



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“DISEÑO EXPERIMENTAL PARA ANALIZAR LA TRANSFERENCIA  
DE CALOR Y MAPEO DE LA TEMPERATURA EN UN SISTEMA  
MATRIZ- FRACTURA, DURANTE UN PROCESO DE  
INYECCIÓN DE VAPOR”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERA PETROLERA**

**PRESENTA:**

**SOL ZÚÑIGA VERÓNICA**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. ERICK E. LUNA ROJERO**

**MÉXICO, D.F., CIUDAD UNIVERSITARIA, 2014**



*Sé que moriré. . .*

*Pero antes de, pelearé,*

*Juro por Dios triunfaré.*

*Es que en mis manos aún sangra la herida. . .*

*ARAGORN*

*No existe nada más importante que aprender a creer en mí. . .*

*Hoy mis sueños renacen, el libro se abre, la magia se hace. . .*

*SAURON*

*Revolution striking down right now!*

*ANGRA*

*Agradecimientos*

*Especialmente a la vida, porque ¡la vida es hoy!*

*A mis padres, hermanos, a mi abuesita Trini y cada uno de mis tíos que siempre he contado en todo momento. Me han otorgado fuerza, paciencia y sustento.*

*Mi total gratitud al Doc. Enrique Serrano por haber dirigido este trabajo de tesis, gracias por el tiempo invertido, por sus amables atenciones. ¡Mis gracias!*

*Al IMP por trabajar en sus instalaciones y cada una de las personas que me brindaron su apoyo del departamento de Recuperación Secundaria y Mejorada; al señor Armando mis gracias, al Doc. Galileo.*

*Un agradecimiento total a mi querida UNAM por haberme abierto las aulas de la Facultad de Ingeniería, me dejaste muchos amigos y momentos significativos; no hay comparación en nada ser parte de ti. Sé que extrañare caminar entre los pasillos de la biblioteca Central admirando y leyendo cada uno de tus libros como estudiante, más sin embargo, regreso como profesionista porque así tú me forjaste.*

*Mi querida UNAM!*

**ÍNDICE GENERAL**

**RESUMEN**.....I

**INTRODUCCIÓN**.....II

**CAPÍTULO I**

**ASPECTOS GENERALES**

1.1. Inyección de vapor.....10  
    1.1.1. Inyección cíclica de vapor o estimulación cíclica de vapor.....11  
    1.1.2. Inyección continua de vapor.....11  
1.2. Mecanismos de recuperación por inyección de vapor.....13  
1.3. Distribución efectiva del vapor.....15  
1.4. Tasa de inyección de vapor.....15  
1.5. Eficiencia de barrido.....15  
1.6. Presión de inyección de vapor.....16  
1.7. Problemas en un proceso de inyección de vapor.....16

**CAPÍTULO II**

**FUNDAMENTOS DEL VAPOR**

2.1 Propiedades térmicas del vapor.....17  
    2.1.1 Calor sensible y calor latente.....17  
    2.1.2 Calor específico.....19  
2.2 Tipos de vapor de agua.....19  
2.3 Entalpia del vapor.....20  
2.4 Calidad del vapor.....21  
2.5 Propiedades térmicas de las rocas y los fluidos .....22  
2.6 Transferencia de calor.....23  
    2.6.1 Conducción.....24  
    2.6.2 Convección.....24  
    2.6.3 Radiación.....25  
2.7 Variables térmicas en el proceso.....25

**CAPÍTULO III**

**ANÁLISIS DE LA INYECCIÓN DE VAPOR EN YACIMIENTOS  
NATURALMENTE FRACTURADOS**

3.1 Mecanismos de recuperación en yacimientos fracturados.....26  
    3.1.1. Mecanismos de recuperación de aceite de la matriz a la fractura.....27  
        3.1.1.1 Expansión térmica.....27

## ÍNDICE GENERAL

---

3.1.1.2 Imbibición capilar.....	28
3.1.1.3 Generación de gas.....	28
3.1.1.4 Drene gravitacional.....	29
3.1.1.5 Generación de vapor in situ.....	29
3.1.2 Mecanismo de recuperación de aceite de las fracturas al pozo productor.....	29
3.1.2.1 Destilación.....	30
3.2 Inyección de vapor en carbonatos.....	30
3.3 Modelos de simulación a yacimientos naturalmente fracturados.....	30

## CAPÍTULO IV DISEÑO EXPERIMENTAL

4.1 Revisión de la literatura.....	32
4.2 Objetivos.....	34
4.3 Planteamiento del problema.....	34
4.4 Hipótesis de trabajo.....	35
4.5 Metodología.....	35
4.6 Configuración para el proceso de inyección de vapor.....	36
4.7 Proceso de inyección de vapor en sistemas homogéneos.....	37
4.7.1 Caso base 1.....	37
4.7.2 Caso base 2.....	38
4.8 Proceso de inyección de vapor en sistemas fracturados.....	39
4.8.1 Saturación de las muestras de roca.....	41
4.8.2 Condiciones de inyección agua caliente/ vapor.....	42
4.9 Análisis térmico de la inyección del fluido.....	43

<b>RESULTADOS Y ANÁLISIS.....</b>	<b>45</b>
-----------------------------------	-----------

<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>59</b>
--	-----------

<b>APÉNDICE A EQUIPO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>63</b>
--	-----------

<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>72</b>
--------------------------	-----------

## RESUMEN

Si bien extensa literatura se dispone en el área de la inyección de vapor, los mecanismos de flujo de calor no se comprenden suficientemente, destacando que para la optimización en el uso del vapor, estos mecanismos y la distribución de la temperatura en el yacimiento, son fundamentales. A continuación se presenta un trabajo de investigación en conceptos teóricos relacionados con la inyección de vapor como mecanismo de recuperación mejorada (Enhanced Oil Recovery o EOR, por sus siglas en inglés), las variables termodinámicas involucradas en el proceso y un desarrollo experimental, que tiene como objetivo analizar el comportamiento espacial y temporal del frente de calor a través de un modelo de yacimiento homogéneo, comparado con un modelo de yacimiento fracturado, simulando un proceso de recuperación mejorada de aceite. El análisis se basó en imágenes térmicas obtenidas de cada uno de los procesos y en el mapeo de las temperaturas con el tiempo y la distancia.

# INTRODUCCIÓN

La inyección de vapor como método de recuperación mejorada de aceite es un proceso que tiene como objetivo agregar energía térmica al yacimiento y modificar sustancialmente algunas propiedades de los fluidos y la roca, tal como la viscosidad del aceite, la tensión interfacial agua-aceite y modificar la mojabilidad, entre otras. El vapor se inyecta en forma continua o como un proceso cíclico, ambas con sus respectivas ventanas de aplicación, sin embargo, una inyección continua es la que mayor recuperación de petróleo se obtiene.

Existe extensa literatura científica relacionada con la inyección de vapor en arenas y sistemas homogéneos; sin embargo, en sistemas carbonatados y fracturados es escasa, en los que la disipación de calor puede ser mayor y su efectividad se extingue si no entra en contacto con grandes porciones de la formación. Si bien se han identificado los mecanismos de recuperación de aceite que ocurren durante el proceso para estos yacimientos, retos a escala microscópica tales como la comprensión de la manera en cómo actúa la conducción del calor en las heterogeneidades del yacimiento, son clave para el éxito de esta técnica.

La transferencia de calor de un fluido caliente inyectado hacia la formación está gobernada primordialmente por la convección y conducción térmica. Bajo estos principios la formación y la manera en que se propaga un perfil de temperatura, puede ayudar a entender la disipación del calor y enriquecer los modelos matemáticos que predicen el comportamiento de la producción de aceite por inyección de vapor en sistema fracturados.

En este contexto, el trabajo presente se enfocó en el análisis de perfiles de temperaturas para observar el comportamiento del avance de un frente de calor, en un sistema matriz-fractura, durante un proceso de recuperación de aceite por inyección de vapor.

El trabajo presenta la estructura siguiente: En el Capítulo 1 describe en forma general los aspectos teóricos de la inyección de vapor.

Reis (REIS, 1992) identificó los mecanismos que actúan en la recuperación de aceite por inyección de vapor en yacimientos fracturados: la imbibición capilar (en matriz mojada por agua), la expansión térmica, la generación de gas, alteración química del aceite, la segregación gravitacional, la generación de vapor in situ, la destilación, la reducción de la viscosidad, entre otros, como los mecanismos fundamentales. Dado que la recuperación de aceite en sistemas fracturados puede modelarse por medio de dos procesos (el aceite se expulsa de la matriz a la red de fracturas, y el desplazamiento del aceite de las fracturas al

pozo productor); en cada uno actúan diferentes mecanismos de recuperación que se detallan en el Capítulo 2.

El Capítulo 3 fundamenta los aspectos termodinámicos del vapor, la manera en que se transfiere su calor del vapor a la formación, las variables termodinámicas de la roca y los fluidos.

Una propuesta experimental se desarrolla en el Capítulo 4. Los estudios experimentales se efectuaron en tres etapas; en la primera de ellas se realizaron pruebas para el manejo y establecimiento de las condiciones óptimas en el uso de los equipos utilizados para generar vapor, controlar temperaturas, presiones, velocidades y flujos de inyección hacia el modelo de yacimiento diseñado. La segunda etapa consistió en la corrida de dos experimentos (casos bases), para un proceso de inyección de vapor en un sistema homogéneo. En la última etapa se realizaron tres experimentos para la inyección de vapor en un sistema matriz- fractura.

Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos y el análisis correspondiente. Al final se presentan las conclusiones y recomendaciones para la continuidad de la investigación.

# CAPÍTULO I

## ASPECTOS GENERALES

Los métodos de recuperación de petróleo se denominan de diversas maneras. Uno de los primeros conceptos describe las fases secuenciales de producción, utilizando los términos de recuperación primaria, secundaria y terciaria. No obstante, con los avances registrados y los retos presentes esta concepción ha caído en desuso, porque actualmente los procesos de recuperación de hidrocarburos vislumbran como alternativas adicionales de recuperación y no como etapas secuenciales de recuperación.

El abanico de actividades aplicadas para incrementar la recuperación de petróleo de los yacimientos es amplio. Hoy, alrededor del 60% de la producción mundial de petróleo atribuida a los métodos de recuperación de petróleo (EOR), proviene de la estimulación térmica, donde el petróleo es movilizado mediante el agregado de calor al yacimiento con el fin de reducir su viscosidad. Los métodos térmicos abarcan la inyección de vapor, la inyección de agua caliente, el calentamiento eléctrico y la combustión in-situ. El vapor posee mayor contenido calorífico que el agua caliente, pero ambos satisfacen objetivos similares en los procesos EOR. Si bien la combustión del petróleo in-situ se utiliza, la inyección de vapor es el método térmico predominante, con recuperaciones de hasta el 50-60%.

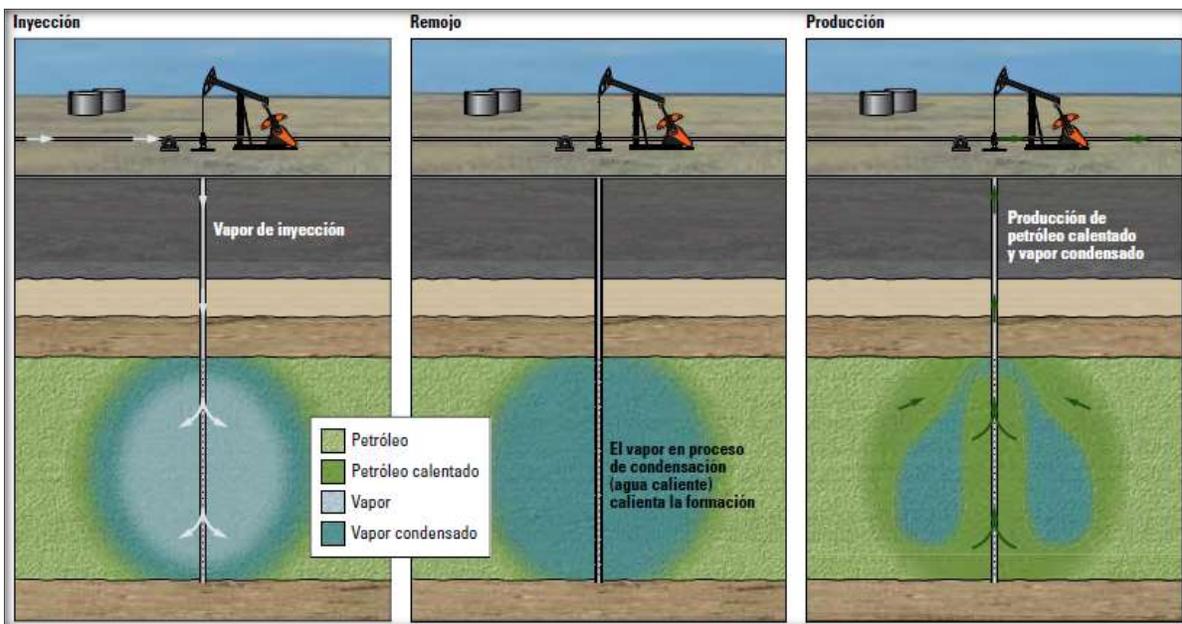
El capítulo presente está enfocado a una revisión teórica del método de recuperación de aceite por inyección de vapor, estos aspectos abarcan la definición del proceso, los principales mecanismos de recuperación, la distribución efectiva del vapor en superficie como en el yacimiento, la eficiencia de barrido, problemas en un proceso de inyección de vapor y la tasa de inyección.

### **1.1 Inyección de vapor.**

Es el proceso por el cual se le suministra energía térmica al yacimiento por medio de vapor de agua, a fin de reducir la viscosidad del aceite y ser movilizado hacia los pozos productores. El vapor es usado de dos diferentes formas: como inyección continua o inyección cíclica.

**1.1.1 Inyección cíclica de vapor o estimulación cíclica de vapor.**

Cyclic Steam Stimulation, CSS, por sus siglas en inglés, este método se realiza en un pozo que opera alternadamente como inyector y productor. Considera tres etapas en un ciclo: la etapa de inyección, la etapa de remojo y la etapa de producción, *Figura 1.1*. En la primera etapa se inyecta continuamente un volumen preestablecido de vapor (expresado en barriles equivalentes de agua) durante un tiempo, posteriormente el pozo se cierra para que el calor inyectado se transfiera y distribuya en la vecindad del pozo (soaking o etapa de remojo), donde se promueve una condensación parcial de todo el vapor inyectado para calentar la roca y los fluidos. Finalmente se abre el pozo donde se observa un incremento en la producción, que posteriormente declina lentamente por un tiempo que puede ir de varios meses hasta un año aproximadamente. El proceso se repite hasta dejar de ser económicamente rentable, debido a la declinación de la presión del yacimiento y al aumento de la producción de agua.

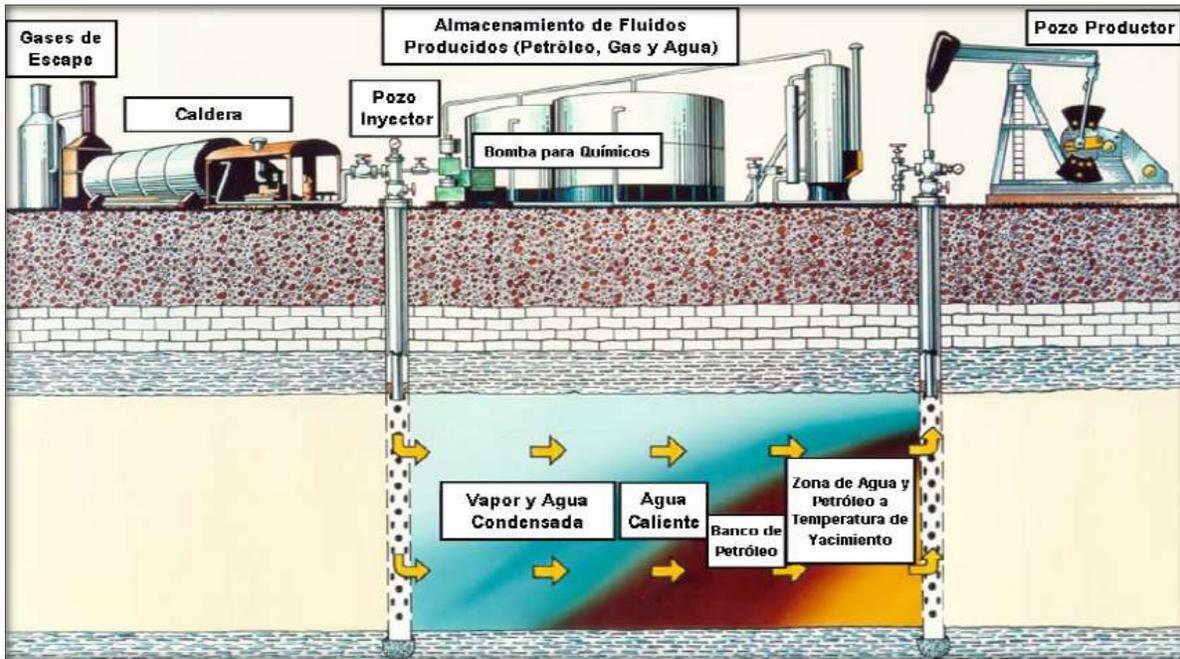


*Figura 1.1.- Diagrama representativo de la inyección cíclica de vapor*

**1.1.2 Inyección continua de vapor (ICV)**

La *Figura 1.2* representa un proceso de ICV en arreglo de pozos, que consiste en inyectar vapor hacia la formación en forma continua a través del pozo inyector. El aumento de la

temperatura de la formación causa una significativa disminución en la viscosidad del aceite, lo cual permite que éste pueda ser desplazado con facilidad desde la formación hacia los pozos productores.



*Figura 1.2.- Diagrama Representativo de la ICV.*

El desplazamiento del vapor a través del yacimiento, crea varias regiones de flujo de fluidos. Esas regiones con respecto al cambio de temperatura son llamadas: zona de vapor, zona de condensado caliente, zona de agua fría/aceite y zona inicial (1)<sup>1</sup>. *Figura 1.3*

Cuando el vapor entra al yacimiento forma la zona de vapor, cuya expansión se deberá al incremento de la tasa de inyección. El movimiento del vapor hacia la formación y la transferencia de calor causan que el vapor se condense, formando la zona de condensado caliente. El avance de la zona de condensado caliente, aunado a las pérdidas de calor forman la zona de agua fría hasta llegar a la temperatura del yacimiento cerca del pozo productor.

<sup>1</sup> La bibliográfica se indica al final del documento.

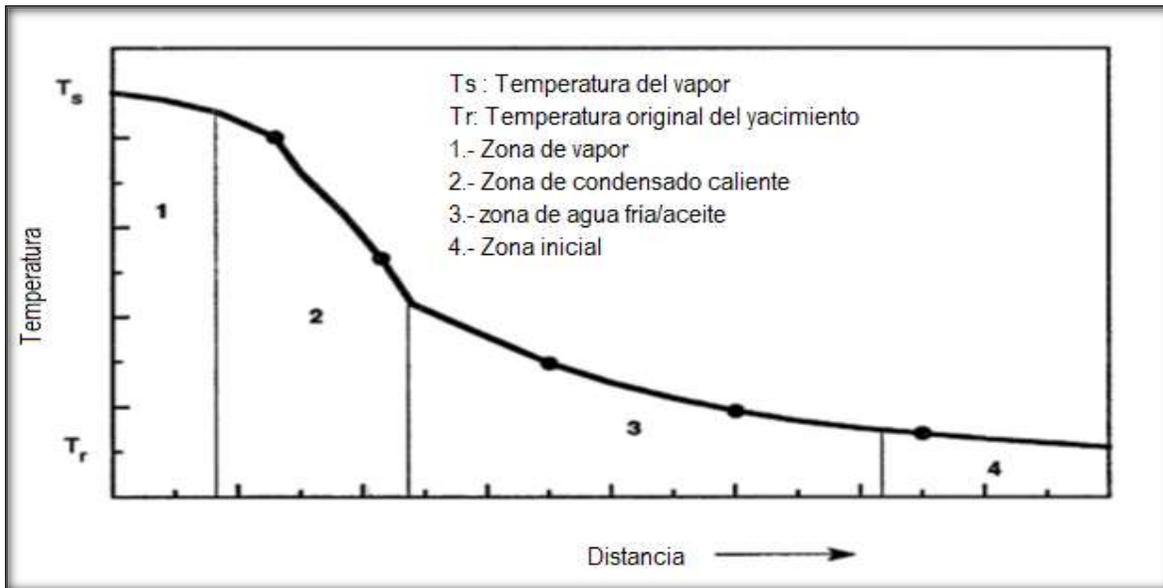


Figura 1.3.- Regiones de flujo de fluidos de acuerdo al cambio de temperatura.

### 1.2 Mecanismos de recuperación de aceite por inyección de vapor.

En cada zona actúan diferentes mecanismos, que es el resultado de la recuperación de aceite por inyección de vapor, de esta manera la saturación de aceite varía en cada zona (1). Figura 1.4

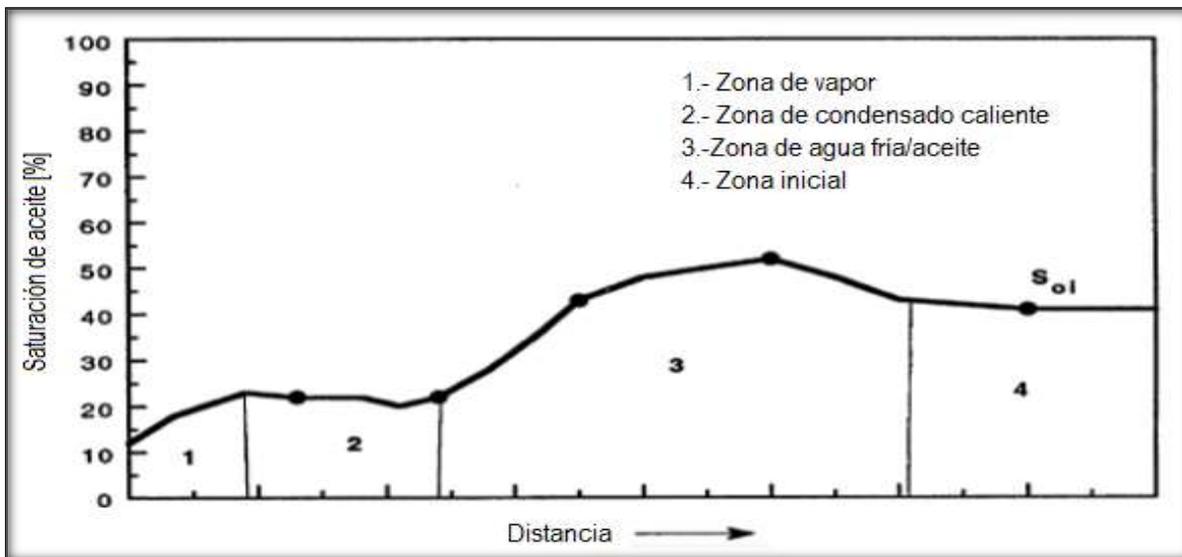


Figura 1.4.- Distribución de la saturación de aceite en las diferentes zonas.

Existen tres mecanismos de recuperación principales, cuyas magnitudes dependen de las propiedades del aceite y el medio poroso: la destilación por vapor, reducción de la viscosidad y expansión térmica de los fluidos, sin embargo otros mecanismos se hacen presentes como el empuje por gas en solución y desplazamientos miscibles.

En la zona de vapor, predomina el mecanismo por destilación con vapor. La alta temperatura y la presencia de la fase gaseosa originan que los componentes livianos del petróleo se vaporicen y sean transportados hacia adelante por el vapor, donde posteriormente se condensaran, reduciendo así, la viscosidad del crudo en el frente de condensación. De modo que la recuperación de aceite puede alcanzar el 20 % in situ, pero depende de las propiedades del aceite.

En la zona de agua caliente, la recuperación está gobernada por la expansión térmica de los fluidos cuyo orden va del 3% al 5% del petróleo in situ. Si la viscosidad del aceite exhibe una drástica disminución con aumento de la temperatura, ayudará considerablemente a la recuperación de petróleo, por el contrario, si el cambio en la viscosidad es moderado, los beneficios serán ligeramente mayores que los obtenidos con inyección de agua fría convencional.

Al final en la zona de agua fría la formación se encuentra a su temperatura original y en donde el agua fría junto con el aceite barrido por las tres zonas son bombeadas hacia la superficie. Dentro de esta zona los principales mecanismos son desplazamientos por agua y segregación gravitacional.

Los procesos de inyección continua de vapor a diferencia de la estimulación con vapor, se caracterizan por presentar mayores factores de recobro de aceite. Este comportamiento se debe principalmente a que el volumen de la formación que es afectado por el proceso de calentamiento, es mayor en el proceso continuo. Los mecanismos de desplazamiento provocados por la inyección de vapor son distintos en yacimientos de aceite pesados con aquellos de aceite medio y ligero. Los yacimientos que contienen aceite pesado producen eficientemente bajo los mecanismos de expansión térmica y segregación gravitacional, esto sucede por el efecto de la reducción de la viscosidad. Mientras que en los yacimientos de aceite ligero generalmente producen debido a la tendencia a la vaporización de los componentes ligeros y en menos medida a la expansión térmica y la segregación gravitacional; durante la explotación tardía de los yacimientos con estas características la destilación puede llegar a ser el mecanismo principal de producción.

### **1.3 Distribución efectiva del vapor.**

El vapor se produce por medio de generadores de vapor convencionales de un paso o mediante instalaciones de cogeneración, que producen vapor y energía eléctrica. Parámetros críticos, como el flujo de gas combustible y aire para la combustión, el exceso de oxígeno y la calidad de vapor son constantemente medidos y controlados.

El flujo de vapor que se inyecta en los campos petroleros es saturado (húmedo) lo que lo hace difícil de medir y controlar tanto en superficie como en el subsuelo. En superficie el método de estranguladores de orificio fijo en flujo crítico es el preferido para el control y medición del flujo de vapor. En el subsuelo, la distribución apropiada de vapor a las zonas individuales es importante si se quiere alcanzar una recuperación y un desempeño económico óptimo de inyección de vapor. Se han desarrollado herramientas de pozo para controlar la distribución de calor y el desempeño del campo y se han demostrado los beneficios de una distribución apropiada del mismo.

La identificación del vapor, la saturación de crudo y los registros de temperatura provenientes de pozos de observación se utilizan para desarrollar geomodelos de variaciones temporales de saturación de petróleo y temperatura. Esta información se utiliza posteriormente para identificar las áreas que necesitan vapor adicional o las que han alcanzado un estado de maduración de la inyección de vapor.

### **1.4 Tasa de inyección de vapor.**

La tasa de inyección de vapor al yacimiento está sujeto a dos factores principales: a la capacidad del generador y a la capacidad de la formación de recibir el fluido inyectado. Debe tenerse en cuenta que altas tasas de inyección contribuyen a que se presente una menor tasa de pérdidas de calor. Sin embargo, en la medida en que las tasas de inyección son muy altas, las presiones requeridas aumentan; lo cual genera mayores pérdidas de calor en el pozo y mayor esfuerzo en el revestimiento. Por otro lado debe tenerse en cuenta que a altas tasas de inyección puede presentarse una mayor canalización del vapor en el medio poroso, lo cual conlleva a menores eficiencias de recobro de aceite.

### **1.5 Eficiencia del barrido.**

El barrido depende de la relación de movilidad, debido a que por lo general la permeabilidad relativa del aceite ( $K_{ro}$ ) es independiente de la viscosidad, entonces este parámetro está

dado por la relación de viscosidad entre el crudo y el agua; mientras menor sea este valor, menor será el barrido.

### ***1.6 Presión de inyección.***

A las condiciones a las que el vapor es inyectado en el yacimiento, este se comporta en forma similar a un gas, ya que en la medida que aumente la presión, el volumen ocupado por el vapor es menor pero su temperatura aumenta, mejorando la eficiencia térmica en la formación.

### ***1.7 Problemas en un proceso de inyección de vapor***

El problema más grande con el proceso de vapor es que su densidad es mucho menor que la del agua y la del aceite, por lo que tiende a ubicarse en la cima del yacimiento, dejando fuera del barrido gran parte del aceite; esto es compensado parcialmente por la conducción de calor que se presenta cuando el vapor hace contacto dentro del yacimiento. Aunque se condense sigue existiendo un intercambio de energía.

El control de la movilidad es otro problema en el proceso de inyección de vapor, a causa de que la viscosidad del vapor es pequeña comparada con la viscosidad del agua y del aceite; otros aspectos involucrados en este proceso son: las pérdidas de calor, problemas con el equipo para operar a altas temperaturas, emisiones de contaminantes por la generación de energía o por la generación de vapor en la superficie.

## CAPÍTULO II

# FUNDAMENTOS DEL VAPOR

El proceso de inyección de vapor está influenciado tanto por parámetros operacionales propios de la técnica, como por las propiedades de la roca y de los fluidos de la zona que está siendo sometida a dicho proceso, de allí la importancia de analizar la influencia ejercida por estos factores en el comportamiento de la inyección.

El presente capítulo describe conceptos fundamentales, las propiedades térmicas de la roca y de los fluidos involucrados en los procesos de transferencia de calor cuando el vapor es generado e inyectado en las formaciones productoras. Estas propiedades afectan directamente el desarrollo del proceso ya que determinan cuanto calor se transfiere y cuanto calor se almacena en la formación.

### ***2.1 Propiedades térmicas del vapor***

El vapor proporciona energía al yacimiento debido a su alta capacidad calorífica por libra. Normalmente, el vapor de agua que se utiliza en los procesos de inyección es húmedo, ya que puede transportar más calor que el agua caliente. El entendimiento de sus propiedades térmicas, es necesario para comprender plenamente por que el vapor es efectivo para la producción de aceite.

#### ***2.1.1 Calor sensible y calor latente***

El vapor se crea añadiendo energía al agua, esta energía en forma de calor, tiene dos formas: Calor sensible [ $h_w$ ] y Calor latente [ $L_v$ ]. *Figura 2.1*

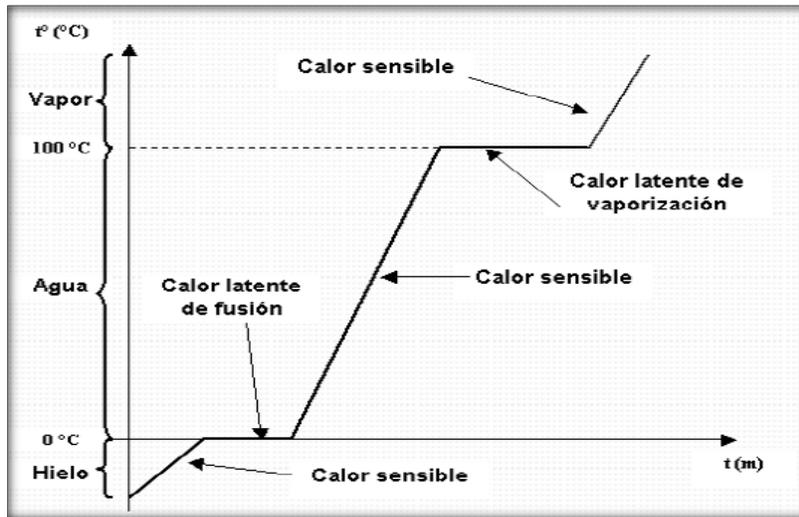


Figura 2.1.- Diagrama que representa el calor sensible y calor latente a diferentes temperaturas.

El calor sensible a una presión constante, es la cantidad de energía requerida para aumentar la temperatura del agua hasta la temperatura de saturación<sup>2</sup>.

El calor sensible o entalpia se puede leerse de tablas de vapor o estimar mediante la siguiente ecuación (con un error menor del 0.3% para presiones en el rango de 15 a 1000 [psia]) (2):

$$h_w = 91 P_s^{0.2574}, \dots\dots\dots(2.1)$$

Donde:

$P_s$ : Es la presión de saturación [psia]

La cantidad de energía requerida para lograr el cambio de estado físico del agua sin que exista variación de temperatura es el calor latente de vaporización. Esta propiedad también se puede determinar de tablas de vapor o determinarse mediante la siguiente ecuación (con un error menor del 1.9% para presiones en el rango de 15 a 100 [psia]) (2):

$$L_v = 1318 P_s^{-0.0874}, \dots\dots\dots(2.2)$$

Donde:  $L_v$ : es el calor latente de vaporización [ $\frac{BTU}{lb}$ ]

Ambos, el calor sensible y el calor latente dependen de la presión y al aumentar la presión:

<sup>2</sup> Temperatura de saturación: Es la temperatura a la cual se produce la ebullición (vaporización) del agua a una determinada presión. También se le denomina punto de ebullición y aumenta al aumentar la presión.

- La cantidad de calor sensible aumenta
- La cantidad de calor latente disminuye
- El volumen específico del vapor disminuye
- Aumenta la temperatura del vapor

### 2.1.2 Calor específico

Es la capacidad que tiene una sustancia para absorber calor y se mide como el número de BTU necesarios para aumentar la temperatura de una libra de una sustancia en 1°F. Es evidente que entre mayor sea el calor específico de una sustancia, mayor será la cantidad de calor que debe absorber para que se produzca un determinado aumento de temperatura y por lo tanto mayor será la cantidad de calor liberado al enfriarse. En general, el calor específico de una sustancia no es constante, al contrario depende de la temperatura a la cual se mide.

El agua tiene un calor específico a  $1 \left[ \frac{BTU}{lb-F} \right]$  a 14.7 [lpc] y 60 [°F], por ende, es capaz de contener y transportar más calor que cualquier otro líquido a la misma temperatura. Para el vapor, su calor específico es mucho menor (  $0.56 \frac{BTU}{lb-F}$  ), pero al igual que el agua varía muy poco con la temperatura, que en casos prácticos se considera constante. (2)

### 2.2 Tipos de vapor de agua

A una presión particular, la temperatura y la entalpía del agua se incrementan constantemente a medida que se le añade calor hasta alcanzar el punto de ebullición del agua. Cuando la temperatura alcanza los 100 °C se empieza a formar vapor a temperatura constante. El inicio de la vaporización se denomina líquido saturado; el final vapor saturado. Entre esos dos estados se produce la vaporización: el fluido está formado por dos fases (vapor y líquido) y se denomina vapor húmedo. El fluido con una temperatura menor que la de vaporización es un líquido subenfriado; el vapor con temperatura mayor que la de vaporización es un vapor sobrecalentado que contiene mayor temperatura y menor densidad. En aplicaciones industriales el uso del vapor sobrecalentado es ventajoso, por otro lado está en duda su uso en recuperación térmica, por lo menos mientras se utilicen los tipos de generadores disponibles en la actualidad. Sin embargo, el uso de vapor sobrecalentado tiene sus ventajas si se consideran las pérdidas de calor a través del pozo.

**2.3 Entalpia del vapor**

La propiedad más importante del vapor para recuperaciones térmicas es su entalpia. (3) La entalpia se define como:

$$H = U + PV, \dots\dots\dots(2.3)$$

Donde:

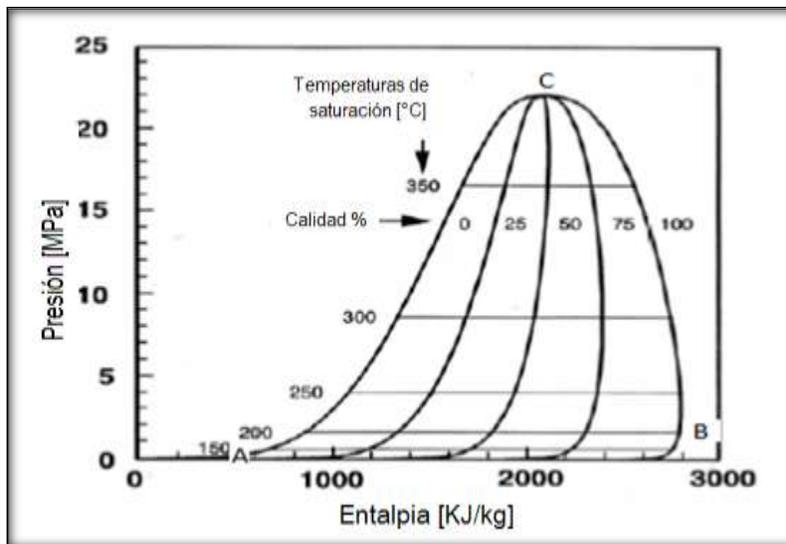
H: Entalpia en unidades de energía por unidades másicas [kJ/kg]

U: Energía interna [kJ/kg]

P: Presión [kPa]

V: Volumen específico [ $\frac{m^3}{kg}$ ]

En *Figura 2.2* muestra la curva de saturación líquido-vapor en coordenadas presión-entalpia. La línea AC corresponde a los estados de líquido saturado (curva de presión de saturación), la línea CB a los estados de vapor saturado seco (curva de presión de rocío) y C corresponde al punto crítico. En la zona izquierda de la envolvente de fases, se tiene líquido súper calentado y en la derecha vapor súper calentado. La región bifásica corresponde al vapor húmedo. (3) (4)



*Figura 2.2.- curva de saturación liquido-vapor en coordenadas presión- entalpia*

En el diagrama presión-entalpia, el calor latente de vaporización es la diferencia en entalpia entre las curvas de saturación y de rocío a una presión dada.

**2.4 Calidad del vapor**

Como se mencionó, el vapor húmedo es utilizado en la recuperación de aceite. El parámetro que define el vapor húmedo es su calidad,  $fs$ , y es definida como la fracción de la mezcla líquido-vapor que es vapor, expresado como fracción del peso total.

La entalpia del vapor con calidad  $fs$  puede ser calculada a partir de datos de tablas o por el diagrama de fases como:

$$H_s = (1 - fs)H_L + fsH_v, \dots\dots\dots(2.4)$$

O bien.

$$H_v = H_L + \lambda, \dots\dots\dots(2.5)$$

$$H_s \text{ también puede ser expresado como } H_s = H_L + fs \lambda, \dots\dots\dots(2.6)$$

Donde:

$\lambda$ : calor latente de vaporización [KJ/ kg]

Y los subíndices  $S, L, V$  corresponden a la mezcla de vapor, líquido saturado y vapor saturado.

En el campo el vapor es generado a presiones de hasta aproximadamente los 2200 psia. Pero se sabe que entre mayor sea la presión a la que se encuentre el sistema, el contenido de calor que el vapor es capaz de transferir disminuye considerablemente. (3)

La calidad del vapor es un valor difícil de determinar con exactitud. En la actualidad existen varios métodos para determinar la calidad del vapor, sin embargo, no existe ninguno que pueda considerarse simple y sencillo. Entre los más utilizados se pueden mencionar el método del separador, método de los cloruros, método de la conductividad, método del orificio y el método calorimétrico. (4)

### **2. 5 Propiedades térmicas de las rocas y los fluidos. (5)**

A menudo se utilizan las simulaciones de yacimientos para diseñar programas de EOR térmicos y pronosticar el volumen de petróleo adicional atribuido a los tratamientos de estimulación térmica y su tasa de producción con el tiempo en diversos pozos del campo. A estos efectos, los simuladores emplean algoritmos sofisticados para computar la evolución de la temperatura y del flujo de calor en un yacimiento después de la estimulación. Estas dos magnitudes; temperatura y calor, se vinculan mediante las propiedades térmicas de las rocas y los fluidos. Las más importantes de estas propiedades son la capacidad calorífica volumétrica, la conductividad térmica, la difusividad térmica. Algunas de estas propiedades para diferentes tipos de roca y fluidos se presentan en la *Figura 2.3*.

La capacidad calorífica volumétrica, especifica la cantidad de calor requerido para elevar la temperatura de una unidad de volumen de roca (y de cualquier fluido intersticial contenido en su interior) en un grado.

La conductividad térmica determina dónde y cuánto calor fluye en respuesta a las diferencias de temperatura del yacimiento. Depende de un gran número de factores: la composición y la distribución de los minerales en la matriz de la roca, de los fluidos en su espacio poroso, densidad y movimientos de los fluidos. Generalmente disminuye con el aumento de la temperatura y aumenta con la saturación de agua.

Dado que la tasa de flujo de calor es determinada por la conductividad térmica del material y el incremento de la temperatura por su capacidad calorífica volumétrica, la tasa de incremento de la temperatura se obtiene dividiendo la conductividad térmica por la capacidad calorífica volumétrica. Esta relación, denominada difusividad térmica, rige la velocidad con la que se propagan los cambios de temperatura a través de un material. La difusividad térmica determina la velocidad con la que se desplaza un frente de temperatura a través del yacimiento.

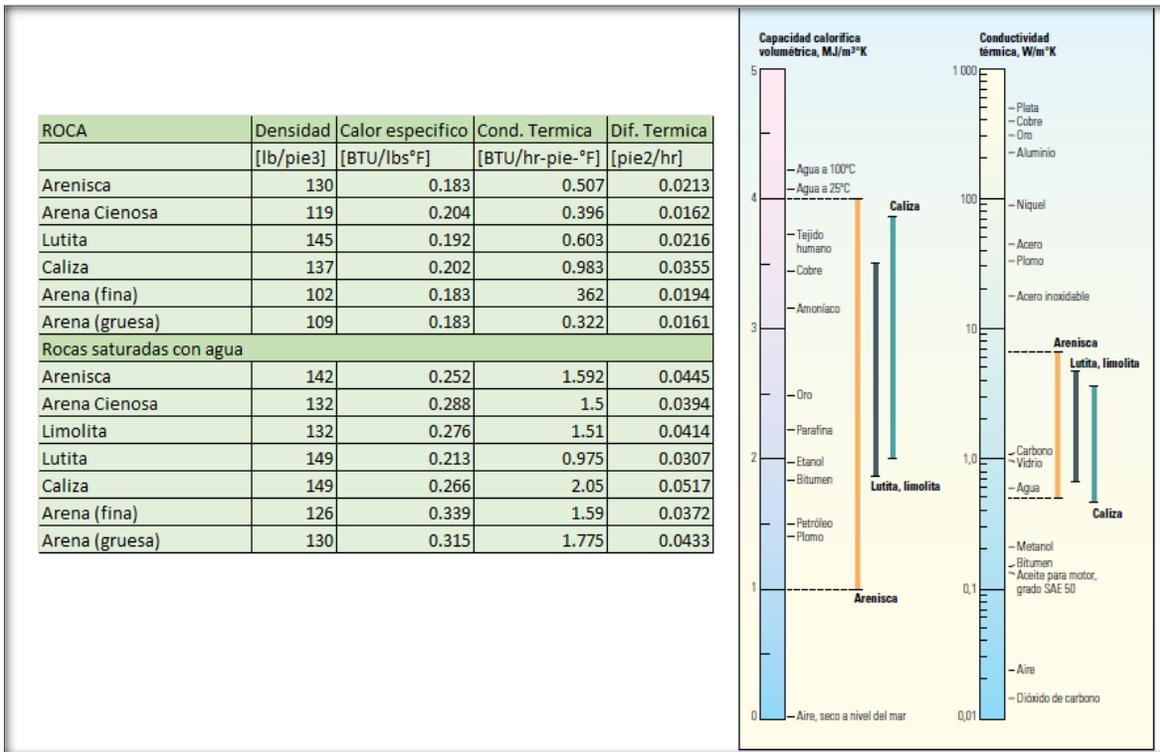


Figura 2.3.- Propiedades térmicas para rocas y fluidos comunes.

Una cuarta propiedad, el coeficiente de expansión térmica, relaciona las respuestas térmica y mecánica de las rocas del yacimiento mediante la determinación del grado de expansión de un volumen de roca a medida que se incrementa su temperatura. El conocimiento de estas propiedades es necesario, por ejemplo, para evaluar los cambios producidos en la estabilidad mecánica de un pozo.

### 2.6 Transferencia de calor

Los análisis de la transferencia y movimiento de calor dentro del yacimiento juegan un papel fundamental en recuperaciones térmicas, siendo que la conducción y la convección son los principales mecanismos de transferencia de calor. Así, mientras el calor es transportado en el yacimiento por convección, la conducción juega un rol importante en el calentamiento de los límites del yacimiento. (3)

Para describir estos fenómenos de transporte, se utilizan las leyes de flujo que tiene básicamente la misma forma (los flujos son proporcionales a los gradientes o potenciales).

**2.6.1 Conducción**

Es la transferencia de calor en contacto físico de una parte de un cuerpo a alta temperatura, a otra parte del cuerpo a menor temperatura. La velocidad de conducción de calor es dependiente sobre el material a través del cual viaja.

Si la transferencia de calor ocurre bajo condiciones de flujo continuo, es decir, las temperaturas de los cuerpos no varían con el tiempo:

$$q_x = -k \frac{\partial T}{\partial x} \dots\dots\dots(2.7)$$

Donde:

$q_x$ : es la tasa de flujo de calor por conducción [ $\frac{J}{s}$ ]

$K$ : Conductividad térmica del material [ $\frac{W}{mK}$ ]

$\frac{\partial T}{\partial x}$ : Gradiente de temperatura [ $\frac{K}{m}$ ]

El signo negativo indica el flujo de calor en la dirección en que la temperatura decrece. La conductividad térmica ( $k$ ), es función de la temperatura, sin embargo, la variación es suficientemente pequeña.

Aunque la transferencia de calor por conducción es muy importante en recuperaciones térmicas, es muy lento. Por sí mismo, la conducción térmica es un medio inadecuado de transferencia de calor dentro de grandes volúmenes de yacimiento por el contrario es efectivo en distancias cortas. (3)

**2.6.2 Convección**

Es la transferencia de calor desde una superficie hacia un fluido en movimiento (o del fluido en movimiento hacia la superficie) en contacto con ella, o de una parte de un fluido en movimiento a mayor temperatura hacia otra parte del mismo a menor temperatura. La transferencia de calor se expresa con la siguiente ecuación:

$$\frac{Q_{cv}}{A} = h_{cv}|T_F - T_S|, \dots\dots\dots(2.9)$$

Donde:

$Q_{cv}$ : Tasa de flujo de calor por convección [ $\frac{BTU}{hr}$ ]

$A$ : Área a través de la cual ocurre el flujo [ $pies^2$ ]

$h_{cv}$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección [ $\frac{BTU}{hr \cdot pie \cdot ^\circ F}$ ]

$T_F$ : Temperatura del fluido [ $^\circ F$ ]

$T_S$ : Temperatura de la superficie [ $^\circ F$ ]

### **2.6.3 Radiación**

La energía calorífica se transmite en forma de energía de la radiación electromagnética, emitida por todos los cuerpos por el hecho de encontrarse a una temperatura.

### **2.7 Variables Térmicas en el proceso.**

En la zona de vapor, éste tiende a ceder todo su calor latente hasta la temperatura de saturación, ocurriendo el cambio de fase de vapor a líquido. Las pérdidas de calor en los límites inferior y superior de la formación el calor es trasferido es por conducción. Posteriormente cuando el calor latente ha sido consumido, el calor sensible liberado del condensado va a calentar la formación primordialmente por convección.

## CAPÍTULO III

# ANÁLISIS DE LA INYECCIÓN DE VAPOR EN YACIMIENTOS NATURALMENTE FRACTURADOS

Durante la producción primaria de aceite en un yacimiento fracturado, la presión diferencial matriz-fractura es la principal fuerza de empuje. La inyección de agua es un proceso de recuperación secundaria en yacimientos con mojabilidad al agua, el agua inyectada puede imbibir dentro de la matriz y expulsar el aceite que fluye por la red de fracturas. Por el contrario en yacimientos con mojabilidad al aceite, el agua inyectada fluye preferencialmente por la red de fracturas, resultando una baja eficiencia de recuperación. Para tales yacimientos, el mejoramiento de la eficiencia de recuperación es obtenida por implementación de un gas inyector.

La optimización en la inyección de vapor en el yacimiento fracturado es una tarea difícil y crítica debido a la alta movilidad del vapor inyectado en el sistema fracturado de alta permeabilidad, causando un avance temprano de ella sin calentar la matriz efectivamente. Altas tasas de inyección son deseables para una rápida recuperación y rápido calentamiento de la matriz, pero los resultados son un avance temprano. A bajos gastos de inyección dan lugar a un calentamiento efectivo de la matriz, debido a un tiempo más largo en contacto con la matriz, pero la recuperación de aceite es más lenta. Además, los gastos de inyección y la calidad del vapor juegan un papel fundamental para la optimización en la recuperación en yacimientos fracturados.

### ***3.1 Mecanismos de recuperación en yacimientos fracturados***

Diversos estudios experimentales y aplicaciones de pruebas pilotos en diferentes campos se han reportado para identificar el desarrollo y mecanismos de recuperación de aceite por inyección de vapor a yacimientos fracturados. Reis (1992) identificó los mecanismos de recuperación durante la inyección de vapor que se enlistan en la *Tabla 3.1*

*Tabla 3.1.- Mecanismo de recuperación durante la inyección de vapor. (Reis, 1992)*

- 1.-Imbibición capilar (matriz mojada por agua)
- 2.-Expansión térmica
- 3.-Generación de gas
- 4.-Alteración química del aceite
- 5.-Segregación gravitacional
- 6.-Generación de vapor in situ
- 7.-Alteración de la matriz
- 8.-Destilación
- 9.-Reducción de la viscosidad
- 10.-Empuje de gas en solución
- 11.-Compactación de la roca

Principalmente la recuperación de aceite en yacimientos fracturados, se modela por mecanismos que se generan por dos procesos: el aceite que es expulsado de la matriz y el desplazamiento de aceite de las fracturas al pozo productor.

### **3.1.1 Mecanismos de recuperación de aceite de la matriz a la fractura.**

El mecanismo de recuperación más importante dentro de la matriz es el diferencial de expansión térmica entre el aceite y el volumen de poro de la matriz. Gran parte de los mecanismos presentes durante la inyección de vapor son independientes de la gravedad, a continuación se presentan estos mecanismos en la expulsión de aceite de la matriz.

#### **3.1.1.1 Expansión térmica**

Los minerales de la matriz y los fluidos en el espacio poroso son calentados durante la inyección de vapor, provocando su expansión, reduciendo a su vez la porosidad. Este efecto combinado es la “expansión térmica diferencial” que expelle los fluidos hacia las fracturas, a una tasa de  $9 \times 10^{-4} \left[ \frac{m^3}{m^3 K} \right]$ , representado el mecanismo principal de expulsión del aceite en la matriz.

Para el aceite la expansión térmica es grande que la del agua, esto contribuye a la reducción en la saturación de aceite residual (Sor) a altas temperaturas.

Un incremento de temperatura de los bloques de matriz cercana a los 205°C resulta de la expansión diferencial térmica del fluido y el volumen de poros del 20% del volumen de poros. Este mismo volumen de fluidos será expulsado de la matriz después del

calentamiento. La expansión del aceite depende de su composición, esto provoca un incremento en su saturación y fluidez. La expansión térmica es más efectiva en aceites ligeros.

### **3.1.1.2 Imbibición capilar**

A saturaciones equivalentes la presión capilar en la matriz es muy alta que la presión capilar en las fracturas ( $P_{cm} \gg P_{cf}$ ), esto representa la fuerza de desplazamiento debido a la diferencia de presiones capilares.

Para yacimientos mojados por agua, el agua presente en el sistema de fracturas es desplazada en los bloques de matriz a través de los poros más pequeños aumentando la presión interna de los bloques de matriz y expulsando aceite por los poros de mayor volumen. El volumen de aceite expulsado depende de la tensión interfacial, mojabilidad y geometría de los poros del sistema roca- fluidos. La producción mediante este mecanismo varía con bajas temperaturas desde un poco por ciento hasta un 70 %.

En yacimientos mojados por aceite la imbibición del agua incrementa directamente con el aumento de la temperatura, debido a la reducción del ángulo de contacto entre el agua y la roca.

La imbibición capilar espontanea se produce cuando la fractura contiene una fase mojante y el petróleo en el interior de la matriz es la fase no mojante. Durante este fenómeno, el agua imbibibe en la matriz y el petróleo es expulsado de la matriz a la fractura.

### **3.1.1.3 Generación de gas**

Cantidades significativas de gas se generan en el yacimiento durante la inyección de vapor por las diferentes reacciones químicas (agua/aceite, agua/roca) que desplazan el aceite de la matriz mientras su volumen se incrementa. La generación de gas puede llevarse a cabo a partir de temperaturas bajas de 230°C, dependiendo de la composición de los fluidos del yacimiento y de la composición de la roca (generalmente en carbonatos). Estos gases generados incluyen el  $CO_2$ ,  $H_2S$  e hidrocarburos ligeros.

El  $CO_2$  puede enriquecer e hinchar el aceite. En altas temperaturas se genera mayor cantidad de  $CO_2$  aunque menos aceite es enriquecido e hinchado debido al exceso de la expansión térmica.

#### ***3.1.1.4 Drene gravitacional***

Este mecanismo puede ocurrir en yacimientos con fracturas verticales saturados por agua o aceite. La diferencia del calentamiento hidrostático entre el fluido en las fracturas y el aceite en el bloque de la matriz, establecerá un gradiente de presión vertical que forzará al aceite a salir de la matriz. En yacimientos con baja permeabilidad en la matriz el drene gravitacional no es un factor significativo durante la inyección de vapor porque resulta de un diferencial de gradiente de presión bajo.

#### ***3.1.1.5 Generación de vapor in situ***

Es la vaporización del agua contenida en los bloques de la matriz por causa de la caída de presión en el yacimiento. Cuando un YNF es sometido a la inyección cíclica de vapor, las caídas de presión en el yacimiento se presentan con mayor rapidez que la caída de temperatura por conducción térmica. Puesto que los bloques de la matriz se contraerán cerca de la temperatura de saturación del vapor a la presión de inyección, una caída de presión permitirá la vaporización instantánea del agua contenida en los bloques de la matriz. Esto llevará a la expulsión del aceite similar al empuje de gas.

#### ***3.1.2 Mecanismos de recuperación de aceite de las fracturas al pozo productor.***

Las fracturas tienen efectos positivos o negativos en el flujo de fluidos; en fracturas abiertas o parcialmente mineralizadas producen un efecto positivo en el flujo de aceite, pero un efecto negativo en el flujo de gas y agua debido a la canalización de estos fluidos. Por el contrario las fracturas cementadas crean barreras de permeabilidad para todo tipo de flujo.

El aceite expulsado de la matriz se moviliza por la red de fracturas como consecuencia de un gradiente de presión en el medio fracturado. En yacimientos muy fracturados es difícil que se establezca el gradiente de presión, no obstante, un gradiente de presión aunque pequeño será suficiente para movilizar el aceite en las fracturas. Los principales mecanismos de recuperación en la red de fracturas son la destilación y la reducción de la viscosidad.

### **3.1.2.1 Destilación**

El vapor que fluye en las fracturas permite la destilación cuando entra en contacto con el aceite, las fuerzas termodinámicas evaporan algunos de los componentes del hidrocarburo, reduciendo así la saturación residual de aceite (Sor). La destilación se hace presente si la presión es menor que la suma de las presiones del agua y del aceite, entonces, la mezcla de líquido hierve y, en consecuencia, se presenta la fase de vapor compuesta de vapor de agua y componentes orgánicos.

### **3.2 Inyección de vapor en carbonatos.**

La mayoría de los yacimientos carbonatados son yacimientos naturalmente fracturados, donde la recuperación de aceite en la matriz en este tipo de yacimientos representa grandes retos. Las fracturas existen en todas las escalas; desde las fisuras microscópicas hasta las estructuras de varios kilómetros, denominadas enjambres o corredores de fracturas, que crean redes de flujo complejas en el yacimiento. En consecuencia, el movimiento de los hidrocarburos y otros fluidos a menudo no es el esperado o pronosticado.

Además de las variaciones producidas en la porosidad, la mojabilidad es una característica heterogénea adicional de los carbonatos. La maduración de la roca carbonatada que contiene agua y petróleo convierte a las rocas inicialmente mojadas por agua en rocas de mojabilidad mixta o por petróleo, lo que significa que es más difícil de producir.

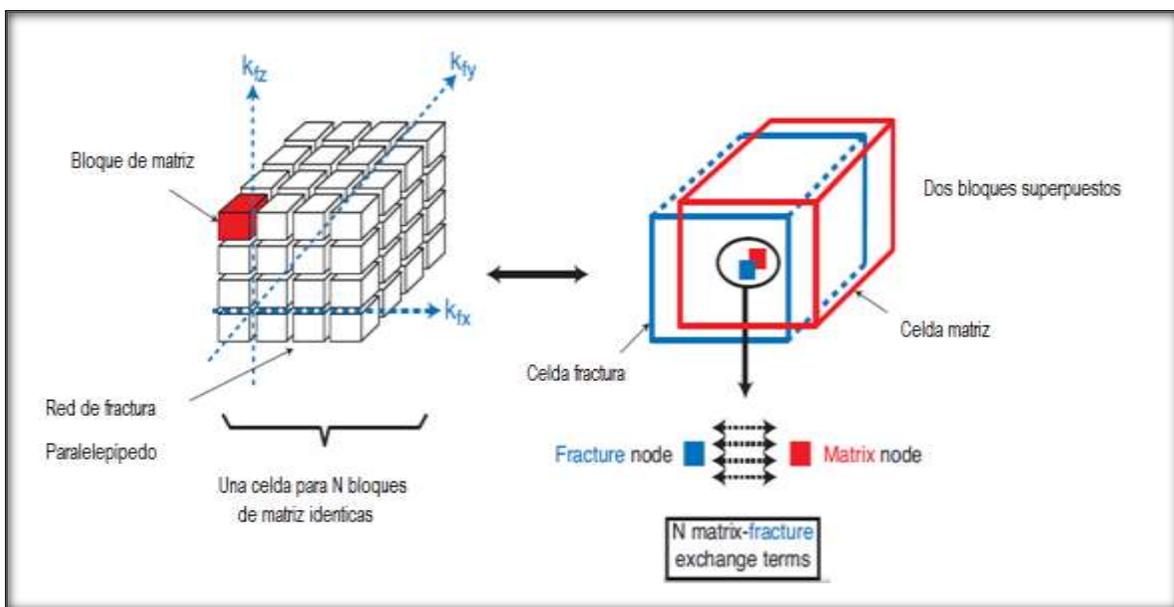
La estructura y competencia de las capas de carbonato se ven afectadas considerablemente durante la inyección de vapor u otros procesos térmicos. Se ha demostrado que cuando los carbonatos se someten a este tipo de procesos térmicos se producen alteraciones en la permeabilidad de la roca como consecuencia de un fenómeno llamado “choque térmico” (producido a temperaturas de 125 a 175 °C) que puede llegar a mejorar la permeabilidad expandiendo las fracturas.

### **3.3 Modelos de simulación a yacimientos naturalmente fracturados.**

La simulación de yacimientos naturalmente fracturados (NFR) se basa en el concepto de medio doble, introducido por Barenblatt y Zheltov (1960), en este enfoque el yacimiento fracturado consiste en dos elementos: la fractura y la matriz, que intercambian fluidos. Warren y Root (1963) propusieron una representación geométrica simplificada para facilitar

la formulación de transferencia matriz- fractura, sin embargo, ellos no consideraron una comunicación entre los bloques de matriz.

Como se muestra en la *Figura 3.1*, un modelo de yacimiento doble consiste de dos bloques idénticos superpuestos, una red de fractura y una red de matriz. El flujo de fluidos es simulado entre las celdas vecinas de la red de fractura. Una forma conveniente de expresar el flujo matriz-fractura de un par de red matriz- fractura, es considerar el medio fracturado como paralelepípedos (matriz) delimitados por conjuntos ortogonales (fractura) (7).



*Figura 3.1.- Representación del modelo de doble porosidad de un yacimiento fracturado.*

Por lo general, los modelos se pueden clasificar en dos grupos: de doble porosidad y de doble permeabilidad. La representación de los modelos físicos del presente trabajo de experimentación, se basa en esta concepción del modelo de doble porosidad, que supone la red de fracturas como un medio primario para el flujo de fluidos y la matriz de baja permeabilidad y de alta capacidad de almacenamiento.

# CAPÍTULO IV

## DISEÑO EXPERIMENTAL

### **4.1 Revisión de la literatura**

Diversos estudios experimentales y de simulación sobre la inyección de vapor a yacimientos fracturados han sido presentados, entre ellos los resultados significativos se presentan a continuación:

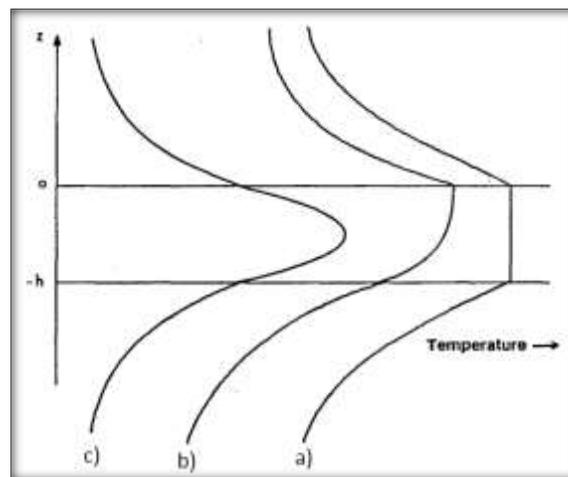
1. Una recuperación significativa de aceite puede ser recuperada por inyección de vapor en un yacimiento fracturado, comparado con la recuperación primaria e inyección de agua.(7)
2. El éxito y la implementación de los proyectos de inyección de vapor dependen de la caracterización del sistema fracturado.(7)
3. El vapor inyectado en un sistema matriz-fractura solo fluye por la red de fracturas, donde la matriz es eficientemente calentada por conducción y por convección cuando el condensado imbebe la matriz. La presión capilar agua/aceite de la matriz y la presión capilar gas/aceite de la fractura son parámetros significativos en la recuperación. (8)
4. El agua caliente imbebe en la matriz en sistemas mojados por agua, reduciendo la viscosidad del aceite y desplazándolo.

Los estudios científicos están centrados en estudiar los mecanismos de recuperación que actúan en el proceso, o bien, en los mecanismos de transferencia de calor del fluido inyectado a la formación. A pesar de lo anterior, no hay una clara comprensión de la interacción matriz- fractura bajo los efectos térmicos por estudios experimentales, ellos se debe poner énfasis en las condiciones siguientes:

1. Interacción matriz- fractura bajo condiciones estáticas para agua caliente y vapor a escala de laboratorio.
2. Interacción matriz- fractura bajo condiciones dinámicas de agua caliente y vapor a escala de laboratorio.
3. Procesos anteriores a escala de campo. (6)

La predicción exacta de los perfiles de temperatura dentro del yacimiento sometidos a procesos de recuperación térmica es un factor clave en diseños de procesos, que puede ayudar a pronosticar la producción y manejo del yacimiento. Tales perfiles son gobernados por la transferencia de calor entre la matriz y el flujo de fluidos donde es altamente dependiente de las propiedades térmicas de la roca y los fluidos. (9)

Literatura sobre los análisis de los perfiles de temperatura en la formación, idealizan un perfil típico para el caso de un medio de temperatura uniforme dado por la curva a) de la *Figura 4.1*; en la inyección de vapor, el vapor tiende a ascender en la parte superior generando un perfil de temperatura dado por la curva b). En ausencia de zonas ladronas el perfil de temperatura resultante de la inyección de agua caliente está dado por la curva c). (10)



*Figura 4.1.-Idealización de los perfiles de temperatura generados en un intervalo de inyección.  
a) Temperatura uniforme, b) Inyección de vapor, c) Inyección de agua caliente.*

Sin embargo, estas idealizaciones no tienen un estudio científico en la práctica, no obstante, representan una clave para la comprensión de la propagación del calor. Es por ello, que el presente trabajo se fundamentó en realizar experimentos para estudios de los perfiles de temperatura en un sistema matriz-fractura y el análisis del comportamiento espacio-temporal del frente de vapor, generados por un proceso de recuperación mejorada de aceite.

### **4.2 Objetivos**

General:

1. Analizar experimentalmente el comportamiento espacial y temporal del frente de calor en un modelo físico de un sistema matriz-fractura durante un proceso de inyección de vapor, para la recuperación adicional de aceite.

Particulares:

1. Diseñar experimentos que permitan analizar la formación y propagación de perfiles de temperatura a través de imágenes térmicas.
2. Generar mapas de distribución de temperaturas en espacio-tiempo para sistemas homogéneos.
3. Generar mapas de distribución de temperaturas en espacio-tiempo para sistemas matriz-fractura.
4. Generar propuestas de metodologías para la optimización de análisis del frente de calor en un proceso de inyección de vapor.

### **4.3 Planteamiento del problema**

La forma que adopta y se propaga un perfil de calor a través de un sistema matriz-fractura puede ayudar a comprender la propagación del calor en la formación cuando se inyecta un fluido caliente. Esta información es útil para predecir pérdidas de calor, localización de zonas de influencia térmica, el efecto en los fluidos, y por consiguiente mejorar el entendimiento de la producción de aceite. Tales perfiles tienen un carácter cambiante y dinámico al pasar por diversas zonas con diferentes conductividades y capacidades térmicas del sistema roca-fluidos a diferentes condiciones de temperatura, también es sensible a variables como el tiempo, velocidad y gasto de inyección de fluido que aporta energía térmica.

Existen casos documentados en México de la inyección de vapor con resultados exitosos, sin embargo; el comportamiento de la producción es cambiante en el tiempo y aún no se esclarece cuáles son los mecanismos que la dominan. Esta incertidumbre se presenta en arenas que pueden idealizarse como sistemas homogéneos. Sin embargo, en litologías carbonatadas y fracturadas el conocimiento es muy escaso, por lo que se requiere generar información técnica útil desde un nivel básico para el entendimiento de la propagación de calor en este tipo de sistemas, para generar criterios que permitan interpretar y predecir el

comportamiento de los perfiles de temperatura durante la inyección de vapor y sus consecuencias en la producción de aceite.

### **4.4 Hipótesis de trabajo**

Los desarrollos experimentales residen en las siguientes hipótesis fundamentales:

1. La propagación de calor es discontinua en un sistema matriz-fractura.
2. Existe regeneración del perfil de temperatura cuando el frente sale de la fractura e ingresa a la matriz.
3. Existe una dependencia en la generación y propagación del frente de calor en un sistema matriz-fractura con el tiempo de residencia y la velocidad del fluido inyectado.

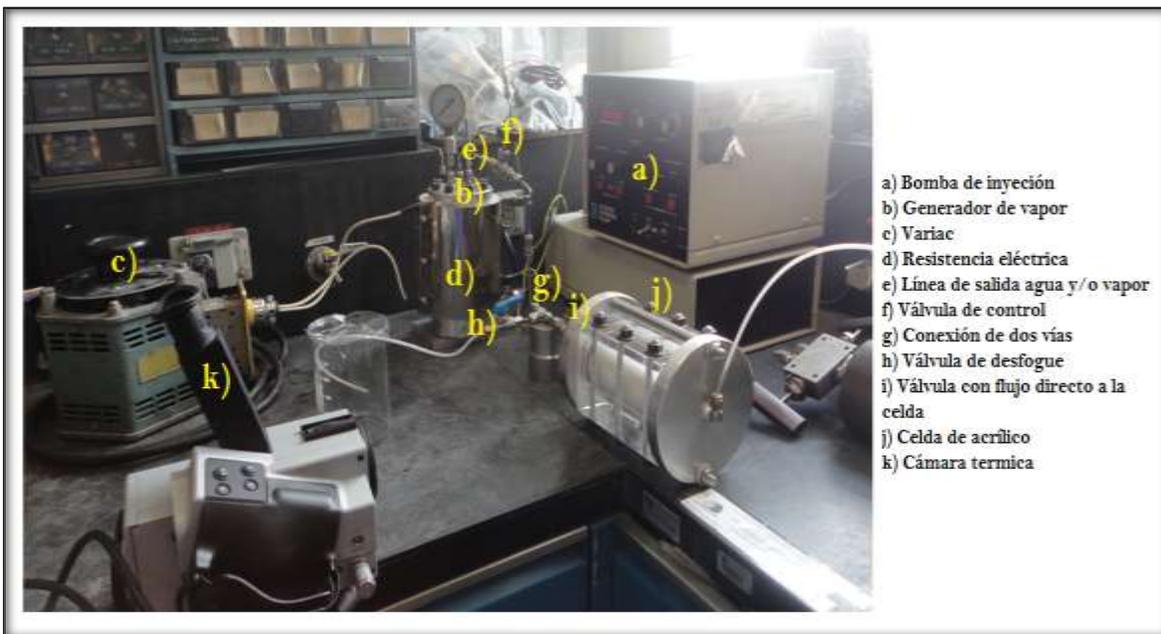
### **4.5 Metodología**

Se desarrollaron experimentos que simulaban procesos de recuperación de aceite por inyección de vapor para monitorear el comportamiento de la temperatura en sistemas homogéneos y en sistemas fracturados. Imágenes térmicas de los procesos fueron tomadas para observar la forma que adopta el perfil de temperatura en ambos sistemas a fin de realizar comparaciones entre ellos. Posteriormente se generaron los mapas de distribución de la temperatura en espacio y tiempo para el monitoreo del frente de calor.

Los estudios experimentales se efectuaron en tres etapas, en la primera de ellas se realizaron pruebas para el manejo y establecimiento de las condiciones óptimas en el uso de los equipos utilizados para generar vapor, controlar temperaturas, presiones, velocidades, calidad del vapor y flujos de inyección hacia el modelo diseñado [Ver Apéndice A Equipo Experimental]. La segunda etapa consistió en la corrida de dos experimentos casos base para procesos de inyección de vapor en sistemas homogéneos con y sin saturación de fluidos. Por último se realizaron experimentos para la recuperación de aceite por inyección de vapor a sistemas fracturados, en cada sistema se consideró el grado de fracturamiento como variable dependiente.

#### 4.6 Configuración para el proceso de inyección de vapor.

La *Figura 4.2* representa la configuración de los equipos utilizados para la generación e inyección de vapor en sistemas homogéneos. Inicialmente se fijó un gasto de salida de agua de la bomba de inyección (a), enviada al generador de vapor (b). El variac<sup>3</sup> (c) reguló el suministro de corriente eléctrica enviada a la resistencia eléctrica (d) para proporcionar energía en forma de calor al agua. En la línea de salida de agua/vapor (e) del generador, se montó una válvula de control (f) que permitió regular presiones así como controlar gastos de salida de los fluidos. A través de la misma línea se colocó una conexión de dos vías (g), de la cuál una se utilizó para colocar una válvula de desfogue (h) y en la otra una válvula (i) con flujo directo a la celda de acrílico (j) donde se formaron los modelos físicos.



*Figura 4.2. Configuración del proceso de inyección de vapor en un sistema homogéneo.*

La configuración de los equipos para la generación de vapor en sistemas fracturados fue el mismo que el caso anterior, *Figura 4.3*; sin embargo, la celda de acrílico se colocó de forma vertical, donde la inyección de agua caliente fue por la parte inferior y la producción por la

<sup>3</sup> En el Apéndice A Equipo Experimental se describe cada uno de los aparatos utilizados.

parte superior y de manera inversa en el proceso de inyección de vapor. Se observa que la inyección de fluidos a los modelos físicos es en el punto concéntrico de la celda.



Figura 4.3.- Configuración del proceso de inyección de vapor para un sistema matriz- fractura

El uso de la cámara térmica (CV) *Figura 4.2*, permitió obtener imágenes térmicas de los perfiles de temperatura bajo los procesos de inyección de calor. La distancia entre la cámara térmica y la celda de acrílico fue aproximadamente de 60 [cm] para el primer sistema y de 90 [cm] para el segundo sistema.

Las imágenes generadas por la CV se analizaron con el software *FLIR QuickReport*, herramienta útil para visualizar una imagen mediante escalas de colores que indican las diferencias de temperatura.

### 4.7 Proceso de inyección de vapor en sistemas homogéneos.

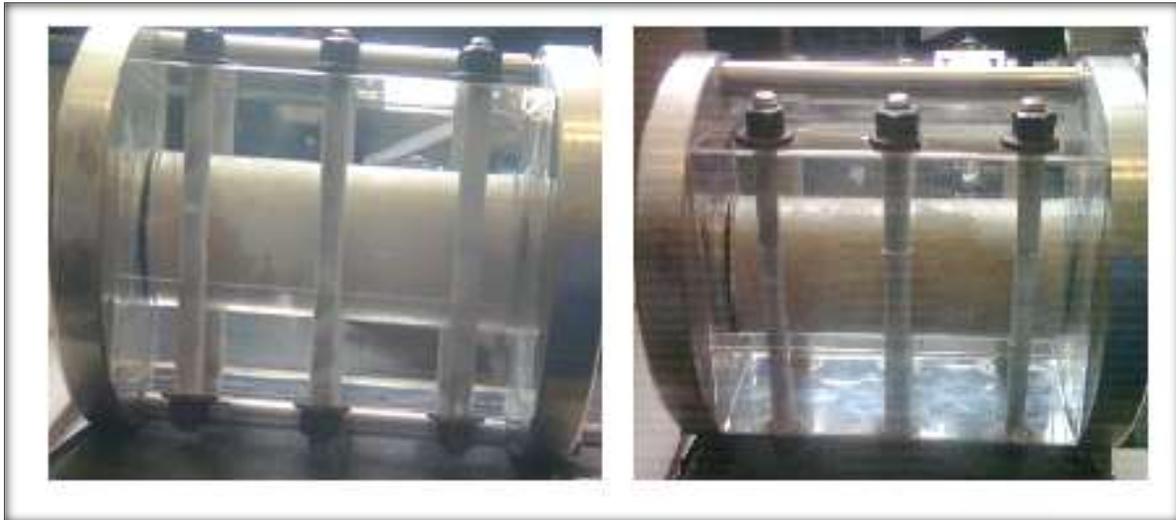
#### 4.7.1 Caso base 1

El experimento caso base 1 se estableció como un nivel básico a fin de realizar comparaciones entre todos los procesos.

En la celda de acrílico se realizó un empacamiento con 574.3 [gr] de arena limpia y seca, sin estar muy compactada para evitar restricciones del flujo. Posteriormente se inyectó solo

vapor en forma continua a una temperatura promedio de 105-128 [°C], a una presión de 44 [psia].

El avance físico de los procesos de inyección de vapor se observa en la *Figura 4.4*, resultando la formación de tres zonas: la zona de vapor, la zona de agua caliente y la zona de agua fría. A tiempos mayores de inyección, el sistema alcanzó el equilibrio térmico local cuyo resultado fue la entrada y salida de agua/vapor.



*Figura 4.4.- Avance físico de la inyección de vapor para un empacamiento de arena seca.*

### 4.7.2 Caso base 2

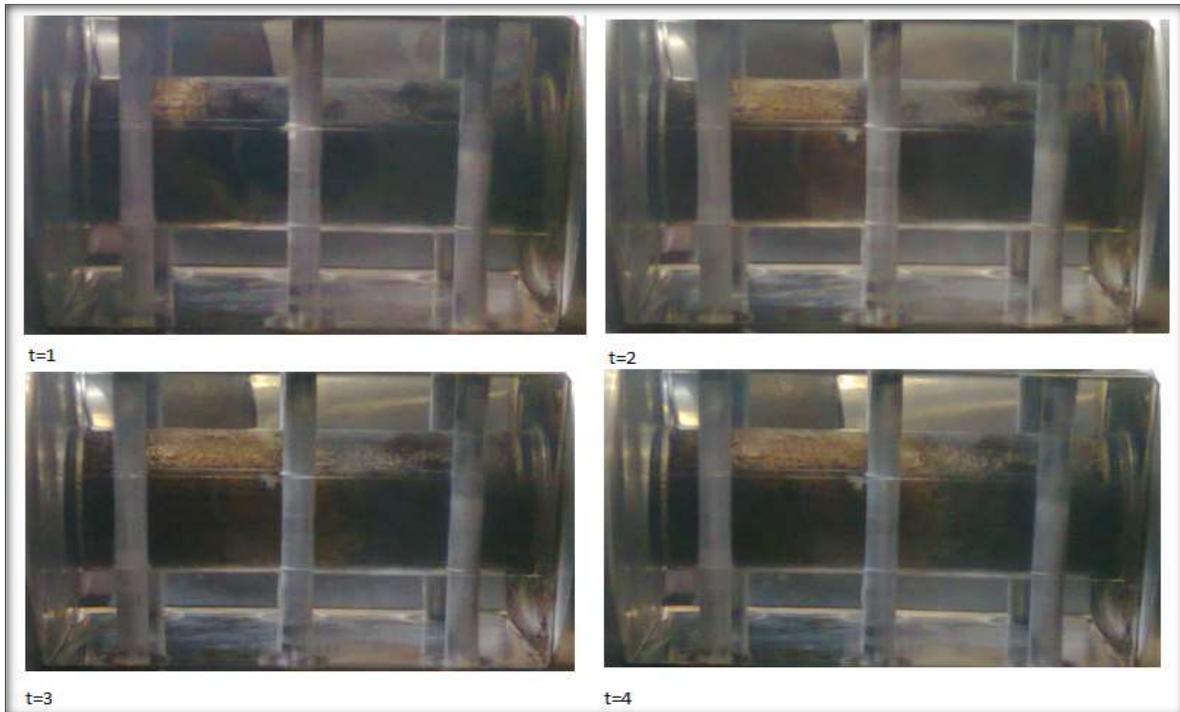
La etapa secuencial para saturar el medio homogéneo se llevó bajo la siguiente forma:

1. Empacamiento de arena seca y limpia en la celda de acrílico.
2. Saturación de agua a través de una inyección continua. La inyección finalizó cuando la producción de agua fue constante para tiempos constantes.
3. Inyección de aceite. En este caso la inyección finalizó cuando sólo había producción de aceite.

Formado el sistema homogéneo con saturación de fluidos (agua/aceite), preferentemente mojado por agua, se inyectó agua caliente a 48-60 [°C] para una producción primaria y a fin

de dejar una saturación residual de aceite. Por consiguiente, se inyectó vapor saturado a un gasto constante.

El barrido de aceite por vapor fue mayor en comparación con el agua caliente, observando un barrido de aceite uniforme en todos los planos. *Figura 4.5*



*Figura 4.5.-Avance físico del barrido de aceite por inyección de vapor en el caso base 2.*

#### **4.8 Proceso de inyección de vapor en sistemas fracturados.**

Varios modelos han sido presentados para manejar los procesos que rigen el flujo de fluidos y de calor en los yacimientos fracturados; la configuración de los modelos físicos en el presente desarrollo experimental se consideró el modelo de Warren y Root (1963) descrito en el Capítulo III, donde un bloque de roca representa la matriz y el espacio entre dos bloques o un bloque y la superficie interior de la celda representan las fracturas.

Se utilizó caliza de la formación Benfort (E.U.A) cortadas en tres bloques para configurar el sistema matriz-fractura de los tres experimentos. Las dimensiones de los bloques y el arreglo de los sistemas se muestran en la *Figura 4.6*.

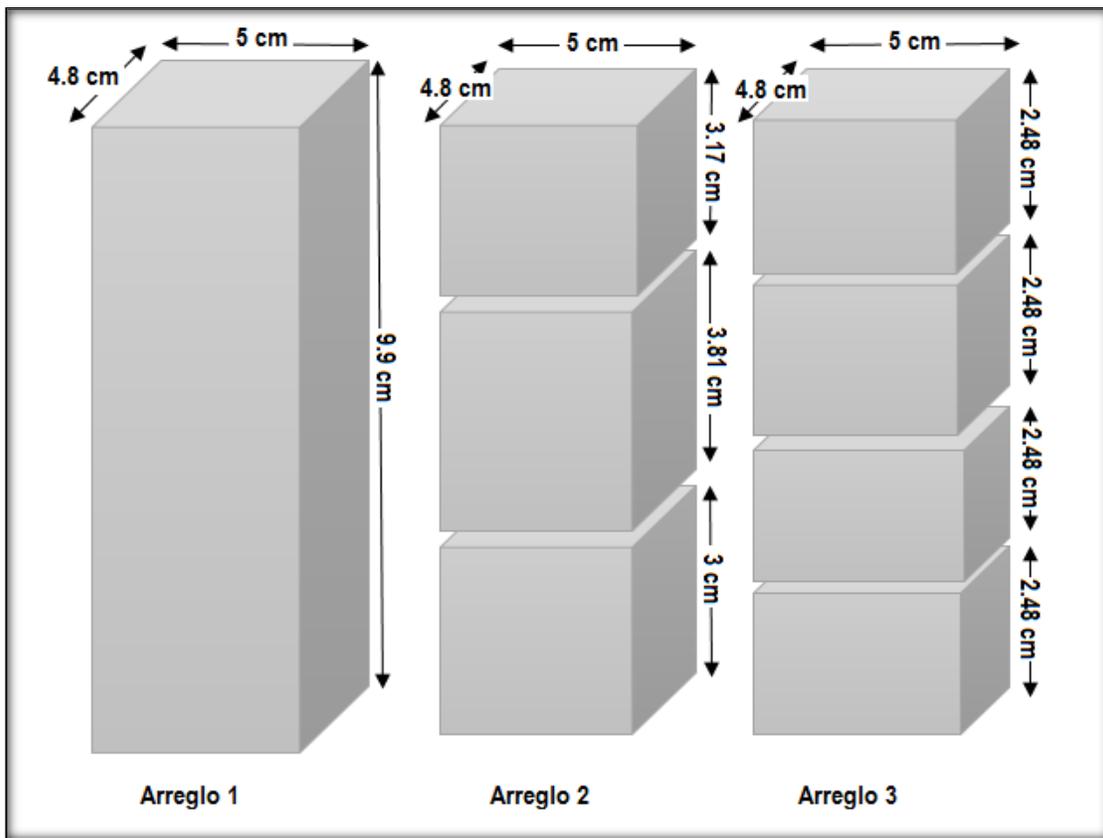
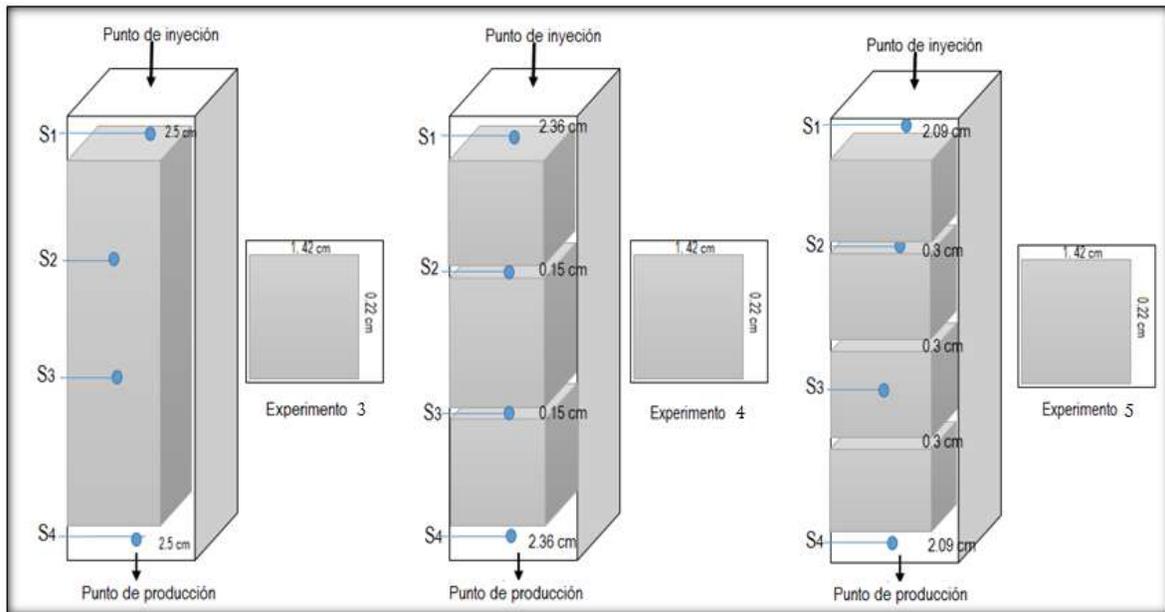


Figura 4.6.- Dimensiones de los bloques y arreglo del sistema matriz- fractura para los tres experimentos.

Cuatro termopares o sensores fueron introducidos en diferentes puntos. La distancia de los termopares con respecto al punto de inyección se presenta en la *Tabla 4.1*. Cada termopar dentro de la celda de acrílico registró temperaturas en una misma línea vertical lo que conlleva al mapeo de las temperaturas en un solo plano vertical.

<b>Tabla 4.1.- Distancia de los sensores desde el punto de inyección</b>	
<b>Sensor</b>	<b>Distancia desde el punto de inyección [cm]</b>
Sensor 1	1.8
Sensor 2	5.5
Sensor 3	9.45
Sensor 4	13.3

Los sensores 1 y 4 registraron temperaturas de entrada y salida de vapor. Mientras que los sensores 2 y 3 registraron temperaturas dentro de la matriz o en la fractura de acuerdo a cada configuración, *Figura 4.7*.



*Figura 4.7.- El diagrama esquemático muestra el concepto de la posición de los termopares y tamaño de espaciamiento de las fracturas en los experimentos 3,4 y 5.*

Para los experimentos 3 y 4, la morfología optada fue fracturas rellenas de arena fina, distintivo de barreras permeables para el flujo de fluidos. Por el contrario, para el experimento 5 las fracturas horizontales y verticales fueron abiertas, es decir, 100 % para el flujo de vapor.

#### **4.8.1 Saturación de las muestras de roca**

Inicialmente los bloques de caliza fueron calentados en la estufa, a fin de eliminar el agua que penetró en los poros cuando se realizaron los cortes para obtener las dimensiones especificadas. Posteriormente se saturaron las muestras de roca bajo el siguiente esquema:

1. Peso de los bloques limpios y secos.
2. Se realizó vacío en los poros de las muestras.
3. Se inyectó agua (previamente desairada), sin dejar de realizar vacío. (Fluido mojante)
4. Peso de los bloques saturados de agua y determinación del volumen poroso.
5. Se fijó un 25% de agua residual a cada bloque de roca y se eliminó el exceso calentando las muestras.

6. Las muestras se sometieron a otro nivel de vacío en la celda de imbibición.
7. Inyección de aceite a una presión de 1500 [psia] (Fluido no mojante).
8. Peso de los bloques saturados de agua/aceite. *Tabla 4.2*

<b>Tabla 4.2.-Determinación del volumen poroso y saturaciones de fluidos.</b>							
<b>BLOQUE 1</b>	<b>Wseco [gr]</b>	<b>Wsw [gr]</b>	<b>Porosidad</b>	<b>(Wsw-Wseco)= ml de agua</b>	<b>25% de agua</b>	<b>Wsw 25%</b>	<b>Wsw0 [gr]</b>
	531.13	577.328	19%	46.198	11.5495	542.6795	569.45
	162	174.4	19%	12.4	3.1	165.1	174.9
<b>BLOQUE 2</b>	201.4	216.6	18%	15.2	3.8	205.2	216.6
	160.8	172.8	16%	12	3	163.8	174.1
	125.8	137	18%	11.2	2.8	128.6	138.2
<b>BLOQUE 3</b>	132.6	144.1	19%	11.5	2.875	135.475	144.1
	130.9	142.5	19%	11.6	2.9	133.8	142.7
	129.8	141.3	19%	11.5	2.875	132.675	140.5

#### **4.8.2 Condiciones de inyección agua caliente/ vapor en sistemas fracturados.**

Todas las pruebas estuvieron limitadas a una temperatura máxima de 90° [C] <sup>4</sup> dentro de la celda de acrílico. La inyección de agua caliente fue efectuada como un proceso de recuperación primaria solo para los experimentos 3 y 4, a temperaturas entre los 45-60 [°C] y presiones de 5-14 [psia].

El vapor se inyectó con una calidad del 80-85% en todos los casos, y finalizó cuando se registraron temperaturas cercanas a los 100 [°C] en el sensor 1. Algunas pruebas superaron el valor máximo de la temperatura<sup>5</sup>, como se muestran en las gráficas *T vs tiempo* del capítulo siguiente. En el experimento 5, el vapor fue el único fluido de inyección para la recuperación de aceite.<sup>6</sup>

<sup>4</sup> La temperatura máxima a la cual el acrílico comienza su deformación es de 80 [°C]; sin embargo, se optó una tolerancia de 90-100[°C] como máxima.

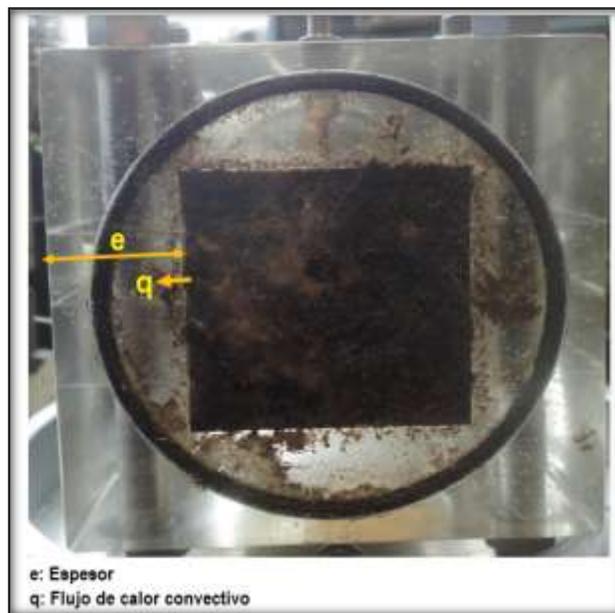
<sup>5</sup> A las temperaturas superiores a los 100 [°C] el acrílico se deformó en las partes cercanas al punto de inyección.

<sup>6</sup> La forma de los perfiles de temperatura de las pruebas anteriores mostraban comportamientos similares; por ende, se analizó su comportamiento con fracturas abiertas y de mayor espesor, afectas sólo por vapor.

#### 4.9 Análisis térmico de la inyección del fluido.

El flujo térmico está controlado por las diferencias de temperatura del fluido inyectado y las regiones del sistema; el flujo de calor tiene magnitud y dirección que está en función de los gradientes de temperatura  $[\frac{dT}{dx}, \frac{dT}{dy}, \frac{dT}{dz}]$ . La diferencia de un grado en cualquier dirección representa un cambio de temperatura equivalente. Por consiguiente para generar los mapas de distribución de las temperaturas en espacio-tiempo, se consideró que  $\frac{dT}{dx} \gg \frac{dT}{dy}, \frac{dT}{dz}$  en sistemas homogéneos y  $\frac{dT}{dz} \gg \frac{dT}{dx}, \frac{dT}{dy}$  en sistemas fracturados. Bajo esta suposición, el análisis se realizó en una dimensión, respecto a la dirección de flujo de fluidos y despreciando el flujo de calor en otras direcciones.

La transferencia de calor del fluido caliente a la superficie interna de la celda es debido a la convección; entonces, el tiempo difusivo de calor de la parte interna a la parte externa de la celda es un proceso que tarda varios minutos por el espesor del acrílico (4.6 [cm]), *Figura 4.8*. Por lo anterior, el perfil que se genera en la parte interna del proceso la CT lo detecta minutos después de ocurrido el proceso interno.



*Figura 4.8.- El grosor del acrílico afecta la imagen procesada por la CV. La CV detecta la radiación infrarroja emitida por la superficie externa de una cara de la celda.*

En la celda utilizada para los procesos de inyección de vapor a sistemas fracturados, el sello de las tapas fue por tornillos como se observa en la *Figura 4.9*, esto afecta considerablemente la toma de imágenes térmicas de los procesos. Para observar la forma de propagación del perfil de temperatura se desprecia una cuarta parte del sistema fracturado, lo que repercute en los resultados obtenidos.



*Figura 4.9.- El sello de las tapas por tornillos limita la toma de imágenes térmicas del proceso.*

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

El tiempo y las características de la inyección de vapor se describen en la *Tabla R.1*, para todos los experimentos.

<b>Tabla R.1.- Tiempo y características de la inyección de vapor.</b>			
<b>Inyección de vapor en sistemas homogéneos.</b>			
<b>Caso base</b>		<b>Tiempo de inyección de vapor</b>	<b>Características</b>
1		2 hr 41 min	- Baja velocidad de inyección de vapor. - Gasto constante.
2		1 hr 14 min	- Inyección de agua caliente: 1 hr, 14 min. - Baja velocidad de inyección de vapor. - Gasto constante.
<b>Inyección de vapor en sistemas fracturados</b>			
<b>Experimento</b>	<b>Prueba</b>	<b>Tiempo de inyección</b>	<b>Características</b>
1	inyección continua	1 hr, 14 min	- Inyección de agua caliente: 1hr, 14 min - Baja velocidad de inyección de vapor - Presión de inyección: 30 [psia] - Gasto constante
2	Prueba 1	38 min	-inyección de agua caliente: 53 min -Alta velocidad de inyección de vapor - Presión de inyección: 36 [psia] - Gasto constante
	Prueba 2	1. 15 min 2. 14 min 3. 6 min 4. 13 min 5. 12 min	-Inyección de vapor a la misma velocidad anterior - Inyección de vapor en ciclos
	Prueba 3	2 hrs	-Baja velocidad de inyección de vapor - Gasto constante
3	1er ciclo	6 min	-Inyección de vapor a velocidades bajas - Presión de inyección:35 [psia]
	2do ciclo	18 min	
	3er ciclo	7 min	

### A) Sistemas homogéneos

La celda de acrílico utilizada en los primeros dos experimentos no incluyó el uso de termopares, por consiguiente, el análisis presente se limitó a valores promedio<sup>7</sup> de temperaturas obtenidas de las imágenes térmicas.

De cada imagen térmica obtenida a diferentes intervalos de tiempo, se tomaron temperaturas en un mismo plano horizontal a las mismas distancias en dirección al flujo de fluidos para generar las gráficas  $T$  vs *tiempo*. No obstante, a diferentes intervalos de tiempo se graficó la distribución de la temperatura con la distancia.

Las variaciones de la temperatura en espacio y tiempo se muestran en las *Figuras R.1 y R.2* para un sistema homogéneo sin saturación de fluidos. A una velocidad baja y gasto constante de inyección de vapor, la temperatura dentro del sistema se incrementa gradualmente con el tiempo.

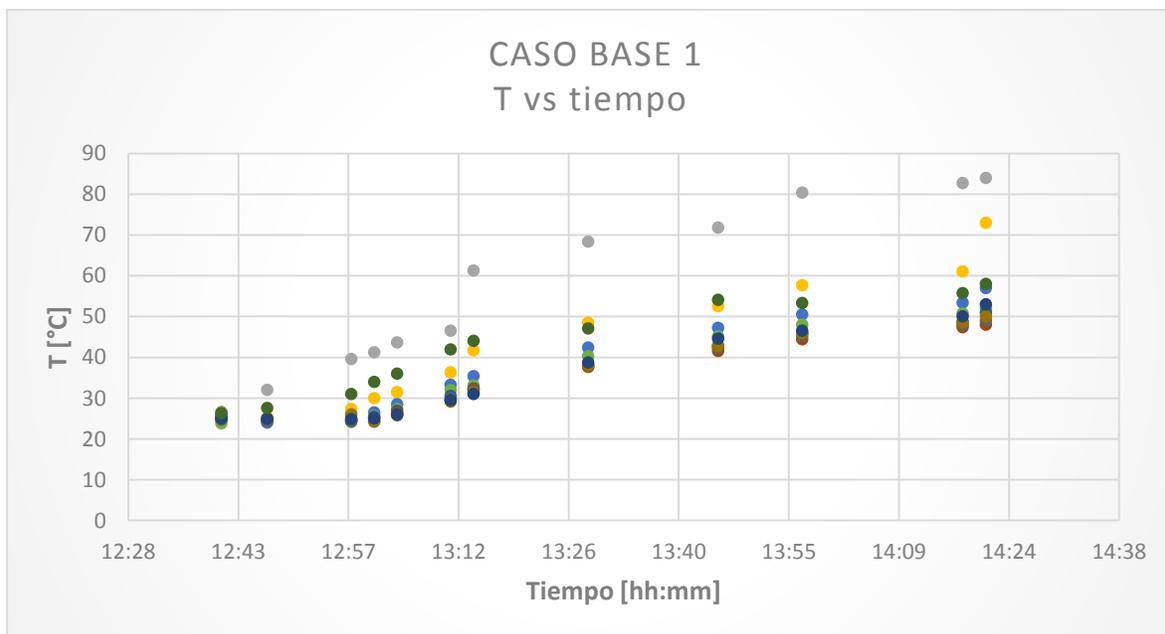


Figura R.1.-Incremento de la temperatura con respecto al tiempo de inyección. Caso base 1

<sup>7</sup> La cámara térmica (CV) detecta radiación infrarroja que emite un objeto debido única y exclusivamente a su temperatura. En este caso el enfoque de la lente de la CV hacia una sola cara de la celda de acrílico, tuvo como emisor parámetros de objeto que afectan a la radiación infrarroja que mide la cámara. Estos parámetros son: la distancia de la lente hacia el objeto emisor (celda de acrílico), la humedad relativa, la temperatura atmosférica, la temperatura aparente del acrílico, el agua, el vapor y la roca. Por ello, las temperaturas registradas en las imágenes procesadas representan un promedio de temperatura.

Los incrementos de temperatura en espacio siguen el mismo comportamiento y alcanza una temperatura máxima después de un tiempo largo de inyección.

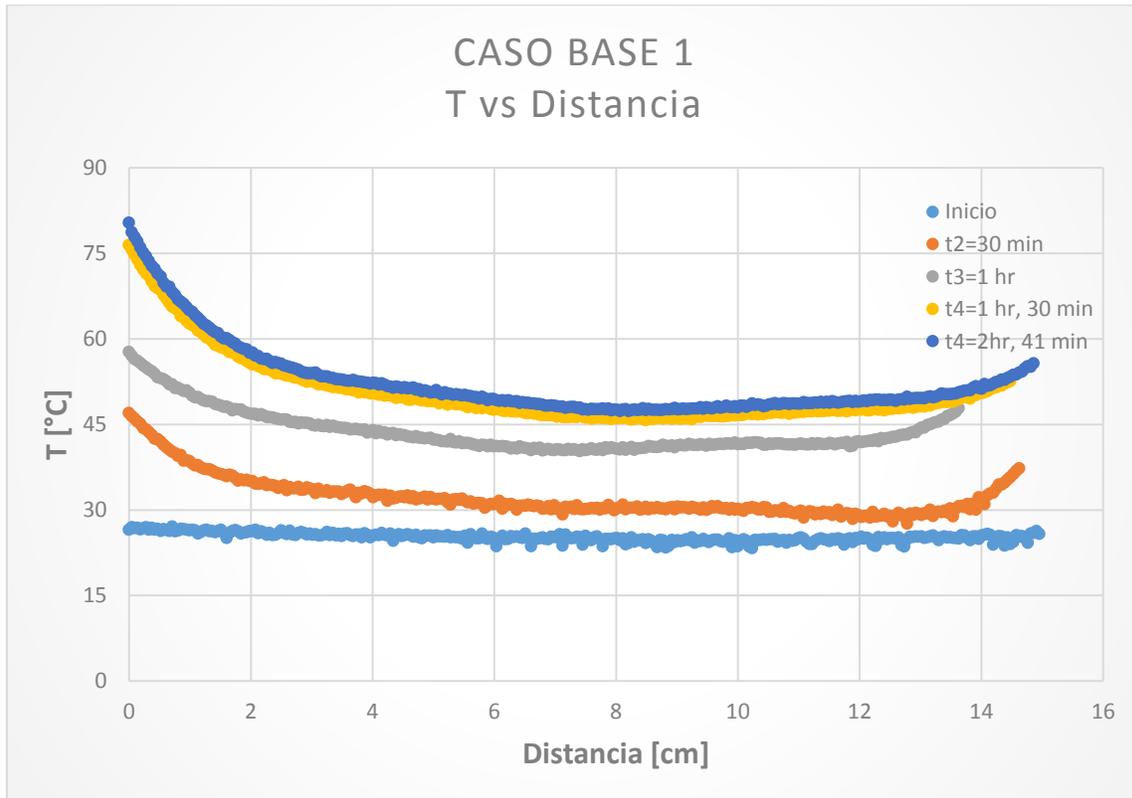


Figura R.2.-Variación de la temperatura con respecto a la distancia. Caso base 1

Como se muestra en la *Figura R.3*, el vapor inyectado al medio homogéneo forma un perfil de temperatura plano con un avance uniforme para velocidades de inyección constante. Cuando el sistema es saturado de agua e incrementa la temperatura, se desarrolla un perfil parabólico con incremento en dirección X y se disipa perpendicular al flujo de fluido a una distancia media del sistema.

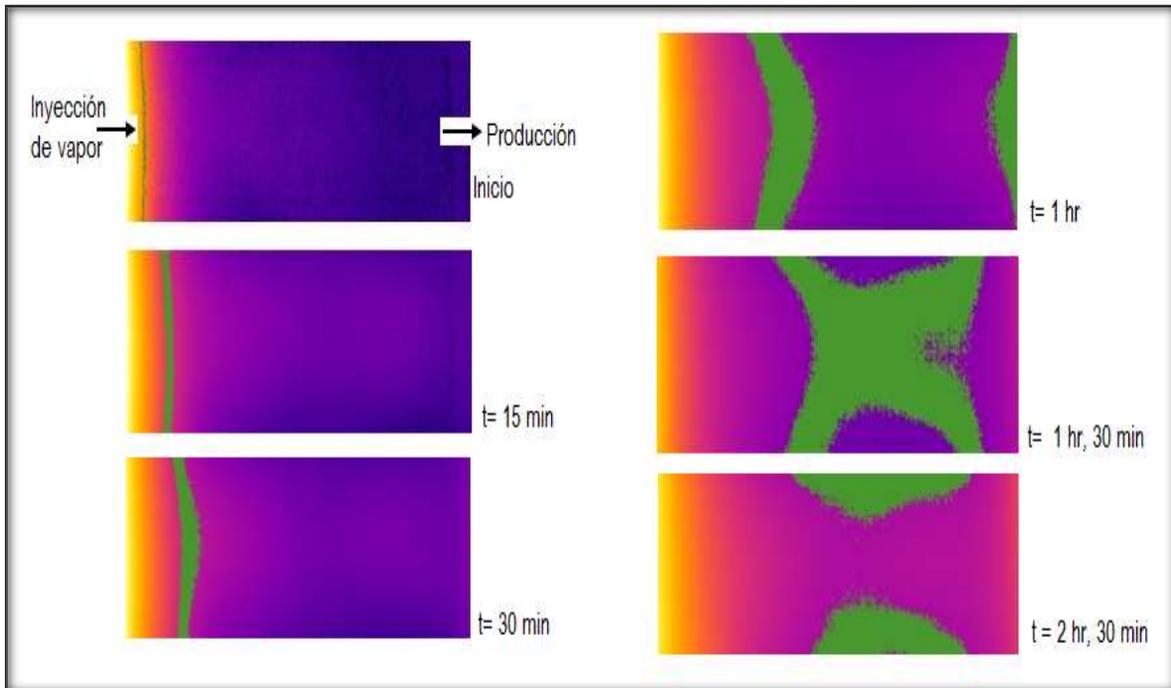


Figura R.3.- Disipación del perfil de temperatura en el medio poroso homogéneo sin saturación de fluidos. Caso base 1

Durante la inyección de agua caliente para la recuperación primaria de aceite en el caso base 2, la temperatura incrementó aproximadamente 6 [°C] a distancias cercanas del punto inyector; la zona de agua fría representa más del 50% en espacio. *Figura R.4*

En el comienzo de la inyección de vapor, el calor transferido tiene poco impacto en la distribución de la temperatura, sin incrementos a distancias lejanas del punto inyector. Esto radica que gran parte del calor se pierde por el calentamiento de la tapa de la celda y otra parte del calor entra al sistema.

La comparación de la distribución de la temperatura en espacio con la forma de propagación del perfil de temperatura en el mismo tiempo, se observa que hay un incremento súbito de la temperatura cuando es barrido la mayor cantidad de aceite e incrementa la saturación de agua, *Figura R.5*.

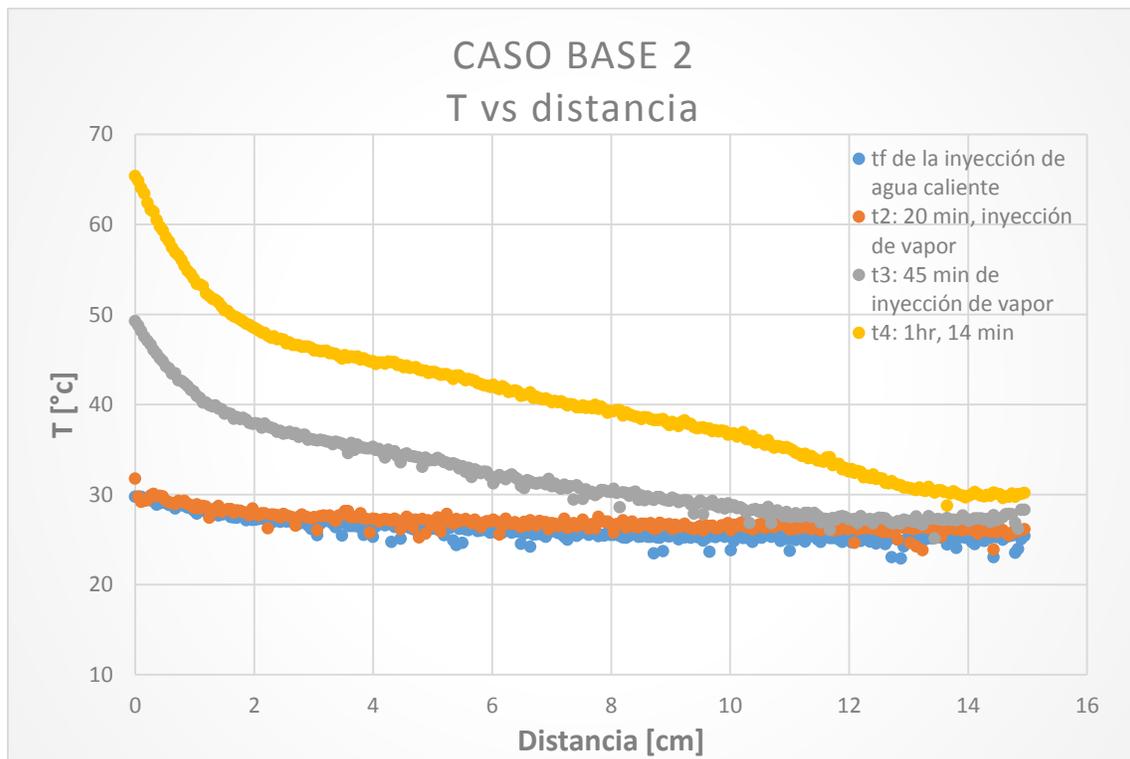


Figura R.4.- Distribución de la temperatura en espacio en intervalos de tiempo. Caso base 2

De la *Figura R.5*, el perfil de temperatura se propaga en forma plana cuando se inyecta agua caliente, los tiempos que opta ésta forma corresponden al momento de un barrido de aceite uniforme.

La saturación de aceite residual y el incremento de la saturación de agua, desarrollaron un perfil parabólico que rápidamente se estabiliza sin cambiar con el incremento en  $X$ .

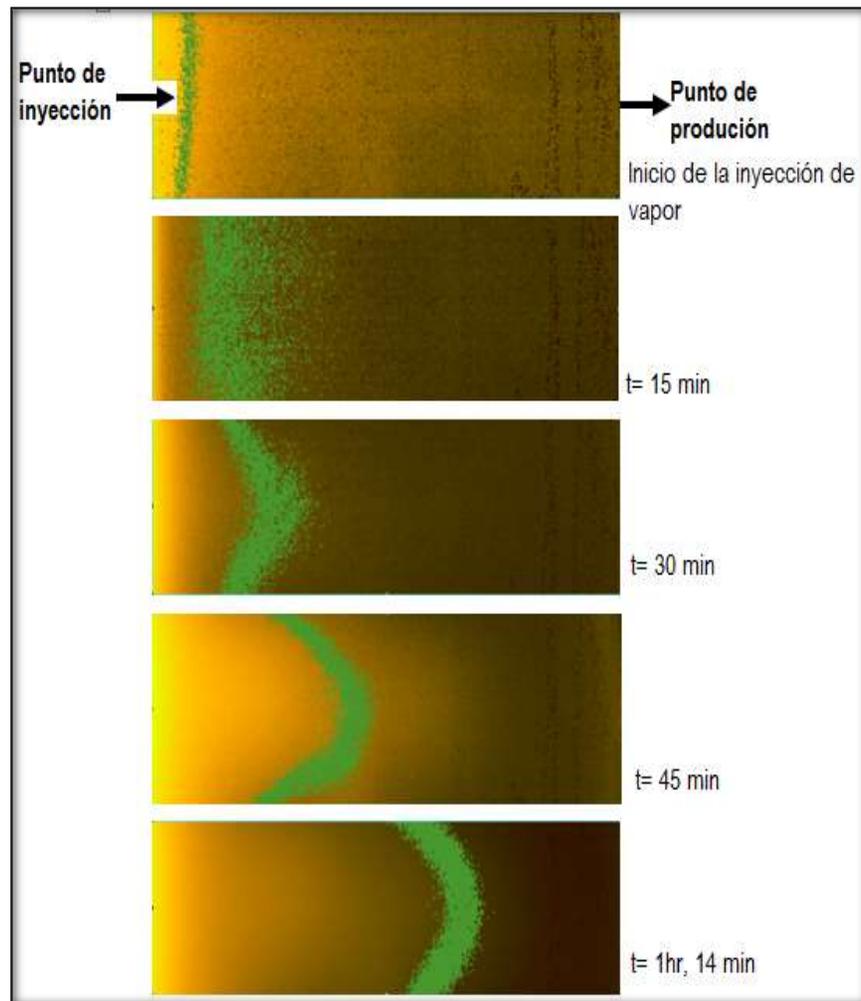


Figura R.5.- Disipación del perfil de temperatura en el medio poroso homogéneo saturado de fluidos.

## B) Sistemas Fracturados

Los valores de temperatura registrados por los termopares permitieron obtener las gráficas  $T$  vs  $tiempo$  para sistemas fracturados. Por el contrario, las gráficas  $T$  vs  $Distancia$  corresponden a temperaturas promedio de las imágenes térmicas, para un mejor análisis del frente de calor a través de las fracturas horizontales.

La distribución de la temperatura con el tiempo se observa en la *Figura R.6* para el experimento 1. Antes de la inyección de vapor, el sistema alcanzó temperaturas máximas de 58, 45, 42 y 40 [°C] para el S1, el S2, el S3 y el S4 en la recuperación de aceite por agua caliente. La diferencia de la temperatura entre los cuatro sensores es de 2 a 4 [°C] en la

inyección de vapor, por tanto los sensores introducidos en la matriz fueron afectados por la canalización del vapor y no determinan la temperatura de la matriz.

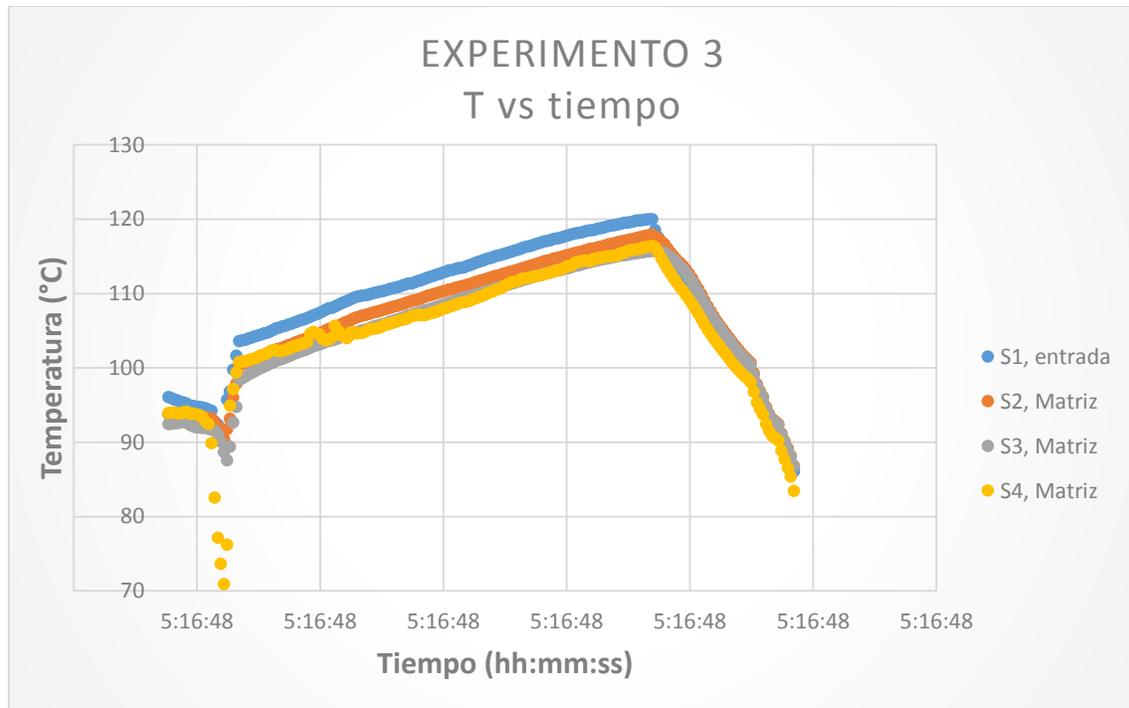


Figura R.6.- Variación de la temperatura con el tiempo de inyección de vapor. Experimento 3.

La temperatura aumenta súbitamente cuando hay un precalentamiento en el sistema para gastos constantes y velocidades bajas de inyección de vapor. Posteriormente el incremento es gradual, *Figura R.7*. Las diferencias de temperatura entre los valores registrados por los sensores y los valores obtenidos de las imágenes térmicas, determinan que el espesor de la celda de acrílico y los parámetros de objeto descritos en el Capítulo IV, si afectan las temperaturas que registra la CV.

La formación del perfil de temperatura para el experimento 1, se observa en la *Figura R.8*. Durante la recuperación de aceite por agua caliente, el perfil se originó cerca del punto de inyección con un avance lento en comparación con la inyección de vapor.

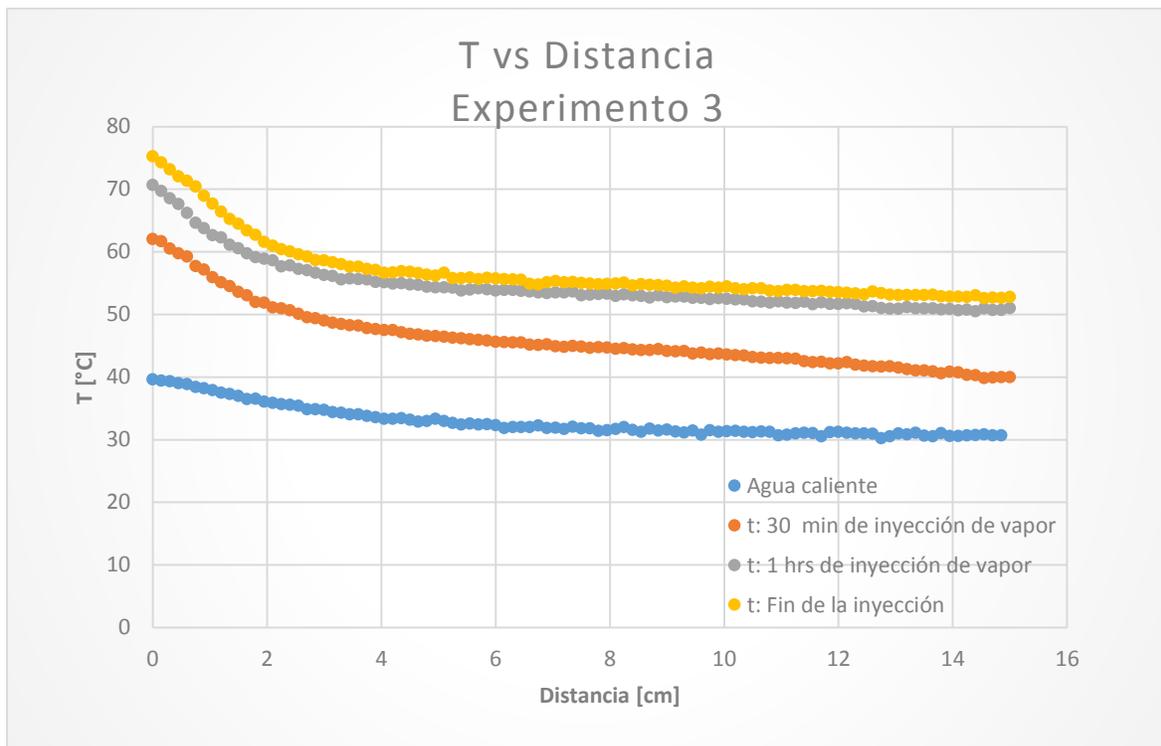


Figura R.7.- Distribución de la temperatura con respecto a la distancia. Experimento 3

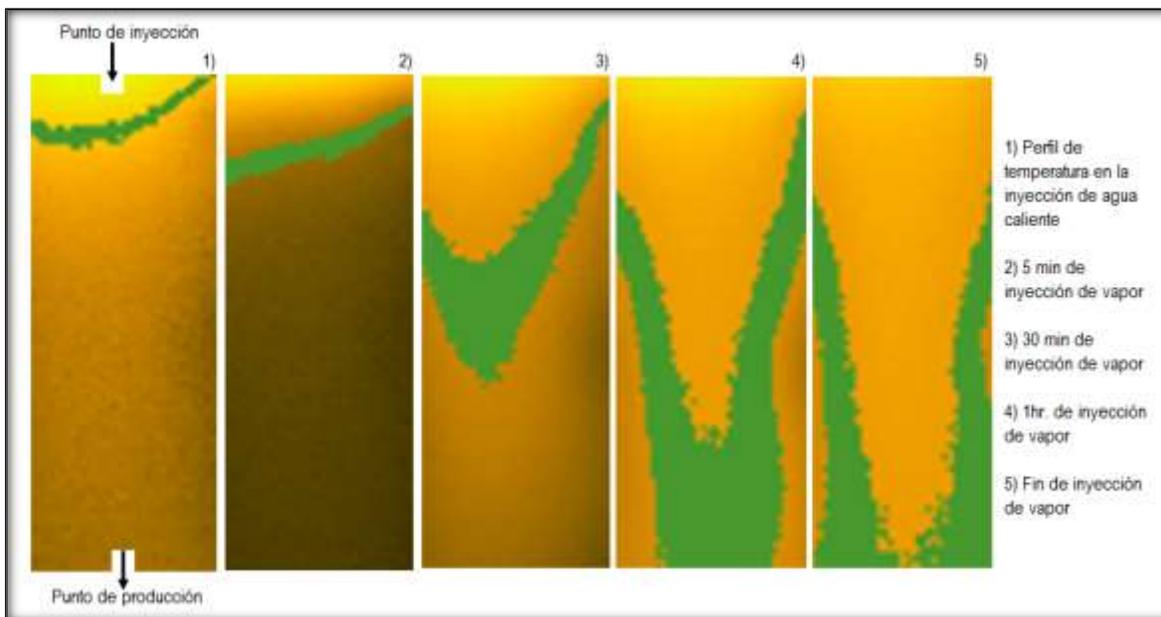
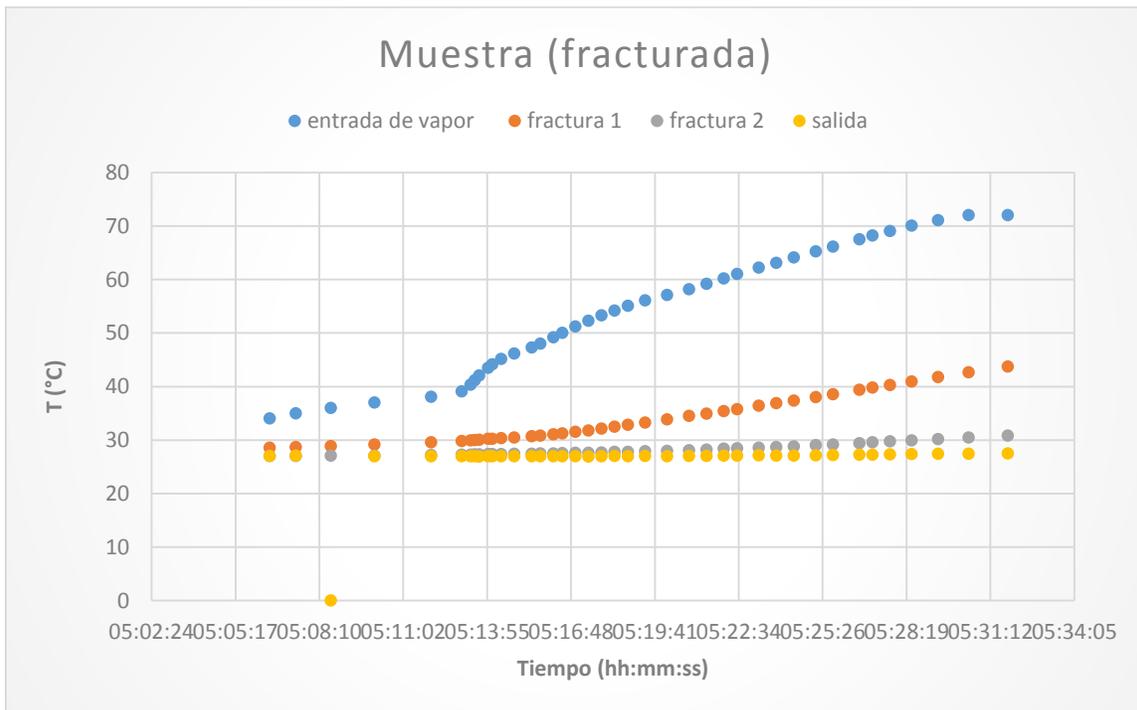


Figura R.8.- Los perfiles de temperatura avanzan con el tiempo a gastos continuos de inyección de calor

La inyección de agua caliente para el segundo sistema fracturado incremento la temperatura a 27 [°C]. El agua caliente barre el aceite de la parte externa de la matriz, que lo llevó a dispersarse por las fracturas sin tener producción de éste, es decir, que sólo había producción de agua. La inyección de agua caliente finalizó cuando se registró un aumento de la presión en el generador de vapor, lo que indica que sólo había acumulación de fluidos y el descenso en la producción de agua era evidente. Posteriormente se inyectó vapor a las condiciones que se indican en la *Tabla R.1*.

Las velocidades altas de inyección de vapor registran acumulación de calor cerca del punto inyector sin calentamiento efectivo a distancias lejanas, *Figura R.9*. Por lo anterior, las imágenes térmicas del proceso se descartaron porque el perfil de temperatura se propagó lentamente sin alcanzar la matriz.



*Figura R.9.- Variación de la temperatura con respecto al tiempo. Experimento 2*

Cuando se alcanzó la temperatura ambiente en el sistema fracturado, se realizó una segunda prueba con inyección de vapor a la misma velocidad del caso anterior pero en ciclos de tiempo, *Figura R.10*. El primer ciclo forma una zona caliente que no alcanza la matriz; los ciclos posteriores aumentan la temperatura de la zona caliente súbitamente y las

temperaturas que registran los sensores 2,3 y 4 corresponden a temperaturas de los fluidos que fluyen por las fracturas.

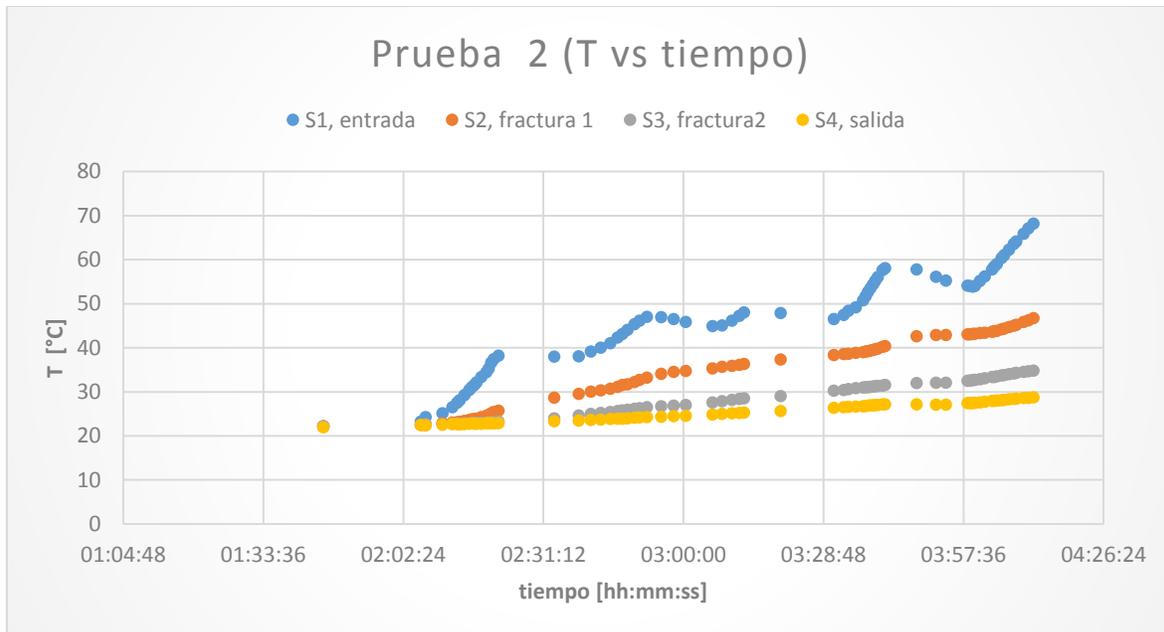


Figura R.9.-Incremento de la temperatura respecto al tiempo de inyección. Experimento 2, prueba 2

El perfil de temperatura que se genera en la misma prueba se observa en la *Figura R.10*; la velocidad de propagación es lenta para ciclos de inyección de vapor sin avanzar el 50% de la distancia.

El perfil de temperatura que procesó la CV fue afectado por el diseño de la celda, sin embargo, se observa que el perfil se propaga a la misma velocidad en todos los puntos y no alcanza la primera fractura formada por los dos bloques de matriz. Por tanto, no se puede analizar si el perfil de temperatura se dispersa por una fractura horizontal.

Se realizó la tercera prueba experimental manteniendo como condición inicial la temperatura ambiente dentro del sistema fracturado. A una velocidad baja de inyección de vapor existe un calentamiento mayor del sistema a distancias lejanas del punto de inyección. La *Figura R.11* muestra la forma que se propaga el perfil de temperatura para gastos constantes de inyección de vapor a velocidades bajas. El avance del perfil de temperatura desde el punto de inyección al punto productor no muestra dispersión al pasar por fracturas horizontales.

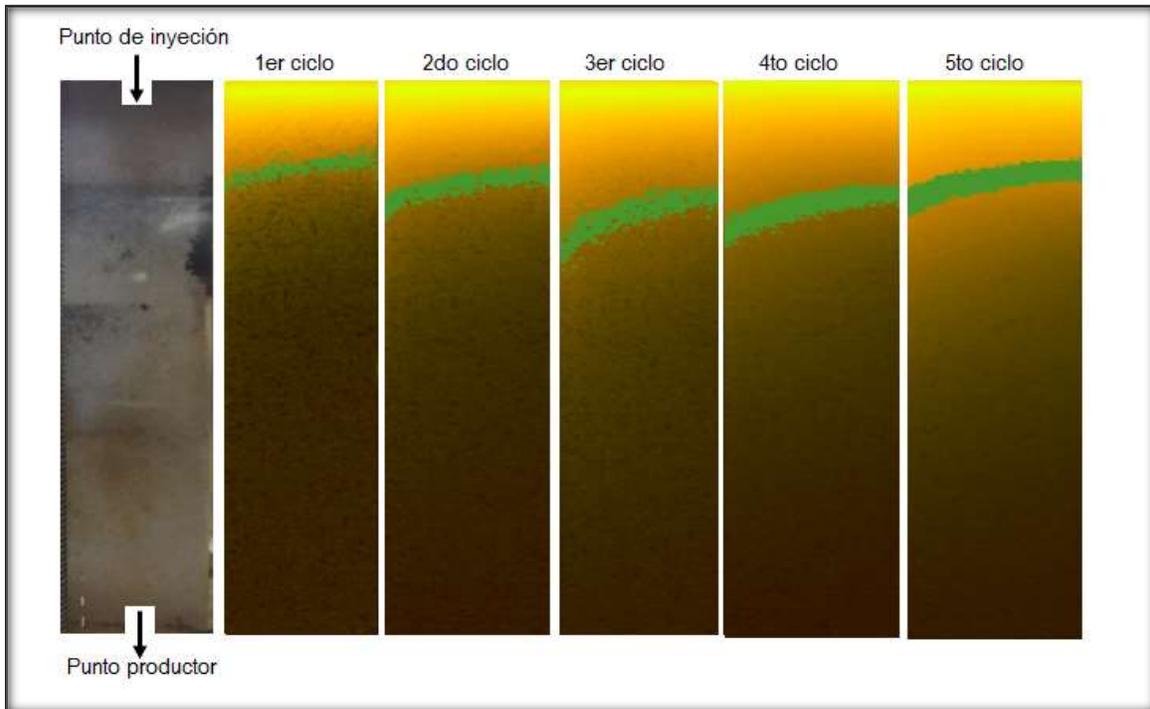


Figura R.10.- Avance del perfil de temperatura en el experimento 2 por inyección de vapor en ciclos Prueba 2

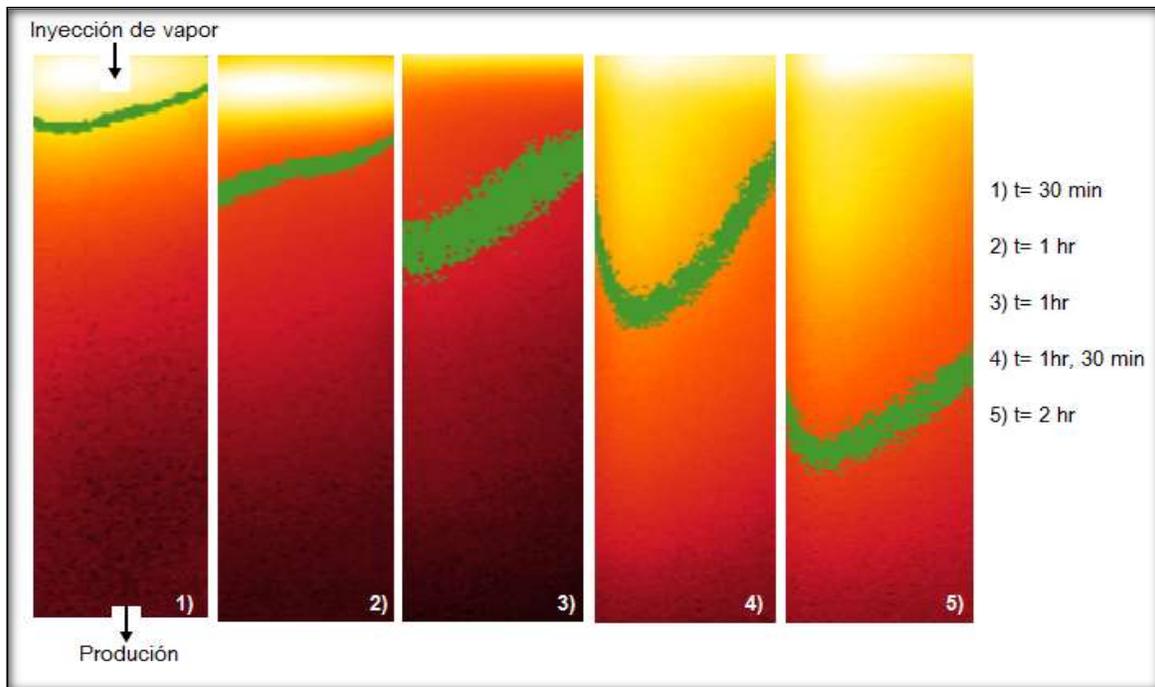
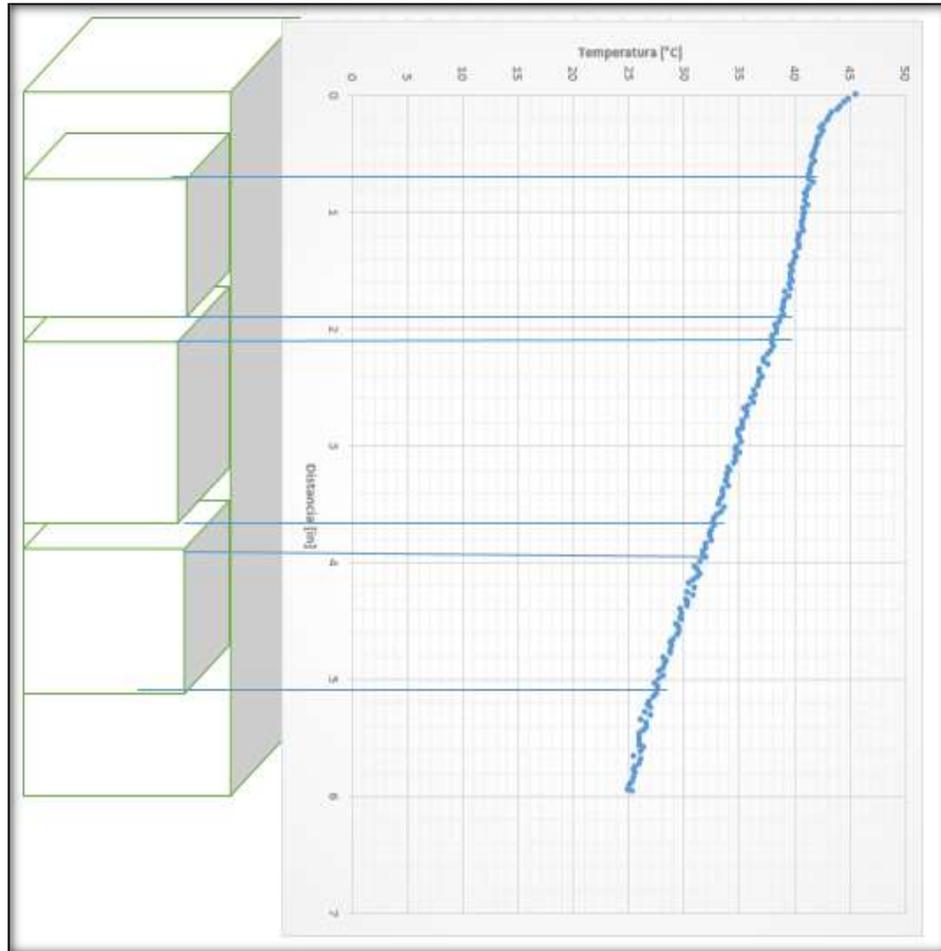


Figura R.11.- Propagación del perfil de temperatura a velocidades bajas de inyección de vapor. Prueba 3 del segundo sistema fracturad

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

La variación de la temperatura con respecto a la distancia vertical de la prueba tres del segundo sistema fracturado se presenta en la *Figura R.11*, con este análisis no se aprecia los cambios de temperatura que pudieran existir entre la matriz y la fractura.



*Figura R.11.- Variación de la temperatura con respecto a la distancia. Prueba 3, experimento 2.*

El comportamiento similar de los perfiles de temperatura de las pruebas anteriores no permite observar una dispersión del perfil al pasar por las fracturas horizontales. Ocurre que la inyección de agua caliente para la recuperación primaria de aceite satura las fracturas de agua y aceite.

La diferencia de la conductividad térmica entre la caliza y la arena saturadas de agua es pequeña, que para fines prácticos se considera igual, bajo esta suposición la matriz y la

## RESULTADOS Y ANÁLISIS

fractura tiene la misma conductividad térmica, entonces, la distribución de la temperatura se comporta como un sistema homogéneo.

Bajo las observaciones anteriores, se inyectó vapor en ciclos a un sistema con permeabilidad del 100% en las fracturas. La Figura R.12 muestra la distribución de la temperatura con respecto al tiempo.

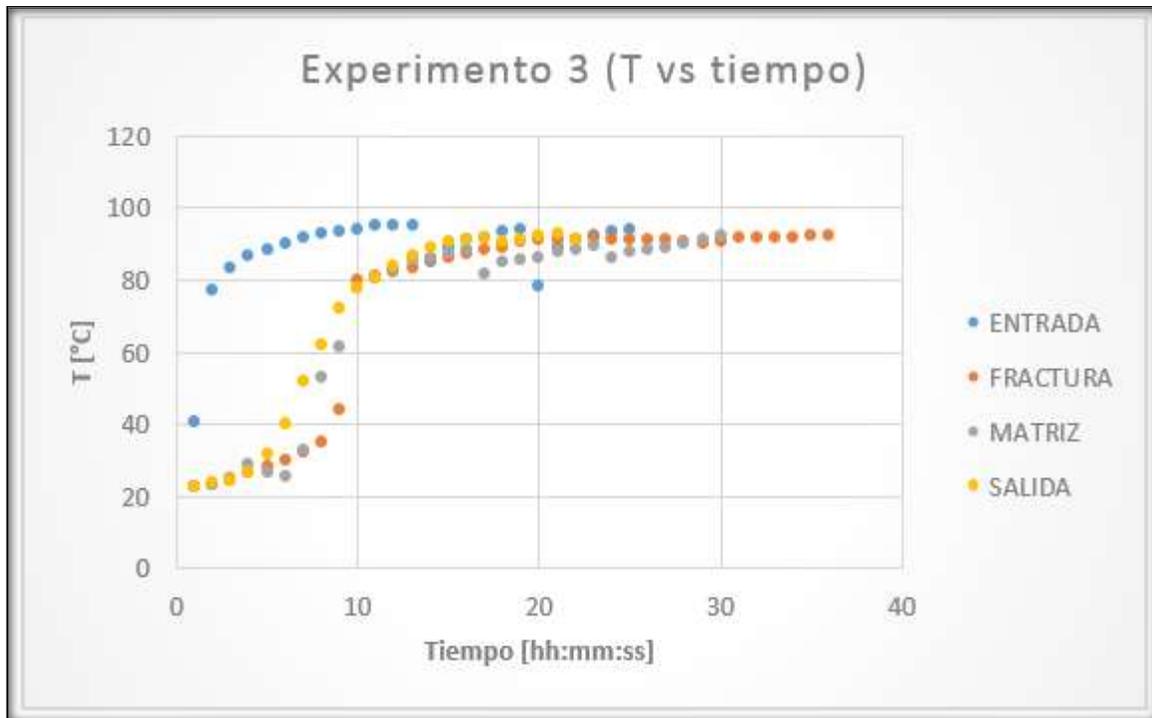


Figura R.12.- Variaciones de la temperatura respecto al tiempo. Experimento 3

Aunque las fracturas fueron de mayor espesor, los perfiles de temperatura adoptan la misma morfología con un avance tipo pistón, sin observar una dispersión a través de las fracturas. Figura R.13

Por las imágenes térmicas obtenidas en procesos de recuperación de aceite en medios homogéneos y fracturados, se observa que el perfil avanza en dirección al flujo de fluidos; inicialmente el perfil es uniforme y después se desarrolla un perfil parabólico que se mantiene constante. El desarrollo de un perfil parabólico se debe a que la velocidad del fluido en contacto con la superficie del acrílico es menor.

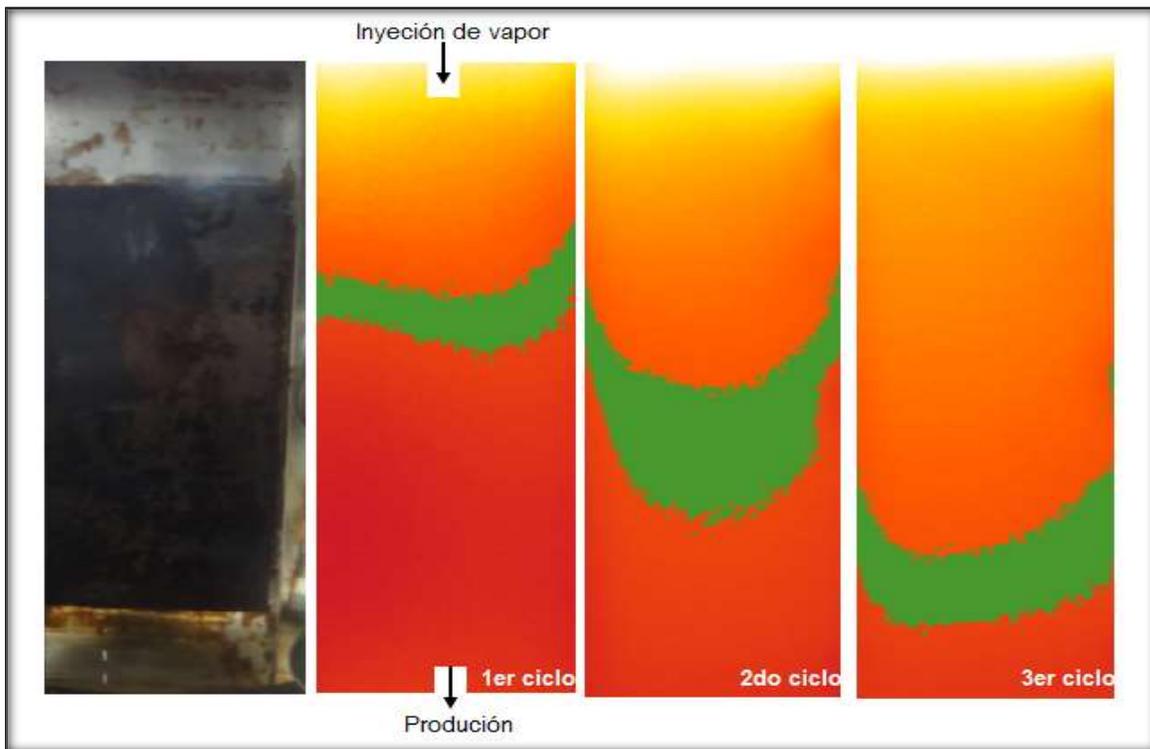


Figura R.13.- Propagación del perfil de temperatura en un sistema fracturado. Experimento 3

## CONCLUSIONES

Los diseños experimentales condujeron a la formación y propagación de perfiles de temperatura obtenidas de imágenes térmicas de los procesos; inicialmente se formó un perfil de temperatura plano a razón de la transferencia de calor en todas direcciones; posteriormente el perfil se propagó en forma parabólica en dirección al flujo de fluidos (flujo desarrollado).

Ahora bien, los cambios de temperatura que ocurren dentro de la celda sólo pueden ser determinados con los termopares introducidos y aunque la cámara térmica resulte ser una herramienta importante para obtener los perfiles de temperatura, éstos no fueron obtenidas en tiempo real por el análisis térmico descrito de la celda. Además las imágenes térmicas no ayudaron a determinar si el perfil se dispersa al pasar por un medio fracturado, ya que avanza en forma continua desde el punto inyector al punto productor. Estas observaciones no representan un hecho concluyente para sistemas fracturados, pues diversos parámetros pudieron afectar el proceso como se describe a continuación.

La matriz saturada de fluidos tiene una conductividad térmica específica (suma de las conductividades térmicas del agua, aceite y roca). Después del proceso de recuperación primaria de aceite, las fracturas horizontales quedaron saturadas de agua, aceite barrido y la presencia de arena y aire le dan una conductividad térmica específica de la fractura diferente de la matriz; para los experimentos desarrollados, éstas pudieron ser constantes por los mismos fluidos presentes en ambas y la variación de la temperatura fue menor para existir un cambio de conductividad térmica, aunado al tamaño de los diseños experimentales y tamaño de las fracturas. Visto de esta forma, no hubo una dispersión del perfil de temperatura a través del sistema matriz- fractura.

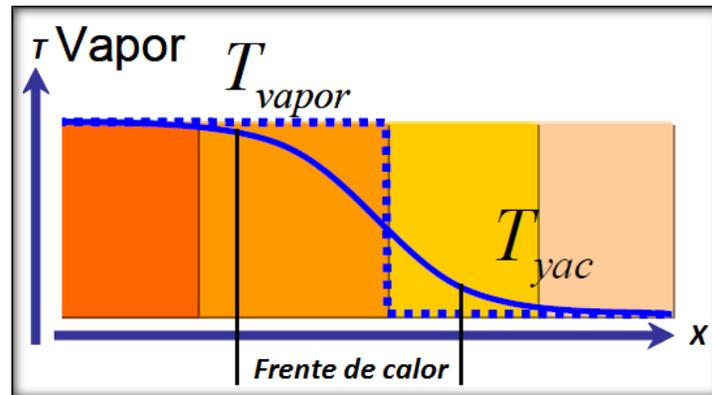
Por otro lado, los tiempos de calentamiento dentro de los sistemas fracturados se observaron en las gráficas *T vs Tiempo* con temperaturas obtenidas de los termopares. En ellas no se puede deducir un frente de calor, esto se debe a que el vapor se canalizó en la red de fracturas, por lo que las temperaturas registradas corresponden a las del vapor. A tiempos prolongados de inyección y velocidades bajas hay un calentamiento efectivo, contrario a las velocidades altas de inyección, pues el calor sólo se propaga cerca del punto inyector sin calentamiento efectivo a distancias lejanas. Por tanto la velocidad del fluido inyectado afecta la velocidad de propagación del frente de calor. Dicho lo anterior, el frente

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

---

de calor avanza a mayor velocidad con vapor que el frente térmico producido por la inyección de agua caliente.

En la literatura se reporta que la distribución de la temperatura en los procesos físicos puede ser aproximada a una función que va desde la temperatura del vapor hasta la temperatura inicial *Figura C.1*, donde se observa el avance del frente de calor.



*Figura C.1.- Modelo ideal que representa la distribución de la temperatura en los diseños experimentales.*

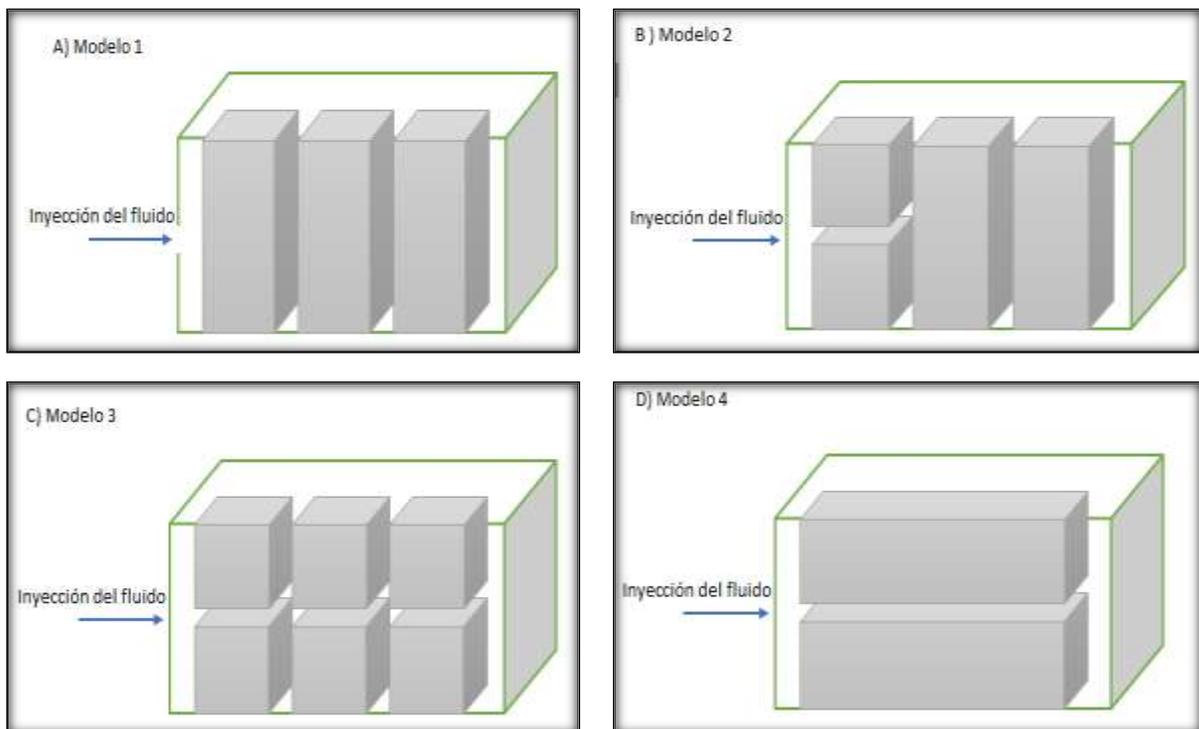
El análisis detallado de las imágenes térmicas respecto a las gráficas  $T$  vs *Distancia* no se aprecia cambios en la propagación del frente de calor entre las fracturas y la matriz, por lo que se presentan propuestas para optimizar el análisis.

## RECOMENDACIONES

1. Reducir el espesor de la celda de acrílico puede ayudar a obtener imágenes térmicas cercanas al tiempo real de ocurrir el proceso; sin embargo, el acrílico se deformaría rápido. Por ello se considera cambiar el material de la celda, por ejemplo, usar el vidrio templado que soporta cambios bruscos de temperatura.
2. Realizar pruebas con fracturas considerando una sola orientación. Si se consideran solo fracturas verticales, la dirección de flujo sea perpendicular a la orientación de la fractura.
3. Hacer pruebas con fracturas de mayor espesor considerando el inciso anterior. Y por el contrario con fracturas de menor espesor cambiando las capacidades térmicas entre la matriz- fractura.
4. Inyectar los fluidos a gastos y velocidades bajas con tiempos prolongados de inyección, a fin de que el perfil de temperatura se propague lentamente, dando tiempo para observar su comportamiento a través de las fracturas.
5. Reducir las pérdidas de calor del fluido inyectado, ya que afectan la eficiencia térmica del proceso y reducen la velocidad real de avance del frente de temperatura.
6. Observar el proceso con una cámara termográfica con mayor resolución para generar imágenes térmicas correlacionando con imágenes del proceso físico.
7. Aunque es difícil discernir la contribución de los mecanismos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación en el medio físico, se plantea, tener control numérico de la conductividad térmica específica en la dirección de flujo en función del cambio de temperatura.
8. Tener control numérico en la velocidad, tiempos y gastos de inyección para determinar la velocidad de avance del frente de calor a través de la matriz y el tiempo de regeneración del perfil de temperatura cuando sale de la fractura e ingresa en la matriz.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

9. El comportamiento del frente de calor se podría analizar con el desarrollo de modelos matemáticos.
10. Por cada experimento que se realice, analizar los resultados adquiridos para modificar parámetros necesarios antes de proseguir a otra prueba.
11. Se podrían determinar tiempos de calentamiento de la matriz realizando diferentes modelos físicos, al respecto se presentan 4 modelos físicos para experimentación a las condiciones descritas en los puntos anteriores:



*Figura 7.- Diseño de 4 modelos físicos para experimentación.*

## APÉNDICE A

### EQUIPO EXPERIMENTAL

La primera etapa tuvo como objetivo particular conocer, usar y controlar cada uno de los aparatos utilizados en el sistema, para facilitar el uso en las etapas siguientes. Así en el diseño de los experimentos fueron necesarios los equipos siguientes:

#### 1) Bomba de inyección

Actúa como una jeringa. El llenado de la bomba requiere de agua destilada para evitar la formación de incrustaciones en el generador de vapor. La bomba succiona el agua de la botella de plástico montada en ella, evitando la entrada de aire, *Figura A.1*. La capacidad de almacenamiento de agua es de 500 [ml] y la velocidad de entrega de agua es de 5 a 400 [ml/ hr], ajustando la entrega al porcentaje que se desea trabajar.

Maneja un rango de presión mínima de 10 [psia] y máxima de 1500 [psia], que también se ajusta a las condiciones de trabajo.



*Figura A.1.- Bomba de inyección.*

## 2) Variac

Auto transformador variable, *Figura A.2*, con el cual se obtiene una tensión de salida de corriente alterna; es decir, permite regular el suministro de energía eléctrica a la celda eléctrica que rodea al generador de vapor. De 127 [volts] de corriente directa, se ajustó un 55-65 % de esa energía como óptima para generar buena calidad del vapor.



*Figura A.2.- Variac.*

## 3) Generador de vapor

La bomba de inyección suministra el agua a través una línea de acero, conectada a la parte inferior del generador. En la tapa del generador se tienen tres orificios donde se conecta un manómetro, un sensor de temperatura y una línea de acero, que permite la salida de agua y/o vapor, *Figura A.3*. La capacidad de almacenamiento es de 750 [ml] de agua.

El sello de la tapa del generador es por tornillos; por ello se trabajó a una presión máxima de 250 [psia].

El calentamiento del agua y la generación de vapor se realizó suministrando energía a una resistencia eléctrica que envuelve al generador.



*Figura A.3.- Generador de vapor.*

#### 4) Cámara térmica

Detecta la radiación térmica emitida por un objeto debido a su temperatura y luego traduce los diferentes valores a una imagen. Las temperaturas registradas por la cámara térmica en los experimentos representan un promedio; el enfoque de la lente de la CV hacia una sola cara de la celda de acrílico, tuvo como emisor parámetros de objeto que afectan a la radiación infrarroja que mide la cámara, estos parámetros son: la distancia de la lente hacia el objeto emisor (celda de acrílico), la humedad relativa, la temperatura atmosférica, la temperatura aparente del acrílico, el agua, el vapor y la roca



*Figura A.4.- Cámara térmica.*

### 5) Celda de acrílico

El diseño de la celda fue elaborada bajo condiciones de trabajos previos a una tesis de maestría. El acrílico resultó el material de mejor ajuste por causas económicas, facilidad de elaboración a las características deseadas, y para tener una visión directa en la obtención de imágenes térmicas de los experimentos.

La primera celda ocupada para la inyección de fluidos en casos homogéneos fue de forma circular en la parte interna. Por el contrario, una segunda celda fue elaborada de forma cuadrada, incluidos cuatro termos pozos donde se fijaron 4 sensores de temperatura, para experimentos en sistemas fracturados.

El diseño en ambas celdas incluyó dos tapas de aluminio en sus extremos, por donde se conectaron las líneas de acero de entrada y salida de fluidos. *Figura A.5*



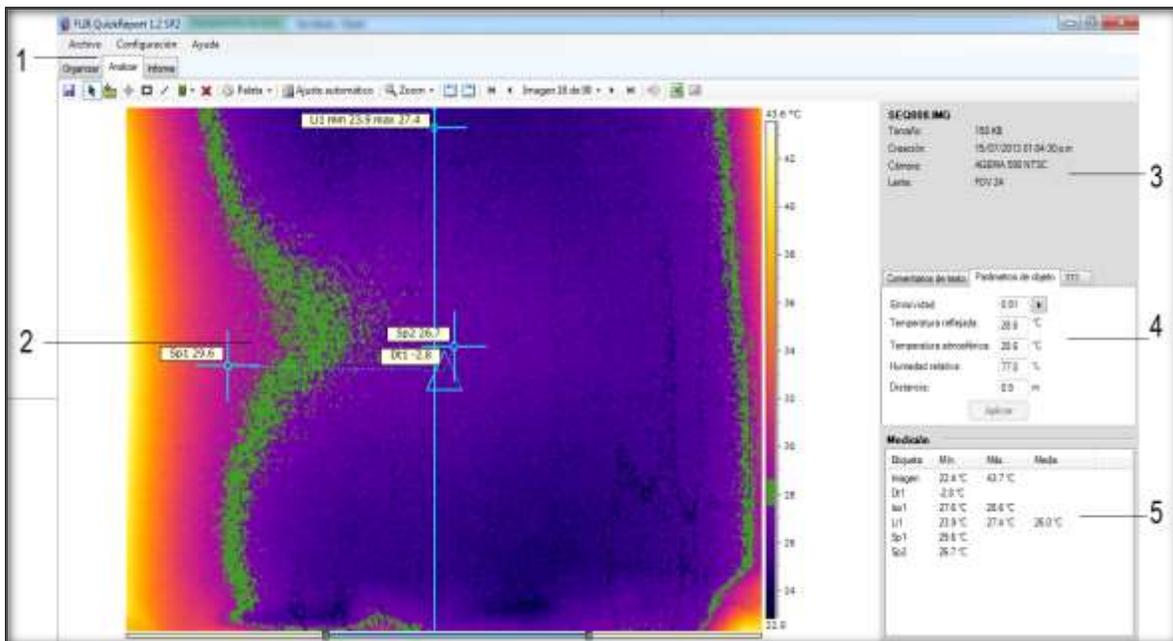
*Figura A.5.- Celda de acrílico.*

La *Tabla A.1*, presenta el volumen y las medidas correspondientes para ambas celdas.

<b>Tabla A.1 Medidas de la celda.</b>			
<b>Celda</b>	<b>Capacidad</b>	<b>Longitud</b>	<b>Espesor</b>
<b>1</b>	306 [cm <sup>3</sup> ]	15 [cm]	4.3 [cm]
<b>2</b>	404 [cm <sup>3</sup> ]	15.3 [cm]	4.35 [cm]

## 6) Software FLIR QuickReport

Las imágenes térmicas obtenidas de la cámara térmica, fueron procesadas por el software FLIR QuickReport, *Figura A.6*. El software permite analizar las imágenes, configurar la escala de colores, obtener la temperatura en un punto o en un área específica, así como obtener el valor cuantitativo de las temperaturas en Excel.



*Figura A.6.- Ventana de visualización de imágenes del software. 1.-Barra de herramientas de imagen, 2.-Imagen de infrarrojos, 3.- Descripción de la imagen 4.-Parámetros de objeto, 5.- Tabla de resultados de medición.*

## Equipo para saturaciones

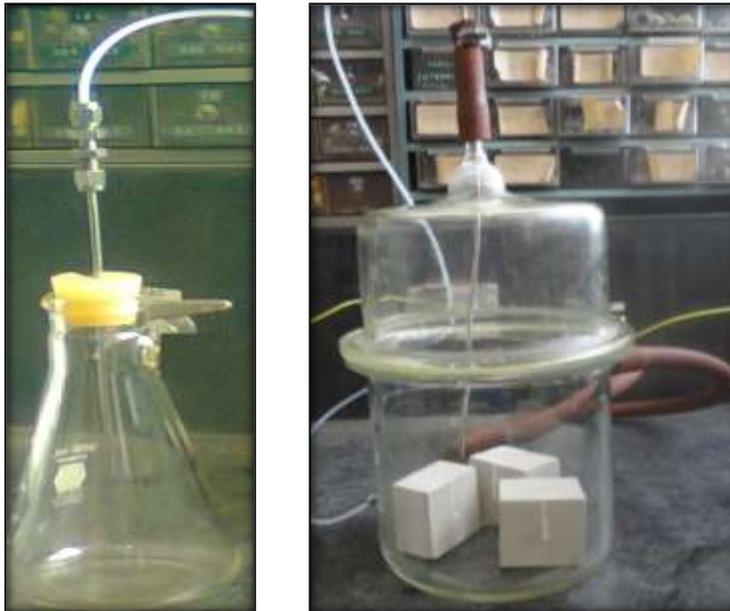
### 1) Fluidos

El agua destilada y el aceite fueron los principales fluidos empleados. Se utilizó aceite muerto con una densidad de 23.4 °API del pozo San Andrés II, Poza Rica.

## 2) Bomba de vacío

Las muestras de caliza se sometieron a vacío antes de ser saturadas de fluidos. Como se muestra en la *Figura A.7*, los bloques se introdujeron a la campana, conectada de una manguera a la válvula de vacío de la mesa de laboratorio. Otra manguera se conectó en la parte superior del recipiente que une la trampa.

Para garantizar la extracción del aire de los poros de la roca, se dejaron por 3 [hrs] en vacío. Posteriormente sin dejar de hacer vacío se inyectó agua destilada para saturar las muestras.



*Figura A.7.- Trampa y campana de vacío.*

## 3) Celda de imbibición

Las muestras de roca saturadas con agua, se les dejó una saturación del 25 %, el exceso fue eliminado calentando las muestras de roca.

En la celda de imbibición, *Figura A.8*, se introdujeron las rocas de caliza para saturarlas con aceite a presión de 1500 [psia].



*Figura A.8.- Celda de imbibición.*

#### **4) Celda de inyección**

La celda de inyección tiene un émbolo en su interior, *Figura A.9*. Inicialmente se coloca el émbolo en un extremo de la celda para que el espacio restante se llene de aceite. Ambos extremos de la celda se cierran con válvulas de dos vías. Una válvula se monta a la línea de acero de la bomba de inyección para empujar el émbolo con agua, y el aceite se inyecte a presión a la celda de imbibición.



*Figura A.9.- Celda de inyección.*

La *Figura A.10*, representa la configuración de los equipos utilizados para saturar los bloques de caliza con aceite. La bomba de inyección se conecta a la celda de inyección, para entregar el aceite a presión a la celda de imbibición.



*Figura A.9.- Proceso de saturación de aceite de las muestras de roca*

### **Calidad del vapor**

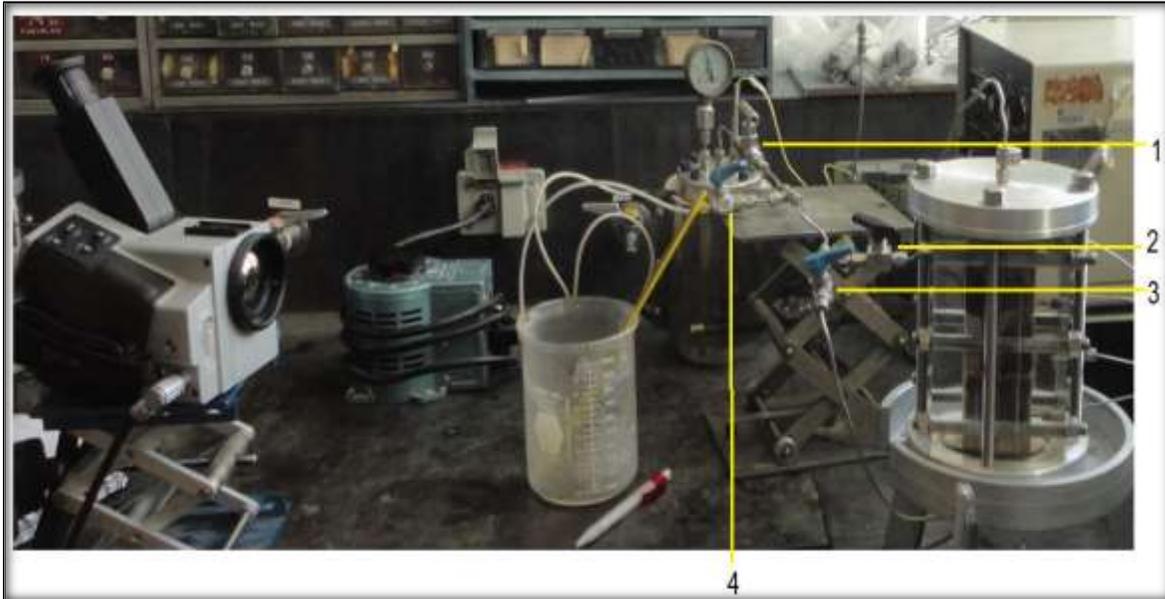
En todos los experimentos, inicialmente se llenó el generador de vapor de agua destilada con la bomba de inyección, seguido de un suministro de energía eléctrica regulada por el variac.

En la inyección de agua caliente para la recuperación primaria de aceite, se dejaba alcanzar una temperatura promedio de 80 [°C] dentro del generador, entonces, al inyectar el agua caliente al modelo físico, se reducía la temperatura a 45-50 [°C] por las pérdidas de calor. Al finalizar la recuperación de aceite por agua caliente, el voltaje se iba incrementando cada 5 % hasta alcanzar la temperatura de saturación del agua, en este punto se mantenía constante el voltaje de un 55 %. El cambio de fase del agua dentro del generador incrementaba la presión, trabajando presiones máximas de 45 [psia].

Las condiciones óptimas de trabajo para obtener una calidad de vapor del 80-85% fue mantener un gasto de entrada de agua al generador de 90-150 [ml/hr] y un suministro de energía del 55-65% de voltaje, dependiendo la velocidad de entrega de vapor.

Es importante destacar que las velocidades y gastos de inyección de agua y/o vapor, estuvieron controlados manualmente por 3 válvulas (véase *Figura A.10*), y aunque no se

tienen valores cuantitativos, estos fueron inyectados a un ritmo para controlar las temperaturas dentro el sistema.



*Figura A.10.- Válvulas usadas para controlar el ritmo de inyección del agua y/o vapor.*

La válvula 4 que se muestra en *la Figura A.10* se utilizó como desfogue para controlar las presiones del generador de vapor y determinar temperaturas de inyección.

La temperatura dentro del generador fue registrada por un sensor, codificando los valores en una computadora, ésta temperatura representa un promedio del fluido en dos fases (agua/vapor). El agua y/o vapor del generador hacia el modelo físico, transfirieron parte de su calor al recorrer las líneas de acero, y en el punto de inyección las pérdidas de calor fueron significativas por el calentamiento de la tapa de la celda de acrílico, hecha de aluminio. Estas consideraciones reducen el calor transferido del agua caliente y la calidad del vapor inyectado; para suplir estas pérdidas de calor se incrementaba poco a poco el gasto de inyección hasta un valor constante.

---

## BIBLIOGRAFÍA

1. Goodlett, G. O., M.M. Honarpour, H.B. Carroll and P. S. Sarathi. *Diverse Mechanisms Add to Increased Oil Production in Thermal and Gas Projects*. Oil & Gas J., v,84,No. 26, July 28, 1986, pp.98-102
2. Farouq Ali S.M. 1982. *Steam Injection Theories- A unified Approach*, Paper SPE 10746
3. Roger M. Butler. 1991. *Thermal Recovery of Oil and Bitumen*. Department of Chemical and Petroleum Engineering. University of Calgary, Alberta, Canada
4. Farouq Ali S.M. 1970. “*Oil Recovery by Steam Injection*”, Producers Publishing Co, Bradford.
5. Chekhonin, Anton Parshin, Dimitri Pissarenko, Yury Popov. 2013. *Cuando las rocas se calientan: Las propiedades térmicas de las rocas yacimiento*. Oilfield Review, otoño de 2012:24, no3
6. Babadagli T. y Ali Al-Bemani. 2007. *Investigations on matrix recovery during steam injection into heavy-oil containing carbonate rocks*. Journal of Petroleum Science and Engineering 58: 259-274.
7. P. Lemonnier y B. Bourbiaux. 2010. *Simulation of Naturally Fractured Reservoir. State of the Art. Par I Physical Mechanisms and Simulator Formulation*. Oil & Gas Science and Technology-Rev, IFP, vol. 65, No.2, pp. 239-262.
8. Hossain M. E., A. Abu-Khamsin Sidqi y Al-Helali A.A. 2011. *Use of the Memory Concept to Investigate the Temperature Profile during a Thermal EOR Process*. Paper SPE 149094, 15-18 May.
9. Alajmi A. F., Grader A. y Halleck P. 2008. *Visualization of Steam Zone Advancement during Heavy Oil Recovery*. Paper SPE 120819, 10-12 May.
10. Prats M. 1992. *The Heat Efficiency of Thermal Recovery Processes Resulting from Non- Uniform Vertical Temperature Profiles*. Paper SPE 23744, 8-11 March.

11. Wark K. y Richards D.E. 2001. *Termodinámica*, 6ª Edición, Mac Graw-Hill, España.
12. Hossain M.E., Mousavizadegan S.H., Islam M.R. 2009. *Detecting Fluid Influx from Temperature profiles in porous media*. Paper ID: 205 Proceedings of the fourth International Conference on Thermal Engineering: Theory and Applications. 12-14 January.
13. M. D. Sumnu, Brigham W. E., Aziz K. & Castanier L.M. 1996. *An Experimental Study on Steam Injection in Fractured Systems*. Paper SPE/DOE 35459, 21-26 April.
14. Hossain M.E., Mousavizadegan S. H., Islam M.R. 2007. *Rock and Fluid Temperature Changes during Thermal Operation in EOR Process*. Journal of Nature Science and Sustainable Technology, Volume 2, Issue 3. ISSN 1933- 0324.
15. Tosun I. 2002. *Modelling in Transport Phenomena a Conceptual Approach*. First edition. Peg 15-29.