 \text{ reactor}}$	$21.3889 \frac{kg \text{ combustible}}{m^3 \text{ reactor}}$
Requerimiento de aire	$107.5313 \frac{m^3 \text{ aire}}{m^3 \text{ reactor}}$	$2360.5556 \frac{m^3 \text{ aire}}{m^3 \text{ reactor}}$
Relación aire/combustible	$9.5573 \frac{m^3 \text{ aire}}{kg \text{ combustible}}$	$110.3637 \frac{m^3 \text{ aire}}{kg \text{ combustible}}$
Relación oxígeno/combustible	$2.007 \frac{m^3 \text{ oxigeno}}{kg \text{ combustible}}$	$23.1763 \frac{m^3 \text{ oxigeno}}{kg \text{ combustible}}$
WAR	$4.692 \frac{ml \text{ agua}}{L \text{ aire}}$	$4.692 \frac{ml \text{ agua}}{L \text{ aire}}$
Factor de recobro	70.94%	

De los parámetros hallados previamente se puede destacar que la cantidad de aire inyectado es insuficiente para barrer el combustible presente en el tubo de combustión; antes de la falla, a pesar de que la cantidad de aire es poca, el frente se mantiene estable a 400°C, en el momento de la falla del controlador, el aire que ha sido inyectado se consume casi por completo, por lo cual se presenta una disminución drástica en la cantidad de material oxidante que debilita en gran medida al frente de combustión, una vez se reanuda la inyección de aire, el caudal de inyección es muy bajo, sin embargo, es suficiente para mantener el frente encendido ( aunque muy débil e inestable) pues la temperatura del mismo no alcanza los 400°C, esto se puede evidenciar, observando que el % de oxígeno que reacciona es 100 y 99.9% para antes y después de la falla, pero que el requerimiento de aire es de 107.53 y de 2360.55  $\frac{m^3 \text{ aire}}{m^3 \text{ reactor}}$  para antes y después de la falla respectivamente, el requerimiento de aire indica que después de la falla se necesitaría una cantidad exagerada de aire para lograr barrer 1  $m^3$  del reactor, esto es debido a que el frente se encuentra muy debilitado, se mueve muy lento y la energía que libera no contribuye en gran medida en la disminución de la viscosidad del crudo. En conclusión, al analizar los parámetros de desempeño, es claro que el oxígeno que se inyecta, reacciona casi en un 100% para producir  $CO$  y  $CO_2$ , es decir, hay frente durante toda la corrida, pero este frente no contribuye en la recuperación del crudo, lo que vuelve al proceso ineficiente.

### 5.3. OPTIMIZACIÓN DE LA TASA CRÍTICA

Como se mencionó anteriormente, existen infinitos valores de tasas de inyección que constituyen la misma relación WAR, y teniendo en cuenta los resultados obtenidos cuando se aumentó la tasa de inyección de agua, que demostraron que la velocidad del frente de combustión es directamente proporcional al caudal incremental de agua inyectada, es posible aumentar la tasa de inyección de agua

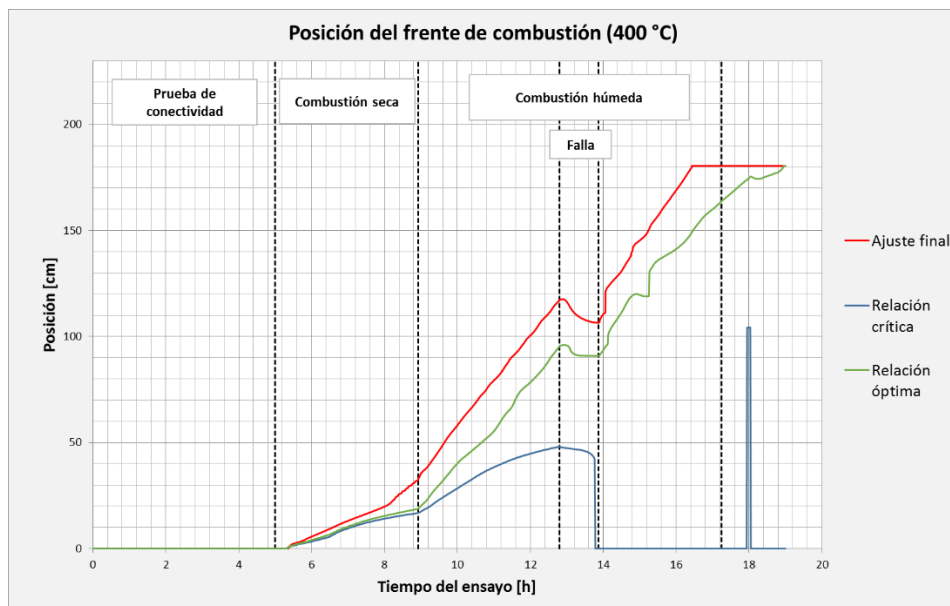
disminuyendo simultáneamente la tasa de aire a fin de no modificar la relación WAR.

El objetivo de esta optimización, es encontrar las tasas de agua y aire que permitan que el frente de combustión alcance el último centímetro del tubo en el último *step* de tiempo, así no se inyectaran caudales adicionales de agua y aire que pueden aumentar considerablemente el costo del proceso de recuperación mejorada. También, las tasas óptimas serán aquellas que ofrezcan el factor de recobro más alto al final de la prueba.

El procedimiento utilizado consistió en aumentar gradualmente el caudal de inyección de agua y establecer el respectivo caudal de aire para que la relación se mantuviese en  $4.692 \text{ L/m}^3$ .

La figura 66 muestra el avance del frente de combustión para el escenario que arroja los resultados deseados,  $12.6 \text{ ml/min}$  de agua y  $2685.375 \text{ ml/min}$  de aire, y se compara con las curvas del modelo ajustado a la prueba y de la relación crítica.

**Figura 66.** Posición del frente de combustión en el tiempo para la tasa óptima



En la curva roja que representa el comportamiento del frente para el ajuste de la prueba se puede observar que el tubo es barrido en su totalidad en la hora 16, sin embargo se continúa inyectando aire hasta la hora 18.05 esto indica costos asociados innecesarios. Por el contrario, la curva verde muestra que

efectivamente la totalidad del tubo es barrida a la hora 19, ratificando el hecho de que sea considerada la relación WAR con las tasas de inyección óptimas.

### 5.3.1. Parámetros de desempeño relación óptima

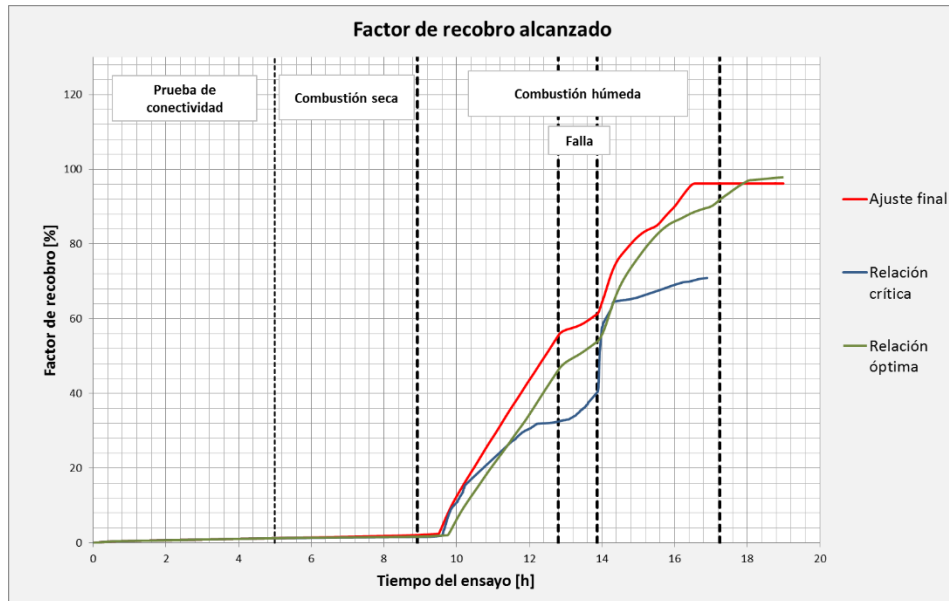
De igual manera y con el mismo esquema de colores, la tabla 33 muestra los valores calculados para la velocidad del frente y su valor promedio para el modelo de simulación numérica con las tasas encontradas como óptimas.

**Tabla 33.** Velocidad del frente de combustión relación óptima para antes y después de la falla del controlador

Tiempo del ensayo (horas)	Posición del frente (cm)	Velocidad en cada zona (m/h)	Promedio ponderado (m/h)
6.816683292	12.192		
9.075895309	24.384	0.05396572	0.143433379
9.676296234	36.576	0.20306431	
10.37714958	48.768	0.17395936	
11.11075687	60.96	0.16619246	
11.58332253	73.152	0.25799589	
12.21668243	85.344	0.19249719	
12.76676273	97.536	0.22164037	
14.3257618	109.728	0.07820402	
14.76668358	121.92	0.27651163	
15.2834034	134.112	0.23594992	
16.15004349	146.304	0.14068124	
16.71668243	158.496	0.21516347	
17.51660347	170.688	0.15241504	
18.95012283	182.88	0.08504943	

El factor de recobro final alcanzado es mostrado en la figura 67 y se compara con los factores alcanzados en el modelo ajustado y en el escenario que describe la relación crítica.

**Figura 67.** Comparación factor de recobro entre relación óptima, crítica y ajuste final



A partir de los datos obtenidos de la simulación y presentados en las tablas 34 y 35, se hace el cálculo de los parámetros de desempeño de la misma manera a como se realizó para la prueba experimental.

**Tabla 34.** Volumen gases producidos – crítica

	Combustión húmeda antes de la falla del controlador	Combustión húmeda antes de la falla del controlador
<b>Componente</b>	<b>Volumen (L)</b>	
<i>CO<sub>2</sub></i>	71.9	62.2
<i>CO</i>	7.4	5.7
<i>O<sub>2</sub></i>	0.0	0.1

**Tabla 35.** Aire inyectado y volumen barrido del reactor – crítica

	Combustión húmeda antes de la falla del controlador	Combustión húmeda antes de la falla del controlador
<b>Aire inyectado</b>	397.2 L	424.9 L
<b>Volumen barrido del reactor</b>	3.7 L	0.18 L

Ahora, los demás parámetros de desempeño son calculados (Anexo B) para la relación óptima y se muestran a continuación.

**Tabla 36.** Parámetros de desempeño tasas de agua y aire óptimas

PARÁMETROS DESEMPEÑO TASA AGUA Y AIRE OPTIMA		
	Antes de la falla	Después de la falla
Carbono quemado	0.0598 kg	0.0525 kg
Oxígeno consumido	0.1777 kg	0.1905 kg
% $O_2$ que reaccionó	99.92 %	99.79 %
Hidrógeno consumido	0.003171 kg	0.007127kg
Agua formada	0.02854 kg	0.06401 kg
Combustible consumido	0.06297 kg	0.05961 kg
Relación atómica H/C	0.9456	1.6266
Requerimiento de combustible	$14.9928 \frac{kg \text{ combustible}}{m^3 \text{ reactor}}$	$8.5279 \frac{kg \text{ combustible}}{m^3 \text{ reactor}}$
Requerimiento de aire	$148.9762 \frac{m^3 \text{ aire}}{m^3 \text{ reactor}}$	$96.123 \frac{m^3 \text{ aire}}{m^3 \text{ reactor}}$
Relación aire/combustible	$9.9365 \frac{m^3 \text{ aire}}{kg \text{ combustible}}$	$11.2716 \frac{m^3 \text{ aire}}{kg \text{ combustible}}$
Relación oxígeno/combustible	$2.0867 \frac{m^3 \text{ oxígeno}}{kg \text{ combustible}}$	$2.367 \frac{m^3 \text{ oxígeno}}{kg \text{ combustible}}$
WAR	$4.692 \frac{ml \text{ agua}}{L \text{ aire}}$	$4.692 \frac{ml \text{ agua}}{L \text{ aire}}$
Factor de recobro	97.86%	

De los parámetros calculados, se destaca que la combustión es estable antes y después de la falla, casi el 100% del oxígeno que se inyecta reacciona. Al comparar los parámetros antes y después de la falla, se destaca que el aire requerido para barrer un  $m^3$  del reactor es mucho menor después de la falla, al igual que el requerimiento de combustible, esto indica que a estas condiciones de inyección, el proceso de combustión húmeda presenta un mejor comportamiento o una mayor eficiencia después de la falla del controlador, sin embargo antes de la falla también presenta un buen comportamiento.

### **5.3.2. Comparación parámetros de desempeño prueba ajustada, relación crítica y relación óptima**

En la siguiente tabla se comparan los parámetros de desempeño de la relación crítica y la tasa óptima con los obtenidos en la prueba ajustada con el fin de observar que tan malo es el desempeño del proceso a condiciones de inyección críticas y que tan bueno es después de optimizar dicha relación variando las tasas de inyección.

**Tabla 37.** Comparación parámetros de desempeño prueba ICP, Relación crítica, óptima

	PRUEBA AJUSTADA		RELACIÓN CRÍTICA		RELACIÓN ÓPTIMA	
	Antes de la falla	Después de la falla	Antes de la falla	Después de la falla	Antes de la falla	Después de la falla
Carbono quemado (Kg)	0.0998	0.0583	0.0402	0.034457	0.0598	0.0525
Oxígeno consumido (Kg)	0.3312	0.2167	0.1129	0.1206	0.1777	0.1905
% $O_2$ que reacciona	99.79%	96.69%	100 %	99.89 %	99.92 %	99.79 %
Hidrógeno consumido (Kg)	0.0093	0.0086	0.0013	0.0041	0.003171	0.007127
Agua formada (Kg)	0.0871	0.077	0.0119	0.0367	0.02854	0.06401
Combustible consumido (Kg)	0.1095	0.0668	0.0416	0.0385	0.06297	0.05961
Relación atómica H/C	1.1639	2.015	0.3942	1.4189	0.9456	1.6266
Requerimiento de combustible $\left(\frac{kg\ combustible}{m^3 reactor}\right)$	14.407	10.9868	11.2324	21.3889	14.9928	8.5279
Requerimiento de aire $\left(\frac{m^3\ aire}{m^3 reactor}\right)$	153.671	125.805	107.5313	2360.5556	148.9762	96.123
Relación aire/combustible $\left(\frac{m^3\ aire}{kg\ combustible}\right)$	10.666	11.4506	9.5573	110.3637	9.9365	11.2716
Relación oxígeno / combustible $\left(\frac{m^3\ oxigeno}{kg\ combustible}\right)$	2.399	2.4046	2.007	23.1763	2.0867	2.367
WAR $\left(\frac{ml\ agua}{L\ aire}\right)$	1.6	1.6	4.692	4.692	4.692	4.692
Factor de recobro	96.22%		70.94%		97.86%	

En la tabla 37, se puede observar que tanto para la corrida de la tasa crítica y la tasa óptima, todo el oxígeno que se inyecta, reacciona, sin embargo en el caso de la crítica, la cantidad de aire inyectado es tan bajo que a pesar de que se presente reacción de combustión, el frente es demasiado débil sobre todo después de la falla del controlador, esto se puede evidenciar con el valor del requerimiento de aire ( $2360.5556 \frac{m^3 \text{ aire}}{m^3 \text{ reactor}}$ ), quiere decir que el aire inyectado no está barriendo efectivamente el reactor, es decir, la combustión no tiene ningún efecto en la movilidad del combustible, esta misma condición se puede ver con los valores de relación aire/ combustible y relación oxígeno combustible. Por el contrario, los parámetros de desempeño de la tasa óptima, muestran una combustión eficiente y si se comparan con los valores correspondientes a la prueba ajustada, se puede ver que, en primera instancia, que en esta prueba parte del oxígeno que se inyecta no reacciona, sin embargo, barre todo el volumen de reactor, esto indica que al final de la prueba se inyecta aire innecesariamente que entra y sale del reactor sin reaccionar pues ya no hay combustible dentro del mismo, esto no ocurre con la corrida óptima, en los parámetros de desempeño se puede ver que todo el oxígeno que se inyecta, reacciona y también se alcanza a barrer todo el reactor. Vale la pena resaltar también, que el requerimiento de aire, de combustible, relación aire/combustible y la relación oxígeno combustible son menores en la óptima que en el modelo ajustado, esto es un indicador de que con esta relación no solo se obtiene eficiencia técnica del proceso sino también es el escenario más eficiente económicamente debido a que se desarrolla una combustión estable y eficiente a una tasa de inyección de aire mínima, este hecho, en escala de campo disminuye en gran medida los costos por compresión.

## 6. CONCLUSIONES

- Una relación de inyección agua – aire se puede obtener con infinitas combinaciones de tasas de inyección, pero sólo una pareja de tasas hace que la combustión se comporte de manera crítica. El proceso estudiado presenta un comportamiento crítico con tasas de inyección de agua y aire de 8 ml/min y 1705 ml/min respectivamente, lo que representa una relación de inyección agua – aire crítica igual a  $4.692 \frac{\text{ml de agua}}{\text{L de aire}}$ .
- A partir de la revisión bibliográfica del proceso se determinó que las tasas de inyección de agua y aire son los parámetros operacionales más importantes porque permiten modificar la velocidad del frente de combustión, la tasa de producción de fluidos y el radio de extensión de la zona de combustión.
- Un ajuste aceptable de una prueba de tubo de combustión se logra a partir de la modificación de los parámetros cinéticos del modelo de reacciones. Se determinó, a partir del ajuste numérico de una prueba de celda cinética, que el valor de energía de activación que ofreció un comportamiento oxidativo normal para el crudo del campo N&R fue de 150 Btu/gmol.
- Se demostró que a escala de laboratorio la permeabilidad de la arena no tiene un efecto considerable en la velocidad del frente de combustión. Se modificó el valor de la permeabilidad absoluta con valores entre 30 md y 12000 md sin obtener un cambio considerable en el valor de la velocidad. También se modificó la permeabilidad relativa al gas disminuyendo a la mitad el valor del *endpoint* de permeabilidad relativa en líquido connato sin obtenerse un cambio en la velocidad.
- Una mala elección del método de solución causa errores de balance de masa elevados, que la simulación no converja o que los resultados de la misma no sean confiables. Para el modelo de simulación construido en la presente investigación se utilizó el método de solución PARASOL con el que se logró una disminución en el tiempo de cómputo del 150% en comparación con el método AIMSOL y se obtuvo un error de convergencia del 0%.

## 7. RECOMENDACIONES

- Para una próxima prueba de tubo experimental que se realice, es importante que todo el sistema de control tenga un buen ajuste para garantizar el buen desarrollo del proceso. En la presente investigación se evidenció que el caudal de inyección de aire, uno de los parámetros operacionales más relevantes en un proceso de combustión, no se controló durante la prueba lo que dificultó el ajuste de la misma a partir de la simulación numérica, lo mismo puede pasar si no se tiene un buen control de la temperatura o de la concentración de gases efluentes, así que previamente a dar inicio a una prueba de tubo de combustión, se debe verificar que el sistema de control implementado a las variables determinantes en el proceso tenga un buen funcionamiento.
- Con el fin de analizar de una manera completa un proceso de combustión en una prueba de tubo, se hace necesario reportar además de la concentración de gases efluentes, temperaturas en todas las zonas y posición del frente en el tiempo, datos como el tiempo de duración de la prueba de conectividad (inyección de Nitrógeno) y los volúmenes de los líquidos producidos.
- No se debe hablar de una relación de inyección agua – aire, sin especificar los caudales de inyección, pues con diferentes tasas es posible obtener la misma relación de inyección, hasta el punto en que una relación de inyección crítica se puede incluso volver la relación óptima con un buen manejo de las tasas de agua y aire.
- Teniendo en cuenta que las celdas cinéticas permiten representar el comportamiento oxidativo de un hidrocarburo, se plantea desarrollar una metodología para ajustar el comportamiento y los resultados de una prueba de tubo a una celda cinética con el fin de determinar con exactitud los parámetros cinéticos de las reacciones involucradas en el proceso.

## BIBLIOGRAFÍA

ALEXANDER, Jhon, MARTIN, L., DEW, Jhon. "Factors Affecting Fuel Availability and Composition during In situ Combustion". SPE 296, 1962.

BELGRAVE J., MOORE G., URSENBACH M. and 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., MOORE G. and BENNION, W. "The Thermal Behavior of Vertically Operated Near-Adiabatic In-Situ Combustion Tubes". Journal of Petroleum Science & Engineering. Vol 5.1990.

CASTANIER. L.M., BRIGMAN, W.E. "In situ combustion". Chapter 16. Reservoir Engineering Section. Society of Petroleum Engineers Handbook. Society of Petroleum Engineers. Richardson Texas.

CHU, Chieh. "State of the art review of fireflooding field projects". SPE 9772, 1982.

CINAR, Murat. "Kinetics of crude oil combustion in porous media interpreted using isoconversional methods. A Dissertation". August. 2011.

CHEN, Bo. "Investigation of in situ combustion kinetics using the isoconversional principle. A Dissertation." November. 2012.

CMG. Computer Modeling Group. Calgary Alberta Canada. User Manual. 2012.

CORE LAB Petroleum Services. "Informe de estudio de fluidos de yacimiento para Ecopetrol". Bogotá (2009).

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

GARCÍA M., Maylin D. & PATIÑO R., Christian D. "Evaluación del efecto de la presencia de arcilla y minerales en un yacimiento sobre el desarrollo de un proceso de combustión in situ". Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. pp 17-23.

GONZALES G., Ana Y. "Diseño de dos equipos experimentales (Tubular y tridimensional) para pruebas de laboratorio de combustión in situ a condiciones de yacimiento". Caracas. Universidad Central de Venezuela. 2007.

JOSEPH C. & PUSCH W. H. "A field comparison of wet and dry combustion". Paper (SPE 7992) first presented at the SPE 1979 California Regional Meeting, held in Ventura, April 18-20.

JOYA J., Diana C. "Determinación de parámetros cinéticos a partir de pruebas RTO para un proceso de combustión in situ". Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander - GRM. 2012.

MAMORA, D.D. New findings in Low Temperature Oxidation of Crude Oil; Society of Petroleum Engineers Journal, SPE 29324.1995.

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 Canadá. Vol. 11. 1994. pp 1-33.

MOORE R.G., LAURESHEN, C.J., MEHTA, S.A., URSENBACH, M.G. "Observations and design considerations for in situ combustion projects". University of Calgary. Calgary, 1997.

MURILLO P., Antonio. "Métodos alternos de recuperación mejorada- inyección de aire". México D.F. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ingeniería. 2010.

NELSON, T. W & MCNEIL, J.S. "How to Engineer an In Situ Combustion Project". The Oil and Gas Journal. June 5 1961. P 58.

NIÑO H., Luis. "Determinación de los parámetros de desempeño de la combustión *in situ* para el campo T1". UT UP Consultorías. Para Ecopetrol SA. Piedecuesta. 2013.

OLIVEROS G., Luis. "Determinación de parámetros de diseño y evaluación técnica de procesos de combustión *in situ* a partir de pruebas de tubo de combustión". Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2011. pp 6-8.

OLIVEROS G., Luis. "Evaluación técnica de la implementación de un proceso de combustión *in situ* posterior a procesos de inyección de vapor en yacimientos estratificados de crudo pesado con arenas delgadas". Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2011. pp 37-50.

PALACIO O., Carlos. "Evaluación de yacimientos prospectos para la implementación de procesos de combustión in situ mediante analogías". Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2010. pp 16-31.

PALMA B., Jorge. "Procedimiento para el ajuste de variables involucradas en procesos de combustión in situ". Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2011. pp 70-75.

RAMEY, Henry J. "Recovery of Hydrocarbons Beyond the Primary Stage". Stanford University, Stanford, California, U.S.A.

REYES N., Yoletth, MÉNDEZ B., Gilberto. "Metodología integrada para el monitoreo y seguimiento de yacimientos sometidos a procesos de combustión in situ". Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander – GRM. 2009. pp 35-53.

SANTAFÉ P., Samuel. "Análisis de incertidumbre aplicado a un modelo de simulación de combustión in situ". Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander - GRM. 2013.

SARATHI, Partha S. "In situ Combustion Handbook. Principles and Practices". Tulsa, Oklahoma: January 1999. (BDM Petroleum Technologies) NIPER/BDM-0374.

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

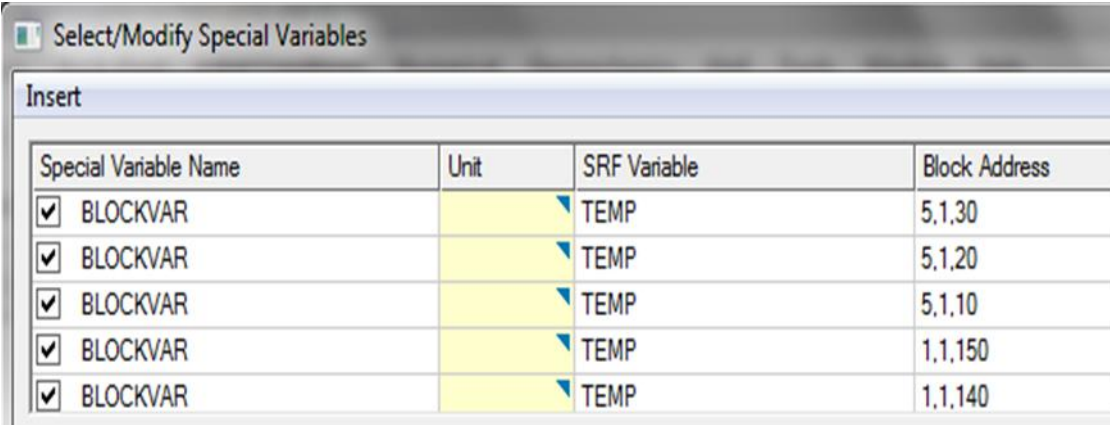
SHOWALTER, W. "Combustion Drive Test". SPE 456. Union Oil Co. California. March 1963. pp 53-58

YATTE G., Fabian C. "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". Bucaramanga. Universidad Industrial de Santander - GRM. 2011.

## ANEXO A. PROCEDIMIENTO PARA LA UBICACIÓN DE TERMOCUPLAS Y CALENTADORES ELÉCTRICOS EN EL SIMULADOR STARS

La ubicación de las termocuplas en el simulador STARS se realiza en la sección I/O control, donde se selecciona la opción *simulation results output* y en la función *Special* se selecciona el comando *Blockvar* que permite medir una variable en un rango de celdas determinado, allí se debe introducir tanto la variable que se quiere medir, que para este caso específico es la temperatura, y la posición de la celda del *grid* donde se va a ubicar cada una de las termocuplas. Lo anterior se puede visualizar en la figura 68.

**Figura 68.** Ubicación de las termocuplas en el simulador



Special Variable Name	Unit	SRF Variable	Block Address
<input checked="" type="checkbox"/> BLOCKVAR		TEMP	5,1,30
<input checked="" type="checkbox"/> BLOCKVAR		TEMP	5,1,20
<input checked="" type="checkbox"/> BLOCKVAR		TEMP	5,1,10
<input checked="" type="checkbox"/> BLOCKVAR		TEMP	1,1,150
<input checked="" type="checkbox"/> BLOCKVAR		TEMP	1,1,140

**Fuente:** Modificado de Computer Modeling Group (CMG). 2013

Para definir la posición de las termocuplas se deben tener en cuenta las divisiones en cada una de las direcciones del *grid* de simulación, recordando que en la dirección *r* se definieron 5 divisiones, donde la división 1 corresponde al centro de la muestra y la división 5 a la pared del tubo; en la dirección  $\Theta$  se definió una sola división; y finalmente en la dirección *k*, se tienen 15 zonas con 10 divisiones cada una; se procede de la siguiente manera:

- Para las termocuplas ubicadas en el centro de la muestra, la coordenada *r* tiene un valor de 1 y para las ubicadas en la pared del tubo tiene un valor de 5.
- Tanto para las termocuplas ubicadas en la muestra como para las ubicadas en la pared, la coordenada  $\Theta$  tiene un valor de 1, pues como ya se ha dicho solo hay una división en dicha dirección.
- En cuanto a la coordenada *k*, que representa la longitud del tubo, se debe ubicar cada par de termocuplas al final de cada una de las 15 zonas, teniendo en cuenta que cada zona tiene 10 divisiones, el valor de la coordenada *k* para el par de termocuplas ubicado al final de la primera zona tiene un valor de 10,

para el segundo par de termocuplas tiene un valor de 20 y así hasta el último par de termocuplas que le corresponde un valor de 150.

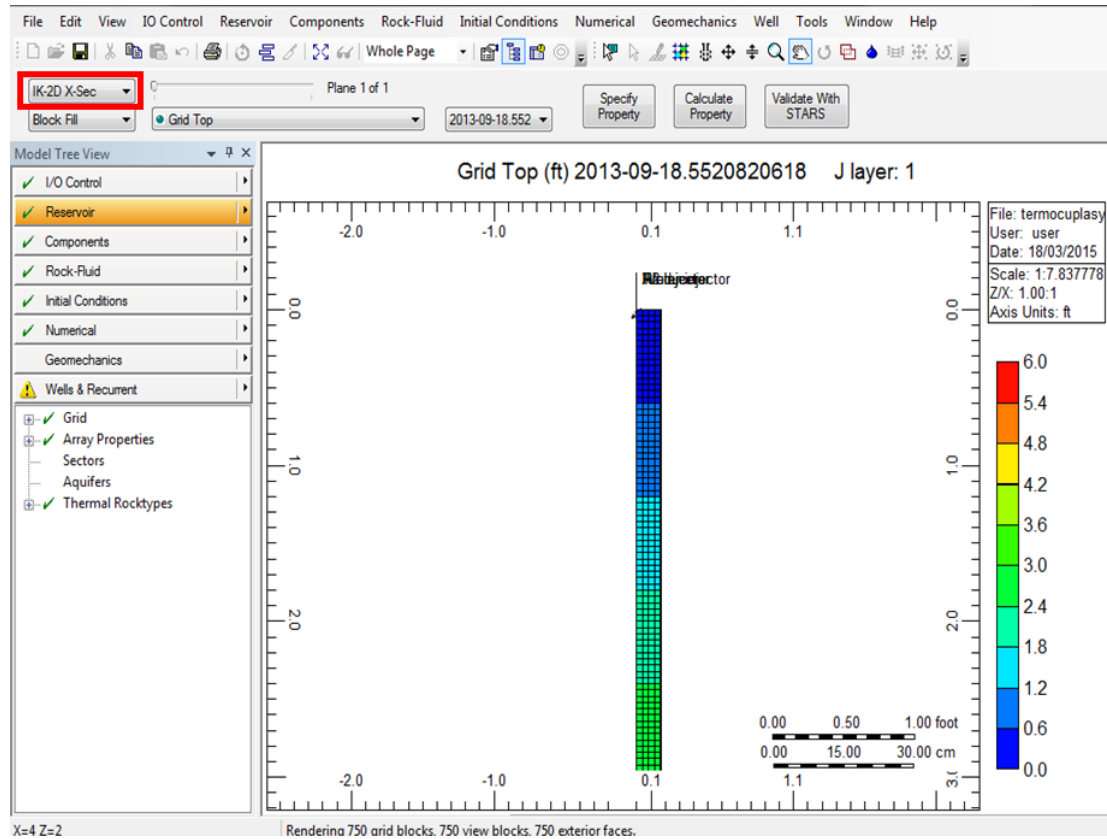
**Tabla 38.** Posición de las termocuplas en el simulador

POSICIÓN TERMOCUPLAS	
Muestra	Pared
1,1,10	5,1,10
1,1,20	5,1,20
1,1,30	5,1,30
1,1,40	5,1,40
...	...
1,1,150	5,1,150

Para ubicar los calentadores en el tubo de combustión se deben definir tres factores en el simulador; tasa de transferencia de calor, coeficiente de transferencia de calor y un *set point* de temperatura variable en el tiempo. Para ello se deben seguir los pasos detallados desde la página siguiente.

1. En la herramienta BUILDER de CMG, visualizar el *grid* de simulación en la vista IK-2D.

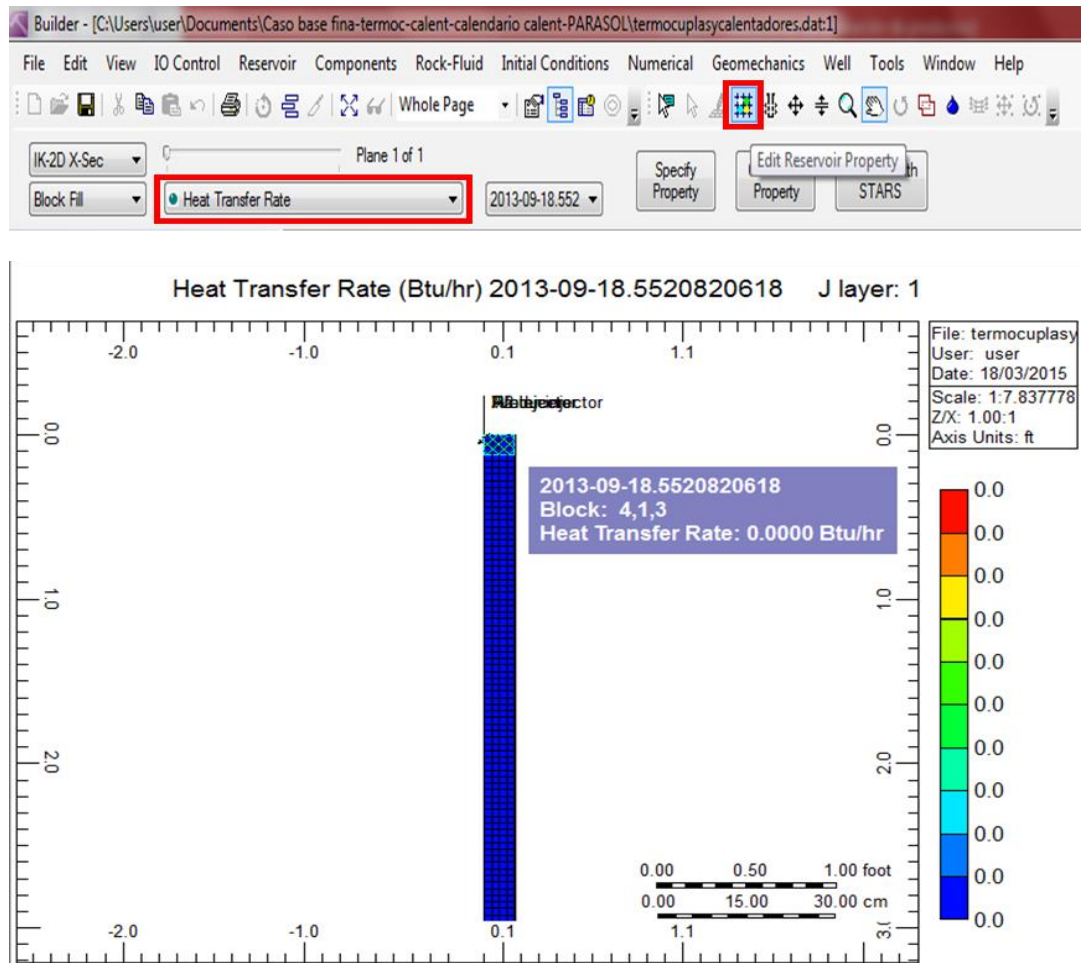
**Figura 69.** *Grid* de simulación IK-2D



**Fuente:** Modificado de Computer Modeling Group (CMG). 2013

2. Para definir la tasa de transferencia de calor, seleccionar en la barra desplegable la opción *Heat Transfer Rate* y mediante el botón *Edit Reservoir Property* seleccionar las celdas del *grid* en las que se desean ubicar los calentadores.

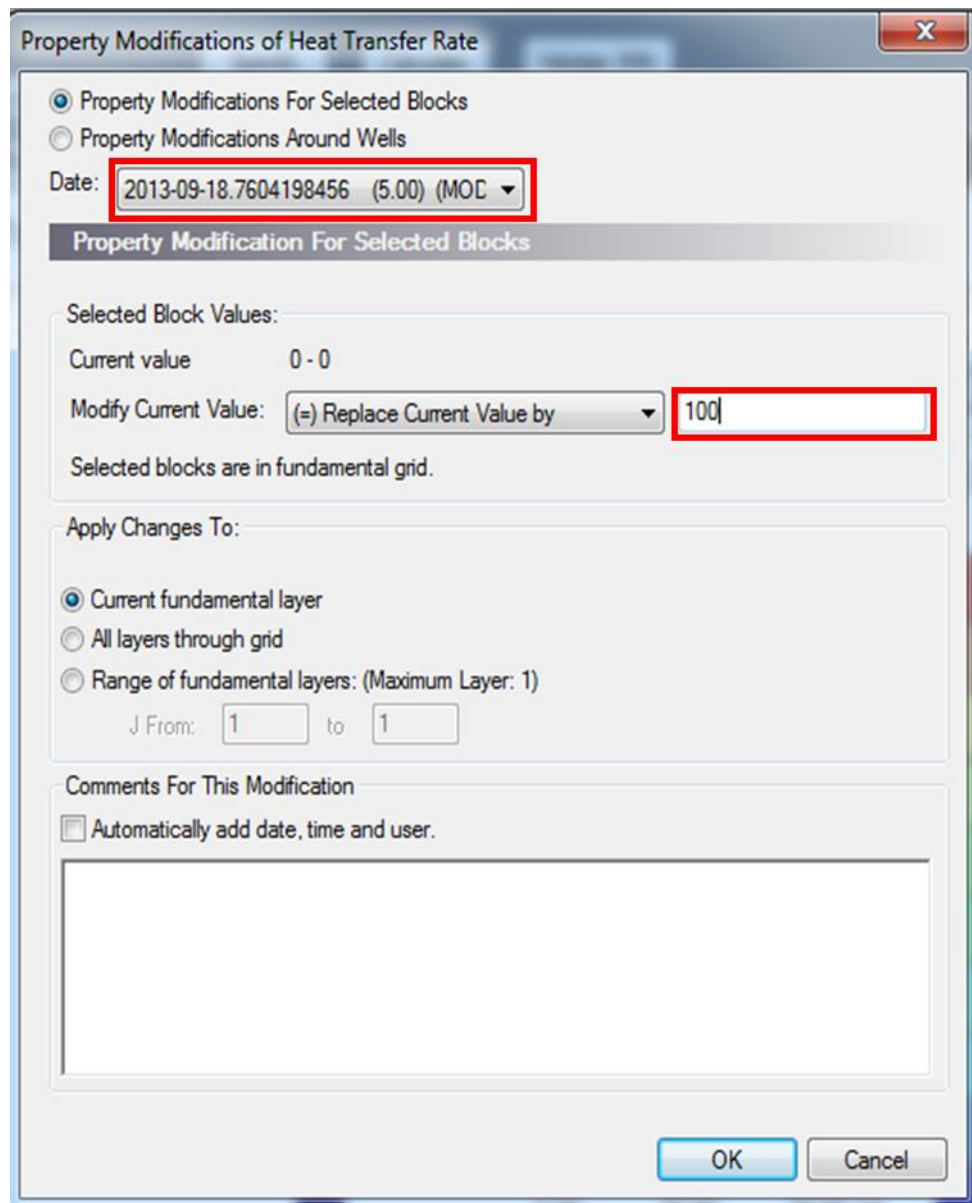
**Figura 70.** *Heat Transfer Rate*



**Fuente:** Modificado de Computer Modeling Group (CMG). 2013

- Al seleccionar las celdas aparece una ventana en la que se introduce el valor de la tasa de transferencia de calor deseado, teniendo el cuidado de seleccionar previamente la fecha en la que se prenden los calentadores en la barra desplegable y finalmente dar click en Ok.

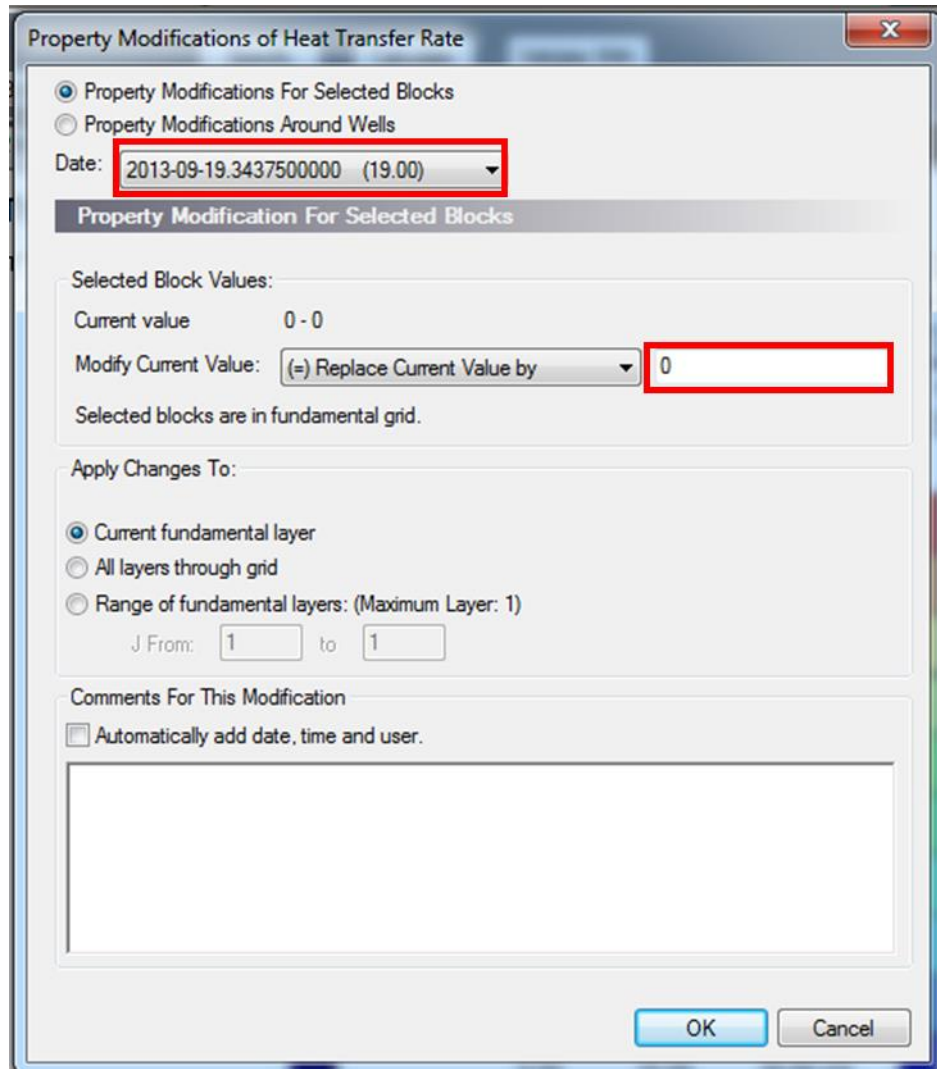
**Figura 71.** Tasa de transferencia de calor



**Fuente:** Modificado de Computer Modeling Group (CMG). 2013

4. La tasa establecida, permanece constante para todas las fechas hasta que se decida apagar los calentadores, para hacerlo se repiten los pasos 2 y 3, pero se selecciona la fecha en la cual se desean apagar y se digita el valor de cero en la casilla correspondiente a *Modify Current Value*. Finalmente click en Ok.

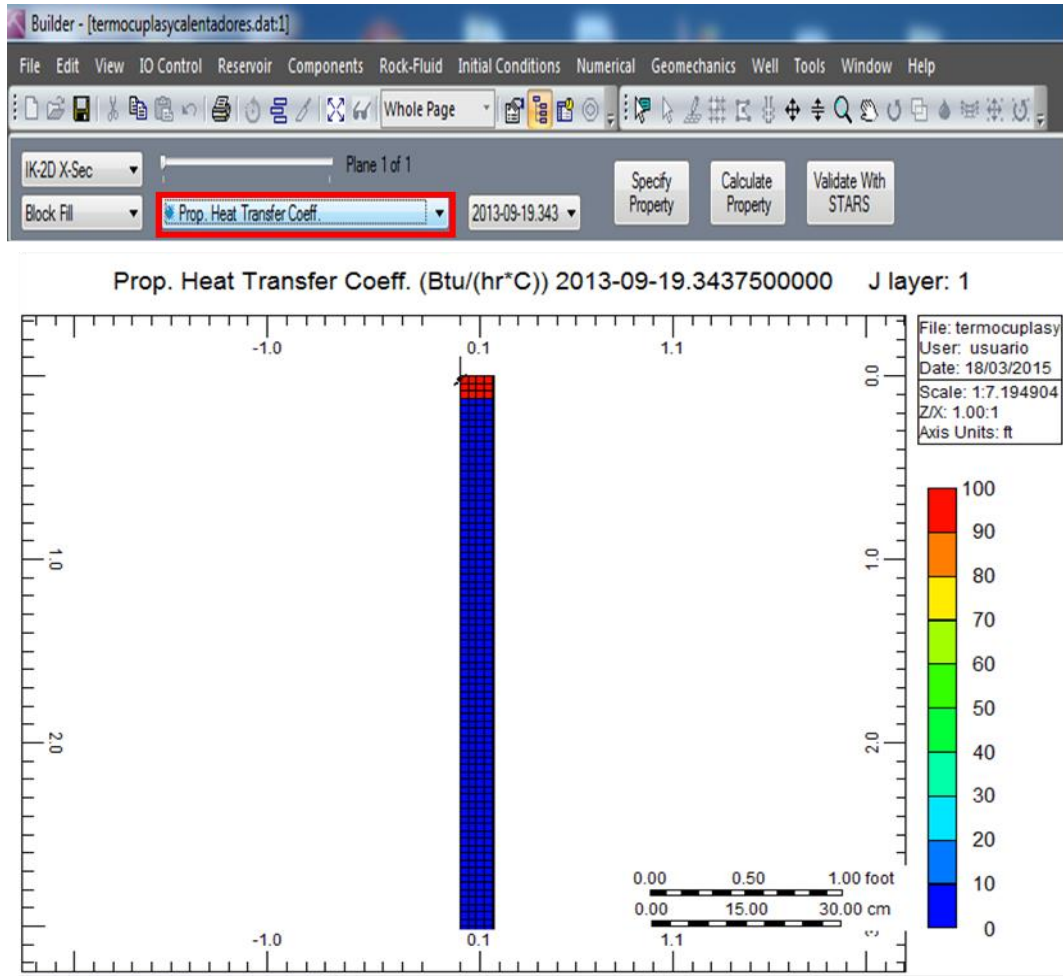
**Figura 72.** Apagar los calentadores



**Fuente:** Modificado de Computer Modeling Group (CMG). 2013

5. Para definir el coeficiente de transferencia de calor, se repiten los pasos 1 y 2, pero esta vez se elige en la barra desplegable la opción *Prop. Heat Transfer Coeff.*

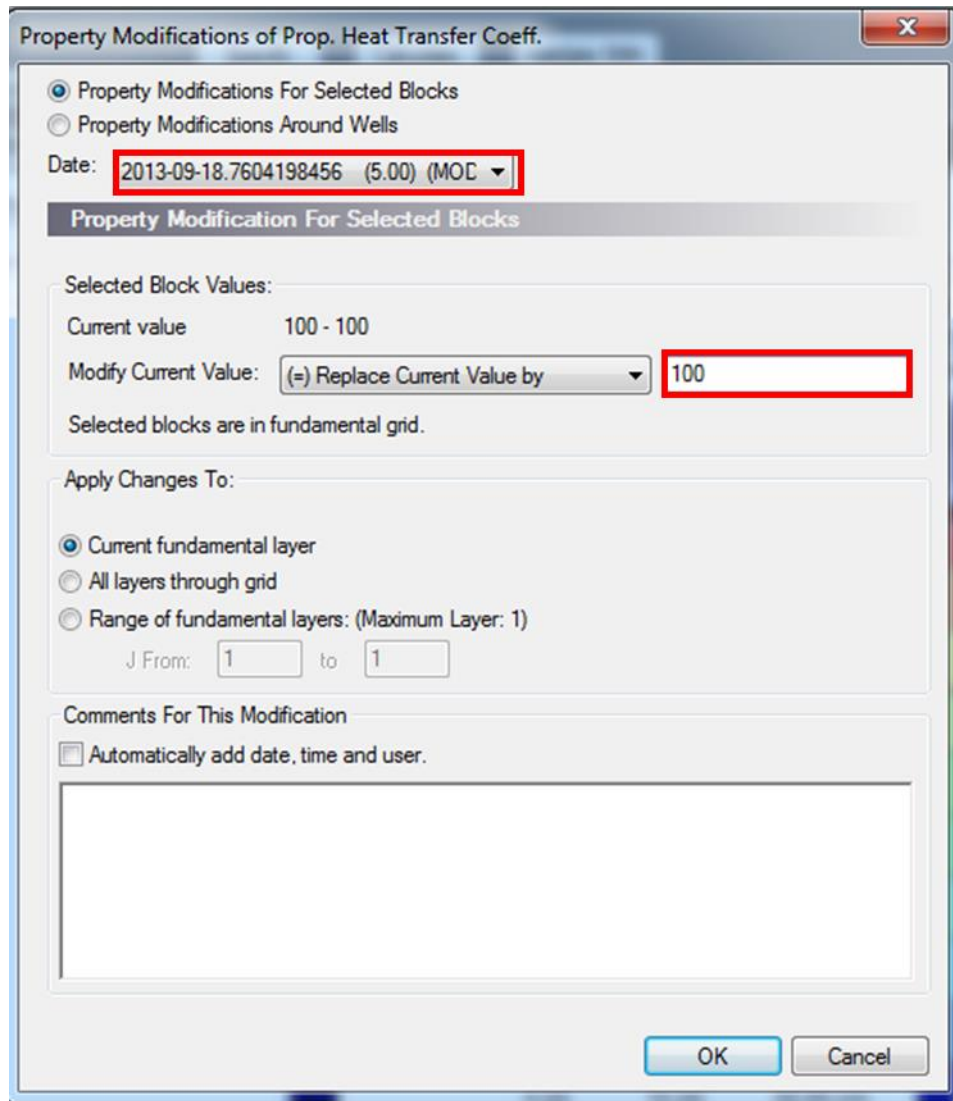
**Figura 73.** Coeficiente de transferencia de calor



**Fuente:** Modificado de Computer Modeling Group (CMG). 2013

6. En la ventana que aparece, se elige la fecha en la que se encienden los calentadores, se digita el valor del coeficiente de transferencia de calor y click en Ok.

**Figura 74.** Encendido de los calentadores

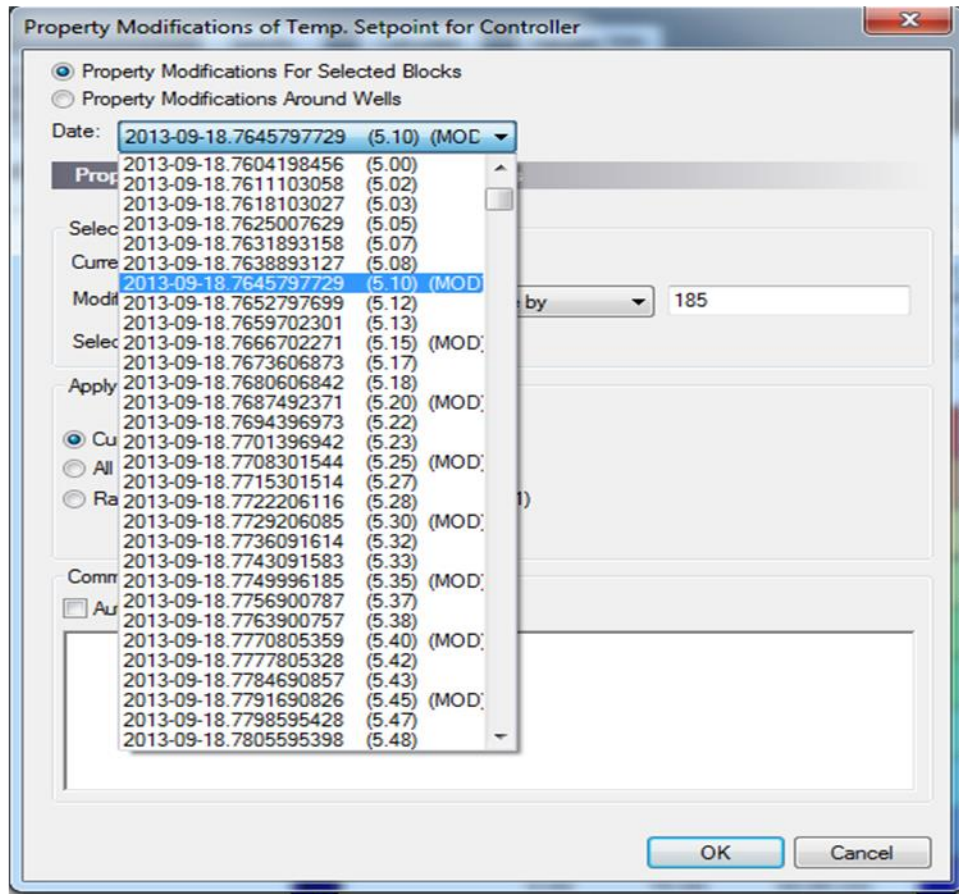
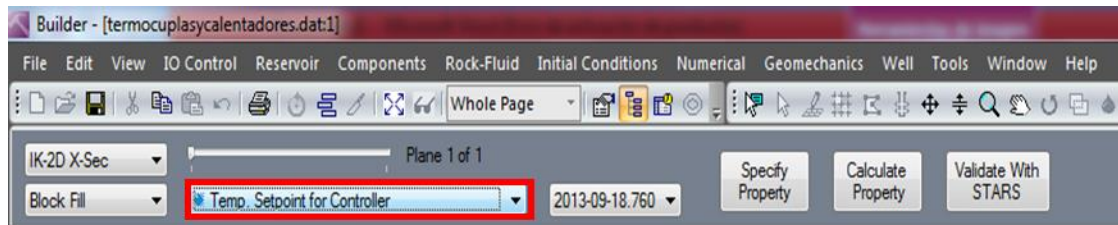


**Fuente:** Modificado de Computer Modeling Group (CMG). 2013

7. Finalmente para definir el *set point* de temperatura variable en el tiempo, se realiza el mismo procedimiento que para las dos propiedades anteriores, seleccionando en la barra desplegable la opción *Temp. Setpoint for controler*.
  
8. En este caso, el proceso es más tedioso debido a que se debe modificar el valor del *set point* en el tiempo; cosa que no ocurre con las dos propiedades que se vieron anteriormente, las cuales permanecen constantes desde que se encienden hasta que se apagan los calentadores. Para saber el valor del *set point* que se debe introducir en cada tiempo, es necesario contar con el archivo histórico de una prueba experimental donde se registran los valores de temperatura de la primera zona del reactor para cada tiempo, teniendo esto como base, se procede a modificar el valor del *set point* en fechas estratégicas en el simulador, es decir, teniendo en cuenta que hay periodos de tiempo en los que la temperatura no cambia o cambia muy poco, no es necesario modificar el *set point* en cada una de las fechas que se especificaron en el modelo de simulación sino solo en aquellas en las que se nota un cambio significativo en la temperatura con respecto a la última fecha modificada. Cabe aclarar que cada vez que se modifica el valor del *set point* se debe dar click en Ok y repetir el procedimiento para una nueva modificación. Después de modificar cada fecha, aparece al lado de la misma la palabra (MOD).

Este procedimiento se puede hacer desde el BUILDER en la versión de CMG 2013; en versiones más antiguas no es posible modificar el valor de una propiedad para diferentes fechas pues no se cuenta con la barra desplegable que contiene todas las fechas especificadas en el modelo, en estos casos, se hace necesario realizar el procedimiento desde el archivo plano.

Figura 75. Set Point de temperatura



Fuente: Modificado de Computer Modeling Group (CMG). 2013

## ANEXO B. PARÁMETROS DE DESEMPEÑO

En este anexo se muestra detalladamente el procedimiento de cálculo para todos los parámetros de desempeño de cada una de las pruebas consideradas, prueba experimental, prueba ajustada, relación de inyección agua-aire crítica, modificación de la relación de inyección.

### CÁLCULO DE PARAMETROS DE DESEMPEÑO PRUEBA ICP

#### 1. Cantidad de carbono quemado:

Teniendo en cuenta la reacción de combustión, las moles de carbono que se quemaron durante el ensayo son equivalentes a la cantidad de moles de  $CO$  y  $CO_2$  producidas.

**Ec 10.** Carbono quemado

$$\text{Moles } C = \text{Moles } CO + \text{Moles de } CO_2$$

Para el cálculo de las moles de  $CO$  y  $CO_2$ , se tiene que:

$$PV = nRT$$

**Ec 11.** Gas ideal

$$n = \left( \frac{P}{RT} \right) * V$$

Las condiciones del laboratorio a las que se midió la concentración de los gases efluentes fueron:

$$P = 1 \text{ atm}$$

$$T = 288.1664 \text{ K}$$

Reemplazando estos valores en la ecuación 11,

$$n = \left( \frac{1}{0.08205746 * 288.1664} \right) * V$$
$$n = 0.04229 \frac{\text{mol}}{\text{L}} * V$$

**Ec 12.** Convertir volumen a moles

$$n = \frac{V}{23.6462 \text{ L/mol}}$$

- **Antes de la falla del controlador:**

$$\text{Vol } CO_2 \text{ producido} = 153.2 \text{ L}$$

Este dato se reporta en los datos registrados en la prueba experimental

Reemplazando el volumen de  $CO_2$  producido en la ecuación 12,

$$\text{Moles de } CO_2 = \frac{153.2 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 6.4788 \text{ moles}$$

$$\text{Kmoles de } CO_2 = \mathbf{0.0064788 \text{ Kmol de } CO_2 \text{ producidas}}$$

$$\text{Vol } CO \text{ producido} = 26.6 \text{ L}$$

Este dato se reporta en los datos registrados en la prueba experimental

Reemplazando el volumen de CO producido en la ecuación 12,

$$\text{Moles de } CO = \frac{26.6 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 1.124916 \text{ moles}$$

$$\text{kmoles de } CO = \mathbf{0.001124916 \text{ Kmoles de } CO \text{ producidas}}$$

Reemplazando la cantidad de moles de CO y  $CO_2$  en la ecuación 10,

$$\text{Kmoles } C = 0.001124916 \text{ kmol } CO + 0.0064788 \text{ kmol } CO_2$$

$$\text{Kmoles } C = 0.007603716 \text{ kmol de carbono}$$

$$\text{masa } C = 0.007603716 * 12 = \mathbf{0.091245 \text{ kg de carbono consumido}}$$

• **Después de la falla del**

**controlador**

$$\text{Vol } CO_2 \text{ producido} = 84.8 \text{ L}$$

Este dato se reporta en los datos registrados en la prueba experimental

Reemplazando el volumen de  $CO_2$  producido en la ecuación 12,

$$\text{Moles de } CO_2 = \frac{84.8L}{23.6462 \text{ L/mol}} = 3.586192 \text{ moles}$$

$$\text{Kmoles de } CO_2 = \mathbf{0.003586192 \text{ Kmol de } CO_2 \text{ producidas}}$$

$$\text{Vol } CO \text{ producido} = 15.6 \text{ L}$$

Este dato se reporta en los datos registrados en la prueba experimental

Reemplazando el volumen de CO producido en la ecuación 12,

$$\text{Moles de } CO = \frac{15.6L}{23.6462 \text{ L/mol}} = 0.659724 \text{ moles}$$

$$\text{kmoles de } CO = \mathbf{0.000659724 \text{ Kmoles de } CO \text{ producidas}}$$

Reemplazando la cantidad de moles de CO y  $CO_2$  en la ecuación 10,

$$\text{Kmoles } C = 0.000659724 \text{ mol } CO + 0.003586192 \text{ mol } CO_2$$

$$\text{Kmoles } C = 0.004245916 \text{ kmol de carbono}$$

$$\text{masa } C = 0.004245916 * 12 = \mathbf{0.05095 \text{ kg de carbono consumido}}$$

## 2. Cantidad de Oxígeno consumido:

### Ec 13. Oxígeno consumido

$$\text{Oxígeno consumido} = \text{Oxígeno inyectado} - \text{Oxígeno producido}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$\text{Aire inyectado} = 1103.4 \text{ L}$$

Este dato se reporta en los datos registrados en la prueba experimental

$$\text{Moles de Aire inyectado} = \frac{\text{Vol Aire inyectado}}{23.6462 \text{ L/mol}}$$

$$\text{Moles de Aire inyectado} = \frac{1103.4 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 46.66288 \text{ mol}$$

$$\text{Moles de } O_2 \text{ inyectado} = 0.21 * 46.66288 = \mathbf{9.7992 \text{ moles}}$$

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ producido} = 10 \text{ L}$$

Este dato se reporta en los datos registrados en la prueba experimental

$$\text{Moles de } O_2 \text{ producido} = \frac{10 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = \mathbf{0.4229 \text{ moles}}$$

Reemplazando en la ecuación 13,

$$\text{O}_2 \text{ consumido} = 9.7992 \text{ moles} - 0.4229 = \mathbf{9.3763 \text{ moles}}$$

En volumen

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ consumido} = (1103.4 \text{ L} * 0.21) - 10 \text{ L} = 221.714 \text{ L}$$

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ inyectado} = (1103.4 \text{ L} * 0.21) = 231.714 \text{ L}$$

$$\% \text{ O}_2 \text{ consumido} = \frac{221.714}{231.714} * 100 = \mathbf{95.68\%}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$\text{Aire inyectado} = 643.7 \text{ L}$$

Este dato se reporta en los datos registrados en la prueba experimental

$$\text{Moles de Aire inyectado} = \frac{\text{Vol Aire inyectado}}{23.6462 \text{ L/mol}}$$

$$\text{Moles de Aire inyectado} = \frac{643.7 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 27.22213 \text{ mol}$$

$$\text{Moles de } O_2 \text{ inyectado} = 0.21 * 27.22213 = \mathbf{5.71665 \text{ moles}}$$

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ producido} = 0 \text{ L}$$

Este dato se reporta en los datos registrados en la prueba experimental

$$\text{Moles de } O_2 \text{ producido} = \mathbf{0 \text{ moles}}$$

Reemplazando en la ecuación 13,

$$O_2 \text{ consumido} = 5.7166 \text{ moles} - 0 = \mathbf{5.7166 \text{ moles}}$$

En volumen

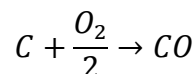
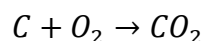
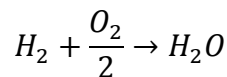
$$\text{Volumen de } O_2 \text{ consumido} = (643.7 \text{ L} * 0.21) - 0 = 135.177 \text{ L}$$

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ inyectado} = (643.7 * 0.21) = 135.177 \text{ L}$$

$$\% O_2 \text{ consumido} = \frac{135.177}{135.177} * 100 = \mathbf{100\%}$$

### 3. Consumo de Hidrógeno

Teniendo en cuenta la estequiometría de las siguientes reacciones



Se sabe que se necesita el doble de moles de hidrógeno con respecto a las de oxígeno para producir una mol de agua, se requiere una mol de oxígeno para producir una mol de Dióxido de carbono y que con media mol de oxígeno se produce una mol de Monóxido de carbono.

Teniendo en cuenta lo anterior, se tiene que:

**Ec 14.** Hidrogeno consumido

$$n_{H_2} \text{ consumidas} = 2 * (\text{Moles de } O_2 \text{ consumido para producir } H_2O)$$

**Ec 15.** Moles de oxigeno consumidas para producir agua

$$n_{O_2} \text{ consum. para } H_2O = n \text{ totales } O_2 \text{ consumido} - \left( n_{CO_2} + \frac{CO}{2} \text{ moles} \right)$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$n_{O_2} \text{ consumido} = 9.3763 \text{ moles, calculadas en el punto 2}$$

$$n \text{ de } CO_2 \text{ producidas} = 6.4788 \text{ mol, calculadas en el punto 1}$$

$$n \text{ de } CO \text{ producidas} = 1.124916 \text{ mol, calculadas en el punto 1}$$

Reemplazando en la ecuación 15,

$$n_{O_2} \text{ consumidas para } H_2O = 9.3763 \text{ moles} - \left( 6.4788 + \frac{1.124916}{2} \right) \text{ moles}$$

$$n_{O_2} \text{ consumidas para } H_2O = 2.335042 \text{ moles}$$

Reemplazando en la ecuación 14,

$$\text{Moles de } H_2 \text{ consumidas} = 2 * (2.335042) = \mathbf{4.67008 \text{ moles}}$$

$$\text{Masa de } H_2 \text{ consumida} = 4.67008 \text{ moles} * 2 \frac{g}{mol}$$

$$\text{Masa de } H_2 \text{ consumida} = \mathbf{9.3402 = 0.0093402kg}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$n_{O_2} \text{ consumido} = 5.7166 \text{ moles, calculadas en el punto 2}$$

$$n \text{ de } CO_2 \text{ producidas} = 3.586192 \text{ mol, calculadas en el punto 1}$$

$$n \text{ de } CO \text{ producidas} = 0.659724 \text{ mol, calculadas en el punto 1}$$

Reemplazando en la ecuación 15,

$$n_{O_2} \text{ consumidas para } H_2O = 5.7166 \text{ moles} - \left( 3.586192 + \frac{0.659724}{2} \right) \text{ moles}$$

$$n_{O_2} \text{ consumidas para } H_2O = 1.8005 \text{ moles}$$

Reemplazando en la ecuación 14,

$$\text{Moles de } H_2 \text{ consumidas} = 2 * (1.8005) = \mathbf{3.60109 \text{ moles}}$$

$$\text{Masa de } H_2 \text{ consumida} = 3.60109 \text{ moles} * 2 \frac{g}{mol}$$

$$\text{Masa de } H_2 \text{ consumida} = \mathbf{7.202 \text{ g} = 0.007202 \text{ kg}}$$

#### 4. Masa de agua formada

La cantidad de moles de agua que se forman en el proceso equivalen a la cantidad de moles de hidrogeno que se consumen.

**Ec 16.** Agua producida

$$\text{moles } H_2O \text{ producidas} = \text{moles } H_2 \text{ consumidas}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$\text{moles } H_2 \text{ consumidas} = 4.67008 \text{ moles}, \quad \text{calculadas en el punto 3}$$

Reemplazando en la ecuación 16,

$$\text{moles } H_2O \text{ producidas} = 4.67008 \text{ moles}$$

$$\text{masa } H_2O \text{ producida} = 4.67008 \text{ moles} * 18 \frac{g}{mol}$$

$$\text{masa } H_2O \text{ producida} = \mathbf{84,061 \text{ g} = 0.08406 \text{ kg}}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$\text{moles } H_2 \text{ consumidas} = 3.60109 \text{ moles}, \quad \text{calculadas en el punto 3}$$

Reemplazando en la ecuación 16,

$$\text{moles } H_2O \text{ producidas} = 3.60109 \text{ moles}$$

$$\text{masa } H_2O \text{ producida} = 3.60109 \text{ moles} * 18 \frac{g}{mol}$$

$$\text{masa } H_2O \text{ producida} = 64.8196 \text{ g} = 0.06482 \text{ kg}$$

## 5. Combustible total consumido

El combustible total que se consume equivale a la suma del carbono y el hidrógeno que se consumen.

### Ec 17. Combustible consumido

$$\text{Masa de combustible consumido} = \text{masa de carbono} + \text{masa de hidrogeno}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$\text{masa de carbono consumido} = 0.091245 \text{ kg}, \quad \text{calculado en el punto 1}$$

$$\text{masa de hidrógeno consumido} = 0.0093402 \text{ kg}, \text{ calculado en el punto 3}$$

Reemplazando en la ecuación 17,

$$\text{Masa combustible consum.} = 0.091245 \text{ kg} + 0.0093402 \text{ kg} = 0.1005 \text{ Kg}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$\text{masa de carbono consumido} = 0.05095 \text{ kg}, \quad \text{calculado en el punto 1}$$

$$\text{masa de hidrógeno consumido} = 0.007202 \text{ kg}, \quad \text{calculado en el punto 3}$$

Reemplazando en la ecuación 17,

$$\text{Masa combustible consum.} = 0.05095 \text{ kg} + 0.007202 \text{ kg} = 0.05815 \text{ Kg}$$

## 6. Relación atómica aparente de Hidrogeno y Carbono

**Ec 18.** Relación H - C

$$\frac{H}{C} = \frac{\text{Moles } H_2 * (2 \text{ Átomos/mol})}{\text{Moles de } C * \left(1 \frac{\text{Átomo}}{\text{mol}}\right)}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$\text{Moles } H_2 = 4.67008 \text{ moles,} \quad \text{Calculadas en el punto 3}$$

$$\text{Moles } C = 7.603716 \text{ moles,} \quad \text{Calculadas en el punto 1}$$

Reemplazando en la ecuación 18,

$$\frac{H}{C} = \frac{4.67008 \text{ mol} * (2 \text{ Átomos/mol})}{7.603716 * \left(1 \frac{\text{Átomo}}{\text{mol}}\right)} = \mathbf{1.2284}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$\text{Moles } H_2 = 3.60109 \text{ moles,} \quad \text{Calculadas en el punto 3}$$

$$\text{Moles } C = 4.245916 \text{ moles,} \quad \text{Calculadas en el punto 1}$$

Reemplazando en la ecuación 18,

$$\frac{H}{C} = \frac{3.60109 \text{ mol} * (2 \text{ Átomos/mol})}{4.245916 * \left(1 \frac{\text{Átomo}}{\text{mol}}\right)} = \mathbf{1.6962}$$

## 7. Requerimiento de combustible

Es la masa de hidrocarburo que se consume en el proceso de combustión

**Ec 19.** Requerimiento de combustible

$$\text{Req. Combustible} = \frac{\text{Combustible total consumido}}{\text{Volumen barrido del reactor}}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$Volumen\ barrido\ del\ reactor = 6.2\ L$$

Este dato se reporta en los datos registrados en la prueba experimental

$$Combustible\ total\ consumido = 0.1005Kg, \quad Calculado\ en\ el\ punto\ 5$$

Reemplazando en la ecuación 19,

$$Req.\ Combustible = \frac{0.1005Kg}{0.0062\ m^3} = 16.209 \frac{kg\ combustible}{m^3\ reactor}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$Volumen\ barrido\ del\ reactor = 4.72\ L$$

Este dato se reporta en los datos registrados en la prueba experimental

$$Combustible\ total\ consumido = 0.05815Kg, \quad Calculado\ en\ el\ punto\ 5$$

Reemplazando en la ecuación 19,

$$Req.\ Combustible = \frac{0.05815Kg}{0.00472\ m^3} = 12.3199 \frac{kg\ combustible}{m^3\ reactor}$$

## 8. Requerimiento de aire

Volumen de aire requerido para quemar una unidad de volumen de yacimiento.

**Ec 20.** Requerimiento de aire

$$Req.\ Aire = \frac{Volumen\ de\ aire\ inyectado}{Volumen\ barrido\ del\ reactor}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$Volumen\ de\ aire\ inyectado = 1103.4\ L$$

$$Volumen\ barrido\ del\ reactor = 6.2\ L$$

Datos reportados en la prueba experimental

Reemplazando en la ecuación 20,

$$Req.\ Aire = \frac{1.1034\ m^3}{0.0062\ m^3} = 177.9677 \frac{m^3\ aire}{m^3\ reactor}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$Volumen\ de\ aire\ inyectado = 643.7\ L$$

$$Volumen\ barrido\ del\ reactor = 4.72\ L$$

Datos reportados en la prueba experimental

Reemplazando en la ecuación 20,

$$Req.\ Aire = \frac{0.6437\ m^3}{0.00472\ m^3} = 136.377 \frac{m^3\ aire}{m^3\ reactor}$$

## 9. Relación aire / Combustible

Volumen de aire requerido para quemar una unidad de masa del combustible.

**Ec 21.** Relación aire - combustible

$$\frac{Aire}{Combustible} = \frac{Req.\ Aire}{Req.\ combustible}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$Req. Aire = 177.9677 \frac{m^3 aire}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 8}$$

$$Req. combustible = 16.209 \frac{kg combustible}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 7}$$

Reemplazando en la ecuación 21,

$$\frac{Aire}{Combustible} = \frac{177.9677 \frac{m^3 aire}{m^3 reactor}}{16.209 \frac{kg combustible}{m^3 reactor}} = 10.9795 \frac{m^3 aire}{kg combustible}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$Req. Aire = 136.377 \frac{m^3 aire}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 8}$$

$$Req. combustible = 12.3199 \frac{kg combustible}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 7}$$

Reemplazando en la ecuación 21,

$$\frac{Aire}{Combustible} = \frac{136.377 \frac{m^3 aire}{m^3 reactor}}{12.3199 \frac{kg combustible}{m^3 reactor}} = 11.0696 \frac{m^3 aire}{kg combustible}$$

## 10. Relación oxígeno / Combustible

Es el mínimo volumen de oxígeno requerido para quemar una unidad de masa de combustible.

### Ec 22. Relación oxígeno - combustible

$$\frac{O_2}{Combustible} = \frac{Req. aire * Concentración molar de O_2}{Req. combustible}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$Req. Aire = 177.9677 \frac{m^3 aire}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 8}$$

$$Req. combustible = 16.209 \frac{kg combustible}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 7}$$

Reemplazando en la ecuación 22,

$$\frac{O_2}{Combustible} = \frac{177.9677 * 0.21}{16.209} = 2.3057 \frac{m^3 O_2}{kg combustible}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$Req. Aire = 136.377 \frac{m^3 aire}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 8}$$

$$Req. combustible = 12.3199 \frac{kg combustible}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 7}$$

Reemplazando en la ecuación 22,

$$\frac{O_2}{Combustible} = \frac{136.377 * 0.21}{12.3199} = 2.3246 \frac{m^3 O_2}{kg combustible}$$

## 11. Relación inyección agua – aire (WAR)

- **Antes de la falla**

$$WAR = \frac{vol\ agua\ inyectada}{vol\ aire\ inyectado} = \frac{\left(\frac{8ml}{min}\right) * \left((12.8h - 8.92h) * \left(\frac{60min}{h}\right)\right)}{1103L}$$

$$WAR = \frac{1862,4 \text{ ml}}{1103L} = 1.6884 \frac{\text{ml agua}}{L \text{ aire}}$$

- Después de la falla

$$WAR = \frac{\text{vol agua inyectada}}{\text{vol aire inyectado}} = \frac{\left(\frac{8\text{ml}}{\text{min}}\right) * \left((16.12\text{h} - 13.88\text{h}) * \left(\frac{60\text{min}}{\text{h}}\right)\right)}{643.7L}$$

$$WAR = \frac{1075.2 \text{ ml}}{643.7L} = 1.6703 \frac{\text{ml agua}}{L \text{ aire}}$$

## 12. Factor de recobro (F.R)

$$F.R = \frac{\text{Crudo cargado al tubo} - \text{Combustible consumido}}{\text{Crudo cargado al tubo}}$$

$$= \frac{3.465 \text{ Kg} - 0.1005\text{Kg} - 0.05815 \text{ Kg}}{3.465 \text{ Kg}} = 95.42\%$$

## CÁLCULO DE PARAMETROS DE DESEMPEÑO PRUEBA AJUSTADA

### 1. Cantidad de carbono quemado:

Teniendo en cuenta la reacción de combustión, las moles de carbono que se quemaron durante el ensayo son equivalentes a la cantidad de moles de  $CO$  y  $CO_2$  producidas.

$$\text{Moles } C = \text{Moles } CO + \text{Moles de } CO_2$$

Y sabiendo que

$$n = \frac{V}{23.6462 \text{ L/mol}}$$

- **Antes de la falla del controlador:**

$$\text{Vol } CO_2 \text{ producido} = 178.5 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } CO_2 = \frac{178.5 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 7.5487 \text{ moles}$$

$$\text{Kmoles de } CO_2 = \mathbf{0.0075487 \text{ Kmol de } CO_2 \text{ producidas}}$$

$$\text{Vol } CO \text{ producido} = 18.1 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } CO = \frac{18.1 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 0.7654 \text{ moles}$$

$$\text{kmoles de } CO = \mathbf{0.0007654 \text{ Kmoles de } CO \text{ producidas}}$$

$$\text{Kmoles } C = 0.0007654 \text{ kmol } CO + 0.0075487 \text{ kmol } CO_2$$

$$\text{Kmoles } C = 0.0083141 \text{ kmol de carbono}$$

$$\text{masa } C = 0.0083141 * 12 = \mathbf{0.0997692 \text{ kg de carbono consumido}}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$\text{Vol } CO_2 \text{ producido} = 104.2 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } CO_2 = \frac{104.2L}{23.6462 \text{ L/mol}} = 4.4066 \text{ moles}$$

$$\text{Kmoles de } CO_2 = \mathbf{0.0044066 \text{ Kmol de } CO_2 \text{ producidas}}$$

$$\text{Vol } CO \text{ producido} = 10.7L$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } CO = \frac{10.7L}{23.6462 \text{ L/mol}} = 0.4525 \text{ moles}$$

$$\text{kmoles de } CO = \mathbf{0.0004525 \text{ Kmoles de } CO \text{ producidas}}$$

$$\text{Kmoles } C = 0.0004525 \text{ mol } CO + 0.0044066 \text{ mol } CO_2$$

$$\text{Kmoles } C = 0.004245916 \text{ kmol de carbono}$$

$$\text{masa } C = 0.0048591 * 12 = \mathbf{0.0583 \text{ kg de carbono consumido}}$$

## 2. Cantidad de Oxígeno consumido:

$$\text{Oxígeno consumido} = \text{Oxígeno inyectado} - \text{Oxígeno producido}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$\text{Aire inyectado} = 1167.9 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de Aire inyectado} = \frac{\text{Vol Aire inyectado}}{23.6462 \text{ L/mol}}$$

$$\text{Moles de Aire inyectado} = \frac{1167.9 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 49.39059 \text{ mol}$$

$$\text{Moles de } O_2 \text{ inyectado} = 0.21 * 49.39059 = \mathbf{10.37202 \text{ moles}}$$

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ producido} = 0.5 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } O_2 \text{ producido} = \frac{0.5 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = \mathbf{0.021145 \text{ moles}}$$

Entonces,

$$O_2 \text{ consumido} = 10.37202 \text{ moles} - 0.021145 \text{ moles} = \mathbf{10.3508 \text{ moles}}$$

En volumen

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ consumido} = (1167.9 \text{ L} * 0.21) - 0.5 \text{ L} = 244.759 \text{ L}$$

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ inyectado} = (1167.9 * 0.21) = 245.259 \text{ L}$$

$$\% O_2 \text{ consumido} = \frac{244.759}{245.259} * 100 = \mathbf{99.793\%}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$\text{Aire inyectado} = 764.9 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de Aire inyectado} = \frac{\text{Vol Aire inyectado}}{23.6462 \text{ L/mol}}$$

$$\text{Moles de Aire inyectado} = \frac{764.9 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 32.34769 \text{ mol}$$

$$\text{Moles de } O_2 \text{ inyectado} = 0.21 * 32.34769 = \mathbf{6.79301 \text{ moles}}$$

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ producido} = 0.5 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } O_2 \text{ producido} = \frac{0.5 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = \mathbf{0.021145 \text{ moles}}$$

Entonces,

$$O_2 \text{ consumido} = 6.79301 \text{ moles} - 0.021145 \text{ moles} = \mathbf{6.7718 \text{ moles}}$$

En volumen

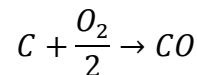
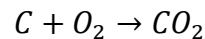
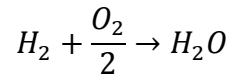
$$\text{Volumen de } O_2 \text{ consumido} = (764.9 \text{ L} * 0.21) - 0.5 = 160.129 \text{ L}$$

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ inyectado} = (764.9 * 0.21) = 160.629 \text{ L}$$

$$\% O_2 \text{ consumido} = \frac{160.129}{160.629} * 100 = \mathbf{99.688\%}$$

### 3. Consumo de Hidrógeno

Teniendo en cuenta la estequiometria de las siguientes reacciones



Se sabe que se necesita el doble de moles de hidrogeno con respecto a las de oxígeno para producir una mol de agua, se requiere una mol de oxígeno para producir una mol de Dióxido de carbono y que con media mol de oxígeno se produce una mol de Monóxido de carbono.

Teniendo en cuenta lo anterior, se tiene que:

$$n_{H_2} \text{ consumidas} = 2 * (\text{Moles de } O_2 \text{ consumido para producir } H_2O)$$

$$n_{O_2} \text{ consum. para } H_2O = n_{\text{totales } O_2 \text{ consumido}} - (n_{CO_2} + \frac{CO}{2} \text{ moles})$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$n_{O_2} \text{ consumido} = 10.3508 \text{ moles,} \quad \text{calculadas en el punto 2}$$

$$n_{\text{de } CO_2 \text{ producidas}} = 7.5487 \text{ moles,} \quad \text{calculadas en el punto 1}$$

$n$  de CO producidas = 0.7654 moles, calculadas en el punto 1

$$n_{O_2} \text{ consumidas para } H_2O = 10.3508 \text{ moles} - \left(7.5487 + \frac{0.7654}{2}\right) \text{ moles}$$

$$n_{O_2} \text{ consumidas para } H_2O = 2.4194 \text{ moles}$$

$$\text{Moles de } H_2 \text{ consumidas} = 2 * (2.4194) = \mathbf{4.8388 \text{ moles}}$$

$$\text{Masa de } H_2 \text{ consumida} = 4.8388 \text{ moles} * 2 \frac{g}{mol}$$

$$\text{Masa de } H_2 \text{ consumida} = \mathbf{9.6776 = 0.009776kg}$$

- **Después de la falla del controlador**

$n$   $O_2$  consumido = 6.7718 moles, calculadas en el punto 2

$n$  de  $CO_2$  producidas = 4.4066 moles, calculadas en el punto 1

$n$  de CO producidas = 0.4525 mol, calculadas en el punto 1

$$n_{O_2} \text{ consumidas para } H_2O = 6.7718 \text{ moles} - \left(4.4066 + \frac{0.4525}{2}\right) \text{ moles}$$

$$n_{O_2} \text{ consumidas para } H_2O = 2.13895 \text{ moles}$$

$$\text{Moles de } H_2 \text{ consumidas} = 2 * (2.13895) = \mathbf{4.2779 \text{ moles}}$$

$$\text{Masa de } H_2 \text{ consumida} = 4.2779 \text{ moles} * 2 \frac{g}{mol}$$

$$\text{Masa de } H_2 \text{ consumida} = \mathbf{8.5558 g = 0.0085558kg}$$

#### 4. Masa de agua formada

La cantidad de moles de agua que se forman en el proceso equivalen a la cantidad de moles de hidrogeno que se consumen.

$$\text{moles } H_2O \text{ producidas} = \text{moles } H_2 \text{ consumidas}$$

- **Antes de la falla del controlador**

*moles H<sub>2</sub> consumidas = 4.8388 moles,      calculadas en el punto 3*

*moles H<sub>2</sub>O producidas = 4.8388 moles*

*masa H<sub>2</sub>O producida = 4.8388 moles \* 18  $\frac{g}{mol}$*

***masa H<sub>2</sub>O producida = 87.0984 g = 0.08709 kg***

- **Después de la falla del controlador**

*moles H<sub>2</sub> consumidas = 4.2779 moles,      calculadas en el punto 3*

*moles H<sub>2</sub>O producidas = 4.2779 moles*

*masa H<sub>2</sub>O producida = 4.2779 moles \* 18  $\frac{g}{mol}$*

***masa H<sub>2</sub>O producida = 77.0022 g = 0.077kg***

## **5. Combustible total consumido**

El combustible total que se consume equivale a la suma del carbono y el hidrógeno que se consumen.

*Masa de combustible consumido = masa de carbono + masa de hidrogeno*

- **Antes de la falla del controlador**

*masa de carbono consumido = 0.0997692 kg,      calculado en el punto 1*

*masa de hidrógeno consumido = 0.009776 kg, calculado en el punto 3*

***Masa combustible consum. = 0.0997692 kg + 0.009776 kg = 0.1095Kg***

- **Después de la falla del controlador**

*masa de carbono consumido = 0.0583 kg,      calculado en el punto 1*

*masa de hidrógeno consumido = 0.008555 kg,      calculado en el punto 3*

$$\text{Masa combustible consum.} = 0.0583 \text{ kg} + 0.008555 \text{ kg} = \mathbf{0.0668Kg}$$

## 6. Relación atómica aparente de Hidrogeno y Carbono

$$\frac{H}{C} = \frac{\text{Moles } H_2 * (2 \text{ Átomos/mol})}{\text{Moles de C} * \left(1 \frac{\text{Átomo}}{\text{mol}}\right)}$$

- **Antes de la falla del controlador**

*Moles H<sub>2</sub> consumidas = 4.8388 moles,      Calculadas en el punto 3*

*Moles C consumidas = 8.3141 moles,      Calculadas en el punto 1*

$$\frac{H}{C} = \frac{4.8388 * (2 \text{ Átomos/mol})}{8.3141 * \left(1 \frac{\text{Átomo}}{\text{mol}}\right)} = \mathbf{1.1639}$$

- **Después de la falla del controlador**

*Moles H<sub>2</sub> consumidas = 4.2779 moles,      Calculadas en el punto 3*

*Moles C consumidas = 4.245916 moles,      Calculadas en el punto 1*

$$\frac{H}{C} = \frac{4.2779 \text{ mol} * (2 \text{ Átomos/mol})}{4.245916 * \left(1 \frac{\text{Átomo}}{\text{mol}}\right)} = \mathbf{2.015}$$

## 7. Requerimiento de combustible

Es la masa de hidrocarburo que se consume en el proceso de combustión

$$\text{Req. Combustible} = \frac{\text{Combustible total consumido}}{\text{Volumen barrido del reactor}}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$Volumen\ barrido\ del\ reactor = 7.6\ L$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$Combustible\ total\ consumido = 0.1095Kg, \quad Calculado\ en\ el\ punto\ 5$$

$$Req.\ Combustible = \frac{0.1095Kg}{0.0076\ m^3} = 14.407 \frac{kg\ combustible}{m^3\ reactor}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$Volumen\ barrido\ del\ reactor = 6.08\ L$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$Combustible\ total\ consumido = 0.0668Kg, \quad Calculado\ en\ el\ punto\ 5$$

$$Req.\ Combustible = \frac{0.0668Kg}{0.00608\ m^3} = 10.9868 \frac{kg\ combustible}{m^3\ reactor}$$

## 8. Requerimiento de aire

Volumen de aire requerido para quemar una unidad de volumen de yacimiento.

$$Req.\ Aire = \frac{Volumen\ de\ aire\ inyectado}{Volumen\ barrido\ del\ reactor}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$Volumen\ de\ aire\ inyectado = 1167.9\ L$$

$$Volumen\ barrido\ del\ reactor = 7.6\ L$$

Estos datos se obtienen de la simulación

$$Req. Aire = \frac{1.1679 \text{ m}^3}{0.0076 \text{ m}^3} = 153.671 \frac{\text{m}^3 \text{aire}}{\text{m}^3 \text{reactor}}$$

- **Después de la falla del controlador**

Volumen de aire inyectado = 764.9 L

Volumen barrido del reactor = 6.08 L

Datos reportados en la prueba experimental

$$Req. Aire = \frac{0.7649 \text{ m}^3}{0.00608 \text{ m}^3} = 125.805 \frac{\text{m}^3 \text{aire}}{\text{m}^3 \text{reactor}}$$

## 9. Relación aire / Combustible

Volumen de aire requerido para quemar una unidad de masa del combustible.

$$\frac{Aire}{Combustible} = \frac{Req. Aire}{Req. combustible}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$Req. Aire = 153.671 \frac{\text{m}^3 \text{aire}}{\text{m}^3 \text{reactor}}, \quad \text{Calculado en el punto 8}$$

$$Req. combustible = 14.407 \frac{\text{kg combustible}}{\text{m}^3 \text{reactor}}, \quad \text{Calculado en el punto 7}$$

$$\frac{Aire}{Combustible} = \frac{153.671 \frac{\text{m}^3 \text{aire}}{\text{m}^3 \text{reactor}}}{14.407 \frac{\text{kg combustible}}{\text{m}^3 \text{reactor}}} = 10.666 \frac{\text{m}^3 \text{aire}}{\text{kg combustible}}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$Req. Aire = 125.805 \frac{m^3 aire}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 8}$$

$$Req. combustible = 10.9868 \frac{kg combustible}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 7}$$

$$\frac{Aire}{Combustible} = \frac{125.805 \frac{m^3 aire}{m^3 reactor}}{10.9868 \frac{kg combustible}{m^3 reactor}} = 11.45055 \frac{m^3 aire}{kg combustible}$$

## 10. Relación oxígeno / Combustible

Es el mínimo volumen de oxígeno requerido para quemar una unidad de masa de combustible.

$$\frac{O_2}{Combustible} = \frac{Req. aire * Concentración molar de O_2}{Req. combustible}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$Req. Aire = 153.671 \frac{m^3 aire}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 8}$$

$$Req. combustible = 14.407 \frac{kg combustible}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 7}$$

$$\frac{O_2}{Combustible} = \frac{153.671 * 0.21}{14.407} = 2.399 \frac{m^3 O_2}{kg combustible}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$Req. Aire = 125.805 \frac{m^3 aire}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 8}$$

$$Req. combustible = 10.9868 \frac{kg combustible}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 7}$$

$$\frac{O_2}{Combustible} = \frac{125.805 * 0.21}{10.9868} = 2.4046 \frac{m^3 O_2}{kg combustible}$$

### 11. Relación inyección agua – aire (WAR)

- Antes de la falla

$$WAR = \frac{8 \text{ ml/min agua}}{5 \text{ L/min aire}} = 1.6 \frac{\text{ml agua}}{\text{L aire}}$$

- Después de la falla

$$WAR = \frac{8 \text{ ml/min agua}}{5 \text{ L/min aire}} = 1.6 \frac{\text{ml agua}}{\text{L aire}}$$

## CÁLCULO DE PARAMETROS DE DESEMPEÑO RELACIÓN CRÍTICA

### 1. Cantidad de carbono quemado:

Teniendo en cuenta la reacción de combustión, las moles de carbono que se quemaron durante el ensayo son equivalentes a la cantidad de moles de  $CO$  y  $CO_2$  producidas.

$$\text{Moles } C = \text{Moles } CO + \text{Moles de } CO_2$$

Y sabiendo que,

$$n = \frac{V}{23.6462 \text{ L/mol}}$$

- **Antes de la falla del controlador:**

$$\text{Vol } CO_2 \text{ producido} = 71.9 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } CO_2 = \frac{71.9 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 3.0406 \text{ moles}$$

$$\text{Kmoles de } CO_2 = \mathbf{0.0030406 \text{ Kmol de } CO_2 \text{ producidas}}$$

$$\text{Vol } CO \text{ producido} = 7.4 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } CO = \frac{7.4 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 0.3129 \text{ moles}$$

$$\text{kmoles de } CO = \mathbf{0.0003129 \text{ Kmoles de } CO \text{ producidas}}$$

$$\text{Kmoles } C = 0.0003129 \text{ kmol } CO + 0.0030406 \text{ kmol } CO_2$$

$$\text{Kmoles } C = 0.0033535 \text{ kmol de carbono}$$

$$\text{masa } C = 0.0033535 * 12 = \mathbf{0.04024 \text{ kg de carbono consumido}}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$\text{Vol } CO_2 \text{ producido} = 62.2 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } CO_2 = \frac{62.2L}{23.6462 \text{ L/mol}} = 2.6304 \text{ moles}$$

$$\text{Kmoles de } CO_2 = \mathbf{0.0026304 \text{ Kmol de } CO_2 \text{ producidas}}$$

$$\text{Vol } CO \text{ producido} = 5.7L$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } CO = \frac{5.7L}{23.6462 \text{ L/mol}} = 0.24105 \text{ moles}$$

$$\text{kmoles de } CO = \mathbf{0.00024105 \text{ Kmoles de } CO \text{ producidas}}$$

$$\text{Kmoles } C = 0.00024105 \text{ mol } CO + 0.0026304 \text{ mol } CO_2$$

$$\text{Kmoles } C = 0.002871 \text{ kmol de carbono}$$

$$\text{masa } C = 0.002871 * 12 = \mathbf{0.034457 \text{ kg de carbono consumido}}$$

## 2. Cantidad de Oxígeno consumido:

$$\text{Oxígeno consumido} = \text{Oxígeno inyectado} - \text{Oxígeno producido}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$\text{Aire inyectado} = 397.2 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de Aire inyectado} = \frac{\text{Vol Aire inyectado}}{23.6462 \text{ L/mol}}$$

$$\text{Moles de Aire inyectado} = \frac{397.2 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 16.7976 \text{ mol}$$

$$\text{Moles de } O_2 \text{ inyectado} = 0.21 * 16.7976 = \mathbf{3.5275 \text{ moles}}$$

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ producido} = 0 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } O_2 \text{ producido} = \frac{0 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = \mathbf{0 \text{ moles}}$$

Entonces,

$$O_2 \text{ consumido} = 3.5275 \text{ moles} - 0 \text{ moles} = \mathbf{3.5275 \text{ moles}}$$

En volumen

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ consumido} = (397.2 \text{ L} * 0.21) - 0 \text{ L} = 83.412 \text{ L}$$

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ inyectado} = (397.2 * 0.21) = 83.412 \text{ L}$$

$$\% O_2 \text{ consumido} = \frac{83.412}{83.412} * 100 = \mathbf{100\%}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$\text{Aire inyectado} = 424.9 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de Aire inyectado} = \frac{\text{Vol Aire inyectado}}{23.6462 \text{ L/mol}}$$

$$\text{Moles de Aire inyectado} = \frac{424.9 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 17.9691 \text{ mol}$$

$$\text{Moles de } O_2 \text{ inyectado} = 0.21 * 17.9691 = \mathbf{3.7735 \text{ moles}}$$

Volumen de  $O_2$  producido = 0.1 L

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } O_2 \text{ producido} = \frac{0.1 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = \mathbf{0.004229 \text{ moles}}$$

Entonces,

$$O_2 \text{ consumido} = 3.7735 \text{ moles} - 0.0042295 \text{ moles} = \mathbf{3.7693 \text{ moles}}$$

En volumen

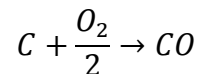
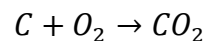
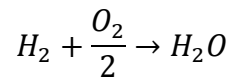
$$\text{Volumen de } O_2 \text{ consumido} = (424.9 \text{ L} * 0.21) - 0.1 = 89.129 \text{ L}$$

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ inyectado} = (764.9 * 0.21) = 89.229 \text{ L}$$

$$\% O_2 \text{ consumido} = \frac{89.129}{89.229} * 100 = \mathbf{99.89\%}$$

### 3. Consumo de Hidrógeno

Teniendo en cuenta la estequiometría de las siguientes reacciones



Se sabe que se necesita el doble de moles de hidrógeno con respecto a las de oxígeno para producir una mol de agua, se requiere una mol de oxígeno para producir una mol de Dióxido de carbono y que con media mol de oxígeno se produce una mol de Monóxido de carbono.

Teniendo en cuenta lo anterior, se tiene que:

$$n H_2 \text{ consumidas} = 2 * (\text{Moles de } O_2 \text{ consumido para producir } H_2O)$$

$$n_{O_2} \text{ consum. para } H_2O = n \text{ totales } O_2 \text{ consumido} - (n CO_2 + \frac{CO}{2} \text{ moles})$$

- **Antes de la falla del controlador**

$n_{O_2}$  consumido = 3.5275 moles, calculadas en el punto 2

$n$  de  $CO_2$  producidas = 3.0406 moles, calculadas en el punto 1

$n$  de  $CO$  producidas = 0.3129 moles, calculadas en el punto 1

$$n_{O_2} \text{ consumidas para } H_2O = 3.5275 \text{ moles} - \left( 3.0406 + \frac{0.3129}{2} \right) \text{ moles}$$

$$n_{O_2} \text{ consumidas para } H_2O = 0.33045 \text{ moles}$$

$$\text{Moles de } H_2 \text{ consumidas} = 2 * (0.33045) = \mathbf{0.6609 \text{ moles}}$$

$$\text{Masa de } H_2 \text{ consumida} = 0.6609 \text{ moles} * 2 \frac{g}{mol}$$

$$\text{Masa de } H_2 \text{ consumida} = \mathbf{1.3218g = 0.0013218kg}$$

- **Después de la falla del controlador**

$n_{O_2}$  consumido = 3.7693 moles, calculadas en el punto 2

$n$  de  $CO_2$  producidas = 2.6304 moles, calculadas en el punto 1

$n$  de  $CO$  producidas = 0.24105 mol, calculadas en el punto 1

$$n_{O_2} \text{ consumidas para } H_2O = 3.7693 \text{ moles} - \left( 2.6304 + \frac{0.24105}{2} \right) \text{ moles}$$

$$n_{O_2} \text{ consumidas para } H_2O = 1.0184 \text{ moles}$$

$$\text{Moles de } H_2 \text{ consumidas} = 2 * (1.0184) = \mathbf{2.0368 \text{ moles}}$$

$$\text{Masa de } H_2 \text{ consumida} = 2.0368 \text{ moles} * 2 \frac{g}{mol}$$

$$\text{Masa de } H_2 \text{ consumida} = \mathbf{4.0735g = 0.0040735kg}$$

#### 4. Masa de agua formada

La cantidad de moles de agua que se forman en el proceso equivalen a la cantidad de moles de hidrogeno que se consumen.

$$\text{moles } H_2O \text{ producidas} = \text{moles } H_2 \text{ consumidas}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$\text{moles } H_2 \text{ consumidas} = 0.6609 \text{ moles,} \quad \text{calculadas en el punto 3}$$

$$\text{moles } H_2O \text{ producidas} = 0.6609 \text{ moles}$$

$$\text{masa } H_2O \text{ producida} = 0.6609 \text{ moles} * 18 \frac{g}{mol}$$

$$\text{masa } H_2O \text{ producida} = \mathbf{11.8962 \text{ g} = 0.01189 \text{ kg}}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$\text{moles } H_2 \text{ consumidas} = 2.0368 \text{ moles,} \quad \text{calculadas en el punto 3}$$

$$\text{moles } H_2O \text{ producidas} = 2.0368 \text{ moles}$$

$$\text{masa } H_2O \text{ producida} = 2.0368 \text{ moles} * 18 \frac{g}{mol}$$

$$\text{masa } H_2O \text{ producida} = \mathbf{36.6624 \text{ g} = 0.03666 \text{ kg}}$$

#### 5. Combustible total consumido

El combustible total que se consume equivale a la suma del carbono y el hidrógeno que se consumen.

$$\text{Masa de combustible consumido} = \text{masa de carbono} + \text{masa de hidrogeno}$$

- **Antes de la falla del controlador**

*masa de carbono consumido = 0.04024 kg, calculado en el punto 1*

*masa de hidrógeno consumido = 0.0013218kg, calculado en el punto 3*

**Masa combustible consum.** = 0.04024 kg + 0.0013218kg = **0.04156Kg**

- **Después de la falla del controlador**

*masa de carbono consumido = 0.034457 kg, calculado en el punto 1*

*masa de hidrógeno consumido = 0.0040735kg, calculado en el punto 3*

**Masa combustible consum.** = 0.034457 kg + 0.0040735 kg = **0.0385Kg**

## 6. Relación atómica aparente de Hidrogeno y Carbono

$$\frac{H}{C} = \frac{\text{Moles } H_2 * (2 \text{ Átomos/mol})}{\text{Moles de C} * \left(1 \frac{\text{Átomo}}{\text{mol}}\right)}$$

- **Antes de la falla del controlador**

*Moles H<sub>2</sub> consumidas = 0.6609 moles, Calculadas en el punto 3*

*Moles C consumidas = 3.3535 moles, Calculadas en el punto 1*

$$\frac{H}{C} = \frac{0.6609 * (2 \text{ Átomos/mol})}{3.3535 * \left(1 \frac{\text{Átomo}}{\text{mol}}\right)} = \mathbf{0.3942}$$

- **Después de la falla del controlador**

*Moles H<sub>2</sub> consumidas = 2.0368 moles, Calculadas en el punto 3*

*Moles C consumidas = 2.871 moles, Calculadas en el punto 1*

$$\frac{H}{C} = \frac{2.0368 \text{ mol} * (2 \text{ \u00c1tomos/mol})}{2.871 * \left(1 \frac{\text{\u00c1tomo}}{\text{mol}}\right)} = 1.4189$$

## 7. Requerimiento de combustible

Es la masa de hidrocarburo que se consume en el proceso de combusti\u00f3n

$$\text{Req. Combustible} = \frac{\text{Combustible total consumido}}{\text{Volumen barrido del reactor}}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$\text{Volumen barrido del reactor} = 3.7 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulaci\u00f3n

$$\text{Combustible total consumido} = 0.04156 \text{ Kg}, \quad \text{Calculado en el punto 5}$$

$$\text{Req. Combustible} = \frac{0.04156 \text{ Kg}}{0.0037 \text{ m}^3} = 11.2324 \frac{\text{kg combustible}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}$$

- **Despu\u00e9s de la falla del controlador**

$$\text{Volumen barrido del reactor} = 0.18 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulaci\u00f3n

$$\text{Combustible total consumido} = 0.0385 \text{ Kg}, \quad \text{Calculado en el punto 5}$$

$$\text{Req. Combustible} = \frac{0.0385 \text{ Kg}}{0.0018 \text{ m}^3} = 21.3889 \frac{\text{kg combustible}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}$$

## 8. Requerimiento de aire

Volumen de aire requerido para quemar una unidad de volumen de yacimiento.

$$Req. Aire = \frac{Volumen\ de\ aire\ inyectado}{Volumen\ barrido\ del\ reactor}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$Volumen\ de\ aire\ inyectado = 397.2\ L$$

$$Volumen\ barrido\ del\ reactor = 3.7\ L$$

Estos datos se obtienen  
de la simulación

$$Req. Aire = \frac{0.3972\ m^3}{0.0037\ m^3} = 107.3513 \frac{m^3\ aire}{m^3\ reactor}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$Volumen\ de\ aire\ inyectado = 424.9\ L$$

$$Volumen\ barrido\ del\ reactor = 0.18\ L$$

Datos reportados en la  
prueba experimental

$$Req. Aire = \frac{0.4249\ m^3}{0.00018\ m^3} = 2360.5556 \frac{m^3\ aire}{m^3\ reactor}$$

## 9. Relación aire / Combustible

Volumen de aire requerido para quemar una unidad de masa del combustible.

$$\frac{Aire}{Combustible} = \frac{Req. Aire}{Req. combustible}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$Req. Aire = 107.3513 \frac{m^3\ aire}{m^3\ reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 8}$$

$$\text{Req. combustible} = 11.2324 \frac{\text{kg combustible}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}, \quad \text{Calculado en el punto 7}$$

$$\frac{\text{Aire}}{\text{Combustible}} = \frac{107.3513 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}}{11.2324 \frac{\text{kg combustible}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}} = 9.5573 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{kg combustible}}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$\text{Req. Aire} = 2360.5556 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}, \quad \text{Calculado en el punto 8}$$

$$\text{Req. combustible} = 21.3889 \frac{\text{kg combustible}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}, \quad \text{Calculado en el punto 7}$$

$$\frac{\text{Aire}}{\text{Combustible}} = \frac{2360.5556 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}}{21.3889 \frac{\text{kg combustible}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}} = 110.3637 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{kg combustible}}$$

## 10. Relación oxígeno / Combustible

Es el mínimo volumen de oxígeno requerido para quemar una unidad de masa de combustible.

$$\frac{O_2}{\text{Combustible}} = \frac{\text{Req. aire} * \text{Concentración molar de } O_2}{\text{Req. combustible}}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$\text{Req. Aire} = 107.3513 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}, \quad \text{Calculado en el punto 8}$$

$$\text{Req. combustible} = 11.2324 \frac{\text{kg combustible}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}, \quad \text{Calculado en el punto 7}$$

$$\frac{O_2}{\text{Combustible}} = \frac{107.3513 * 0.21}{11.2324} = 2.007 \frac{\text{m}^3 O_2}{\text{kg combustible}}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$Req. Aire = 2360.5556 \frac{m^3 aire}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 8}$$

$$Req. combustible = 21.3889 \frac{kg combustible}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 7}$$

$$\frac{O_2}{Combustible} = \frac{2360.5556 * 0.21}{21.3889} = 23.1763 \frac{m^3 O_2}{kg combustible}$$

### 11. Relación de inyección agua – aire (WAR)

Antes y después de la falla del controlador

$$WAR = \frac{Caudal inyección agua}{Caudal inyección aire} = \frac{8 ml/min}{1.705 L/min} = 4.692 \frac{ml agua}{L aire}$$

## CÁLCULO DE PARAMETROS DE DESEMPEÑO RELACIÓN ÓPTIMA

### 1. Cantidad de carbono quemado:

Teniendo en cuenta la reacción de combustión, las moles de carbono que se quemaron durante el ensayo son equivalentes a la cantidad de moles de  $CO$  y  $CO_2$  producidas.

$$\text{Moles } C = \text{Moles } CO + \text{Moles de } CO_2$$

Y sabiendo que,

$$n = \frac{V}{23.6462 \text{ L/mol}}$$

- **Antes de la falla del controlador:**

$$\text{Vol } CO_2 \text{ producido} = 107.2 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } CO_2 = \frac{107.2 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 4.5335 \text{ moles}$$

$$\text{Kmoles de } CO_2 = \mathbf{0.0045335 \text{ Kmoles de } CO_2 \text{ producidas}}$$

$$\text{Vol } CO \text{ producido} = 10.7 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } CO = \frac{10.7 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 0.4525 \text{ moles}$$

$$\text{kmoles de } CO = \mathbf{0.0004525 \text{ Kmoles de } CO \text{ producidas}}$$

$$\text{Kmoles } C = 0.0004525 \text{ kmol } CO + 0.0045335 \text{ kmol } CO_2$$

$$\text{Kmoles } C = 0.0033535 \text{ kmol de carbono}$$

$$\text{masa } C = 0.004986 * 12 = \mathbf{0.0598 \text{ kg de carbono consumido}}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$\text{Vol } CO_2 \text{ producido} = 94.1 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } CO_2 = \frac{94.1L}{23.6462 \text{ L/mol}} = 3.9795 \text{ moles}$$

$$\text{Kmoles de } CO_2 = \mathbf{0.0039795 \text{ Kmol de } CO_2 \text{ producidas}}$$

$$\text{Vol } CO \text{ producido} = 9.3L$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } CO = \frac{9.3L}{23.6462 \text{ L/mol}} = 0.3933 \text{ moles}$$

$$\text{kmoles de } CO = \mathbf{0.0003933 \text{ Kmoles de } CO \text{ producidas}}$$

$$\text{Kmoles } C = 0.0003933 \text{ mol } CO + 0.0039795 \text{ mol } CO_2$$

$$\text{Kmoles } C = 0.0043728 \text{ kmol de carbono}$$

$$\text{masa } C = 0.0043728 * 12 = \mathbf{0.0525 \text{ kg de carbono consumido}}$$

## 2. Cantidad de Oxígeno consumido:

$$\text{Oxígeno consumido} = \text{Oxígeno inyectado} - \text{Oxígeno producido}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$\text{Aire inyectado} = 625.7 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de Aire inyectado} = \frac{\text{Vol Aire inyectado}}{23.6462 \text{ L/mol}}$$

$$\text{Moles de Aire inyectado} = \frac{625.7 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 26.4609 \text{ mol}$$

$$\text{Moles de } O_2 \text{ inyectado} = 0.21 * 26.4609 = 5.5567 \text{ moles}$$

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ producido} = 0.1 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de } O_2 \text{ producido} = \frac{0.1 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 0.004229 \text{ moles}$$

Entonces,

$$O_2 \text{ consumido} = 5.5567 \text{ moles} - 0.004229 \text{ moles} = 5.5525 \text{ moles}$$

En volumen

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ consumido} = (625.7 \text{ L} * 0.21) - 0.1 \text{ L} = 131.297 \text{ L}$$

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ inyectado} = (625.7 * 0.21) = 131.397 \text{ L}$$

$$\% O_2 \text{ consumido} = \frac{131.297}{131.397} * 100 = 99.92\%$$

- **Después de la falla del controlador**

$$\text{Aire inyectado} = 671.9 \text{ L}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Moles de Aire inyectado} = \frac{\text{Vol Aire inyectado}}{23.6462 \text{ L/mol}}$$

$$\text{Moles de Aire inyectado} = \frac{671.9 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = 28.4147 \text{ mol}$$

$$\text{Moles de } O_2 \text{ inyectado} = 0.21 * 28.4147 = 5.967 \text{ moles}$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ producido} = 0.3 \text{ L}$$

$$\text{Moles de } O_2 \text{ producido} = \frac{0.3 \text{ L}}{23.6462 \text{ L/mol}} = \mathbf{0.01268 \text{ moles}}$$

Entonces,

$$O_2 \text{ consumido} = 5.967 \text{ moles} - 0.01268 \text{ moles} = \mathbf{5.95432 \text{ moles}}$$

En volumen

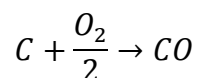
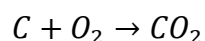
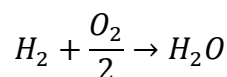
$$\text{Volumen de } O_2 \text{ consumido} = (671.9 \text{ L} * 0.21) - 0.3 = 140.799 \text{ L}$$

$$\text{Volumen de } O_2 \text{ inyectado} = (671.9 * 0.21) = 141.099 \text{ L}$$

$$\% O_2 \text{ consumido} = \frac{140.799}{141.099} * 100 = \mathbf{99.79\%}$$

### 3. Consumo de Hidrógeno

Teniendo en cuenta la estequiometria de las siguientes reacciones



Se sabe que se necesita el doble de moles de hidrogeno con respecto a las de oxígeno para producir una mol de agua, se requiere una mol de oxígeno para producir una mol de Dióxido de carbono y que con media mol de oxígeno se produce una mol de Monóxido de carbono.

Teniendo en cuenta lo anterior, se tiene que:

$$n H_2 \text{ consumidas} = 2 * (\text{Moles de } O_2 \text{ consumido para producir } H_2O)$$

$$n_{O_2} \text{ consum. para } H_2O = n \text{ totales } O_2 \text{ consumido} - (n CO_2 + \frac{CO}{2} \text{ moles})$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$\begin{aligned}
 n_{O_2} \text{ consumido} &= 5.5525 \text{ moles, } \text{ calculadas en el punto 2} \\
 n_{CO_2} \text{ producidas} &= 4.5335 \text{ moles, } \text{ calculadas en el punto 1} \\
 n_{CO} \text{ producidas} &= 0.4525 \text{ moles, } \text{ calculadas en el punto 1} \\
 n_{O_2} \text{ consumidas para } H_2O &= 5.5525 \text{ moles} - \left( 4.5335 + \frac{0.4525}{2} \right) \text{ moles} \\
 n_{O_2} \text{ consumidas para } H_2O &= 0.79275 \text{ moles}
 \end{aligned}$$

$$\text{Moles de } H_2 \text{ consumidas} = 2 * (0.79275) = \mathbf{1.5855 \text{ moles}}$$

$$\text{Masa de } H_2 \text{ consumida} = 1.5855 \text{ moles} * 2 \frac{g}{mol}$$

$$\text{Masa de } H_2 \text{ consumida} = \mathbf{3.171g = 0.003171kg}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$\begin{aligned}
 n_{O_2} \text{ consumido} &= 5.95432 \text{ moles, } \text{ calculadas en el punto 2} \\
 n_{CO_2} \text{ producidas} &= 3.9795 \text{ moles, } \text{ calculadas en el punto 1} \\
 n_{CO} \text{ producidas} &= 0.3933 \text{ mol, } \text{ calculadas en el punto 1} \\
 n_{O_2} \text{ consumidas para } H_2O &= 5.95432 \text{ moles} - \left( 3.9795 + \frac{0.3933}{2} \right) \text{ moles} \\
 n_{O_2} \text{ consumidas para } H_2O &= 1.7782 \text{ moles}
 \end{aligned}$$

$$\text{Moles de } H_2 \text{ consumidas} = 2 * (1.7782) = \mathbf{3.5563 \text{ moles}}$$

$$\text{Masa de } H_2 \text{ consumida} = 3.5563 \text{ moles} * 2 \frac{g}{mol}$$

$$\text{Masa de } H_2 \text{ consumida} = \mathbf{7.1127g = 0.0071127kg}$$

#### 4. Masa de agua formada

La cantidad de moles de agua que se forman en el proceso equivalen a la cantidad de moles de hidrogeno que se consumen.

$$\text{moles } H_2O \text{ producidas} = \text{moles } H_2 \text{ consumidas}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$\text{moles } H_2 \text{ consumidas} = 1.5855 \text{ moles, } \quad \text{calculadas en el punto 3}$$

$$\text{moles } H_2O \text{ producidas} = 1.5855 \text{ moles}$$

$$\text{masa } H_2O \text{ producida} = 1.5855 \text{ moles} * 18 \frac{g}{mol}$$

$$\text{masa } H_2O \text{ producida} = 28.539 \text{ g} = 0.028539 \text{ kg}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$\text{moles } H_2 \text{ consumidas} = 3.5563 \text{ moles, } \quad \text{calculadas en el punto 3}$$

$$\text{moles } H_2O \text{ producidas} = 3.5563 \text{ moles}$$

$$\text{masa } H_2O \text{ producida} = 3.5563 \text{ moles} * 18 \frac{g}{mol}$$

$$\text{masa } H_2O \text{ producida} = 64.0134 \text{ g} = 0.0640134 \text{ kg}$$

## 5. Combustible total consumido

El combustible total que se consume equivale a la suma del carbono y el hidrógeno que se consumen.

$$\text{Masa de combustible consumido} = \text{masa de carbono} + \text{masa de hidrogeno}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$\text{masa de carbono consumido} = 0.0598 \text{ kg, } \quad \text{calculado en el punto 1}$$

$$\text{masa de hidrógeno consumido} = 0.003171 \text{ kg, calculado en el punto 3}$$

$$\text{Masa combustible consum.} = 0.0598 \text{ kg} + 0.003171 \text{ kg} = 0.06297 \text{ Kg}$$

- **Después de la falla del controlador**

*masa de carbono consumido = 0.0525 kg, calculado en el punto 1*

*masa de hidrógeno consumido = 0.0071127kg, calculado en el punto 3*

***Masa combustible consum. = 0.0525 kg + 0.0071127kg = 0.05961Kg***

## 6. Relación atómica aparente de Hidrogeno y Carbono

$$\frac{H}{C} = \frac{\text{Moles } H_2 * (2 \text{ Átomos/mol})}{\text{Moles de C} * \left(1 \frac{\text{Átomo}}{\text{mol}}\right)}$$

- **Antes de la falla del controlador**

*Moles H<sub>2</sub> consumidas = 1.5855 moles, Calculadas en el punto 3*

*Moles C consumidas = 3.3535 moles, Calculadas en el punto 1*

$$\frac{H}{C} = \frac{1.5855 * (2 \text{ Átomos/mol})}{3.3535 * \left(1 \frac{\text{Átomo}}{\text{mol}}\right)} = \mathbf{0.9456}$$

- **Después de la falla del controlador**

*Moles H<sub>2</sub> consumidas = 3.5563 moles, Calculadas en el punto 3*

*Moles C consumidas = 4.3728 moles, Calculadas en el punto 1*

$$\frac{H}{C} = \frac{3.5563 \text{ mol} * (2 \text{ Átomos/mol})}{4.3728 * \left(1 \frac{\text{Átomo}}{\text{mol}}\right)} = \mathbf{1.6266}$$

## 7. Requerimiento de combustible

Es la masa de hidrocarburo que se consume en el proceso de combustión

$$Req. Combustible = \frac{Combustible\ total\ consumido}{Volumen\ barrido\ del\ reactor}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$Volumen\ barrido\ del\ reactor = 4.2\ L$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$Combustible\ total\ consumido = 0.06297Kg, \quad \text{Calculado en el punto 5}$$

$$Req. Combustible = \frac{0.06297Kg}{0.0042\ m^3} = 14.9928 \frac{kg\ combustible}{m^3\ reactor}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$Volumen\ barrido\ del\ reactor = 6.99\ L$$

Este dato se obtuvo de la simulación

$$Combustible\ total\ consumido = 0.05961Kg, \quad \text{Calculado en el punto 5}$$

$$Req. Combustible = \frac{0.05961Kg}{0.00699\ m^3} = 8.5279 \frac{kg\ combustible}{m^3\ reactor}$$

## 8. Requerimiento de aire

Volumen de aire requerido para quemar una unidad de volumen de yacimiento.

$$Req. Aire = \frac{Volumen\ de\ aire\ inyectado}{Volumen\ barrido\ del\ reactor}$$

- **Antes de la falla del controlador**

Volumen de aire inyectado = 625.7 L

Volumen barrido del reactor = 4.2 L

Estos datos se obtienen  
de la simulación

$$\text{Req. Aire} = \frac{0.6257 \text{ m}^3}{0.0042 \text{ m}^3} = 148.9762 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}$$

- **Después de la falla del controlador**

Volumen de aire inyectado = 671.9 L

Volumen barrido del reactor = 6.99 L

Datos reportados en la  
prueba experimental

$$\text{Req. Aire} = \frac{0.6719 \text{ m}^3}{0.00699 \text{ m}^3} = 96.123 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}$$

## 9. Relación aire / Combustible

Volumen de aire requerido para quemar una unidad de masa del combustible.

$$\frac{\text{Aire}}{\text{Combustible}} = \frac{\text{Req. Aire}}{\text{Req. combustible}}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$\text{Req. Aire} = 148.9762 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}, \quad \text{Calculado en el punto 8}$$

$$\text{Req. combustible} = 14.9928 \frac{\text{kg combustible}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}, \quad \text{Calculado en el punto 7}$$

$$\frac{\text{Aire}}{\text{Combustible}} = \frac{148.9762 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}}{14.9928 \frac{\text{kg combustible}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}} = 9.9365 \frac{\text{m}^3 \text{ aire}}{\text{kg combustible}}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$Req. Aire = 96.123 \frac{m^3 aire}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 8}$$

$$Req. combustible = 8.5279 \frac{kg combustible}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 7}$$

$$\frac{Aire}{Combustible} = \frac{96.123 \frac{m^3 aire}{m^3 reactor}}{8.5279 \frac{kg combustible}{m^3 reactor}} = 11.2716 \frac{m^3 aire}{kg combustible}$$

### 10. Relación oxígeno / Combustible

Es el mínimo volumen de oxígeno requerido para quemar una unidad de masa de combustible.

$$\frac{O_2}{Combustible} = \frac{Req. aire * Concentración molar de O_2}{Req. combustible}$$

- **Antes de la falla del controlador**

$$Req. Aire = 148.9762 \frac{m^3 aire}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 8}$$

$$Req. combustible = 14.9928 \frac{kg combustible}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 7}$$

$$\frac{O_2}{Combustible} = \frac{148.9762 * 0.21}{14.9928} = 2.0867 \frac{m^3 O_2}{kg combustible}$$

- **Después de la falla del controlador**

$$Req. Aire = 96.123 \frac{m^3 aire}{m^3 reactor}, \quad \text{Calculado en el punto 8}$$

$$\text{Req. combustible} = 8.5279 \frac{\text{kg combustible}}{\text{m}^3 \text{ reactor}}, \quad \text{Calculado en el punto 7}$$

$$\frac{\text{O}_2}{\text{Combustible}} = \frac{96.123 * 0.21}{8.5279} = 2.367 \frac{\text{m}^3 \text{O}_2}{\text{kg combustible}}$$

### 11. Relación de inyección agua – aire (WAR)

Antes y después de la falla

$$\text{WAR} = \frac{\text{Caudal inyección agua}}{\text{Caudal inyección aire}} = \frac{12.6 \frac{\text{ml}}{\text{min}} \text{ agua}}{2.685375 \frac{\text{L}}{\text{min}} \text{ aire}} = 4.692 \frac{\text{ml agua}}{\text{L aire}}$$

## ANEXO C. CONTROLADORES

En cualquier proceso, es necesario tener un control del mismo para que se lleve a cabo de una manera eficiente, cumpliendo con todas las especificaciones de producción, calidad y seguridad con las que se diseñó. Los procesos son de naturaleza dinámica, es decir, en ellos constantemente ocurren cambios o perturbaciones que hacen que las variables se desvíen de su valor de operación, para dar solución a esto, surge el control automático de procesos, cuyo objetivo es mantener en determinado valor de operación las variables del proceso tales como: temperaturas, presiones, flujos y concentraciones.

Un sistema de control cuenta con cuatro elementos principales: sensor, transmisor, controlador y el elemento final de control. El sensor mide la variable que se desea controlar; hay diferentes tipos de sensores dependiendo de la variable que se quiera medir, en caso de ser temperatura, se puede utilizar una termocupla, un termómetro de sistema lleno, termistores, etc.; en caso de que la variable a medir sea flujo, se puede usar un sensor de flujo de pistón, de paleta o de elevación o rotámetros; para medir presión, se utiliza el manómetro de Bourdon, sensor diferencial, entre otros; finalmente para concentraciones, se puede usar cromatografía o espectrofotómetros. El sensor se conecta físicamente al transmisor, el cual capta la salida del sensor y la convierte en una señal generalmente eléctrica lo suficientemente intensa para transmitirla al controlador. El controlador es el cerebro del sistema de control, pues compara la señal que recibe del transmisor con el valor que desea, es decir, el valor de operación y según el resultado de la comparación, decide que hacer para mantener la variable controlada en el punto de control, con base en la decisión, el controlador envía otra señal al elemento final de control que por lo general es una válvula, la cual ejecuta la acción correctiva.

En la presente investigación, el principal inconveniente que se tuvo a la hora de lograr un buen ajuste de la prueba de tubo de combustión fueron las irregularidades en el controlador de flujo de aire, no solo por el momento de la falla donde se dejó de inyectar aire, sino porque durante toda la corrida de la prueba, el controlador no logró estabilizar el flujo de inyección en el punto de control establecido (5L/min).

Siendo el material oxidante, uno de los parámetros clave para que ocurra la combustión, este flujo, se debe mantener en lo posible estable en el punto de control, para lograr esto, es importante en primer lugar elegir el tipo de controlador más adecuado para el proceso y posteriormente ajustarlo correctamente. En la industria, los controladores más comúnmente utilizados son el controlador proporcional (P), controlador proporcional integral (PI) y controlador proporcional integral derivativo (PID).

**Controlador proporcional (P):** El controlador proporcional es el tipo más simple de controlador. La ecuación que describe su funcionamiento es la siguiente<sup>58</sup>:

$$m(t) = \bar{m} \pm K_c(r(t) - c(t)) \quad \text{ó} \quad m(t) = \bar{m} \pm K_c e(t)$$

Donde:

$m(t)$  = Señal de salida del controlador, psig o mA.

$r(t)$  = punto de control, psig o mA.

$c(t)$  = variable que se controla, señal que llega del transmisor, psig o mA.

$e(t)$  = error, diferencia entre el punto de control y la variable que se controla.

$$K_c = \text{Ganancia del controlador, } \frac{\text{psi}}{\text{psi}} \text{ o } \frac{\text{mA}}{\text{mA}}$$

$\bar{m}$  = valor base, psig o mA. valor de salida del controlador cuando el error es 0.

La ganancia del controlador hace referencia a la sensibilidad del controlador, la cual determina cuánto se modifica la salida del controlador con un cierto cambio de error. Estos controladores tienen la ventaja de que solo cuentan con un parámetro de ajuste, la ganancia ( $K_c$ ), por lo que son los más fáciles de programar, sin embargo, tienen una gran desventaja, y es que operan con una desviación o error de estado estacionario en la variable que se controla, es decir, cuando el controlador estabiliza en el valor de la variable de control, no lo hace en el punto de control sino un poco por debajo o por encima de dicho valor. Entre mayor es el valor de  $K_c$ , el error en estado estacionario disminuye pero la respuesta se hace más oscilatoria.

**Controlador proporcional integral (PI):** La mayoría de los procesos se deben controlar en el punto de control, es decir, no permiten el error en estado estacionario, por ello, se le añade inteligencia al controlador proporcional, para eliminar la desviación, esta inteligencia se denomina acción integral o de reajuste. La siguiente ecuación describe el funcionamiento de este tipo de controlador<sup>59</sup>.

$$m(t) = \bar{m} \pm K_c(r(t) - c(t)) + \frac{K_c}{\tau_I} \int (r(t) - c(t)) dt \quad \text{ó}$$

$$m(t) = \bar{m} \pm K_c(r(t) - c(t)) + \frac{K_c}{\tau_I} \int (e(t)) dt$$

Donde  $\tau_I$  es el tiempo de integración o reajuste, minutos/repetición, el tiempo de integración es el tiempo que toma al controlador repetir la acción proporcional,

<sup>58</sup> SMITH, Carlos A, CORRIPIO, Armando B. Control automático de procesos. Teoría y práctica. Ed. Limusa. México. (2007).

<sup>59</sup> SMITH, Carlos A, CORRIPIO, Armando B. Control automático de procesos. Teoría y práctica. Ed. Limusa. México. (2007).

cuanto menor es el valor de este parámetro, la respuesta del controlador se hace más rápida. Mientras el error exista, el controlador continúa integrándolo y añade este valor a su salida hasta que el error desaparece.

La programación de este tipo de controladores es un poco más compleja que la del controlador P, debido a que cuenta con dos parámetros de ajuste: la ganancia del controlador  $K_c$  y el tiempo de integración  $\tau_I$ , su gran ventaja es que elimina el error en estado estacionario, lo que da como resultado un mejor control del proceso. Aproximadamente el 75% de los controladores en servicio son de este tipo.

**Controlador proporcional integral derivativo (PID):** Este controlador, añade un nuevo modo de control al controlador PI, la acción derivativa o rapidez de derivación, con esta acción es posible anticipar hacia dónde va el proceso, mediante la observación de la rapidez para el cambio del error, es decir, la derivada del error. La ecuación que describe su funcionamiento es la que sigue<sup>60</sup>:

$$m(t) = \bar{m} \pm K_c(e(t)) + \frac{K_c}{\tau_I} \int (e(t))dt + K_c\tau_D \frac{de(t)}{dt}$$

Donde  $\tau_D$  es la rapidez de derivación en minutos, la cantidad de anticipación se decide mediante el valor de  $\tau_D$ . Con esta acción se toma más tiempo para que el proceso llegue al punto de control, pero disminuye el sobrepaso y las oscilaciones alrededor del mismo. Su programación es más compleja pues tiene tres parámetros de ajuste,  $K_c$ ,  $\tau_I$  y  $\tau_D$ .

Estos controladores se usan en procesos donde las constantes de tiempo son largas, para control de temperatura y concentración, los procesos con constantes de tiempo cortas para control de flujo y temperatura, son rápidos y la acción derivativa amplifica el ruido en el proceso por esto los controladores PID no se recomiendan para estos procesos.

### Elección del controlador de flujo de aire

Teniendo en cuenta lo anterior, el controlador más apropiado para controlar el flujo de inyección de aire en el proceso que se estudia en el presente trabajo es un controlador proporcional integral (PI), pues es imperativo mantener estable el caudal de inyección de aire en el punto de control de 5 L/min debido a que es uno de los parámetros operacionales que tienen mayor influencia en un proceso de combustión, así que al no ser conveniente tener una desviación en estado estacionario se hace necesaria la acción integral en el controlador; un controlador PID no sería conveniente pues al ser un control de flujo, la respuesta del proceso

---

<sup>60</sup> SMITH, Carlos A, CORRIPIO, Armando B. Control automático de procesos. Teoría y práctica. Ed. Limusa. México. (2007).

es rápida y la acción derivativa genera ruido en el proceso haciendo que el control no sea satisfactorio.

### **Ajuste del controlador**

Para ajustar un controlador proporcional integral, se deben determinar dos parámetros, la ganancia del controlador y el tiempo de integración. Para ello se deben seguir los siguientes pasos<sup>61</sup>:

1. Determinar las características dinámicas o personalidad del proceso.
2. Determinar la ganancia última y el periodo último de oscilación. La ganancia última en un controlador corresponde a la ganancia para la cual el proceso se vuelve inestable, es decir, con este valor de ganancia o valores por encima de este, la variable controlada nunca se estabiliza en el punto de control; esto es lo que probablemente ocurrió en la prueba suministrada por el ICP, la ganancia del controlador utilizada hacía que el proceso fuese inestable. Estos parámetros se pueden calcular matemáticamente si se cuenta con las funciones de transferencia de todos los componentes del circuito de control, sin embargo, generalmente este no es el caso, así que se deben determinar de manera experimental a partir del sistema real de la siguiente manera:
  - a. Desconectar la acción integral del controlador, de manera que se vuelva un controlador proporcional
  - b. Con el controlador en automático, se incrementa la ganancia proporcional hasta que el circuito oscile con amplitud constante, el valor para la ganancia que produzca dicho comportamiento es la ganancia última. Este procedimiento se realiza alterando el sistema con la aplicación de pequeños cambios en el punto de control a cada cambio en el establecimiento de la ganancia.
  - c. Del registro del tiempo de la variable controlada se registra y mide el periodo de oscilación último ( $T_U$ ).
3. Mediante las correlaciones propuestas por Ziegler y Nichols para ajuste de tasa de asentamiento de un cuarto, que se basan en valores de campo que producen una respuesta rápida en la mayoría de los procesos industriales, se puede determinar la ganancia del controlador y el tiempo de integración ideales para que el controlador funcione correctamente. Estas correlaciones se muestran en la siguiente tabla.

---

<sup>61</sup> SMITH, Carlos A, CORRIPIO, Armando B. Control automático de procesos. Teoría y práctica. Ed. Limusa. México. (2007).

**Tabla 39.** Correlaciones para ajuste de tasa de asentamiento de un cuarto

Tipo de controlador	Ganancia proporcional $K_C$	Tiempo de integración $\tau_I$	Tiempo de derivación $\tau_D$
<b>Proporcional (P)</b>	$\frac{K_{CU}}{2}$		
<b>Proporcional integral (PI)</b>	$\frac{K_{CU}}{2.2}$	$\frac{T_U}{1.2}$	
<b>Proporcional integral derivativo (PID)</b>	$\frac{K_{CU}}{1.7}$	$\frac{T_U}{2}$	$\frac{T_U}{8}$

**Fuente:** SMITH, Carlos A, CORRIPIO, Armando B. Control automático de procesos. Teoría y práctica. Ed. Limusa. México. (2007).