



GRM

**CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA UN REACTOR A ESCALA DE
LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DE UN PROCESO DE COMBUSTIÓN IN
SITU COMO MÉTODO DE RECOBRO DE CRUDOS PESADOS**

JAIR FERNANDO FAJARDO ROJAS

ANDRES JAIR YATTE GARZÓN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA
2013**

**CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA UN REACTOR A ESCALA DE
LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DE UN PROCESO DE COMBUSTIÓN IN
SITU COMO MÉTODO DE RECOBRO DE CRUDOS PESADOS**

**JAIR FERNANDO FAJARDO ROJAS
ANDRES JAIR YATTE GARZÓN**

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

Director

**SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO
M. Sc. Ingeniería de Petróleos**

**M. Sc. Hernando Bottía Ramírez
Ing. María Carolina Ruíz Cañas
CO-DIRECTORES**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2013

DEDICATORIA

A Dios, sin su presencia y guía, este camino no hubiese sido lo maravilloso que fue y espero siga siendo.

A mi mamá, Hilda María, no tengo palabras para describirte ni para agradecer todo tu apoyo. Por siempre estar a mi lado no importa la distancia. Por dedicarnos tu vida a mí y a mis hermanas. Por ser esa guía que ilumina e iluminará siempre mi camino. Por ser cómplice de cuanto locura se me ocurre. Por quererme tanto y tan incondicionalmente. Por enseñarme tantas cosas de la vida. Por reír y llorar conmigo. Por ayudarme a soñar que todo esto podría ser realidad. Por creer en mí, bajo toda circunstancia y sin restricción, sin esa fuerza que me inspiras no sería quien soy. Por tantas trasnochadas cuidándome, por tantas madrugadas levantándome. Por tomarme de la mano y decirme como y hacia donde andar. Por existir. No hay palabra más grande que mamá... Gracias por ser MI MAMÁ.

A mi papá, José Efren, la sabiduría, la excelencia y la fortaleza en mi camino. Por entregarte a la familia como nadie. Por todas las noches que sin dormir pasamos buscando un mejor futuro. Por nunca rendirte, aunque el mundo entero se estuviera oponiendo. Por enseñarme el valor de la palabra, y lo que representa tener responsabilidad. Por estar a mi lado, como sombra fiel, siempre alerta para apoyarme, pero permitiéndome aprender de mis errores. Por hacerme saber que nunca estoy ni estaré solo. Por querernos tanto y darnos todo lo necesario y más... siempre ha sido más. Por el barro en tus botas, en nuestras botas. Por querer siempre ser mejor e inculcarme ese deseo de crecer. No creo que haya podido tener mejor fortuna que tenerte como papá. Gracias por ser MI PAPÁ.

A mi papá y mamá, que equipo más maravilloso. Por ser como son, amorosos y firmes. No obtendré mayor título que el de HIJO suyo.

A mi hermana, Alexandra Estefania, sincera y autentica. Por su inquebrantable firmeza, que me enseñó a que tener criterio en la vida es lo más importante. Por ser honesta cuando en el camino hay que parar y tomar aire nuevo. Por ser mi compañera de infancia, de juegos, de risas, de llantos, de huidas. Por enseñarme el valor de tener una hermana. Por siempre estar dispuesta a apoyarme aunque sea una causa perdida. Por hacerme siempre pedir permiso para salir. Por creer en mí. Por siempre tener una sonrisa y celebrar, o una palabra dulce y reconfortar. Por tener que aguantarme desde que nació, gracias FAFIS.

A mi hermana, Laura Daniela, dulce, el sol de la casa, la alegría interminable. Por ser esa personita que siempre tiene algo lindo que decir. Por ese abrazo cálido que siempre es necesario. Por la ternura que le hace falta a los días. Por la inocencia que siempre veré en ti. Por las cartas que en crayolas recibía mientras estaba en la Universidad, aún las guardo. Porque sé que el camino es largo y estarás siempre para mí. Por ser la menor, mi consentida. Por ser mi hermanita gracias PEQUE.

A Yatte, Jorge y Angela. Por permitirme crecer a su lado. Por tantos momentos de risa, perdón por tantos momentos de ira. Por todos esos momentos que grabados tengo en la mente y no se pueden comparar. Por tanta ridiculez junta y sensatez discontinua. Por seguir siendo mis amigos pese a todo. Siempre tendrán en mí un buen e incondicional amigo. Porque con ustedes aprendí que la vida no es tan seria como parece, aunque en serio parece. Porque todos los deseos se nos hagan realidad. Estamos juntos en el camino.

A Katherine. Sincera, tierna, cómplice... sin palabras. Por sonreír. Por estar ahí. Por hacer que todos los días sean un Bonito regalo, y no dejarme decaer. Por tener siempre una palabra honesta y ser apoyo en la alegría y la tristeza. Por protegerme del sol y otros peligros. Por ser como solo tú eres. Porque no importa el destino, cuentas conmigo. Repito,... sin palabras.

A todos los que han compartido todo o parte de este camino conmigo aportándome siempre sus buenos deseos y sonrisas, a Victor, Jimy, Luis Oliveros, Jorge Palma, Vivian, Ruddy, Elsa y muchos otros que se me escapan.

Al Grupo de Investigación de Recobro Mejorado, por cambiar mi vida para bien en todos los Sentidos. Por todas las personas que conocí y aprecio, el profesor Samuel, otra vez Luis, Jorge, Mariamo, Xiomara, Marcela, Jhon... A todos.

Jair Fernando Fajardo Rojas

DEDICATORIA

A Dios por guiarme en este camino y permitir cumplir con esta meta.

A mi papá, Jair Tobias por hacerme saber que siempre tengo tu apoyo en cada decisión que tome en mi vida. Por enseñarme con paciencia y sobre todo nobleza. Por todos los momentos compartidos y por darme un ejemplo de vida con tu fortaleza para querer vivir por tu familia. Por llegar y llevarnos, a tu familia, hasta este punto, donde a pesar de los problemas sabemos que siempre podremos contar el uno con el otro sin olvidar nunca de dónde venimos.

A mi mamá, Ana Isabel, por ser tan cariñosa y aguantarme tanto. Por todos esos momentos de risas y de peleas que hemos tenido. Por acompañarme durante toda mi educación y preocuparte por mí. Por hacerme saber que siempre estás ahí para lo que necesite y por ser tan fuerte en los momentos que debías serlo. A ustedes dos les debo todo lo que soy y lo que llegaré a ser, porque sin su comprensión y apoyo no podría estar en este punto de mi vida y me siento orgulloso de ser su hijo.

A mi hermano, Fabián Camilo, por siempre querer lo mejor para todos los que te rodean y particularmente para mí y para María Paula. Por ser tan generoso y colaborador en cada aspecto de mi vida. Por todo lo que me has enseñado, porque has sido el mejor maestro también para mí. Por darme unos estándares tan altos para seguir tus pasos y por ser esa persona que colocaba como mi héroe en los ensayos de español en el colegio.

A mi adorable hermanita, Maria Paula, por ser esa niña tan linda que se preocupa por mí y que con todo tu cariño me has apoyado siempre. Por darme tantas anécdotas para recordar y reír y también por todas las peleas que hemos tenido, porque a pesar de todo me doy cuenta de cuanto me quieres y de cuanto te quiero a ti, mi Pau. A toda mi familia, quiero que sepan que así como han estado para mí, siempre estaré para ustedes porque siempre tendremos esa unión familiar que nos reconforta en los momentos difíciles y que nos hacen llorar de la alegría el resto de tiempo.

A mis amigos, Fernando, Jorge y Ángela. Sin ustedes, la vida universitaria no habría sido tan divertida como lo fue. Gracias por tomarse tan pocas cosas en serio y por aliviar tanta presión y otras veces aumentarla. Por darme tantas historias ridículas que contar y otras que no deben ser mencionadas. Espero contar y que cuenten conmigo por un largo rato.

A todos mis amigos y compañeros que me acompañaron durante toda la universidad y fuera de ella: Laura Gonzalez, Jimy, Victor, Andrea, Luis Oliveros, Palma, Mariaca, Malú, Camito, Paula, Kathe y muchos más que me ayudaron cada uno a su manera.

Al Grupo de Recobro Mejorado (GRM) por permitirme entrar en este grupo de personas tan agradables y ayudarme con paciencia a entender conceptos que sentía un poco alejado de mi campo.

A todos y cada uno, muchas gracias por todos los buenos momentos.

Andrés J. Yatte Garzón

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander y a cada uno de los docentes por formarnos como las grandes personas y profesionales que logramos ser hoy.

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

A la Escuela de Ingeniería Química – UIS y todos sus profesores, por contribuir y compartir todo el conocimiento durante nuestra formación profesional.

Al Ingeniero Samuel Fernando Muñoz, el Ing. Luis Oliveros y la Ing. María Carolina por su confianza, y por regalarnos un espacio de su tiempo para compartir todos sus conocimientos durante desarrollo del proyecto y hacer de este un excelente trabajo.

Al Ing. Bottia por su orientación y colaboración en la dirección de nuestro trabajo.

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

A todos aquellos que de una u otra manera estuvieron pendientes y aportaron en este proyecto. Gracias. Infinitas gracias a todos.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	20
1. PRINCIPIOS DE LA COMBUSTIÓN IN SITU	22
2. PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN EXPERIMENTAL	25
2.1. ESTUDIO GENERAL DEL YACIMIENTO	26
2.2. PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS	26
3. DESARROLLO CONCEPTUAL DEL REACTOR	28
3.1. SISTEMA EXPERIMENTAL	29
3.1.1. MECANISMOS Y RETARDO DE LA IGNICIÓN	30
3.1.2. VELOCIDAD DEL FRENTE DE COMBUSTIÓN	33
3.1.3. CANTIDAD, TASA Y PRESION DE INYECCIÓN DE AIRE REQUERIDO	34
3.1.4. RELACIÓN AGUA-AIRE ÓPTIMA EN UN PROCESO DE COMBUSTION IN SITU	35
3.1.5. REGÍMENES DE REACCIÓN	35
3.1.6. COMBUSTIBLE QUEMADO POR UNIDAD DE VOLUMEN EN YACIMIENTO	36
3.1.7. TASA Y COMPOSICIÓN DE CRUDO, GAS Y AGUA DE PRODUCCIÓN	37
3.1.8. VOLUMEN DE YACIMIENTO BARRIDO POR LA ZONA DE COMBUSTIÓN	38
4. PLANTEAMIENTO DE LAS ECUACIONES DE BALANCE	42
4.1. BALANCE DE MASA	43
4.2. BALANCE DE ENERGÍA	44
CONCLUSIONES	45
RECOMENDACIONES	46
BIBLIOGRAFÍA	47
ANEXOS	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de las zonas apreciables en el avance del frente de combustión.....	22
Figura 2. Modelos necesarios para la simulación de procesos de combustión in situ.....	25
Figura 3. Representación conceptual de la Celda de Oxidación Isotérmica	39
Figura 4. Representación conceptual del RTO.....	40
Figura 5. Representación conceptual del Tubo de Combustión.....	41
Figura 6. Perfiles de temperatura del ensayo	65
Figura 7. Composición de los gases efluentes	65
Figura 8. Calculo de la velocidad de los frentes de combustión, vaporización y condensación	66

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Selección de equipos por parámetro a evaluar.	38
---	----

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Screening para la selección de yacimientos candidatos de CIS	51
Anexo B Preparación y caracterización de muestras	52
Anexo C. Diagrama de bloques para la evaluación experimental del proceso de inyección de aire.	54
Anexo D. Esquema básico de los subsistemas del sistema experimental (se omiten Sistema de Control y Sistema de Tratamiento)	55
Anexo E. Diagrama de flujo para el cálculo de los parámetros cinéticos mediante el método diferencial.	56
Anexo F. Características técnicas y planos de los reactores planteados en el trabajo de grado y en actual construcción.	57
Anexo G. Cálculo e interpretación de resultados	62

NOMENCLATURA UTILIZADA EN EL DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

r	Velocidad de reacción: Número de moles de O_2 reaccionando por segundo por unidad de volumen de reactivo en la formación. $mol . cm^{-3} . s^{-1}$
t	Tiempo. s^{-1}
m_o	Masa de aceite. gr
m_{O_2}	Masa de oxígeno, gr
M_{O_2}	Peso molecular del oxígeno, gr/mol
n	Orden de reacción para el oxígeno.
P_{O_2}	Presión parcial de oxígeno, atm
k_0	Factor pre-exponencial, $s^{-1} . atm^{-n}$
Ea/R	Termino de Activación, Energía de activación sobre la constante Universal de los Gases, $^{\circ}K$
T	Temperatura, $^{\circ}K$
T_R	Temperatura inicial del yacimiento, $^{\circ}K$
T_{amb}	Temperatura del entorno, $^{\circ}K$
K	Velocidad de reacción específica, $k_0 e^{\frac{-Ea}{RT}} P_{O_2}^n, gr \text{ de } O_2 . gr \text{ de Aceite}^{-1} . s^{-1}$
P	Presión, atm
V	Volumen, cm^{-3}
A_{transf}	Área de transferencia de calor entre el reactor y el entorno, cm^2
t_{ig}	Tiempo de ignición, s
$(\rho c)^*$	Capacidad calorífica equivalente por unidad de volumen en el medio poroso, se describe como: $(\rho c)^* = (1 - \phi)(\rho c)_r + \phi [(\rho c)_o S_o + (\rho c)_w S_w + (\rho c_p)_g S_g], kcal . cm^{-3} . ^{\circ}C^{-1}$
$(\rho c)_r$	Capacidad calorífica de la roca por unidad de volumen, $kcal . cm^{-3} . ^{\circ}C^{-1}$
$(\rho c)_o$	Capacidad calorífica del aceite por unidad de volumen, $kcal . cm^{-3} . ^{\circ}C^{-1}$
$(\rho c)_w$	Capacidad calorífica del agua por unidad de volumen, $kcal . cm^{-3} . ^{\circ}C^{-1}$
$(\rho c_p)_g$	Capacidad calorífica del agua por unidad de volumen de gas, $kcal . cm^{-3} . ^{\circ}C^{-1}$
S_o	Saturación de aceite
S_w	Saturación de agua
S_g	Saturación de gas
ϕ	Porosidad
ρ_o	Densidad del Aceite, gr/cm^{-3}
Q	Calor liberado, $kcal/mol \text{ de } O_2$

$P_{O_2}^0$	Presión parcial de oxígeno en el aire a presión de yacimiento, <i>atm</i>
q	Caudal de fluido a la entrada por unidad de área por unidad de tiempo, $cm^3.cm^{-2}.s^{-1}$
N	Concentración molar de oxígeno, $mol.cm^{-3}$
X_{O_2}	Fracción molar de oxígeno
U	Coefficiente de transferencia de calor, $J.s^{-1}.cm^{-2}.°K^{-1}$
ΔH	Calor de reacción, $J.mol^{-1}$

RESUMEN

TITULO: CRITERIOS DE SELECCIÓN PARA UN REACTOR A ESCALA DE LABORATORIO PARA EL ESTUDIO DE UN PROCESO DE COMBUSTIÓN IN SITU COMO MÉTODO DE RECOBRO DE CRUDOS PESADOS*.

AUTOR: JAIR FERNANDO FAJARDO ROJAS, ANDRÉS JAIR YATTE GARZÓN**

PALABRAS CLAVES: COMBUSTIÓN IN SITU, REACTOR, PARÁMETROS, REACCIÓN QUÍMICA, CINÉTICA QUÍMICA, DIFUSIÓN.

La Combustión In Situ es una técnica de recobro mejorado para crudos pesados que teóricamente ofrece un gran potencial para el aumento en el factor de recobro, sin embargo, su aplicación a escala de campo aún es reducida, existiendo hasta el momento un único proyecto piloto en operación en el país, alrededor de 22 proyectos piloto en todo el mundo y solamente 4 campos de operación comercial bajo la técnica. Esa baja aplicación es consecuencia de la complejidad del proceso químico y el bajo entendimiento de los fenómenos involucrados en el proceso.

Con el fin de contribuir al entendimiento de la Combustión In Situ, este trabajo de grado presenta el diseño de un reactor, que permita la evaluación de parámetros cinéticos y de desempeño asociados al proceso. De esta manera se podrá evaluar y explicar el proceso que podría suceder en el yacimiento, y evaluar modelos que permitan obtener parámetros operacionales del proceso.

En el desarrollo de este trabajo de grado se plantean los criterios de selección más relevantes en el estudio y diseño de un reactor que permita evaluar el fenómeno a nivel de laboratorio y a su vez obtener las bases de diseño para la aplicación del proceso a nivel de campo.

*Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Química. Ingeniería Química.
Director: M. Sc., M. E. Samuel Fernando Muñoz Navarro

ABSTRACT

TITLE: DESIGN OF A LABORATORY SCALE REACTOR FOR THE IN SITU COMBUSTION STUDY AS A RECOVERY METHOD FOR HEAVY OIL*.

AUTHORS: JAIR FERNANDO FAJARDO ROJAS, ANDRÉS JAIR YATTE GARZÓN*

KEYS WORDS: IN SITU COMBUSTION, REACTOR, PARAMETERS, CHEMICAL REACTION, CHEMICAL KINETIC, DIFUTION.

The In Situ Combustión is an enhanced oil recovery technique for heavy oil that offers a great potential in the recovery factor increase, however, its application in a field scale still in a small amount. Currently, Colombia has only one pilot project in operation, 22 around the world and only 4 commercial active fields with the application of the technique. This low application is a consequence of the complex of the chemical process and the low understanding of the physical phenomena.

This work presents the design of a reactor in order to contribute to the understanding of the In Situ Combustion. This reactor allows the kinetic and performance parameters evaluation of the process. In this way the industry could evaluate and explain the process on the reservoir, and evaluate the parameters in the operation of the technique.

This thesis shows the most important criteria selection to a design of a reactor that allows the evaluation of the phenomena at laboratory scale and the determination of the bases of design for the application of the process at field scale.

*Graduate Project.

+*Physico-Chemical Engineering Faculty, School of Petroleum Engineering.
Tutor: M. Sc., M. E. Samuel Fernando Muñoz Navarro

INTRODUCCIÓN

Actualmente en el mundo, 64 % de las reservas existentes son de crudos pesados¹, los cuales no son de fácil extracción por métodos convencionales. Con el fin de explotar estos yacimientos se han desarrollado técnicas de recobro mejorado con diferentes mecanismos de desplazamiento; por empuje de fluidos miscibles e inmiscibles, reducción de la viscosidad por aumento de la temperatura, reducción de la tensión superficial por métodos químicos, etc. Entre estas técnicas, se encuentra la combustión in situ (CIS), que es conocida como un método térmico puesto que se basa en la transferencia de energía en forma de calor para disminuir la viscosidad y la densidad del crudo pesado que se desea extraer del yacimiento.

En el periodo de tiempo que transcurrió entre el descubrimiento accidental de la CIS en las primeras décadas del siglo veinte y la década de los 80's, la técnica no tuvo gran acogida en la industria debido a proyectos que terminaron en fracasos debido a la falta de profundización en su estudio. Como consecuencia, se le restó importancia y no se investigó mucho más. Sin embargo, gracias al esfuerzo de países como Canadá, desde hace 30 años, la industria está interesándose de nuevo en la CIS. Esto se debe a los grandes aportes de investigadores que muestran que si se realiza el estudio adecuado, la técnica puede ser aplicada en campo con mayor éxito que otros métodos de recobro térmico.

Antes de llevar a cabo un proyecto de CIS en un yacimiento se debe realizar un arduo estudio que comprende una etapa de pruebas a nivel de laboratorio con el fin de predecir el comportamiento del proceso y evaluar su viabilidad. Los parámetros obtenidos por medio de las pruebas experimentales se utilizan finalmente para escalar el proceso a escala de campo, lo cual permite realizar predicciones de cuanto aceite se producirá con la técnica, los requerimientos de

¹ Carta Petrolera. Ed. 114 Abril-Mayo de 2003. ECOPETROL S.A. Disponible en: http://www.ecopetrol.com.co/especiales/informe_carta_abr2006/rev_invitado2.htm [Consultado 10 de abril de 2013]

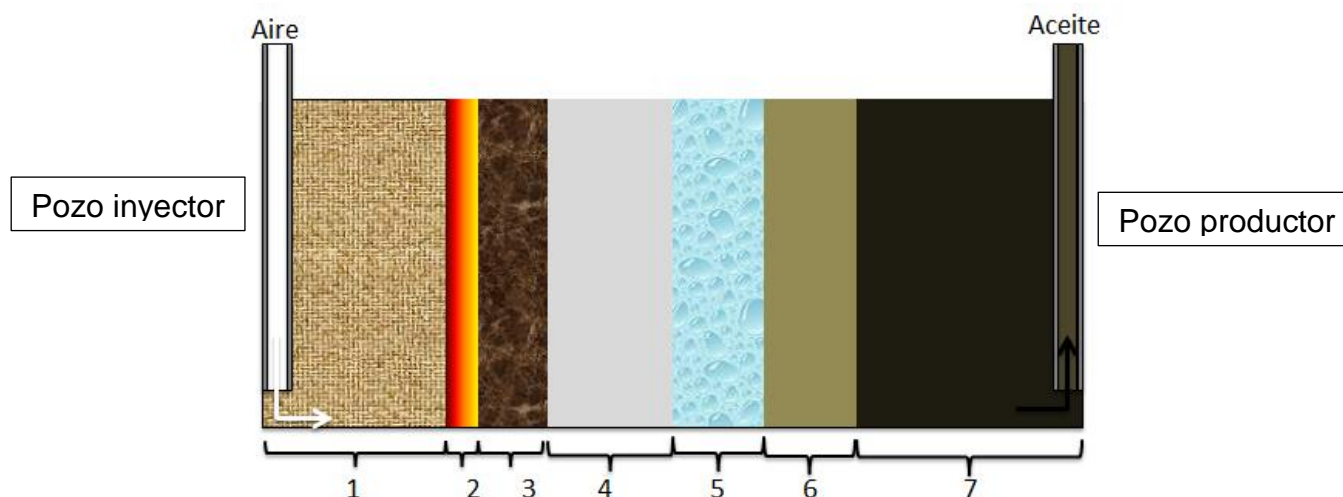
aire y agua, qué temperaturas se alcanzan, cuanto gas y de qué composición se produce, qué tipo de patrón de pozos se deben utilizar, etc. para finalmente saber cuál será la ganancia de aplicar este método sobre un campo determinado y diseñar las facilidades de campo para la inyección, producción y tratamiento de fluidos producidos en un marco de regulación ambiental. De allí la importancia de obtener parámetros acertados que representen el proceso y para esto, se debe tener un procedimiento experimental y equipos adecuados para la lectura y análisis de los datos.

En este trabajo de grado se busca seleccionar las características necesarias con las que debe contar un equipo que permita determinar parámetros para la evaluación de procesos de combustión in situ.

1. PRINCIPIOS DE LA COMBUSTIÓN IN SITU

La combustión in situ es una técnica de recobro de crudos pesados. Se trata de la inyección de un gas rico en oxígeno por medio de un pozo inyector, usualmente aire, al yacimiento con el fin de generar reacciones, en su mayoría exotérmicas, creando un frente de combustión que se propaga por el yacimiento. Esto permite la liberación de grandes cantidades de calor que aumenta la temperatura y la presión del yacimiento, lo cual reduce la viscosidad y densidad del aceite mejorando su movilidad. Una vez desarrollado el frente, los gases calientes producto de la combustión y el vapor de agua, transfieren calor al petróleo original destilando la fracción más liviana, a la vez que generan un empuje del aceite hacia los pozos productores. En el desarrollo del proceso se pueden ver en 7 diferentes zonas en el yacimiento (Figura 1):

Figura 1. Esquema de las zonas apreciables en el avance del frente de combustión.



Fuente: Modificado de SARATHI, Partha. In Situ Combustion Handbook – Principles and Practices. Oklahoma, 1995.

1. Zona quemada, por donde ya pasó el frente de combustión
2. Zona de Combustión, donde ocurren las reacciones de oxidación a altas temperaturas.

3. Zona de craqueo y vaporización, donde se desarrollan reacciones de producción de coque como combustible de la combustión y vapor.
4. Zona de condensación, donde el vapor de agua producto de la combustión y los destilados intercambian calor con los fluidos de yacimientos y se condensan.
5. Banco de agua, donde se acumula el vapor de agua condensado.
6. Banco de aceite, en el cual se ha reducido viscosidad y densidad por el calor intercambiado con el liberado del frente de combustión.
7. Zona nativa, donde aún no ha tenido efecto la combustión.

En algunos casos, la inyección de aire se complementa, continua o alternadamente, con vapor de agua. De esta forma el calor es transportado por el yacimiento más fácilmente debido a que el agua cuenta con una mayor capacidad calorífica que los gases de combustión.

Entre los métodos de recobro mejorado, la CIS es uno de los más complejos debido a la gran cantidad de fenómenos físico-químicos involucrados. Entre los fenómenos más relevante tenemos los cambios de fase, la transferencia de masa y calor, y los cientos de reacciones de adición de oxígeno, transferencia de hidrógeno, rompimiento térmico y combustión que se llevan a cabo secuencial o simultáneamente. Con el fin de simplificar el estudio de las reacciones involucradas en el proceso, se ha determinado experimentalmente que las reacciones pueden ser agrupada entres regímenes de acuerdo a la temperatura en la cual se desarrollan:

- Oxidación a bajas temperaturas, reacciones de adición o Low Temperature Oxidation (LTO por sus siglas en inglés): Son reacciones exotérmicas y usualmente ocurren a temperaturas inferiores a 200 °C y se trata de la adición de átomos de oxígeno a las moléculas de hidrocarburos para formar cetonas, ácidos carboxílicos, aldehídos, alcoholes e hidroperóxidos. Si las LTO se mantienen durante un gran periodo de tiempo puede causar efectos

negativos en la técnica CIS al aumentar la viscosidad, densidad, punto de ebullición del crudo, oponiéndose al objetivo de la técnica².

- Pirólisis: Son reacciones endotérmicas y también son las principales responsables de la deposición del combustible de la técnica, el coque. Generalmente ocurren en un rango de temperatura entre 200 °C y 315 °C. Jia³ propone un modelo de reacción partiendo de que el crudo está compuesto por dos componentes en una emulsión; los maltenos como fase dispersante y los asfaltenos como fase dispersa. En la pirólisis se producen asfaltenos hasta que llega un punto de saturación y aquellos no disueltos se precipitan y al contacto con una superficie se transforman en coque.
- Oxidación a altas temperaturas, reacciones de rompimiento o High Temperature Oxidation (HTO por sus siglas en inglés): Son reacciones de combustión de coque⁴ y las encargadas de liberar la energía necesaria para la reducción de la viscosidad y densidad del aceite para su desplazamiento y finalmente, su producción. Ocurren a temperaturas superiores a 315 °C.

La velocidad de reacción en el proceso de CIS se puede ver controlado por dos factores⁵: la difusión del oxígeno de la corriente gaseosa a la superficie de combustible o la cinética de las reacciones químicas, dependiendo de cuál ocurra más lentamente. Por lo tanto, al estudiar la cinética intrínseca se deben minimizar los efectos de difusión y dispersión para evitar interferencias en los resultados. Mientras que para el estudio de factores operacionales del proceso, se deben tener en cuenta todos los fenómenos que ocurren a nivel del subsuelo, que incluyen la hidrodinámica y la cinética de las reacciones.

² B. SEQUERA, R. G. MOORE, S. A. MEHTA, M. G. URSENBACH. Numerical Simulation of In Situ Combustion Experiments Operated Under Low Temperature Conditions. University of Calgary. 2007.

³ N. JIA, R. G. MOORE, S. A. MEHTA, M. G. URSENBACH. Kinetic Modelling of Thermal Cracking and Low Temperature Oxidation Reactions. University of Calgary. 2006.

⁴ J. D. BELGRAVE, R. G. MOORE. A Comprehensive Approach to In Situ Combustion Modeling. SPE 20250. 2000.

⁵ J. STIPANOV. A Kinetic Model of the Hydrocarbon Fraction Reactions During the Low-and High-Temperature Oxidation of Athabasca Bitumen. University of Calgary. 1999.

2. PROCEDIMIENTO DE EVALUACIÓN EXPERIMENTAL

En el momento de implementar un proceso CIS es necesario conocer con anterioridad el comportamiento del yacimiento bajo los efectos de la inyección de aire. Para esto se utilizan pruebas de laboratorio, modelos analíticos y simulación con software especializado en recobro mejorado (Eclipse, STARS). La CIS presenta una gran diferencia con respecto a otros métodos de recobro; presenta transformaciones químicas, no solo fenómenos físicos. Por esta razón, se debe determinar experimentalmente el efecto de las reacciones de oxidación/pirolisis/combustión en un sistema roca/aceite representativo del yacimiento bajo estudio. Estas mediciones pueden también utilizarse para formular el modelo cinético que se debe adicionar al modelo de simulación de yacimiento (modelo estático - dinámico) para estudiar el desempeño del proceso a nivel de campo cuando se utiliza la simulación numérica como herramienta.

Figura 2. Modelos necesarios para la simulación de procesos de combustión in situ.



Para que los parámetros que conforman el modelo cinético y otros parámetros de desempeño de los modelos analíticos resulten representativos del proceso real en campo, deben ser evaluados por medio de pruebas de laboratorio a condiciones semejantes a las del yacimiento. Sin embargo estas pruebas no son escalables. En tal caso debe realizarse proceso de ajuste a escala de campo por medio de procedimientos analíticos⁶ o numéricos⁷.

⁶ NELSON, T. W & MCNEIL, J.S, "How to Engineer an In Situ Combustion Project", The Oil and Gas Journal, June 5, 1961. P 58

El desarrollo de las pruebas de laboratorio mencionadas requiere de equipos y metodologías capaces de suministrar la totalidad de la información necesaria para el estudio del proceso. En este trabajo se estudiaron las características de los equipos, y las condiciones a las cuales deben realizarse pruebas experimentales que genere la información necesaria para el análisis completo de un proceso de combustión in situ que permita la implementación del proceso a nivel de campo de forma exitosa.

2.1. ESTUDIO GENERAL DEL YACIMIENTO

La CIS es una de los métodos de recobro térmico más eficientes a escala de laboratorio⁸. Sin embargo, no es adecuada su aplicación en cualquier campo. Los criterios de selección preliminar (Screening) que hacen a un yacimiento candidato para la aplicación de la inyección de aire se encuentran en el Anexo 1. Los yacimientos que aprueban los criterios de screening pueden pasar a una segunda fase de estudio experimental para evaluar su viabilidad técnica.

2.2. PREPARACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MUESTRAS

En esta etapa el aceite, la roca y el agua son preparados y caracterizados por aparte, donde cada uno pasa por diferentes procesos. Sin embargo, este procedimiento no es fundamental en el desarrollo de este trabajo de grado, por lo cual se encuentra en el Anexo 2.

⁷ ALI, F. Multiphase, Multidimensional Simulation of In Situ Combustion. University of Pennsylvania. SPE 6896. 1977. 11 p.

⁸ RAMEY Jr. HENRY. IN-SITU COMBUSTION. Stanford University, Stanford, California, U.S.A. WPC.1971.

El siguiente paso es llevar a cabo las pruebas y la evaluación de sus resultados. A continuación se describe el análisis que llevó a determinar las características físicas de los reactores y sistemas utilizados.

3. DESARROLLO CONCEPTUAL DEL REACTOR

La CIS combina fenómenos físicos y químicos, por lo cual es un proceso de análisis altamente complejo. Al evaluar la viabilidad de un proyecto CIS se debe realizar el estudio a escala laboratorio bajo condiciones de yacimiento con el fin de predecir su comportamiento y así reducir los riesgos técnicos y económicos, controlar la seguridad del personal y los impactos ambientales.

Antes de la implementación de la inyección de aire en campo es de gran importancia tener un buen conocimiento de los fenómenos que se presentan a nivel de subsuelo cuando el oxígeno reacciona con el aceite en la matriz de arena presente en el yacimiento. Para esto es necesario realizar pruebas experimentales que permiten determinar las bases de diseño necesarias para desarrollar las ingenierías de las facilidades de superficie y equipos de subsuelo, diseñar el mecanismo de ignición y monitoreo del proceso, realizar las evaluaciones económicas y tomar decisiones para optimizar el proceso (Anexo 3).

Debido a la complejidad del proceso no existe una prueba simple que pueda proveer un entendimiento adecuado del comportamiento de oxidación del sistema roca-aceite y al mismo tiempo suministre información del desempeño del recobro esperado del proceso de combustión cuando se aplica a un yacimiento en particular. Para lo anterior es necesario determinar información como:

- Mecanismo y retardo de la ignición
- Velocidad del frente de combustión
- Cantidad, tasas y presiones de inyección de aire requerido.
- Relación agua-aire óptima en un proceso de combustión húmeda.
- Perfiles de temperatura.
- Combustible quemado por unidad de volumen de yacimiento.
- Tasa y composición de crudo y gas de producción.
- El volumen de yacimiento barrido por la zona de combustión.

Con el fin de obtener los parámetros necesarios en el estudio de un proceso de combustión in situ anteriormente expuestos, se desarrolló un análisis que permitió establecer las bases de diseño de los equipos de laboratorio necesarios para dar respuesta a las necesidades del proceso. Éste se presenta a continuación.

3.1. SISTEMA EXPERIMENTAL

En el inicio de este capítulo se presentaron las principales variables que se deben conocer para el estudio de procesos de combustión in situ. El principal propósito de este trabajo es definir la configuración y condiciones de operación de los equipos experimentales para generar la información que permitan determinar los parámetros de diseño de un proceso en campo. Con este objetivo en mente, se evaluaron las características y necesidades técnicas para determinar parámetros cinéticos, de ignición y desempeño del proceso.

Con el fin de realizar pruebas que permitan la obtención de los parámetros para la evaluación del proyecto anteriormente mencionados en este capítulo, se plantea un sistema experimental que consta de cuatro partes principales: la inyección de fluidos, el reactor o sistema reactivo, el sistema de recolección de fluidos, y el sistema de medición de monitoreo y control (Anexo 4).

La primera parte consiste en la inyección de dos gases independientemente; un gas inerte que puede ser helio o nitrógeno para purgar el sistema y presurizar el reactor inicialmente, y aire u otro gas con alto contenido de oxígeno que se hace pasar una vez alcanzada la presión deseada. Una vez terminada la prueba, se vuelve a hacer pasar el gas inerte por el sistema para purgarlo y enfriarlo.

El sistema de recolección de fluidos se puede dividir en dos sistemas; el de producción de fluidos y el de análisis de gases. En el primero, los fluidos producidos pasan por un separador de dos etapas, donde se separan los gases de

los líquidos y en el aceite del agua. En el segundo sistema, el gas pasa por un condensador para recuperar cualquier volumen de líquido remanente y la parte que no se condensa pasa al cromatógrafo para su análisis.

El sistema de control y monitoreo debe permitir registrar datos como tiempo temperatura, tasa de inyección de gases, tasa de producción y concentración. El sistema debe permitir controlar el equipo para activar, desactivar o graduar la temperatura y presión de reacción del sistema y/o el flujo de inyección en el sistema.

A continuación, se presentan las consideraciones necesarias para obtener cada parámetro de una manera confiable con el fin de diseñar el sistema reactivo.

3.1.1. MECANISMOS Y RETARDO DE LA IGNICIÓN

La ignición es un parámetro de diseño importante, pues es necesario saber si esta ocurre espontáneamente o requiere ser inducida, además de la distancia a la que ocurre del pozo inyector. El tiempo que toma la ignición en tener lugar, se representa matemáticamente como sigue⁹:

$$t_{Ig} = \frac{(\rho c) * T_R \left(1 + \left(2R * \frac{T_R}{Ea} \right) \right)}{\Phi \rho_o S_o Q k_o * (P_{O_2}^0)^n * \frac{Ea}{(R T_R M_{O_2})}} * e^{\frac{Ea}{R T_R}}$$

En la ecuación se evidencia la necesidad de conocer de la energía de activación, el orden de reacción y del factor de frecuencia para el cálculo del tiempo de ignición.

⁹TADEMA, J. WEIJDEMA. Spontaneous Ignition of Oil Sands. Oil and Gas. J. (Dec. 14, 1970) Vol. 68, No. 50, 77-80.

Para calcular estos parámetros conocidos como parámetros cinéticos, existen diferentes métodos, en el presente trabajo de grado se tomó el denominado método diferencial que se explica a continuación.

3.1.1.1. Método Diferencial

El método diferencial requiere un modelo estequiométrico y cinético base, para desarrollar una optimización (Anexo 5) de los parámetros cinéticos. Para la combustión in situ se encuentra una expresión de velocidad de reacción ampliamente utilizada¹⁰, donde el orden de reacción se supone como uno debido a que la masa de aceite quemado es muy inferior respecto a la masa inicial:

$$r = \frac{\Delta m_{O_2}}{m_o \Delta t} = k P_{O_2}^n = k_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) P_{O_2}^n ; n = 1$$

Por otra parte, para el caso en particular de los estudios a nivel de laboratorio CIS se tiene una expresión para la velocidad de reacción en función de la temperatura, la presión, el volumen de reacción, el tiempo y las masas de oxígeno y de aceite¹¹.

$$r = \frac{P * V * \Delta[O_2] M_{O_2}}{2 R t * m_{oil}} \frac{1}{T}$$

Igualando ambas expresiones se obtiene una forma de calcular la constante de Arrhenius a partir de datos de tiempo, temperatura y composición de gases a la salida, siendo el resto de términos constantes tal que:

$$K = \frac{P * V * \Delta[O_2] M_{O_2}}{2 C_{O_2} R t * m_{oil}} \frac{1}{T}$$

¹⁰BURGER, J. SORIEAU P. Spontaneous Ignition in Oil Reservoirs. Institut Francais du Pétrole. Reuil-Malmaison, France. 1976. 6 p.

¹¹ C. GADELLE. In Situ Combustion, Experimental Design and Test Procedures. Curso con intensidad horaria de 40 horas. Patrocinado por: Ecopetrol, Xytel, Ecopetrol-Gravity Stable Air Injection. Diciembre 2012.

Así, teniendo valores de la constante de Arrhenius para diferentes temperaturas se obtienen valores para la energía de activación y el factor de frecuencia al graficar la ecuación linealizada de la velocidad de reacción:

$$\ln K = \ln k_0 - \left(\frac{E_a}{R}\right) \left(\frac{1}{T}\right)$$

De la regresión lineal de los datos obtenidos en la prueba de análisis de efluente de gases, se obtiene una recta donde de la pendiente se obtiene la energía de activación y del corte con el eje de ordenadas, el factor de frecuencia. Si los datos no muestran una tendencia lineal, quiere decir que el proceso está siendo controlado por la difusión y no por la cinética. No obstante, generalmente en un medio poroso, el aceite se encuentra disperso en todo el volumen, con lo cual la velocidad de difusión del oxígeno en el medio poroso es muy alta con respecto a la cinética, controlando esta última el proceso¹².

Para tener valores de energía de activación y factor de frecuencia lo más cercanos posible a la realidad, es necesario el aislamiento de las variables a medir, de las perturbaciones externas. Con la revisión del método anteriormente presentado, se encontró que el equipo adecuado debe ser operado isotérmica e isobáricamente con el fin de minimizar el número de variables involucradas en la cinética del proceso. También debe obtener datos representativos de concentración de los gases producidos en la prueba, para esto es necesario contar con un reactor discontinuo.

El modo de operación discontinuo permite la retención de los gases producidos hasta que estos alcancen una concentración que será fácilmente registrada por el equipo de medición de composición de gases. De esta manera en el equipo se deben realizar varias corridas a diferentes temperaturas, manteniendo una condición isotérmica e isobárica en cada una y un mismo tiempo de residencia.

¹² BURGER, J. SORIEAU P. Chemical Aspects of In Situ Combustion – Heat of Combustion and Kinetics. Institut Francais du Pétrole. Reuil-Malmaison, France. 1972. 13 p.

Con lo cual se obtendrán parejas de datos de temperatura y velocidad de reacción que permita evaluar la mencionada gráfica. Se debe asegurar que la velocidad del proceso sea controlada por la cinética, para esto se necesita trabajar con una baja saturación de aceite en el medio que permita la rápida difusión del material oxidante y un contacto casi instantáneo de los reactivos.

Para controlar y medir las variables mencionadas, se realizan otras consideraciones en el diseño del equipo; debe contar con una termocupla y una chaqueta que permita mantener la condición isotérmica en cada corrida. Un lazo de control para la temperatura. También debe contar con un lazo de control de presión y válvulas que permitan o impidan el paso de fluidos desde o hacia el exterior mientras está en operación.

3.1.2. VELOCIDAD DEL FRENTE DE COMBUSTIÓN

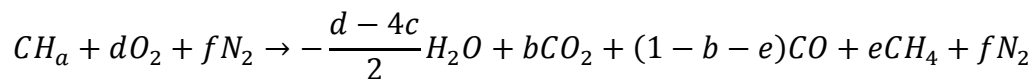
La velocidad con la que se mueve el frente permite conocer tiempos estimados de su sostenibilidad y vida útil del proyecto, dado que la velocidad del frente depende del flujo del aire. Para poder evaluar este parámetro es necesario ver la afectación de fenómenos químicos e hidrodinámicos, además de un sistema lo suficientemente largo como para garantizar la movilización del frente y la evaluación de la rapidez en su desplazamiento. Además, la velocidad del frente de combustión depende del flujo del material oxidante por lo que se hace necesaria una operación continua con respecto a la inyección de este material.

El equipo debe medir el tiempo de la prueba y contar con un sistema de termocuplas equidistantes que permitan registrar parejas de datos de temperatura y tiempo (Anexo 7).

3.1.3. CANTIDAD, TASA Y PRESION DE INYECCIÓN DE AIRE REQUERIDO

Para evaluar las necesidades operacionales de material oxidante es necesario representar lo más cercano a la realidad los procesos en el laboratorio, puesto que las reacciones químicas y el proceso no son escalables, dado que dependen directamente de las temperaturas y presiones de operación, además de las interacciones roca-fluido. Por esta razón no es necesario tener restricciones sobre fenómenos difusionales o químicos que ocurren en el proceso.

Para evaluar la cantidad de material oxidante necesario se plantean relaciones estequiométricas basadas en el modelo de HTO¹³, que permiten conocer la cantidad de aire requerido por unidad de combustible quemado.



La tasa de inyección está directamente relacionada con el avance del frente de combustión. Al multiplicar la velocidad del frente de combustión por el área de interés se obtiene la tasa de inyección¹⁴.

$$Tasa\ de\ Iny = A * Vel.\ Frente [Pies\ Cubicos\ Estandar / dias]$$

En cuanto a la presión dependerá del yacimiento objeto de estudio, la presión de inyección debe ser mayor que la del yacimiento para garantizar flujo del material oxidante hacia el yacimiento, pero menor que la de fractura. La determinación de este parámetro se realiza a escala de campo con una prueba de inyectividad.

¹³THOMAS, F.B; R. G Moore, D. W. BENNION Kinetic Parameters for the High-Temperature Oxidation of in situ combustion. HycalEnergyResearchLaboratoriesLtdUniversity of Calgary. 1985.

¹⁴OLIVEROS, L. R. Determinación de Parámetros de Diseño y Evaluación Técnica de Procesos de Combustión In-Situ A Partir de Pruebas de Tubo de Combustión. 2011. 180 p.

3.1.4. RELACIÓN AGUA-AIRE ÓPTIMA EN UN PROCESO DE COMBUSTION HÚMEDA

Se han realizado estudios sobre los efectos de la inyección de agua en conjunto con proceso de combustión in situ¹⁵, y muestran un mejor comportamiento del proceso en la transferencia de calor a las zonas más alejadas del frente, dada la capacidad calorífica del agua. Estimar la relación óptima de esta tasa es un proceso que requiere la estabilización del frente y la posterior inyección del agua. Esta relación debe ser tan grande como sea posible sin que ahogue el frente de combustión.

Teniendo esto en cuenta el equipo que permita evaluar este parámetro debe tener una longitud lo suficientemente grande como para permitir la estabilización del frente de combustión, y el posterior análisis de la tasa de agua. Es un proceso operacional, que debe ser representado de la manera más cercana al proceso real, por lo que no se deben hacer consideraciones que eviten el fenómeno físico o químico del proceso. Debe ser un sistema que garantice un trabajo continuo del mismo, pues es éste el comportamiento que en escala de campo tendrá el proceso.

El equipo debe contar con lectores y controladores de flujo que permitan establecer la relación entre la tasa de aire inyectada y el agua adicionada al proceso. También requiere de termocuplas que permitan evaluar la estabilidad del frente de combustión.

3.1.5. REGÍMENES DE REACCIÓN

En el estudio de procesos de combustión in situ es necesario conocer la distribución de los regímenes de reacción y la influencia que los compuestos

¹⁵PARRISH, D. R *et al*, "Laboratory study of a combination of forward combustion and Waterflooding, the COFCAW process", SPE 2209. 1969

presentes en la roca pueden tener sobre el comportamiento químico del proceso. Al determinar esta influencia se puede saber si es necesario trabajar con roca original del yacimiento de estudio o arenas sintéticas, las cuales reducirían costos en el procedimiento.

Con el fin de conocer los regímenes de reacción del proceso, se debe contar con un sistema que represente el yacimiento químicamente minimizando los efectos difusionales del proceso. A su vez, debe contar con la posibilidad de medir la variación en la temperatura, tanto en la posición como en el tiempo en una extensión considerable para evidenciar la afectación de heterogeneidades del yacimiento y la presencia de diferentes compuestos en el medio poroso. Además, debe ser un sistema que minimice el intercambio de calor con el exterior mediante el uso de calentadores, llevando el sistema a una condición cercana a la adiabática.

El reactor también requiere un sistema de termocuplas a lo largo del equipo que permita evaluar la temperatura en el tiempo. Para minimizar los efectos difusionales en la zona de interés se añade un volumen de arena gruesa que permita garantizar un flujo tipo pistón del material oxidante hacia la zona reactiva y así eliminar la dispersión radial en ésta. El equipo debe operar de forma continua como lo haría la técnica a escala de campo.

3.1.6. COMBUSTIBLE QUEMADO POR UNIDAD DE VOLUMEN EN YACIMIENTO

El combustible quemado es teóricamente la cantidad de combustible que se consume en el proceso HTO por unidad de volumen de roca. Mediante relaciones estequiométricas es posible relacionar esta cantidad con la producción de óxidos de carbono en los gases de combustión¹⁶, por lo cual se requiere que la carga (mezcla roca/aceite) del sistema reaccionante contenga la cantidad adecuada de

¹⁶OLIVEROS, L. R. op. cit. 180 p.

hidrocarburo que permita generar suficientes gases de combustión que puedan ser analizados por el instrumento de análisis de gases (infra rojo, cromatógrafo entre otros). Para estimar este parámetro no se deben restringir fenómenos hidrodinámicos o químicos en el equipo.

3.1.7. TASA Y COMPOSICIÓN DE CRUDO, GAS Y AGUA DE PRODUCCIÓN

Las composiciones de crudo y gas en producción en pruebas experimentales permiten conocer los diferentes compuestos que están presentes en el proceso. Con esta información es posible plantear y validar modelos cinéticos que expliquen el desarrollo del proceso. Además, conocer la tasa y composición de los fluidos de producción permite evaluar la economía del proceso a nivel de campo. Lo anterior debido a que la composición y volumen de fluidos producidos permiten dimensionar las facilidades de superficie y los equipos de subsuelo, así como seleccionar los procesos de acondicionamiento y tratamiento para el gas, crudo y agua de producción.

Durante la evaluación experimental del proceso de combustión in situ es necesario que el equipo cuente con la instrumentación que permita evaluar concentraciones de los diferentes compuestos que se producen por las reacciones de oxidación/combustión del sistema roca/aceite. Para este fin, el medio poroso debe contener la saturación de crudo y agua necesaria para la recopilación de suficiente cantidad de muestras a diferentes intervalos de tiempos para su caracterización. Además el equipo debe contar con la instrumentación para la medición de la masa, caudal y volumen total de fluido producidos en el tiempo. De acuerdo a lo anterior, el equipo debe operar de manera continua durante el desarrollo del experimento.

3.1.8. VOLUMEN DE YACIMIENTO BARRIDO POR LA ZONA DE COMBUSTIÓN

Uno de los parámetros que permite evaluar la efectividad del proceso es el volumen barrido. Es necesario evaluar este parámetro basado en un volumen inicial saturado que es sometido a un proceso CIS, se evalúa visualmente el sistema roca-fluido y se establece la porción de ese volumen de control barrida por la técnica.

Es necesario contar con un volumen considerable que permita hacer una buena aproximación en la cantidad de volumen barrido. Debe garantizar que el proceso se hizo lo más cercano a la realidad posible, bajo condiciones de operación propias del proceso y en un sistema continuo como sucedería en campo. Afectaciones hidrodinámicas o químicas en la evaluación de este parámetro no tienen mayor influencia, con lo cual no son necesarias restricciones en este sentido.

A continuación se presenta una tabla resumiendo las principales características que debe tener los equipos para la búsqueda de cada parámetro. A partir de esta se deduce que un solo reactor no cuenta con todas las características necesarias puesto que algunas son excluyentes entre sí y otras no lo son.

Tabla 1. Selección de equipos por parámetro a evaluar.

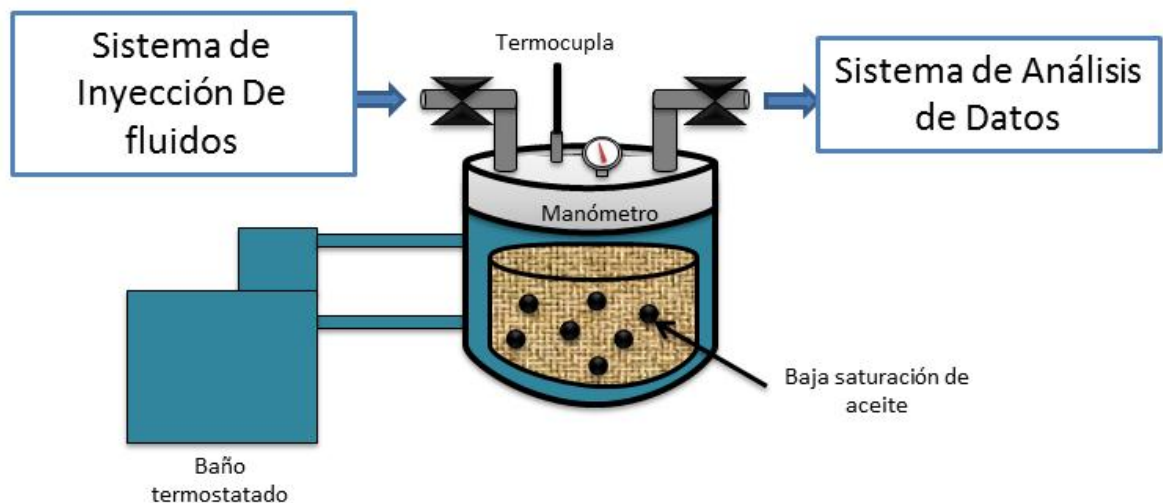
	Minimización Difusión	Adiabático	Isotérmico e Isobárico	Alta saturación de crudo	Longitud considerable	Continuo	Discontinuo	Evitar segregación gravitacional	Reactor
Ignición									Reactor 1
Perfiles de Temperatura									Reactor 2
Velocidad del frente									Reactor 3
Cant. Tasa y Presión de Inyección									
Agua-Aire Óptima									
Combustible Quemado por Volumen									
Tasa y composición de crudo y gas producido									
Volumen Barrido									

Fuente: Autores.

Por tal razón, son necesarios tres reactores con diferentes consideraciones físicas:

- Un reactor discontinuo de operación isotérmica con medidores de presión, temperatura, válvulas que impidan la entrada y salida de fluidos durante la prueba, una chaqueta para el control de la temperatura en donde se realicen diferentes pruebas con diferentes medios: aceite-aire-roca-salmuera, aire-aceite-roca, aire-aceite. Este reactor es una Celda de Oxidación Isotérmica. En este se obtienen los parámetros cinéticos, los cuales permitirán el cálculo del tiempo y la distancia de ignición además de llegar a conocer su mecanismo.

Figura 3. Representación conceptual de la Celda de Oxidación Isotérmica

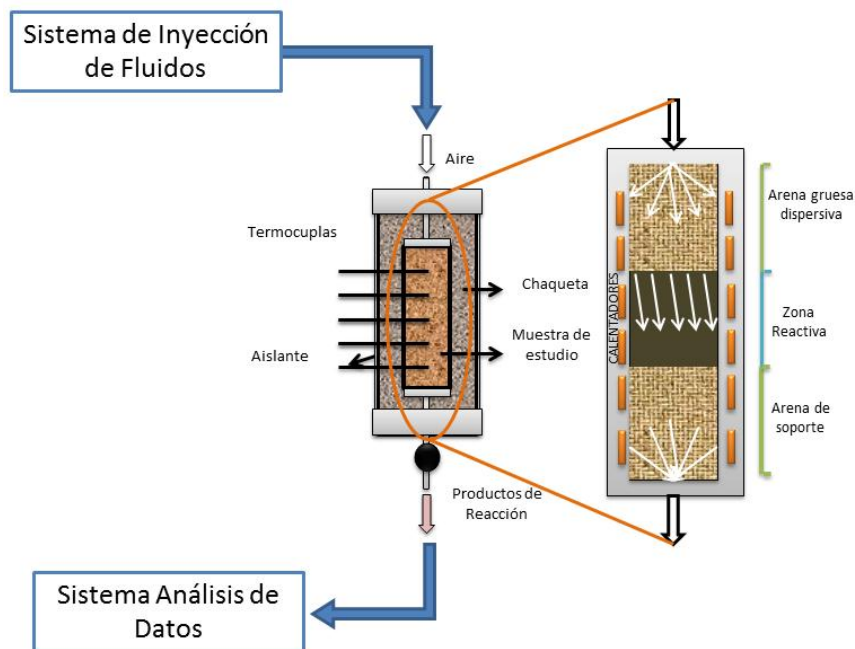


Fuente: Autores.

- Un reactor de lecho empacado con flujo continuo de aire con calentadores y termocuplas a lo largo del equipo para garantizar una operación cercana a una condición adiabática. Además, debe contar con un volumen de arena gruesa a la entrada del material oxidante para garantizar un flujo uniforme

del mismo, es decir, sin dispersión radial, con el fin de minimizar los fenómenos físicos y enfocarse en los químicos. Se debe operar con una rampa de temperatura que asegure el paso del aceite, la roca y el aire por los tres regímenes de temperatura. Este es un reactor RTO (Ramped Temperature Oxidation). Con la ayuda de este reactor se obtienen perfiles de temperaturas y datos cualitativos que permiten estudiar el comportamiento oxidativo del sistema en sus tres regímenes de temperatura y la influencia de los componentes del medio poroso, con el fin de determinar la necesidad o no de usar muestras sintéticas para el desarrollo de las pruebas.

Figura 4. Representación conceptual del RTO.

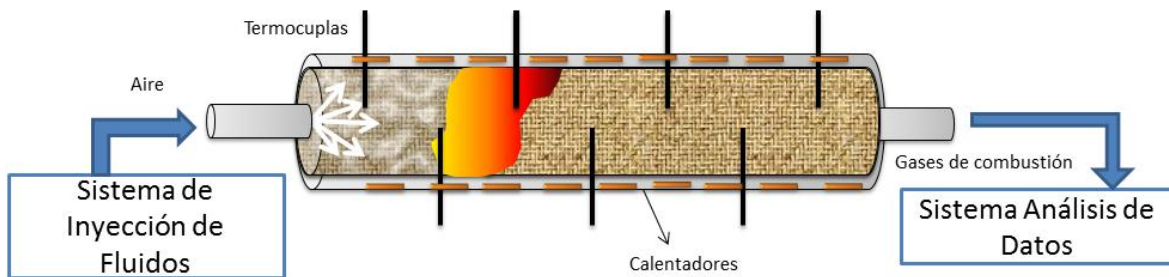


Fuente: Autores.

- Un reactor de lecho empacado con flujo continuo de aire con calentadores y termocuplas a lo largo del equipo para garantizar una operación cercana a la adiabática, con una longitud grande que permita el estudio de parámetros operacionales. Este reactor es el que más se asemeja a las condiciones del yacimiento al no tener restricciones a fenómenos de transporte. Este

reactor es un Tubo de Combustión y entrega datos con los cuales se pueden encontrar los parámetros de desempeño: Velocidad del frente de combustión, cantidad, tasas y presiones de inyección de aire requerido, relación agua-aire optima en un proceso de combustión húmeda, combustible quemado por unidad de volumen de yacimiento, tasa y composición de crudo y gas de producción y volumen de yacimiento barrido por la zona de combustión.

Figura 5. Representación conceptual del Tubo de Combustión.



Fuente: Autores.

Este trabajo de grado es de gran importancia para el Instituto Colombiano de Petróleo (ICP) puesto que basados en la conceptualización de los reactores aquí realizada, se está llevando a cabo su construcción por XYTEL CORPORATION. Las características y los planos detallados de cada uno de estos reactores se encuentran en el anexo 6. Una vez en funcionamiento, estos equipos serán la base del laboratorio de combustión in situ en el ICP, por lo tanto, de gran ayuda en el desarrollo del proceso de evaluación de proyectos de inyección de aire de ECOPELROL.

4. PLANTEAMIENTO DE LAS ECUACIONES DE BALANCE

Es necesario hacer claridad en el hecho de que el diseño de reactores para el estudio de la cinética es substancialmente diferente al diseño de reactores para aplicación industrial de procesos conocidos. En el primer caso se busca la cinética con la que se podrá calcular parámetros de producción, mientras que en el segundo se parte de una cinética conocida.

Considerando que ningún avance en el conocimiento de la técnica podría desarrollarse sin el conocimiento de la cinética del proceso, se plantean los balances de materia y energía para la celda isotérmica. La importancia de los balances de masa y energía en este proyecto se puede observar en el anexo 3, donde se muestra que para el ajuste de los parámetros cinéticos finales es necesaria la resolución de estas ecuaciones antes de comparar una función objetivo.

En este reactor, se han tenido en cuenta las consideraciones que permiten despreciar los efectos de fenómenos difusionales y evaluar el proceso como una consecuencia de transformaciones químicas únicamente, permitiendo calcular la cinética asociada a este. Con esto se puede tomar el equipo como un reactor de lecho empacado en el que ocurren reacciones que se pueden asumir como un proceso pseudo-homogéneo¹⁷, sin variaciones de concentración o temperatura en el eje radial. Este planteamiento base, permite hacer simplificaciones en el desarrollo de balances de materia y energía que llevan a un modelo matemático como sigue:

¹⁷ FROMENT, GILBERT. BISCHOFF, KENNETH. Chemical Reactor Analysis And Design. John Wiley and Sons. 1990.

4.1. BALANCE DE MASA

Teniendo en cuenta que se ignoran los fenómenos de difusión y de dispersión en el sistema, además de establecer la variación radial del sistema como despreciable, y que el oxígeno será el compuesto de interés, dada su facilidad de medición antes y después del proceso, el balance de materia en función del oxígeno se plantea como sigue:

$$-r_1 = \phi S_g N \frac{\partial X_{O_2}}{\partial t}$$

Que también puede ser expresada como se menciona en el método diferencial, así:

$$r_1 = -\frac{1}{V} \frac{dn_{O_2}}{dt} = -\frac{1}{VM_{O_2}} \frac{dm_{O_2}}{dt}$$

Por otra parte y con anterioridad se había definido una velocidad de reacción en función de la masa de aceite, esta era:

$$-r = k_0 e^{-\frac{E}{RT}} P_{O_2}^n$$

Para que esta última expresión sea consistente con el desarrollo matemático planteado y pueda ser alimentada como ecuación de balance válida, se transforma como sigue:

$$-\frac{1}{V} \frac{dm_{O_2}}{dt} = \phi \rho_o S_o k_0 e^{-\frac{E}{RT}} P_{O_2}^n$$

De esta manera la velocidad de reacción está en función del consumo de oxígeno e incluye parámetros propios de yacimiento.

4.2. BALANCE DE ENERGÍA

En la celda de oxidación isotérmica se desprecia el cambio en la temperatura en el eje axial y dado que la saturación de crudo en el medio poroso es baja, se puede despreciar la variación radial. Además se considera que las temperaturas en la roca y el fluido son iguales. De esta manera el balance de energía para la celda de oxidación isotérmica como sigue:

$$A_{Transf} * U * (T - T_{amb}) = (-\Delta H)r$$

En esta expresión¹⁸, el primer término de izquierda a derecha permite evaluar la transferencia de calor con el entorno y de esta manera poder conocer las necesidades energéticas del equipo para mantener la condición de operación isotérmica necesaria en la celda de oxidación, el segundo término representa la energía liberada por el efecto de las reacciones ocurridas en el proceso reactivo.

La expresión para r presentada en el subtítulo anterior, es aplicable en esta ecuación y permite generar un sistema de ecuaciones para obtener los parámetros cinéticos del proceso. Las condiciones iniciales para el procedimiento de cálculo de estos parámetros en el balance de masa y energía son:

$$t = 0; X_{O_2} = 0,21; T = T_R$$

Obtenidos los balances de masa y energía, además de los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio tales como composición de gases, se puede realizar la rutina de optimización de parámetros cinéticos mostrada en el Anexo 5. Estos podrán alimentar el modelo cinético para la posterior simulación del proceso y evaluación de su viabilidad técnica y financiera.

¹⁸ FROMENT, GILBERT. BISCHOFF, KENNETH. Chemical Reactor Analysis And Design. John Wiley and Sons. 1990. 900 p.

CONCLUSIONES

Durante la realización de este proyecto de grado se encontró que un solo reactor no puede entregar toda la información necesaria para la evaluación experimental del proceso debido a que necesita de diferentes condiciones excluyentes entre sí. Por el contrario, son necesario tres reactores: celda de oxidación isotérmica, RTO y tubo de combustión.

El planteamiento de los balances de masa y energía se debe realizar para la celda de oxidación isotérmica para obtener los parámetros cinéticos por medio de la rutina de optimización presentada, pues este reactor este ofrece las condiciones más favorables para el estudio de la cinética del proceso asociado a la cinética del proceso de CIS.

RECOMENDACIONES

Este trabajo es el resultado de tiempo de lectura e investigación del Grupo de Investigación en Recobro Mejorado GRM de la Universidad Industrial de Santander conjuntamente con el Instituto Colombiano del Petróleo ICP, se avanzó en el conocimiento de la técnica de recobro conocida como CIS, pero aún hay cosas por hacer, aquí se presentan dos que desde el punto de vista de los autores son importantes a futuro:

Desarrollar futuros trabajos de grado basados en pruebas sobre los equipos ya contruidos para determinar los parámetros que se esperan obtener.

Mediante la creación de diseños experimentales fundamentados en los equipos, es necesario, evaluar aspectos como la presencia de catalizadores en el medio poroso y su afectación en los parámetros cinéticos y operacionales de la técnica de Combustión in situ.

BIBLIOGRAFÍA

AHMED, T. Reservoir Engineering Handbook. Gulf Professional Publishes. 2001. 2400 p.

ALI, F. Multiphase, Multidimensional Simulation of In Situ Combustion. University of Pennsylvania. SPE 6896. 1977. 11 p.

AZERBAIDZHANSKOE, N. Heat Treatment of oil and increase recovery of oil. SPE. 22356, USA. 1975. 17p

AZNAR, A. CABANELAS, J. Ingeniería de Reacciones. Universidad Carlos III de Madrid. Disponible en: <http://ocw.uc3m.es/ingenieria-quimica/quimica-ii/material-de-clase-1/MC-F-003.pdf> [Citado Mayo de 2012]

B. SEQUERA, R. G. MOORE, S. A. MEHTA, M. G. URSENBACH. Numerical Simulation of In Situ Combustion Experiments Operated Under Low Temperature Conditions. University of Calgary. 2007. 10 p.

BELGRAVE, J. MOORE, G. URSENBACH, M. BENNION, W. A Comprehensive approach in situ combustion modeling. SPE 20250. 1990. 10 p.

BENHAM, A. POETTMANN, F. The Thermal Recovery Process - An analysis of Laboratory Combustion Data. Petroleum Trans. AIME. 1958.3 p.

BOBERG C Thomas. "Thermal Methods for oil Recovery", Exxon Monograph. 1988. 266 p.

BOUDART, M. Cinética de Procesos Químicos. Alhambra. 1974. 281 p.

BURGER, J. SORIEAU P. Chemical Aspects of In Situ Combustion – Heat of Combustion and Kinetics. Institut Francais du Pétrole. Reuil-Malmaison, France. 1972. 13 p.

_____. Spontaneous Ignition in Oil Reservoirs. Institut Francais du Pétrole. Reuil-Malmaison, France. 1976. 6 p.

_____. Thermal methods of oil recovery. Institut Français du Pétrole Publications. 1985. 8 p.

C. GADELLE. In Situ Combustion, Experimental Design and Test Procedures. Curso con intensidad horaria de 40 horas. Patrocinado por: Ecopetrol, Xytel, Ecopetrol-GravityStable Air Injection. Diciembre 2012.

CHICUTA,A, TREVISAN. O. UNICAMP. Experimental Study on In-Situ Combustion of Brazilian Heavy Oil.SPE 122036. 2009. 8 p.

CONLEY.F, BURROWS. D. A Centrifuge Core Cleaner. Continental Oil Co. Ponca City, Oklahoma. 1956. 2 p.

CRAFT, B. HAWKINS, M. Applied Petroleum Reservoir Engineering. Prentice Hall.SegundaEdición. 1990. 260 p.

CROOKSTON, R. CULHAM, O. Numerical Simulation Model for Thermal RecoveryProcesses. SPE 6724. Canada. 1985. 18p.

CUEVAS, R. Introducción a los Reactores Químicos. Universidad Autónoma de México. 2009. Disponible en: http://depa.pquim.unam.mx/amyd/archivero/IntroReactores_10564.pdf [Citado Mayo de 2013].

DENBIGH, K. Teoría del Reactor Químico. Alhambra. Segunda Edición. 1968.

ESCOBAR, F. Fundamentos de Ingeniería de Yacimientos. Universidad Surcolombiana. 2000. 264 p.

FOGLER, S. Elements of Chemical Reaction Engineering.2 Ed. Prentice Hall. 1986. 968 p.

FROMENT, GILBERT. BISCHOFF, KENNETH. Chemical Reactor Analysis And Design. John Wiley and Sons. 1990. 900 p.

LEVENSPIEL. Octave. Ingeniería de las Reacciones Químicas. Ed. Reverté. 2002. 638 p.

LEVINE, I. Fisicoquímica. McGraw-Hill, Tercera Edición. 1993. 300 p.

MOORE, R. LAURENSHEN, C. UNSERBACH, M. METHA, S. BELGRAVE, J. A Canadian Perspective on In-Situ Combustion.University of Calgary. 1999. 8 p.

MUÑOZ N, Samuel, "Apuntes combustión in-situ". Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga. 1999.

N. JIA, R. G. MOORE, S. A. MEHTA, M. G. URSENBACH. Kinetic Modelling of Thermal Cracking and Low Temperature Oxidation Reactions.University of Calgary. 2006.

N. Kalogerakis, R. Luus. Improvement of Gauss-Newton Method for Parameter Estimation through the Use of Information Index.University of Toronto.1983.

NELSON, T. W.; MCNEIL, J.S. "How to Engineer a Combustion In Situ Project", Oil and Gas Journal. Junio 5, 1961 N°. 23, 58-65.

OLIVEROS, L. R. Determinación de Parámetros de Diseño y Evaluación Técnica de Procesos de Combustión In-Situ A Partir de Pruebas de Tubo de Combustión. 2011. 180 p.

P,B Crawford and C, Chu. Capitulo VI In situ combustion, "Improve oil Recovery". Interstateoil Compact comission.1983. 251 p.

PARIS DE FERRER, M. Inyección de Agua y Gas en Yacimientos Petrolíferos. Segunda Edición, 2001. 417 p.

PEROZO, H. MENDOZA, A. TEXEIRA, J. ALVAREZ, A. MÁRQUEZ, J. ORTEGA, P. VASQUEZ, P. The In-situ CombustionPilot Project in Bare Field, Orinoco OilBelt, Venezuela. PDVSA INTEVEP, SPE 144484. 2011. 15 p.

PETIT, H. Experimental Evaluation of In-situ Combustion in naturally consolidated cores. InstitutFrançais du Pétrole Publications.JCPT. 1990.

RAMEY, H. In-situ Combustion. Published in "Recovery of Hydrocarbons beyond the primary stage" tras World Petroleum Congress Moscow URSS.1971.

REKLAITIS, G. "Balances de material y energía". Ed. McGraw-Hill. 1989. 649 p.

SARATHI, Partha. In Situ Combustion Handbook – Principles and Practices.Oklahoma, 1995.28 p.

SEQUERA, B. MOORE, R. METHA, R. URSENBACH, M. Numerical simulation of in situ combustion experiments operated under low temperature conditions. Universidad de Calgary. 2007.

STIPANOV. A Kinetic Model of the Hydrocarbon Fraction Reactions During the Low-and High- Temperature Oxidation of Athabasca Bitumen. University of Calgary. 1999.

SMITH, J. Introducción a la termodinámica en Ingeniería Química. 7 Ed. 2007. 836 p.

SOTO, Andrés. Apuntes de cinética química. Universidad de Chile. 2003. Disponible en: http://cabierta.uchile.cl/revista/29/mantenedor/sub/educacion_1.pdf [Citado Mayo de 2013].

TADEMA, J. WEIJDEMA. Spontaneous Ignition of Oil Sands.Oil and Gas. J. (Dec. 14, 1970) Vol. 68, No. 50, 77-80.

T. FAN, J. WANG, J. BUCKLEY. Evaluating Crude Oils by SARA Analysis. SPE 75228. 2002.

TRAMBOUZE, P. VAN LANDEGHEN, H. WAOQUIER, J. Chemical Reacters; Design/Engineer/Operation. TECHINIP Editions. 1988.

TREYBALL, R. Operaciones de transferencia de masa. 2 Ed. 1988. 542 p.

ANEXOS

Anexo A. Screening para la selección de yacimientos candidatos de CIS

Screening de la técnica de Combustión In- Situ									
Propiedades del aceite			Características del yacimiento						
Grav. (°API)	Visco. (cp)	Comp.	Saturación de aceite (%VP)	Tipo de Formación	de	Espesor Neto (ft)	Permeabilidad promedio (md)	Prof. (ft)	Temp. (°F)
>10-16	<5,000-1,200	Algunos asfaltenos	>50-72	Arenas y rocas areniscas de alta permeabilidad		>10	>50	<11,500-3,500	>100-135

Fuente: J.J. Taber, SPE, F.D. Martin, SPE, and R. S. Seright, SPE, New Mexico Petroleum Recovery Research Center. EOR Screening Criteria Revisited- Part 1: Introduction to Screening Criteria and Enhanced Recovery Field Projects.

Anexo B Preparación y caracterización de muestras

El sistema roca-aceite-agua debe ser preparado cuidadosamente para evitar perturbaciones en los resultados de las pruebas y en su posterior análisis. Con este fin, cada una es preparada de forma individual:

- La roca debe pasar por algunas pruebas para saber si es posible trabajar con arenas sintéticas o si es necesario trabajar con aquellas originales del yacimiento. Al trabajar con arenas del yacimiento de estudio, primero se debe realizar una limpieza por medio de destilación con tolueno en un equipo soxhlet¹⁹ para eliminar el agua y el petróleo de éstas. Después, la roca limpia se lleva a un proceso de secado al vacío a una temperatura de alrededor de 150 °C para eliminar el solvente remanente. Por último, se pasa por un proceso de tamizado donde las partículas menores de 300 micras son separadas para evitar taponamiento en las tuberías.
- El petróleo a utilizar en las pruebas debe pasar por un proceso de deshidratación para eliminar el agua y los sedimentos remanentes.
- El agua de la formación se puede preparar de acuerdo a su composición salina o composición físico-química.

Estas muestras deben pasar por un proceso de caracterización para poder obtener ciertos datos que se alimentarán al simulador y al análisis de los resultados de las pruebas.

- Por parte de la caracterización de la roca se deben realizar pruebas para conocer la composición mineralógica, distribución de tamaño de grano y características petrofísicas (porosidad y permeabilidad).

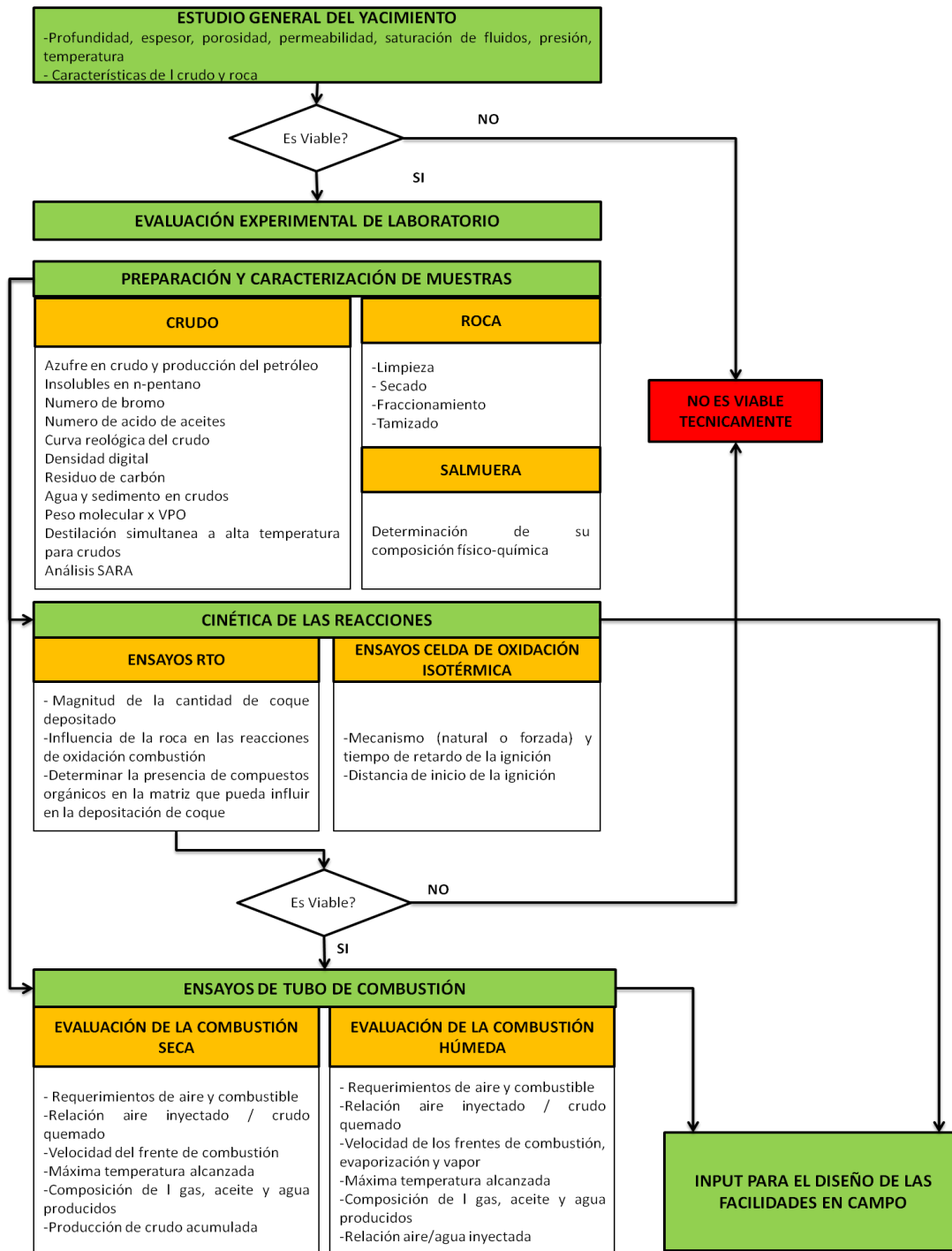
¹⁹CONLEY.F, BURROWS. D. A Centrifuge Core Cleaner. Continental Oil Co. Ponca City, Oklahoma. 1956.

- Las pruebas realizadas al petróleo deben obtener información acerca de la viscosidad, gravedad API, densidad, gravedad específica, peso molecular promedio, número ácido, residuo de carbono micro, azufre en productos del petróleo, identificación de azufrados, análisis elemental CHN, análisis SARA²⁰, análisis PIANO, insolubles en N-Pentano, análisis cuantitativo (Aluminio, cobre, Hierro, Magnesio, Níquel, Vanadio y Calcio, Sodio), contenido de agua y sedimentos y número de bromo.
- Por último, las pruebas de laboratorio del agua debe arrojar información de caracterización físico-química (pH, Salinidad, Sólidos totales disueltos), análisis cuantitativo de cationes (Ca⁺², Fe⁺³, Mg⁺², K⁺¹, Na⁺¹, Ba⁺², Sr⁺², silicio), análisis cuantitativo de aniones ICP/OES (sulfatos, cloruros) y análisis de fenoles.

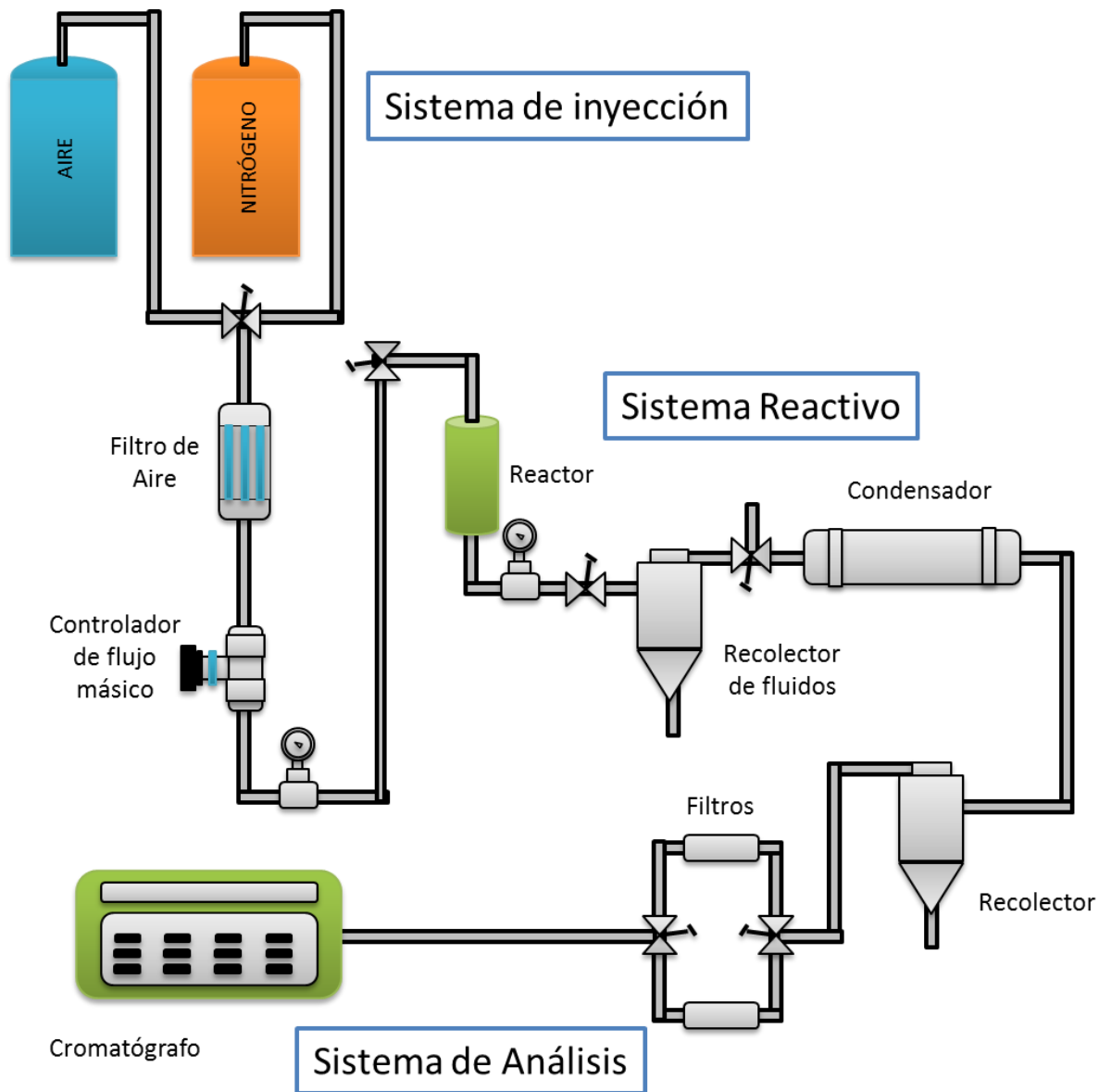
Por último se realizan las pruebas de laboratorio al crudo y al yacimiento para saber si el proyecto es viable o no. Además, los resultados de estas pruebas permiten diseñar el proyecto de CIS en campo y las facilidades que se requieren.

²⁰ T. FAN, J. WANG, J. BUCKLEY. Evaluating Crude Oils by SARA Analysis. SPE 75228. 2002.

Anexo C. Diagrama de bloques para la evaluación experimental del proceso de inyección de aire.

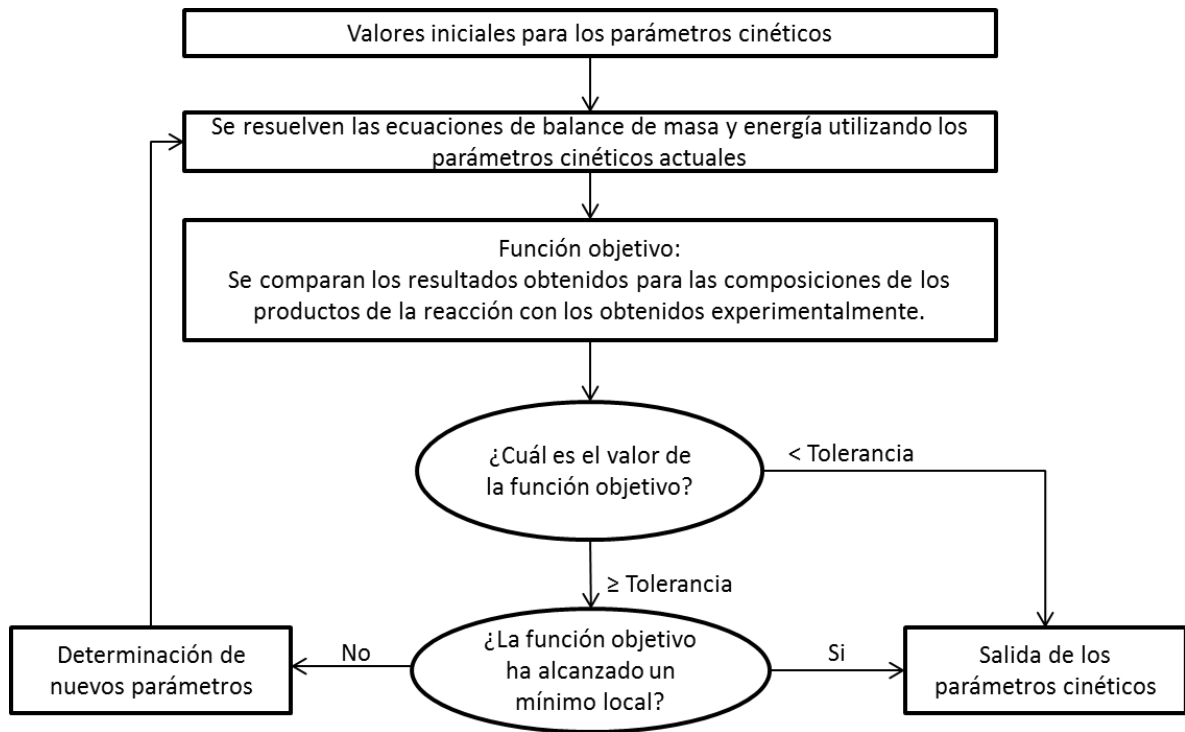


Anexo D. Esquema básico de los subsistemas del sistema experimental (se omiten Sistema de Control y Sistema de Tratamiento)



Fuente: Los autores

Anexo E. Diagrama de flujo para el cálculo de los parámetros cinéticos mediante el método diferencial.



Fuente: Tomada de J. STIPANOV. A Kinetic Model of the Hydrocarbon Fraction Reactions During the Low-and High- Temperature Oxidation of Athabasca Bitumen. University of Calgary. 1999.

Anexo F. Características técnicas y planos de los reactores planteados en el trabajo de grado y en actual construcción.

Características Técnicas de la Celda Isotérmica

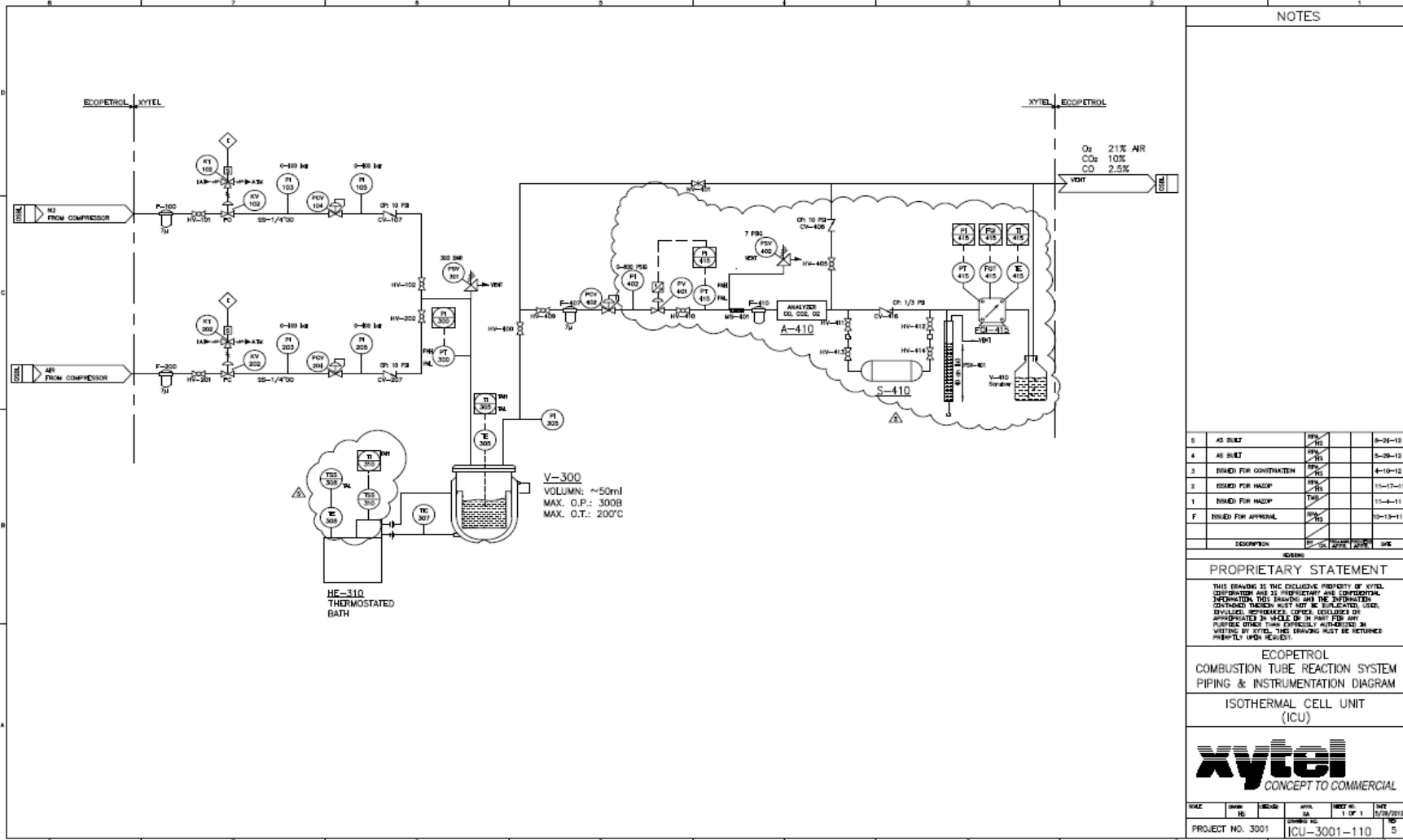
Dimensión	Especificación o medida
Material reactor	SS316
Volumen total reactor (cm ³)	50
Presión máxima (psi)	4350
Temperatura máxima (°C)	200
Termocuplas	1

Características Técnicas Reactor RTO

Dimensión	Especificación o medida
Material reactor	Hastelloy C-276
Diámetro nominal cm	2.54
Cedula	160
Diámetro Externo reactor (cm)	3,34
Longitud Interior reactor (cm)	64,83
Área Interna reactor (cm ²)	3,37
Volumen total reactor (cm ³)	218,16
Presión máxima de operación (psi)	4350
Temperatura máxima de operación (°C)	500
Termocuplas internas	6
Zonas de calentamiento	6

Características Técnicas Tubo de Combustión

Característica	Valor
Material	Hastelloy C-276
Longitud[cm]	183
Diámetro[cm]	10
Espesor de pared del reactor [cm]	0,2
Volumen total reactor [lt]	13.66
Temperatura operación del reactor[°C]	650°C
Zonas de calentamiento del reactor	15
Máx. Dp entre chaqueta y reactor [psi]	120



NOTES

5	AS BUILT	REV. / DIS.	8-24-12
4	AS BUILT	REV. / DIS.	5-28-12
3	ISSUED FOR CONSTRUCTION	REV. / DIS.	4-10-12
2	ISSUED FOR HAZOP	REV. / DIS.	11-17-11
1	ISSUED FOR HAZOP	REV. / DIS.	11-4-11
F	ISSUED FOR APPROVAL	REV. / DIS.	10-13-11

DESCRIPTION: ICU-3001-110

PROPRIETARY STATEMENT

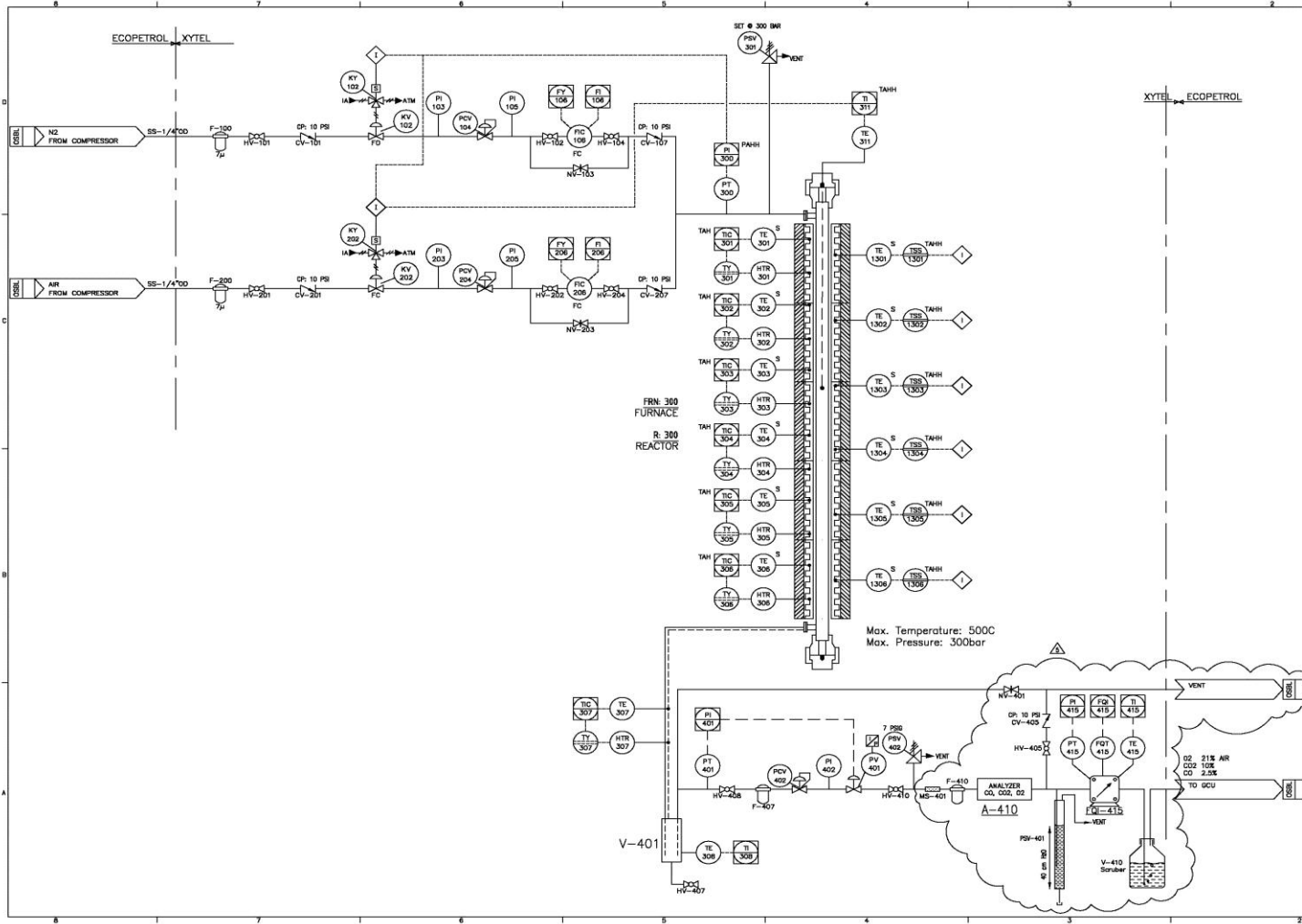
THIS DRAWING IS THE EXCLUSIVE PROPERTY OF XYTEL CORPORATION AND IS PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL INFORMATION. THIS DRAWING AND THE INFORMATION CONTAINED THEREIN MUST NOT BE REPRODUCED, COPIED, DISSEMINATED, LOANED, COPIED, OR APPLIED IN ANY MANNER WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN PERMISSION OF XYTEL. THIS DRAWING MUST BE RETURNED PROMPTLY UPON REQUEST.

ECOPETROL
 COMBUSTION TUBE REACTION SYSTEM
 PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
 ISOTHERMAL CELL UNIT
 (ICU)



DATE	ISSUED	REVISED	APP. BY	REVISED BY	DATE
PROJECT NO. 3001	ICU-3001-110				5

Plano para la Celda Isotérmica en construcción.



NOTES

NOTE: 10-100 ML/HR AIR
PRESSURE MAX=4500PSIG

FRN-300
FURNACE
MAX. TEMP.: 800°C
NO. OF ZONES: 9
EACH ZONE LENGTH: 3in.

R-300
REACTOR
TYPE: 1" PIPE S-160
MOC: C-276

V-401
FETOF / Oil collector
MOC-SS316

V-410
SCRUBBER
MOC: Polypropylene

A-410
ANALYZER

NO.	DESCRIPTION	BY	CHK	DATE
5	AS BUILT	RPS		8-24-12
4	AS BUILT	RPS		5-4-12
3	ISSUED FOR CONSTRUCTION	RPS		4-10-12
2	ISSUED FOR HAZOP	TMS		11-17-11
1	ISSUED FOR HAZOP	RPS		11-4-11
0	ISSUED FOR APPROVAL	RPS		10-13-11

PROPRIETARY STATEMENT

THIS DRAWING IS THE EXCLUSIVE PROPERTY OF KYTEL CORPORATION AND IS PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL INFORMATION. THIS DRAWING AND THE INFORMATION CONTAINED HEREIN MUST BE KEPT UNCLASSIFIED, UNREPRODUCED, COPIED, REPRODUCED OR APPLICATED IN WHOLE OR IN PART FOR ANY PURPOSE OTHER THAN EXPRESSLY AUTHORIZED IN WRITING BY KYTEL. THIS DRAWING MUST BE RETURNED PROMPTLY UPON REQUEST.

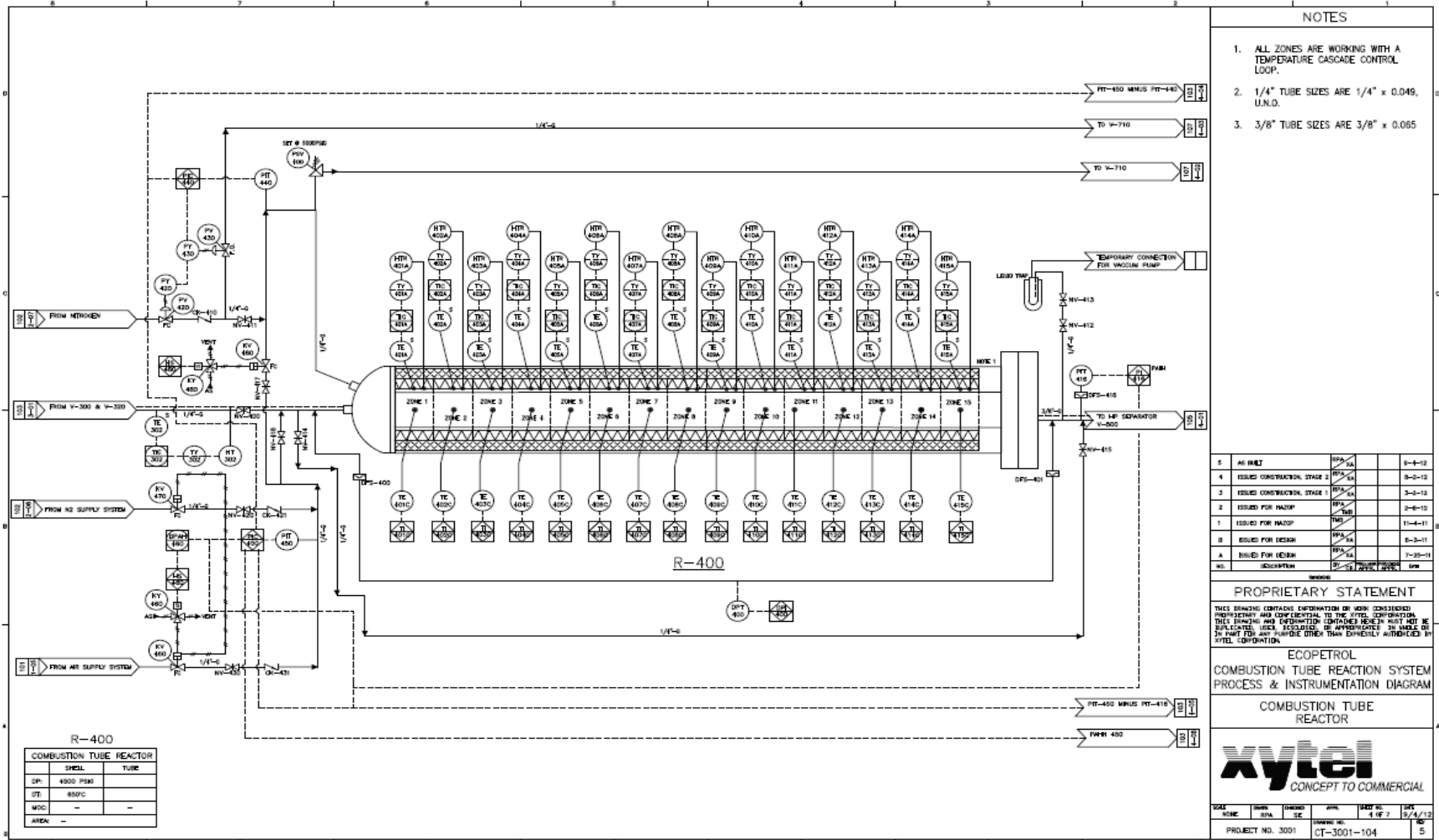
**ECOPETROL
COMBUSTION TUBE REACTION SYSTEM
PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM
RAMPED TEMPERATURE OXYDATION
(RTO)**

kytel
CONCEPT TO COMMERCIAL

SCALE	DRAWN	DESIGNED	APPROVED	SHEET NO.	DATE
NTS	HS	SA	SA	1 OF 1	5/4/2012

PROJECT NO. 3001 RTO-3001-120

Plano para el reactor RTO en construcción.



NOTES

- ALL ZONES ARE WORKING WITH A TEMPERATURE CASCADE CONTROL LOOP.
- 1/4" TUBE SIZES ARE 1/4" x 0.049, U.N.D.
- 3/8" TUBE SIZES ARE 3/8" x 0.065

NO.	DESCRIPTION	ISSUED	DATE
5	AS BUILT	ISSUED	8-4-12
4	ISSUED CONSTRUCTION STAGE 2	ISSUED	8-2-12
3	ISSUED CONSTRUCTION STAGE 1	ISSUED	3-4-12
2	ISSUED FOR HAZOP	ISSUED	2-4-12
1	ISSUED FOR HAZOP	ISSUED	11-4-11
B	ISSUED FOR DESIGN	ISSUED	8-2-11
A	ISSUED FOR DESIGN	ISSUED	7-25-11

PROPRIETARY STATEMENT

THIS DRAWING CONTAINS INFORMATION OF XYTEL CONSIDERED PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL TO THE XYTEL CORPORATION. THIS DRAWING AND INFORMATION CONTAINED HEREIN MUST NOT BE REPRODUCED, COPIED, TRANSMITTED, OR APPLICATED IN ANY MANNER WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN AUTHORIZATION OF XYTEL CORPORATION.

ECOPETROL
COMBUSTION TUBE REACTION SYSTEM
PROCESS & INSTRUMENTATION DIAGRAM

COMBUSTION TUBE REACTOR



SCALE	DATE	DESIGNED BY	APP. BY	DATE	CHK. BY
				4/7	5/4/12

PROJECT NO. 3001 DRAWING NO. CT-3001-104

Plano del tubo de combustión en construcción

Anexo G. Cálculo e interpretación de resultados

A continuación se presentan las fórmulas para calcular los parámetros de desempeño de la combustión in situ.

- a) Velocidad de los frentes de combustión, condensación y evaporización:

Velocidad del frente de combustión: para medir esta velocidad se debe trazar una línea horizontal en la gráfica de los perfiles de temperatura del experimento, la línea se debe trazar en una temperatura mayor a 300 °C de forma que se garantice que se está en el régimen HTO. Con los valores de temperatura y las distancias de separación de las termocuplas se obtiene la velocidad del frente.

- b) Velocidad del frente de condensación: esta velocidad también se determina con la gráfica de perfiles de temperatura del experimento. Se debe trazar una línea horizontal cerca de donde se ve la meseta de vapor que es el frente de condensación. Con los valores de temperatura y las distancias de separación de las termocuplas se calcula la velocidad de este frente.

- c) Velocidad del frente de evaporización: este frente se encuentra cuando inicia el aumento de temperatura en cada termocupla. Se debe trazar una línea horizontal a una temperatura. Con los datos de las temperaturas y las distancias de separación se obtiene este dato.

- d) Requerimiento de aire: el requerimiento de aire es obtenido dividiendo el flux de aire por la velocidad del frente de combustión.

- e) Cantidad de combustible quemado por metro cubico del volumen total

$$m = 1000 * (1 - \phi) * \rho * \left(1 + \frac{n}{12}\right) * W_c$$

- m = disponibilidad de combustible en kg/m³
 ϕ = porosidad
 ρ = gravedad específica de la arena g/cm³
 W_c = masa de carbón quemado por unidad de masa de la arena g/g
 n = relación atómica hidrogeno/carbón

f) Masa de carbón quemado en gramos

$$\frac{[VCO_2]_{Formado} + [VCO]_{Formado}}{24} * 12$$

g) Masa de hidrógeno quemado en gramos

$$\text{Masa Hidrógeno quemado} = \text{masa Carbón quemado} * n/12$$

h) Relación atómica de hidrógeno-carbón

$$n = 4 \frac{[VO_2]_{consumido} - [VCO_2]_{Formado} - [VCO]_{Formado}/2}{[VCO_2]_{Formado} + [VCO]_{Formado}}$$

- $[VO_2]_{consumido}$ = volumen de O₂ consumido
- $[VCO_2]_{Formado}$ = volumen de O₂ formado
- $[VCO]_{Formado}$ = volumen de CO formado

Ejemplo del cálculo de los parámetros de desempeño de la Combustión In Situ a partir de los resultados de una prueba de Tubo de Combustión. (Tomado del curso “In Situ Combustion, Experimental Design and Test Procedures”)

En una prueba de combustión húmeda con empaquetamiento por pre-mezcla. La prueba se inicia como combustión seca y alrededor de la hora 40 se inicia la inyección de agua.

Estas son las condiciones de operación del ensayo:

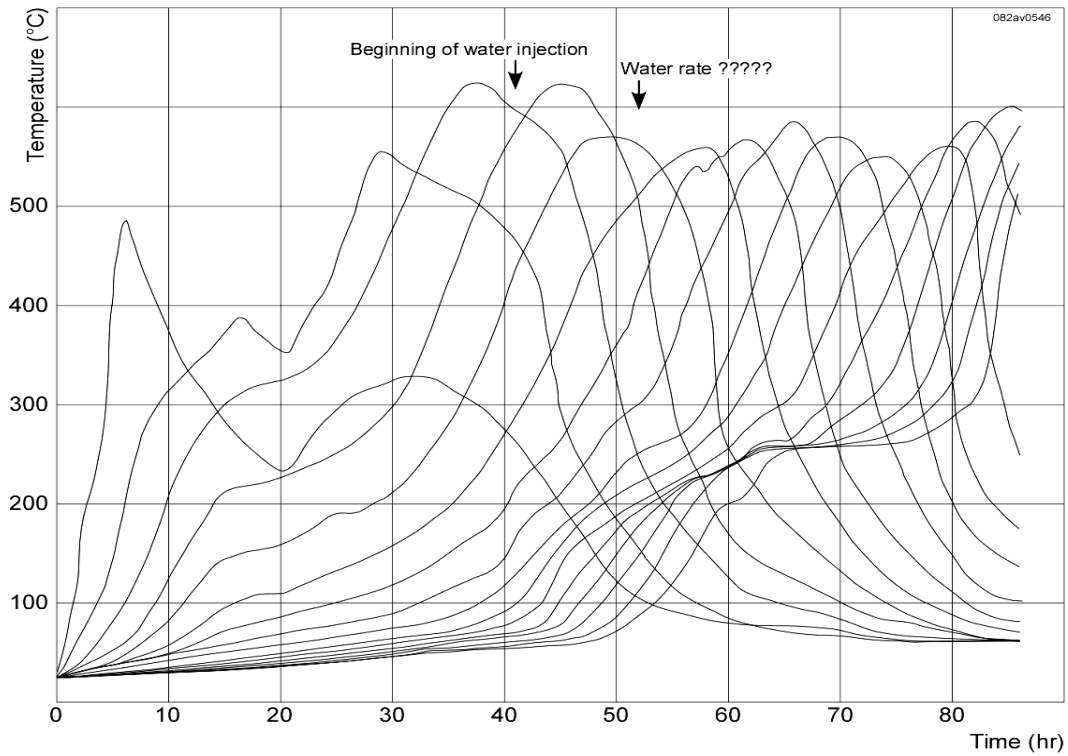
- Presión 100 bar
- Flux de aire: $12.4 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \cdot \text{hr}$
- Relación agua/aire: $0.0015 \text{ m}^3 / \text{m}^3$
- Distancia entre termocuplas: 17 cm

El empaquetamiento por pre-mezcla arrojó los siguientes resultados:

- Porosidad: 34.4 %
- Saturación de aceite: 45.3 %
- Saturación de agua: 23.4 %
- Saturación de gas: 31.3 %
- Contenido de aceite: $148.1 \text{ kg} / \text{m}^3$

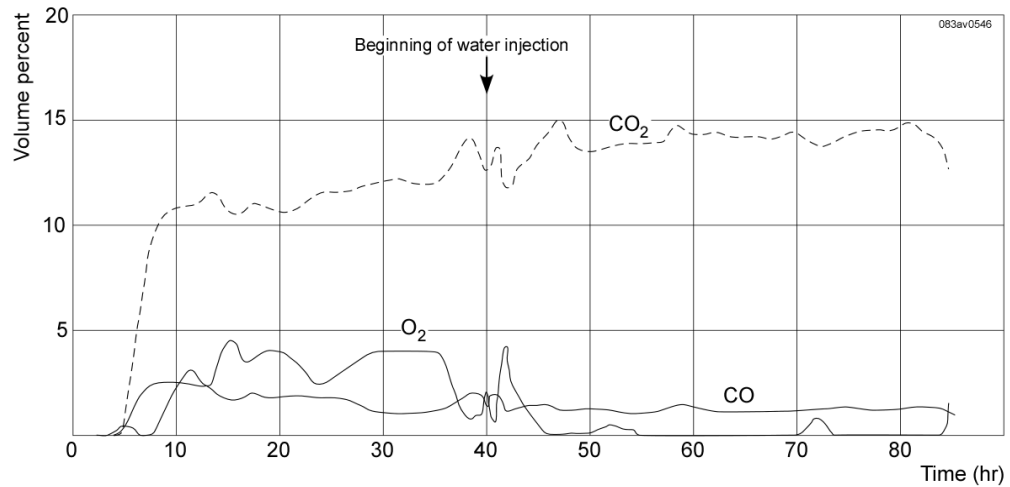
Durante la corrida se presentaron problemas operacionales, se observa que entre el tiempo 0 y 25 el frente de combustión casi se extingue.

Figura 6. Perfiles de temperatura del ensayo



Y la siguiente grafica muestra la composición de los gases producidos durante la prueba:

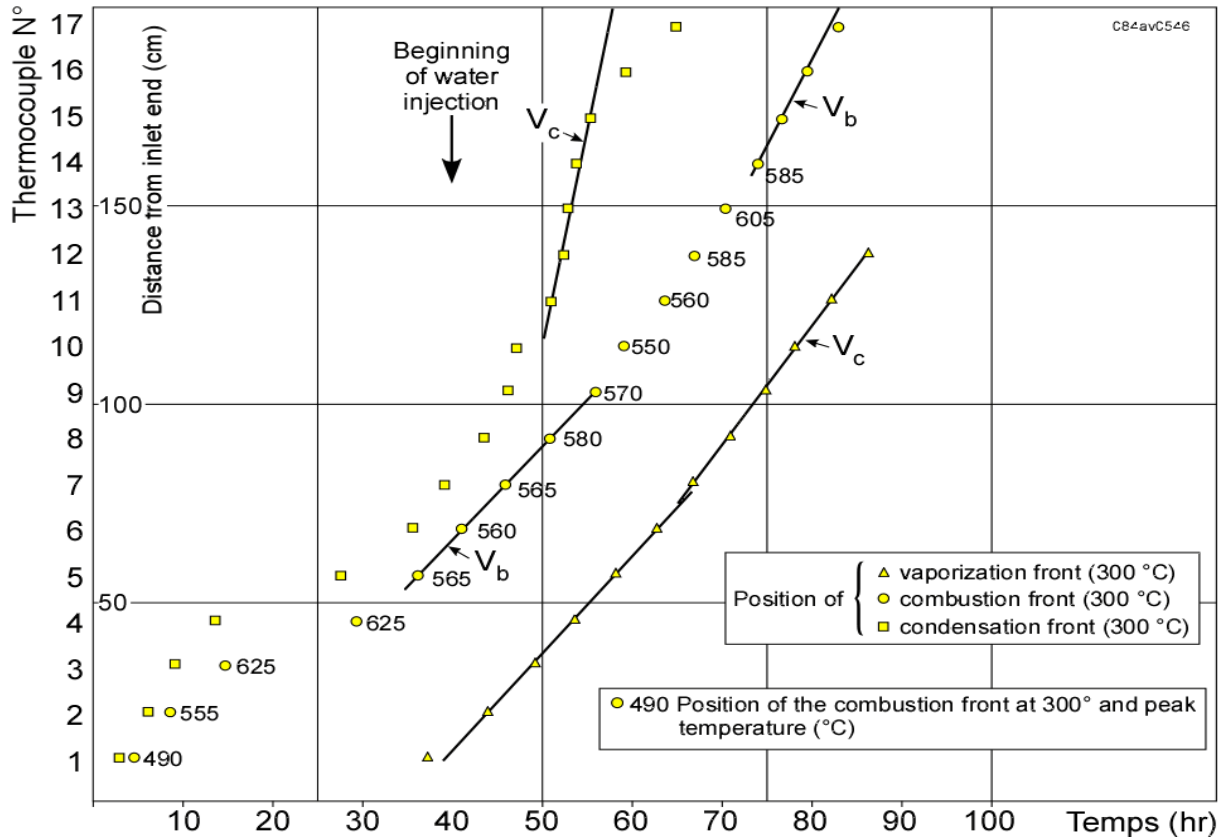
Figura 7. Composición de los gases efluentes



Para la interpretación de los resultados se debe realizar los cálculos tanto para la combustión seca como para la combustión húmeda. A continuación se presentan los resultados:

Para el cálculo de la velocidad de los frentes de combustión seca, combustión húmeda, frente de condensación y frente de evaporización se realizó el procedimiento descrito en el numeral anterior. A continuación se presenta la gráfica con los resultados.

Figura 8. Calculo de la velocidad de los frentes de combustión, vaporización y condensación



Combustión seca

- Velocidad del frente de combustión: 2,40 cm / hr
- Requerimiento de aire: 517 m³/m³

- Oxígeno consumido: 100%
- Gases efluentes con 10,5 a 14% de CO₂, de 1 a 3% de CO
- Combustible Quemado: 41 kg/m³ (28% del OIP) (probablemente demasiado baja)

Combustión húmeda

- Velocidad del frente de combustión: 4,35 cm / hr
- Velocidad del frente de vaporización: 3,1 cm / hr
- Zona de combustión espesor aumentando
- Velocidad del frente de condensación: 10,5 cm / hr
- Requerimiento de aire: 285 m³/m³
- Oxígeno consumido: 100%
- Gases efluentes con 14 a 15% de CO₂, de 1 a 2% de CO
- Combustible Quemado: 24,7 kg/m³ (17% del OIP)
- El aceite producido como una emulsión con 34% de agua
- Recuperación de crudo limpio: 73% de OIP
- Coque depositado en el tubo: cercanamente a 0% de OIP
- Balance de aceite: 73% producido, 25% quemado, 5% residual

OIP = Oil In Place