

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE DIFERENTES ESQUEMAS DE CALENTAMIENTO DIELECTRICO PARA LA RECUPERACIÓN MEJORADA DE CRUDO.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título de
Magíster Scientiarum en Ingeniería Química.
Por la Ing. Somogyi Doval, Grace.

Caracas, Enero del 2004

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

ESTUDIO DE DIFERENTES ESQUEMAS DE CALENTAMIENTO DIELECTRICO PARA LA RECUPERACIÓN MEJORADA DE CRUDO.

TUTOR ACADEMICO: Dr. César Ovalles.

TUTOR INDUSTRIAL: Dra. Mirla Fonseca.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela para optar al Título de
Magíster Scientiarum en Ingeniería Química.
Por la Ing. Somogyi Doval, Grace.

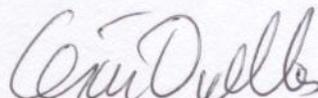
Caracas, Enero del 2004

© Grace Somogyi Doval, 2004

Hecho el Depósito de Ley

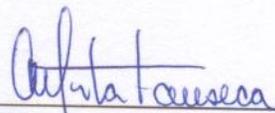
Depósito Legal lft4612004660120

Certifico que he leído este Trabajo de Grado y que lo encuentro apropiado tanto en su contenido como en su formato y apariencia externa.



Dr. Cesar Ovalles

Tutor UCV



Dra. Mirla Fonseca

Tutor PDVSA-Intevop

22/01/2004

Fecha



UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE INGENIERIA
COMISION DE ESTUDIOS DE POSTGRADO

VEREDICTO

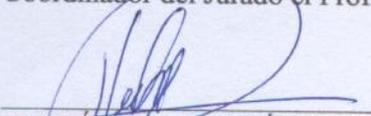
Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de la Facultad de Ingeniería y por el Consejo de Estudios de Postgrado de la Universidad Central de Venezuela, para examinar el Trabajo de Grado presentado por la Ingeniero **GRACE SOMOGYI**, portadora de la cédula de identidad No. 12.623.583, bajo el título: **ESTUDIO DE DIFERENTES ESQUEMAS DE CALENTAMIENTO DIELECTRICO PARA LA RECUPERACION MEJORADA DE CRUDO**, a los fines de cumplir con el requisito legal para optar al Título de Magister Scientiarum en Ingeniería Química dejan constancia de lo siguiente:

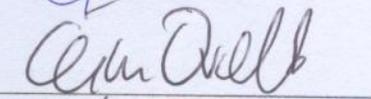
1. - Leído como fue dicho trabajo por cada uno de los Miembros del Jurado, éste fijó el día 22 del mes de enero de 2004, para que el autor lo defendiera en forma pública, lo que éste hizo en la Sala 126 de la Escuela de Ingeniería Química de la Facultad de Ingeniería, mediante un resumen oral de su contenido, luego de lo cual respondió satisfactoriamente a las preguntas que le fueron formuladas por el Jurado; todo conforme a lo dispuesto en los Artículos 44, 49, 50, 51 y 52 del Reglamento de Estudios de Postgrado.

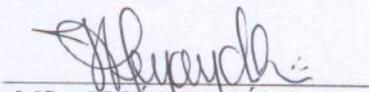
2. - Finalizada la defensa pública del trabajo, el Jurado decidió aprobarlo por considerar, sin hacerse solidario de las ideas expuestas por el autor, que se ajusta a lo dispuesto y exigido en el Reglamento de Estudios de Postgrado.

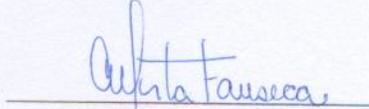
Para dar este veredicto, el Jurado estimó que la obra examinada es un aporte valioso a las Ciencias y la Tecnología del calentamiento con energía electromagnética para la recuperación de crudos pesados y extrapesados mejorados. El trabajo realizado es de gran calidad demostrando una madurez científica en el área. Por lo tanto se recomienda su publicación en revistas y eventos nacionales e internacionales. Finalmente se debe señalar que la Ing. Somogyi demostró en todo momento autonomía de criterio y gran disposición para trabajar.

En fe de o cual se levanta la presente Acta, a los veintidos días del mes de enero de 2004, dejándose también constancia de que, conforme a lo dispuesto en la normativa jurídica vigente, actuó como Coordinador del Jurado el Prof. César Ovalles.


Dr. HÉCTOR RODRÍGUEZ
C.I. 4223617


Dr. CÉSAR OVALLES
C.I. 4806711
Tutor Académico


MSc. JOSÉ HERNÁNDEZ
C.I. 2517965


Dr. MIRLA FONSECA
C.I. 6848491
Tutor Industrial

DEDICATORIA

A mi nenita Cathy

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todos aquellos que contribuyeron a la realización de este trabajo, a los que me acompañaron en los momentos difíciles y también a los que no estuvieron allí, por darme la motivación y el impulso para la culminación de este trabajo.

Agradezco a mi madre, esposo, hermano, hija, y familia, por permitirme contar con el apoyo incondicional que siempre me han brindado.

A mis amigos, colegas, tutores y profesores, por contribuir con su experiencia y servir de guías en este trabajo. A la Universidad Central de Venezuela por abrirme las puertas y darme la oportunidad de presentar mi proyecto.

Muchas gracias...

Somogyi D. Grace

**ESTUDIO DE DIFERENTES ESQUEMAS DE
CALENTAMIENTO DIELECTRICO PARA LA
RECUPERACIÓN MEJORADA DE CRUDO.**

**Tutor Académico: Dr. César Ovalles. Tutor Industrial: Dra.
Mirla Fonseca. Tesis. Caracas, UCV Facultad de Ingeniería. Escuela de
Ingeniería Química. 2004, ## páginas.**

Palabras clave: Calentamiento Electromagnético, Recuperación por métodos térmicos, Mejoramiento, Donantes de Hidrógeno, Crudos Pesados y Extrapesados

Resumen:

Se estudiaron diferentes esquemas de calentamiento dieléctrico a fondo de pozo, y se evaluó el impacto de una fractura como un mecanismo para introducir un material apuntalante que mejore la absorción de radiación electromagnética en el medio.. Se estudiaron dos modelos conceptuales de las áreas: Tía Juana (15,5 °API y K = 900 mD) y Cerro Negro (7,7 °API y K=12000 mD). Los resultados indican que se obtiene una aceleración y un incremento importante en la producción de crudo comparando con el caso en frío (aprox. 42,2% y 21,3%) los cuales se atribuyen a una reducción de la viscosidad con la temperatura que impacta directamente en el factor de recobro (24,5 y 22,7%, respectivamente). Los resultados muestran la potencialidad de esta tecnología para la recuperación mejorada de petróleo, y para mejoramiento de crudos pesados en subsuelo. Una vez determinado el esquema de calentamiento más adecuado, éste se acopló a un modelo de mejoramiento de crudos pesados en subsuelo con donantes de hidrógeno, para lo cual se realizaron simulaciones de un yacimiento típico del área de Hamaca (9,8 °API), obteniéndose la mayor producción de crudo mejorado al concentrar el calentamiento en una Banda 10 pies de ancho (fractura y arena adyacente).

SUMARIO

El calentamiento dieléctrico (radiofrecuencia o microondas) consiste en la transformación de energía electromagnética en energía térmica^[1]. Sin embargo, su aplicación en la industria petrolera como fuente de energía para la recuperación mejorada de petróleo y/o el mejoramiento de los crudos pesados y extra pesados (CP/XP) en subsuelo no ha sido estudiada en detalle. Los resultados reportados a la fecha indican que es posible emplear radiación electromagnética (RF/MW) para el calentamiento dieléctrico a fondo de pozo, ya que su aplicación conduce a un aumento de la temperatura del medio que conlleva a un incremento en la movilidad de la fase oleica y, por ende, a un incremento en la producción de crudo. Se han reportado radios de penetración de hasta 15 m y temperaturas elevadas (<500°C) utilizando diferentes métodos para llevar la radiación a fondo de pozo^[5-6,13,32]. Adicionalmente, las invenciones publicadas en esta área reivindican la conversión de hidrocarburos por interacción con la radiación electromagnética, que podría facilitar el mejoramiento del crudo en subsuelo^[5-6,13,32].

En este trabajo se estudian diferentes esquemas de calentamiento dieléctrico a fondo de pozo utilizando la simulación numérica de yacimientos como herramienta de trabajo. También se evalúa el efecto de una fractura, vista como un mecanismo para introducir en el yacimiento un material que incremente la absorción de radiación electromagnética del medio.

Se estudiaron dos modelos conceptuales de yacimientos de crudos pesados típicos de Venezuela: Tía Juana y Cerro Negro (con crudos de 15,5 y 7,7 °API, respectivamente). Los procedimientos para los cálculos y las propiedades físicas, térmicas y dieléctricas de las arenas y de los crudos estudiados así como la validación experimental de los modelos numéricos utilizados se encuentran publicados en trabajos previos^[5-6,8,12,32]. El calentamiento electromagnético se modeló utilizando el simulador comercial STARS[®] de CMG, Calgary, Canadá, asignándole un valor constante de potencia a cada celda de la zona a calentar, el cual es calculado a través de la ecuación reportada por Abernethy^[20]. Para ambos casos se utilizó una malla

cartesiana de 24x24x3 con el pozo productor y la antena emisora ubicados en el extremo de la malla, y una fractura localizada en las celdas (24, j, k) rellena o no de un material apuntalante. La distribución de energía se alimentó al simulador bajo dos esquemas de calentamiento: 1) en bandas (que varían desde 0,083 hasta 20 pies de ancho), y 2) en forma radial. Se determinó la potencia y frecuencia óptima de calentamiento que permitió llegar a una comparación entre los esquemas de calentamiento estudiados.

Los resultados de los casos Tía Juana y Cerro Negro indican que se obtiene una aceleración y un incremento importante en la producción de crudo comparando con el caso en frío de 42,2% y 21,3%, respectivamente, los cuales se atribuyen a una reducción de la viscosidad con la temperatura que impacta directamente en el factor de recobro (24,5 y 22,7%, respectivamente). Estos resultados varían al modificar la permeabilidad de la arena en estudio.

Se evaluaron diferentes modelos de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo con donantes de hidrógeno. Para ello se realizaron simulaciones de un yacimiento típico del área de Hamaca (9,8 °API) utilizando la metodología publicada por Ovalles y col.^[9-11,29-31]. Se determinó la potencia y frecuencia óptima de calentamiento, así como la temperatura máxima de la fuente, que permitió llegar a una comparación entre los esquemas de calentamiento estudiados.

La mayor producción de crudo mejorado (°API de crudo acumulado en tanque \geq 22) se obtuvo al acoplar el modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo con el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento al focalizar el calentamiento en una Banda 10 pies de ancho (fractura y arena adyacente), con una fractura rellena de apuntalante ALFE, calentado a 400 kW y 2450 MHz, y con una temperatura máxima de calentamiento de 650 °F. Con este modelo, la producción de crudo mejorado resultó 2,5 veces mayor que la obtenida con el calentamiento focalizado únicamente en la fractura.

ÍNDICE GENERAL

SUMARIO	vii
INDICE GENERAL	ix
INDICE DE TABLAS	xvi
INDICE DE FIGURAS	xix
NOMENCLATURA	xxix
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1 OBJETIVOS GENERALES	4
I.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
II. MARCO TEÓRICO	6
II.1 MÉTODOS DE RECUPERACIÓN DE CRUDOS	6
II.1.1 El Calentamiento eléctrico en la recuperación mejorada de petróleo	8
II.1.2 Antecedentes del uso de calentamiento electromagnético en recuperación mejorada de petróleo	10
II.2 MEJORAMIENTO DE CRUDOS CP/XP	11
II.2.1 Mejoramiento de CP/XP por adición de hidrógeno. Antecedentes	12
II.3 CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO	14
II.3.1 Origen del calentamiento electromagnético	16
II.3.2 Constante dieléctrica	18
II.3.3 Profundidad de penetración	19
II.3.4 Ecuaciones de Maxwell	20

II.3.5 Ley de Lambert	20
II.4 FRACTURAMIENTO DE ESTRATOS	21
II.4.1 Proceso de fracturamiento hidráulico	21
II.4.2 Modelaje de una fractura	23
II.4.3 Influencia de la permeabilidad del yacimiento en la geometría de la fractura	25
III. METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	27
III.1 DESCRIPCIÓN DE LOS YACIMIENTOS Y PARÁMETROS DE SIMULACIÓN	27
III.1.1 <u>Caso 1</u> : Yacimiento Tía Juana	29
III.1.2 <u>Caso 2</u> : Yacimiento Cerro Negro	30
III.1.3 <u>Caso 3</u> : Yacimiento Hamaca	31
III.2 CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO	32
III.3 ACOPLAMIENTO CON SIMULADOR STAR®	38
III.3.1 Descripción del simulador	38
III.3.2 Comandos utilizados para las simulaciones	39
III.4 GEOMETRÍA DE LA FRACTURA	40
III.4.1 Fractura “ <i>ovalada</i> ”	42
III.4.2 Fractura “ <i>rectangular</i> ”	43
III.4.3 Fractura “ <i>triangular</i> ”	43
III.4.4 Fractura “ <i>cuadrada</i> ”	45
III.4.5 Fractura “ <i>mini-triangular</i> ”	45
III.4.6 Fractura “ <i>mini-cuadrada</i> ”	46

III.4.7 Fractura “cuadrada” para el caso del yacimiento Hamaca (acoplamiento con el modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo)	47
III.5 MATERIAL APUNTALANTE	48
III.6 MODELOS DE CALENTAMIENTO	49
III.6.1 Calentamiento en Banda 0	50
III.6.2 Calentamiento en Banda 1	50
III.6.3 Calentamiento en Banda 10	51
III.6.4 Calentamiento en Banda 20	51
III.6.5 Calentamiento Radial	51
III.7 ANÁLISIS DEL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO	53
III.8 ANÁLISIS DEL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO ACOPLADO AL MODELO DE MEJORAMIENTO DE CRUDO EN SUBSUELO CON DONANTES DE HIDRÓGENO	57
III.8.1 Cálculos para el análisis de isoenergía	60
III.8.2 Selección de los modelos de calentamiento	62
III.8.3 Cálculo del volumen de reacción del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento y de los perfiles de temperatura y flujo de fluidos	65
IV. APLICACIÓN DEL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO PARA RECUPERACION MEJORADA DE PETRÓLEO	69
IV.1 ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO CUANDO ES APLICADO AL YACIMIENTO TÍA JUANA	70
IV.1.1 Simulación conceptual de un pozo bajo producción natural para el caso Tía Juana	70
IV.1.2 Simulación conceptual de un pozo bajo el esquema Yacimiento-Fractura sin calentamiento para el caso Tía Juana	72

IV.1.3 Simulación conceptual de un pozo bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento	80
IV.1.3.1 Análisis del modelo de calentamiento focalizado en la fractura (<i>Banda 0</i>) bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Tía Juana ...	81
IV.1.3.1.1 Análisis de la potencia óptima de calentamiento para el modelo <i>Banda 0</i> en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento	82
IV.1.3.1.1.a Análisis del Apuntalante Fe_2O_3	82
IV.1.3.1.1.b Análisis del Apuntalante <i>ALFE</i>	84
IV.1.3.1.1.c Análisis del Apuntalante <i>JL-P</i>	86
IV.1.3.1.2 Análisis de la frecuencia óptima de radiación para el modelo de Calentamiento <i>Banda 0</i> bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento	89
IV.1.3.1.3 Análisis de la Geometría de la Fractura para el caso de calentamiento <i>Banda 0</i> , bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Tía Juana	92
IV.1.3.1.4 Análisis de la variación en la Conductividad Térmica para caso óptimo del modelo de calentamiento <i>Banda 0</i>	96
IV.1.3.2 Análisis del modelo de calentamiento en bandas de 1, 10 y 20 pies de ancho (<i>Banda 1</i> , <i>Banda 10</i> y <i>Banda 20</i>) y Radial, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Tía Juana	99
IV.1.3.2.1 Análisis de la potencia óptima de calentamiento y de la frecuencia óptima de radiación para los modelos de calentamiento <i>Banda 1</i> , <i>Banda 10</i> y <i>Banda 20</i> y Radial, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento	100
IV.1.3.2.2 Análisis de la Geometría de la Fractura para los modelos de calentamiento <i>Banda 1</i> , <i>Banda 10</i> y <i>Banda 20</i> y Radial, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento	103
IV.1.3.2.3 Análisis global del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento óptimo para el caso Tía Juana	107
IV.2 ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO CUANDO ES APLICADO AL YACIMIENTO CERRO NEGRO	116
IV.2.1 Simulación conceptual de un pozo bajo producción natural para el caso Cerro Negro	116

IV.2.2 Simulación conceptual de un pozo bajo el esquema Yacimiento-Fractura sin calentamiento para el caso Cerro Negro	118
IV.2.3 Simulación conceptual de un pozo bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento	121
IV.2.3.1.1 Análisis de la potencia óptima de calentamiento para los modelos <i>Banda 0</i> , <i>Banda 1</i> , <i>Banda 10</i> , <i>Banda 20</i> y <i>Radial</i> en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento	122
IV.2.3.1.2 Análisis de la Geometría de la Fractura para los casos de calentamiento <i>Banda 0</i> , <i>Banda 1</i> , <i>Banda 10</i> , <i>Banda 20</i> y <i>Radial</i> , bajo el esquema Yacimiento – Fractura - Calentamiento para el caso Cerro Negro	126
IV.2.3.1.3 Análisis global del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento óptimo para el caso Cerro Negro	129
IV.3 COMPARACION DE LOS RESULTADOS DE LOS CASOS TÍA JUANA Y CERRO NEGRO BAJO EL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO	138
V INTEGRACIÓN DEL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO A UN ESQUEMA DE MEJORAMIENTO DE CRUDO EN SUBSUELO CON DONANTES DE HIDRÓGENO	140
V.1 SIMULACIÓN CONCEPTUAL DEL MODELO DE MEJORAMIENTO DE CRUDO CON DIFERENTES FUENTES DE CALENTAMIENTO. ANÁLISIS DE ISOENERGÍA	141
V.2 ANÁLISIS DEL ESQUEMA YACIMIENTO-CALENTAMIENTO PARA EL MODELO DE MEJORAMIENTO DE CRUDO EN SUBSUELO CON DONANTES DE HIDRÓGENO	143
V.3 ANÁLISIS DEL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO PARA EL MODELO DE MEJORAMIENTO DE CRUDO EN SUBSUELO CON DONANTES DE HIDRÓGENO	147
V.3.1 Análisis del modelo de calentamiento focalizado en la fractura (<i>Banda 0</i>) bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo con donantes de hidrógeno	148
V.3.1.1 Análisis del Apuntalante Fe_2O_3	148

V.3.1.2 Análisis del Apuntalante <i>ALFE</i>	150
V.3.1.3 Análisis del Apuntalante <i>JL-P</i>	154
V.3.1.4 Análisis del apuntalante óptimo para el modelo de calentamiento en Banda 0	156
V.3.2 Análisis del modelo de calentamiento <i>Banda 10</i> bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo con donantes de hidrógeno	157
V.3.2.1 Análisis del Apuntalante Fe_2O_3	158
V.3.2.2 Análisis del Apuntalante <i>ALFE</i>	160
V.3.2.3 Análisis del Apuntalante <i>JL-P</i>	162
V.3.2.4 Análisis del apuntalante óptimo para el modelo de calentamiento en Banda 10	164
V.3.3 Análisis global del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo con donantes de hidrógeno	166
V.3.4 Estudio de los perfiles de flujo para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento bajo los modelos de calentamiento Banda 0 y Banda 10	169
VI. CONCLUSIONES	175
VII. RECOMENDACIONES	178
VIII. REFERENCIAS	179
APÉNDICES	183
A. ANÁLISIS DEL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO PARA LOS YACIMIENTOS TÍA JUANA Y CERRO NEGRO UTILIZANDO SUS PERMEABILIDADES REALES	184

B. ANÁLISIS DETALLADO DE LOS MODELOS DE CALENTAMIENTO BANDA 1, BANDA 10, BANDA 20 Y RADIAL, BAJO EL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO, PARA EL CASO TÍA JUANA	189
C. ANÁLISIS DETALLADO DE LOS MODELOS DE CALENTAMIENTO BANDA 0, BANDA 1, BANDA 10, BANDA 20 Y RADIAL, BAJO EL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO, PARA EL CASO CERRO NEGRO	212
ANEXOS	257
1. ARCHIVOS DE ENTRADA AL SIMULADOR STARS	258
2. VALORES DE ε' Y ε'' PARA LOS MATERIALES ESTUDIADOS	286

INDICE DE TABLAS

Tabla N° 2.1: Valores del Factor de Disipación Para Algunos Materiales y su Interacción con las Microondas	20
Tabla N° 3.1: Valores de ϵ' y ϵ'' de la arena Tía Juana en función de la temperatura para una frecuencia de 397 MHz	35
Tabla N° 3.2: Distribución de calor para una línea de celdas en \hat{i} , para una potencia de 40 kW	37
Tabla N° 3.3: Variables de análisis del modelo Yacimiento-Fractura	55
Tabla N° 3.4: Valores de las frecuencias no comerciales y su valor de Dp correspondiente	57
Tabla N° 3.5 : Variables de análisis del modelo Yacimiento-Fractura-Calentamiento	58
Tabla N° 3.6: Variables de análisis del modelo Yacimiento-Calentamiento	59
Tabla N° 3.7: Variables de análisis del modelo Yacimiento-Fractura-Calentamiento	61
Tabla N° 3.8: Saturación de Donante de hidrógeno, Crudo y Temperatura de las celdas de la fractura en la capa 1 del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, para el modelo Banda 0	68
Tabla N° 4.1: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes longitudes y con respecto al caso de producción natural, para diferentes permeabilidades del yacimiento Tía Juana	77
Tabla N° 4.2: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes alturas en el esquema Yacimiento-Fractura, yacimiento Tía Juana	80
Tabla N° 4.3: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes alturas para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el calentamiento en Banda 0	96
Tabla N° 4.4: Valores de la frecuencia óptima para cada longitud de fractura y material apuntalante, para el caso Tía Juana bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento y el modelo Banda 0	97

Tabla N° 4.5: Rangos de potencia aplicables y de frecuencias óptimas para cada material apuntalante, calentando bajo los modelos Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial, para el caso Tía Juana	103
Tabla N° 4.6: Valor del Dp promedio de los materiales individuales y del área total calentada para el yacimiento Tía Juana, al ser calentados bajo los óptimos de los modelos Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial	105
Tabla N° 4.7: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes alturas para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento bajo los esquemas Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial	107
Tabla N° 4.8: Frecuencia óptima para cada longitud de fractura y apuntalante, para el caso Tía Juana bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento y los modelos Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial	109
Tabla N° 4.9: Factor de recobro y % de incremento para cada óptimo de los modelos de calentamiento estudiados en el caso Tía Juana, para 70 pies de largo	111
Tabla N° 4.10: Relación entre yacimientos con y sin fractura para cada óptimo de los modelos de calentamiento estudiados en el caso Tía Juana, para 70 pies ...	112
Tabla N° 4.11: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes alturas para el esquema Yacimiento-Fractura, para Cerro Negro	123
Tabla N° 4.12: Rangos de potencia aplicables y de frecuencias óptimas para cada material apuntalante, calentando bajo los modelos Banda 0, Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial, para el caso Cerro Negro	127
Tabla N° 4.13: Valor del Dp promedio de los materiales individuales y del área total calentada para el yacimiento Cerro Negro, al ser calentados bajo los óptimos de los modelos Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial	128
Tabla N° 4.14: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes alturas para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento bajo los esquemas Banda 0, Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial	130
Tabla N° 4.15: Valores de la frecuencia óptima para cada longitud de fractura y material apuntalante, para el caso Cerro Negro bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento y los modelos Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial	132
Tabla N° 4.16: Factor de recobro y % de incremento para cada óptimo de los modelos de calentamiento estudiados en el caso Cerro Negro, para una fractura de 70 pies de largo	134

Tabla N° 4.17: Relación entre yacimientos con y sin fractura para cada óptimo de los modelos de calentamiento estudiados en el caso Cerro Negro, para una fractura de 70 pies de largo 135

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 2.1: Clasificación de los Métodos de Recuperación de Petróleo	7
Figura N° 2.2: Clasificación de los métodos de mejoramiento de CP/XP en subsuelo	12
Figura N° 2.3: Disposición espacial para los campos eléctricos y magnéticos que conforman una onda electromagnética	14
Figura N° 2.4: Regiones del espectro electromagnético	15
Figura N° 2.5: Interacción entre el campo eléctrico y las moléculas bipolares ...	17
Figura N° 2.6: Ión cloruro negativo migrando hacia el campo eléctrico positivo	18
Figura N° 2.7: Comportamiento de la materia frente a la radiación	19
Figura N° 2.8: Proceso de Fracturamiento: a) Cañoneo de la zona de interés; b) Propagación del fluido de inyección; c) Inyección del Apuntalante; d) Desplazamiento y cierre del pozo; e) Producción	23
Figura N° 2.9: Modelo KGD	24
Figura N° 2.10: Modelo PKN	25
Figura N° 2.11: Evolución de la geometría de la fractura	26
Figura N° 3.1: Malla de simulación utilizada para los casos Tía Juana y Cerro Negro	30
Figura N° 3.2: Descripción de la malla utilizada para el caso Hamaca	33
Figura N° 3.3: Valor de D_p vs. frecuencia para los materiales utilizados, en el rango de temperatura de interés	35
Figura N° 3.4: Valor de α vs. frecuencia para los materiales utilizados, en el rango de temperatura de interés	36
Figura N° 3.5: Diagrama celda-arandela para el cálculo de la potencia incidente	38
Figura N° 3.6: Diagrama de una fractura descrita bajo el modelo Radial	42

Figura N° 3.7: Diagrama de fracturas reales de tipo Radial para 40, 70 y 200 pies	42
Figura N° 3.8: Diagrama de una fractura “ovalada”: a) geometría real y la simplificación para la simulación; b) modelo final de simulación	44
Figura N° 3.9: Diagrama de una fractura “rectangular”: a) geometría real y la simplificación para la simulación; b) modelo final de simulación	45
Figura N° 3.10: Diagrama de una fractura “triangular”: a) geometría real y la simplificación para la simulación; b) modelo final de simulación	45
Figura N° 3.11: Diagrama de una fractura “cuadrada”: a) geometría real y la simplificación para la simulación; b) modelo final de simulación	46
Figura N° 3.12: Diagrama de una fractura “mini-triangular”: a) geometría real y la simplificación para la simulación; b) modelo final de simulación	47
Figura N° 3.13: Diagrama de una fractura “mini-cuadrada”: a) geometría real y la simplificación para la simulación; b) modelo final de simulación	48
Figura N° 3.14: Diagrama de una fractura “cuadrada” del modelo Hamaca: a) geometría real y la simplificación para la simulación; b) modelo final de simulación para la malla Radial	49
Figura N° 3.15: Valores de Tan (δ) para comparar la capacidad de absorción de microondas de los materiales estudiados	50
Figura N° 3.16: Diagrama del esquema de calentamiento por bandas	53
Figura N° 3.17: Malla utilizada para modelar el caso Yacimiento-Calentamiento, en el estudio “isoenergético” entre calentamiento dieléctrico e IAV	62
Figura N° 3.18: Perfiles de concentración del donante de hidrógeno en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, para el día 20 de simulación	64
Figura N° 3.19: Perfiles de concentración del donante de hidrógeno en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el día 20 de simulación. Vista areal de la parte superior de la malla	64
Figura N° 3.20: Perfiles de concentración del donante de hidrógeno en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el día 20 de simulación. Vista lateral de las celdas que componen la fractura	65

Figura N° 3.21: Perfil de Temperatura en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el día 20 de simulación. Vista completa del yacimiento. Modelo Banda 0	66
Figura N° 3.22: Perfil de concentración de crudo en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el día 20 de simulación. Vista lateral de la fractura. Modelo Banda 0	67
Figura N° 3.23: Perfil de concentración de crudo en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el día 20 de simulación. Vista lateral de la fractura para el modelo Banda 0	67
Figura N° 4.1: Simulación conceptual de un pozo con los datos del Yacimiento Tía Juana: a) Producción acumulado de crudo, b) Tasa de producción diaria, c) Presión promedio del yacimiento, d) Relación Gas Petróleo, e) Viscosidad del crudo en tanque, f) Presión de fondo fluyente	72
Figura N° 4.2: Variación del largo de la fractura (L) en el esquema Yacimiento-Fractura para el caso Tía Juana (permeabilidad de 900 mD)	74
Figura N° 4.3: Producción acumulada de crudo variando del largo de la fractura, en el esquema Yacimiento-Fractura para el caso Tía Juana (500 mD)	75
Figura N° 4.4: Producción acumulada de crudo variando del largo de la fractura, en el esquema Yacimiento-Fractura para el caso Tía Juana (100 mD)	76
Figura N° 4.5: Diagrama de las geometrías de fractura estudiadas: a) altura variable y b) altura constante	79
Figura N° 4.6: Variación de la geometría de la fractura en el esquema Yacimiento-Fractura para el caso Tía Juana con permeabilidad de 100 mD	79
Figura N° 4.7: Producción de crudo acumulada en 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentamiento en Banda 0 para el caso Tía Juana (100 mD)	85
Figura N° 4.8: Temperatura de la celda más caliente del yacimiento a 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentamiento en Banda 0 para el caso Tía Juana (100 mD)	86

Figura N° 4.9: Producción de crudo acumulada en 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante ALFE y calentamiento en Banda 0 para el caso Tía Juana (100 mD)	87
Figura N° 4.10: Temperatura de la celda (24,23,3) a 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante ALFE y calentamiento en Banda 0 para el caso Tía Juana (100 mD)	88
Figura N° 4.11: Producción de crudo acumulada en 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante JL-P y calentamiento en Banda 0 para el caso Tía Juana (100 mD)	89
Figura N° 4.12: Temperatura de la celda (24,23,3) a 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante JL-P y calentamiento en Banda 0 para el caso Tía Juana (100 mD)	90
Figura N° 4.13: Producción acumulada de crudo en 20 años variando la frecuencia y el material apuntalante para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con calentamiento en Banda 0 para el caso Tía Juana (100 mD) ...	91
Figura N° 4.14: Producción de crudo para los valores de frecuencias comerciales y no comerciales comprendidos entre 40 y 915 kW para el modelo Banda 0, calentando a 120 kw y con los datos del yacimiento Tía Juana (100 mD), para una fractura de 70 pies de largo rellena de apuntalante Fe ₂ O ₃	93
Figura N° 4.15: Producción de crudo para los óptimos de frecuencia del modelo de calentamiento Banda 0, calentando a 120 kw y con los datos del yacimiento Tía Juana (100 mD), para una fractura de 70 pies de largo rellena de los materiales apuntalantes estudiados	94
Figura N° 4.16: Variación de la geometría de la fractura para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento bajo calentamiento en Banda 0. Caso óptimo del yacimiento Tía Juana (100 mD): Fe ₂ O ₃ calentando a 120 kW y 54 MHz	95
Figura N° 4.17: Variación en el largo de la fractura para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento. Caso Tía Juana (100 mD), calentando a 120 kW bajo el modelo Banda 0. Material apuntalante Fe ₂ O ₃ . Largos de fractura: a) 40 pies y b) 200 pies	97

Figura N° 4.18: Temperatura de las celdas de la fractura al variar conductividad térmica del apuntalante en 2,4,6,y 10 veces su valor original, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento en el caso Tía Juana (100 mD), con una fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 , calentando en Banda 0 a 120 kW y 163 MHz. Celdas: a) (24,23,2) y b) (24,15,2)	99
Figura N° 4.19: Temperatura de las celdas adyacentes a la fractura al variar conductividad térmica del apuntalante en 2,4,6,y 10 veces su valor original, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento en el caso Tía Juana (100 mD), con una fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 , calentando en Banda 0 a 120 kW y 163 MHz. Celdas: a) (22,23,2) y b) (22,15,2)	99
Figura N° 4.20: Temperatura de las celdas adyacentes a la fractura al variar conductividad térmica del apuntalante en 2,4,6,y 10 veces su valor original, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento en el caso Tía Juana (100 mD), con una fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 , calentando en Banda 0 a 120 kW y 163 MHz. Celdas: a) (20,23,2) y b) (20,15,2)	100
Figura N° 4.21: Temperatura de las celdas adyacentes a la fractura al variar conductividad térmica del apuntalante en 2,4,6,y 10 veces su valor original, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento en el caso Tía Juana (100 mD), con una fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 , calentando en Banda 0 a 120 kW y 163 MHz. Celdas: a) (18,23,2) y b) (18,15,2)	100
Figura N° 4.22: Apuntalantes y frecuencias óptimas para cada modelo de calentamiento estudiado en el caso Tía Juana, con una fractura de 70 pies y bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento	111
Figura N° 4.23: Producción para el caso óptimo del yacimiento Tía Juana (100 mD) bajo diferentes esquemas: Yacimiento-Fractura-Calentamiento, Yacimiento-Fractura, Yacimiento-Calentamiento y producción natural	113
Figura N° 4.24: Producción para el caso óptimo del yacimiento Tía Juana (100 mD) bajo diferentes esquemas: Yacimiento-Fractura-Calentamiento, Yacimiento-Fractura, Yacimiento-Calentamiento y producción natural	114
Figura N° 4.25: Perfil de temperaturas para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Tía Juana (100 mD). Caso óptimo de calentamiento: fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentando en la fractura a 120 kW y 163 MHz	116
Figura N° 4.26: Perfil de temperatura en la capa intermedia de la malla para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Tía Juana (100 mD). Caso óptimo de calentamiento: fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentando en la fractura a 120 kW y 163 MHz	117

Figura N° 4.27: Perfil de presión para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Tía Juana (100 mD). Caso óptimo de calentamiento: fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentando en la fractura a 120 kW y 163 MHz	118
Figura N° 4.28: Simulación conceptual de un pozo con los datos del Yacimiento Cerro Negro: a) Producción acumulado de crudo, b) Tasa de producción diaria, c) Presión promedio del yacimiento, d) Relación Gas Petróleo, e) Viscosidad del crudo, f) Presión de fondo fluyente	120
Figura N° 4.29: Producción acumulada de crudo variando del largo de la fractura, en el esquema Yacimiento-Fractura para el caso Cerro Negro (100 mD)	122
Figura N° 4.30: Variación de la geometría de la fractura en el esquema Yacimiento-Fractura para el caso Cerro Negro con permeabilidad de la arena de 100 mD	123
Figura N° 4.31: Apuntalantes y frecuencias óptimas para cada modelo de calentamiento estudiado en el caso Cerro Negro, con una fractura de 70 pies y bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento	133
Figura N° 4.32: Producción para el caso óptimo del yacimiento Cerro Negro (100 mD) bajo diferentes esquemas: Yacimiento-Fractura-Calentamiento, Yacimiento-Fractura, Yacimiento-Calentamiento y producción natural	136
Figura N° 4.33: Producción para el caso óptimo del yacimiento Cerro Negro (100 mD) bajo diferentes esquemas: Yacimiento-Fractura-Calentamiento, Yacimiento-Fractura, Yacimiento-Calentamiento y producción natural	137
Figura N° 4.34: Perfil de temperaturas para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Cerro Negro (100 mD). Caso óptimo de calentamiento: fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentando en la fractura a 20 kW y 1499 MHz	139
Figura N° 4.35: Perfil de temperatura en la capa intermedia de la malla para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Cerro Negro (100 mD). Caso óptimo de calentamiento: fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentando a 20 kW y 1499 MHz	140
Figura N° 4.3: Perfil de presión para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Cerro Negro (100 mD). Caso óptimo de calentamiento: fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentando en la fractura a 20 kW y 1499 MHz	141

Figura N° 5.1: °API en función del tiempo para análisis de isoenergía del calentamiento dieléctrico y la IAV. Energía = 10^9 BTU ($P_o=300-600$ kW)	146
Figura N° 5.2: °API en función del tiempo para la comparación a isoenergía del caso calentamiento dieléctrico y la IAV. Energía acumulada de $9,5 \times 10^9$ BTU. La línea discontinua representa °API>22	147
Figura N° 5.3: Temperatura de la ceda (2,5,5) en el día 30 de simulación, calentando bajo el esquema Yacimiento-Calentamiento con frecuencias comerciales y potencias desde 200 a 600 kW	149
Figura N° 5.4: °API en función del tiempo variando la temperatura máxima de calentamiento para el esquema Yacimiento-Calentamiento, a una potencia de 400 kW. La línea discontinua representa °API>22	150
Figura N° 5.5: °API en función del tiempo variando la temperatura máxima de calentamiento para el esquema Yacimiento-Calentamiento, a una potencia de 500 kW. La línea discontinua representa °API>22	151
Figura N° 5.6: Acumulado de crudo mejorado (°API > 22) en función del tiempo al calentar a una P_o de 500 kW y variando la temperatura máxima de calentamiento en el esquema Yacimiento-Calentamiento	151
Figura N° 5.7: Temperatura de la celda (2,5,5) en el día 30 de simulación, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 0, apuntalante Fe_2O_3	154
Figura N° 5.8: °API en función del tiempo variando la temperatura asignada a la fuente de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 0 a 400 kW, apuntalante Fe_2O_3 . La línea discontinua representa °API>22	155
Figura N° 5.9: Temperatura de la ceda (2,5,5) en el día 30 de simulación, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 0, apuntalante ALFE	156
Figura N° 5.10: °API en función del tiempo variando la temperatura de la fuente de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 0 a 200 kW, apuntalante ALFE	157
Figura N° 5.11: °API en función del tiempo variando la temperatura asignada a la fuente de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 0 a 300 kW, apuntalante ALFE. La línea discontinua representa °API>22	158

Figura N° 5.12: Perfil de temperatura en la fractura para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, para Calentamiento en Banda 0 en una fractura rellena de apuntalante ALFE calentando: a) a 200 kW y 163 MHz y b) a 300 kW y 2450 MHz	159
Figura N° 5.13: Temperatura de la ceda (2,5,5) en el día 30 de simulación, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando con el modelo Banda 0, apuntalante JL-P	160
Figura N° 5.14: °API en función del tiempo variando la temperatura asignada a la fuente de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, para Calentamiento en Banda 0, apuntalante JL-P. La línea discontinua representa °API>22	161
Figura N° 5.15: °API en función del tiempo variando el material apuntalante para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 0 calentando a 400 kW y 2450 MHz. La línea discontinua representa °API>22	162
Figura N° 5.16: Acumulado de crudo mejorado (°API > 22) en función del tiempo al calentar con 400 kW y 2450 MHz, variando el material apuntalante para el calentamiento en Banda 0 bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento	163
Figura N° 5.17: Temperatura de la ceda (2,5,5) en el día 15 de simulación, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 10, apuntalante Fe ₂ O ₃	165
Figura N° 5.18: °API en función del tiempo variando la temperatura asignada a la fuente de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 10, apuntalante Fe ₂ O ₃ . La línea discontinua representa °API>22	166
Figura N° 5.19: Temperatura de la ceda (2,5,5) en el día 15 de simulación, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando con el modelo Banda 10, apuntalante ALFE	166
Figura N° 5.20: °API en función del tiempo variando la temperatura asignada a la fuente de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentamiento en Banda 10, apuntalante ALFE. La línea discontinua representa °API>22	167
Figura N° 5.21: Temperatura de la ceda (2,5,5) en el día 15 de simulación, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 10, apuntalante JL-P	168

Figura N° 5.22: °API en función del tiempo variando la temperatura de la fuente de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentamiento en Banda 10, apuntalante JL-P. La línea discontinua representa °API>22	169
Figura N° 5.23: °API en función del tiempo variando el material apuntalante para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentamiento en Banda 10 a 500 kW y 2450 MHz. La línea discontinua representa °API>22	170
Figura N° 5.24: Acumulado de crudo mejorado (°API > 22) en función del tiempo al calentar con 500 kW y 2450 MHz, variando el material apuntalante para el calentamiento en Banda 10 bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento	171
Figura N° 5.25: °API de crudo acumulado en tanque en función del tiempo para los esquemas y modelos de calentamiento acoplados al modelo de mejoramiento, apuntalante Fe ₂ O ₃ , calentando a 500 kW y 2450 MHz. Temperatura máxima de la fuente en 650 °F. La línea discontinua representa °API>22	172
Figura N° 5.26: °API de crudo acumulado en tanque en función del tiempo para los esquemas y modelos de calentamiento acoplados al modelo de mejoramiento, apuntalante ALFE, calentando a 400 kW y 2450 MHz. Temperatura máxima de la fuente = 650 °F. La línea discontinua representa °API>22	173
Figura N° 5.27: Acumulado de crudo mejorado (°API > 22) en función del tiempo para los esquemas estudiados, calentar a 400 kW, 2450 MHz y con una temperatura máxima de 650 °F	174
Figura N° 5.28: Perfil de Temperatura ($T \geq 500$ °F) en función del tiempo (5,10 y 20 días de inyección) para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con el modelo Banda 0	176
Figura N° 5.29: Perfil de Saturación de donante de hidrógeno ($S_d \geq 40\%$) en función del tiempo (5,10 y 20 días de inyección) para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con el modelo Banda 0	176
Figura N° 5.30: Perfil de Saturación de crudo ($S_o \geq 40\%$) en función del tiempo (5,10 y 20 días de inyección) para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con el modelo Banda 0	177

Figura N° 5.31: Perfil de Temperatura ($T \geq 500$ °F) en función del tiempo (5,10 y 20 días de inyección) para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con el modelo Banda 10	177
Figura N° 5.32: Perfil de Saturación de donante de hidrógeno ($S_d \geq 40\%$) en función del tiempo (5,10 y 20 días de inyección) para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con el modelo Banda 10	177
Figura N° 5.33: Perfil de Saturación de crudo ($S_o \geq 40\%$) en función del tiempo (5,10 y 20 días de inyección) para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con el modelo Banda 10	178

NOMENCLATURA

$^{\circ}\text{API}$	Gravedad API
D_p	Profundidad de penetración de la onda electromagnética, m.
e	Vector unitario del campo eléctrico
E_o	Campo eléctrico, V/m.
f	Frecuencia de radiación, MHz.
h	Vector unitario campo magnético
H_o	Campo magnético, Ampere/m
H_{vr}	Entalpía de vaporización, BTU/lbmol $\cdot^{\circ}\text{F}$
HEART	Tasa de calor constante, BTU/d (comando del STARS [®])
MW	Microondas.
P	Potencia, kW
P_x	Potencia absorbida en una distancia x, kW
P_i	Presión inicial del yacimiento, lpc.
P_w	Presión de fondo fluyente, lpc.
r	Radio, m ó pies.
RGP	Relación gas petróleo, PCN/BN.
RF	Radiofrecuencia.
s	Saturación
T	Temperatura, K
t	Tiempo, días.
TMPSET	Temperatura de referencia, $^{\circ}\text{F}$ (comando del STARS [®]).
UHTR	Coefficiente de transferencia de calor proporcional, BTU/d $\cdot^{\circ}\text{F}$ (comando del STARS [®]).
x	distancia

Letras griegas

α	Coefficiente de atenuación o coeficiente de penetración, m^{-1} .
δ	Factor de disipación.
ϵ_0	Permitividad eléctrica en el vacío, $8,86 \times 10^{-12}$ F/m.
ϵ'	Habilidad de las moléculas a ser polarizadas por el campo eléctrico, representa la capacidad de respuesta del medio material para almacenar energía electromagnética.
ϵ''	Capacidad para disipar energía interna en procesos de generación de calor.
λ	Longitud de ondas para la radiación en el seno del medio material, m.
μ	Viscosidad cinemática, cm^2/s
ω	Frecuencia, MHz.

Subíndices

o	Crudo
d	Donante de hidrógeno
0	Inicial

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, las reservas de crudo son en su mayoría crudos pesados y extrapesados (CP/XP), encontrándose mayormente en el continente americano, específicamente en Canadá (45,6%) y en la Faja del Orinoco (FO) (49,6%)^[21].

En Venezuela, las reservas de crudos pesados y extrapesados que constituyen el 70,3%, y cuyos yacimientos se encuentran ubicados en su mayoría en la FO y una parte en el occidente del país. El resto de los yacimientos venezolanos se encuentran constituidos por crudos livianos y medianos (CL/M) que presentan baja productividad o que están sometidos a condiciones de altas presiones y altas temperaturas, y presentan una alta complejidad estructural. De esto se desprende la importancia de estudiar y desarrollar tecnologías que permitan optimizar la explotación de los CP/XP, así como su revalorización para obtener crudos mejorados como una alternativa a los CL/M^[21].

Los CP/XP tienen gravedades API menores a 20° y altas viscosidades, lo cual genera un alto costo de inversión inicial para su extracción y para el acondicionamiento de corrientes de producción. También presentan altos niveles de azufre, metales (V y Ni) y nitrógeno lo cual dificulta su comercialización y hace que los indicadores económicos de estos crudos sean marginales.

Algunas técnicas ampliamente empleadas y estudiadas para la recuperación mejorada de crudos muy viscosos son la inyección de vapor o de agua caliente, la inyección de fluidos miscibles y la combustión en sitio. Estas técnicas se basan en la introducción de calor al yacimiento con el objetivo de reducir la viscosidad del crudo allí presente, así como la reducción de las fuerzas capilares. Además, la inversión inicial para la aplicación de las mismas es relativamente baja, lo cual hace que sean procesos económicamente atractivos. Sin embargo, estas técnicas presentan inconvenientes cuando: la inyektividad del yacimiento es pobre, existe la presencia de acuíferos, las arenas son muy delgadas, los yacimientos son muy profundos y presentan altas presiones, ó cuando se encuentran en áreas pobladas o de difícil

acceso. Otros problemas presentados son la baja eficiencia en el barrido de crudo, la canalización del fluido inyectado y las emisiones de gases contaminantes, como H_2S , resultado de la inyección^[2].

Recientemente en la industria petrolera se estudia la factibilidad del uso de la radiación electromagnética como una fuente alternativa de calentamiento para los procesos de recuperación mejorada y de mejoramiento de los crudos pesados y extra pesados. Esta técnica no ha sido muy estudiada ya que la literatura en el área muestra que su aplicación como fuente de energía en procesos de recuperación mejorada ha tenido un alcance limitado, centrándose en la exploración de efectos como la reducción de la viscosidad producto del aumento de la temperatura^[5-6,8].

El calentamiento electromagnético presenta numerosas ventajas sobre las técnicas convencionales de inyección de fluidos calientes al yacimiento, como por ejemplo el hecho de que no se produce una invasión de fluidos al yacimiento, es una tecnología limpia que no genera desechos, no presenta limitaciones en cuanto a la presión y/o profundidad del yacimiento y se pueden manejar parámetros de diseño de manera versátil. De esto último es importante destacar que las fuentes electromagnéticas de relativa alta frecuencia tienen la particularidad de que pueden ser direccionadas y focalizadas, lo cual permite su aplicación en aquellas zonas de mayor interés en el yacimiento. Algunas desventajas que presenta el calentamiento electromagnético radican en que es una tecnología en desarrollo, es necesaria una alta inversión inicial de los equipos, su aplicación no es apropiada para yacimientos con acuíferos y, en algunos casos, la absorción de la energía en el medio generalmente es pobre, lo cual es discutido en la sección II.1.1.^[1]

El calentamiento electromagnético se basa en la transformación de energía eléctrica en energía térmica, a causa del movimiento de las moléculas sin que se produzcan cambios en su estructura. La radiación electromagnética genera un campo eléctrico que induce el movimiento de las moléculas a través de dos vías: por la rotación de las moléculas polares cuyos dipolos se alinean con el campo eléctrico producido por la radiación, y por la migración de los iones cargados eléctricamente que son atraídos o repelidos por dicho campo eléctrico^[14]. Por lo tanto, la aplicación

de ésta tecnología depende de la presencia de fluidos polares en el yacimiento, lo cual es discutido en la sección II.3.1.

La baja capacidad de absorción electromagnética de los crudos y las arenas que los contienen es un hecho conocido y reportado en la literatura. Los crudos son fluidos poco polares, con baja respuesta al calentamiento electromagnético, y las arenas están constituidas por altas fracciones de silicio y cuarzo, los cuales no absorben eficientemente la energía electromagnética. Lo anterior se presenta como un problema, ya que la transferencia de calor no será eficiente en estos materiales.

El presente trabajo busca modelar el calentamiento dieléctrico a fondo de pozo en yacimientos de crudos CP/XP. Para aumentar la efectividad del calentamiento se han introducido en el yacimiento materiales que son buenos absorbentes de las microondas y radiofrecuencia, a través de la técnica del fracturamiento hidráulico. Se realizaron simulaciones conceptuales de un pozo vertical con los datos de dos yacimientos típicos venezolanos de CP/XP, fracturados hidráulicamente y sometidos a calentamiento dieléctrico con el fin de estudiar el efecto de ambas técnicas en conjunto y su potencial en la recuperación mejorada de petróleo. Esta parte del estudio se centró en evaluar diferentes geometrías de fractura y diferentes esquemas de calentamiento dieléctrico, esto último derivado de la propiedad de la energía para direccionarse y focalizarse.

Luego se acopló la tecnología del calentamiento dieléctrico en conjunto con la fractura a un modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo con donantes de hidrógeno^[6,30-31]. Se realizaron simulaciones conceptuales de un pozo vertical con los datos de un yacimiento de CP/XP, que ha sido fracturado hidráulicamente y sometido a calentamiento electromagnético, acoplado al modelo de mejoramiento. Esta parte se centró en determinar las mejores condiciones para llevar a cabo la reacción de mejoramiento a través de diferentes esquemas de calentamiento dieléctrico.

Las simulaciones numéricas conceptuales se llevaron a cabo en el simulador comercial STARS[®], desarrollado por la empresa CMG^[27-28], en donde se simuló el calentamiento electromagnético suponiendo que la antena se encuentra en el fondo del pozo y que sus emisiones pueden direccionarse. Los cálculos para asignar la

potencia absorbida por el yacimiento se basan en la Ley de Lambert, y su acoplamiento al simulador ha sido reportado en la literatura^[17-20]. Se evaluaron las temperaturas de pozo, su producción acumulada de crudo y la tasa de producción para determinar el esquema óptimo de potencia de calentamiento y frecuencia de radiación. En el estudio del mejoramiento de crudo se evaluó la °API de crudo en tanque luego del proceso de inyección de donante de hidrógeno tipo Huff & Puff que ha sido reportado en la literatura^[29-31]. Finalmente los resultados de ambos estudios se comparan con los resultados de las técnicas de fracturamiento y calentamiento dieléctrico aplicadas por separado, con la producción natural del pozo y con los resultados reportados por la literatura, para esquemas similares.

A continuación se enumeran los objetivos generales y específicos que se siguieron para la realización de este estudio.

I.1 OBJETIVOS GENERALES

- Estudiar diferentes modelos de pozos fracturados artificialmente, a los cuales se ha aplicado energía electromagnética como método de recuperación, utilizando para ello un modelo matemático, a fin de determinar de forma numérica cuál es el esquema óptimo para un pozo de producción.
- Integrar el modelo mas apropiado a un esquema de mejoramiento de crudo con donantes de hidrógeno a fin de calcular el impacto de dichos procesos en la producción de crudo mejorado.

I.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el efecto de la geometría de fractura sobre la aplicación de calentamiento dieléctrico utilizando un modelo matemático.
- Estudiar el efecto de los parámetros característicos de una fractura, en términos de su longitud, altura y geometría, sobre el proceso de calentamiento dieléctrico, utilizando para ello el simulador comercial STARS[®].
- Estudiar el efecto geométrico y el comportamiento de una fractura o forzamiento cuando la misma es sometida a calentamiento dieléctrico.

- Estudiar el efecto de los materiales apuntalantes utilizados para sostener la fractura cuando utiliza el calentamiento electromagnético. Determinar cuales producen una mejor absorción del calor, utilizando para ello sus constantes de atenuación (α).
- Proponer y evaluar diferentes esquemas de calentamiento dieléctrico en el modelo yacimiento-fractura.
- Acoplar un modelo de mejoramiento de crudos pesados con donantes de hidrógeno a los casos más promisorios obtenidos en los estudios anteriores, utilizando para ello el simulador comercial STARS[®].

CAPITULO II

MARCO TEORICO

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos necesarios para comprender el funcionamiento de los procesos más usados en la industria petrolera para la recuperación mejorada y el mejoramiento del petróleo. Estos procesos se clasifican de acuerdo a la tecnología aplicada y a la importancia de los mismos. Por último, se presenta una revisión de la técnica de calentamiento electromagnético, presentando los fundamentos teóricos y las ecuaciones que gobiernan el proceso.

II.1. MÉTODOS DE RECUPERACIÓN DE CRUDOS.

Normalmente en la vida de un yacimiento se suceden distintas etapas de explotación. Inicialmente, el yacimiento se explota utilizando la energía natural del mismo, etapa que se conoce como recuperación primaria. Con el tiempo, y debido a la necesidad de mantener la presión en el yacimiento, se introducen métodos de inyección de algún fluido, generalmente agua o gas. Finalmente, para aumentar los factores de recobro surgen los métodos de recuperación mejorada de crudo que incluyen a su vez los métodos térmicos, químicos, procesos de desplazamiento miscible y últimamente los microorganismos^[1]. Sin embargo, en los últimos años, la gerencia de yacimientos tiende a incrementar la recuperación del crudo con la mayor rentabilidad posible, sin importar la clase de proceso que se utilice para ello. Esta nueva visión permite introducir procesos de recuperación mejorada desde las primeras etapas de explotación de un yacimiento.

Los métodos de recuperación de crudo se dividen en dos grandes grupos: La recuperación convencional y la recuperación no convencional^[2].

En el grupo de *Recuperación Convencional* se incluyen los procesos de inyección de agua o gas hidrocarburo miscible, inmisible o cercanos a la miscibilidad. Estos, sumados a la energía natural del yacimiento, tienen como finalidad mantener la presión en el mismo. El 95 % de la producción mundial de crudo proviene de la recuperación convencional, con un recobro promedio de 35 %^[2].

Entre los métodos de *Recuperación no Convencional* se pueden incluir los siguientes^[2]:

- Métodos químicos: Estos incluyen la inyección de polímeros, surfactantes, espumas, geles y emulsiones.
- Métodos inyección de gases: Estos incluyen la inyección de CO₂, N₂, gases de combustión.
- Métodos Térmicos: Estos incluyen la inyección de vapor (continua y cíclica), inyección de agua caliente, combustión en sitio, calentamiento del pozo, calentamiento electromagnético.
- Otros: Inyección de microorganismos, vibrosísmica.

En la Figura N° 2.1 se presenta un esquema de la clasificación de los métodos de recuperación de petróleo.

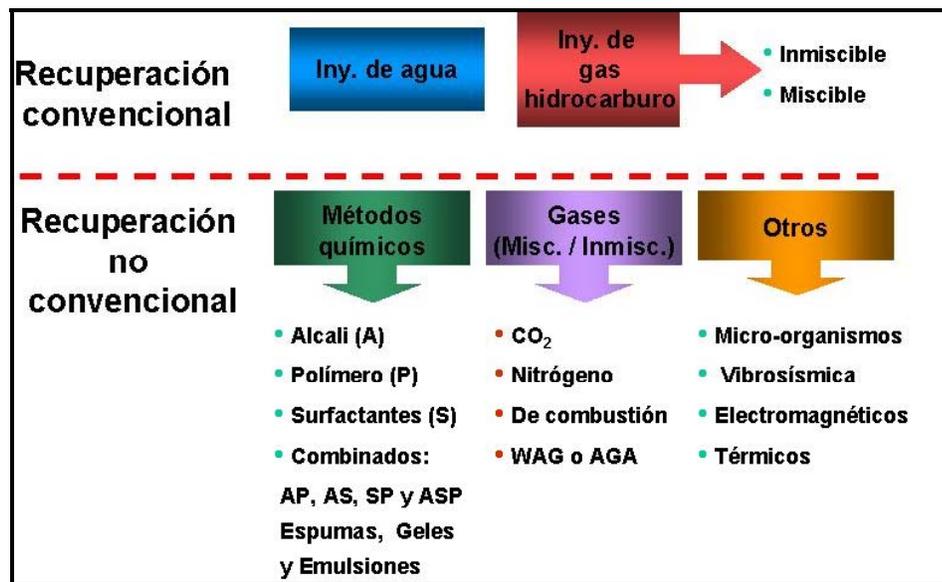


Figura N° 2.1: Clasificación de los Métodos de Recuperación de Petróleo.

Para el propósito de este estudio, es de sumo interés conocer acerca de los procesos térmicos de recuperación no convencional, específicamente aquellos que

utilizan la energía eléctrica como fuente de calentamiento. Seguidamente se presenta una breve descripción de éstos procesos.

II.1.1 El Calentamiento Eléctrico en la Recuperación Mejorada de Petróleo.

La disipación de energía eléctrica en un yacimiento produce el calentamiento del mismo, a consecuencia del aumento de su temperatura. La energía eléctrica puede disiparse a través de una *resistencia* o mediante el mecanismo de *absorción*^[1].

El calentamiento por *resistencia* ocurre cuando la corriente eléctrica pasa a través de un elemento de resistencia sometido a un gradiente de voltaje, el cual es gobernado por leyes análogas a aquellas que gobiernan el desplazamiento de fluidos a través de un medio poroso. Debido a esta analogía es posible utilizar los métodos presentados en otras técnicas de calentamiento convencionales para obtener resultados aplicables al flujo de corrientes directas^[1].

Debido al efecto de calentamiento cercano al pozo y a la ausencia de la aplicación de una fuerza impulsora externa para producir los fluidos, excepto posiblemente por la electroósmosis, se considera que el calentamiento eléctrico sería un tratamiento de estimulación. Naturalmente que los fluidos que fluyen hacia el pozo transportan calor, de manera que la zona efectivamente calentada cerca del pozo es algo mas pequeña que lo que pudiera estimarse solamente basándose en la potencia disipada^[1].

Para desarrollar los modelos de calentamiento resistivo, es necesario tener en cuenta que^[1]:

- La conductividad eléctrica de las lutitas y arenas con algún contenido de agua es apreciablemente mas alta que las de aquellas rocas altamente saturadas de petróleo
- Las corrientes eléctricas no tienen geometría radial,
- Las resistividades eléctricas de las formaciones son afectadas por las temperaturas y las saturaciones de los fluidos.

La potencia electromagnética de alta frecuencia se disipa por *absorción*, en donde la energía irradiada desde una superficie de referencia a través de una superficie plana, depende de la potencia irradiada, de las propiedades dieléctricas de la roca saturada de fluido y de la frecuencia de radiación. Las propiedades dieléctricas de una formación saturada de fluido dependen del tipo y de la cantidad de fluidos presentes y de la frecuencia de radiación^[1].

El calentamiento mediante la disipación de energía eléctrica directamente en el yacimiento tiene algunas ventajas^[1]:

- El calor se genera instantáneamente a través de los elementos del yacimiento. No hay esperar para que la energía sea propagada por fluidos calientes ó conducida a través del yacimiento, a pesar de que podría tomar algún tiempo para que la temperatura del yacimiento aumente significativamente a distancia media entre pozos.
- La generación de calor, que no depende de la inyección de fluidos, es esencialmente independiente de la permeabilidad del yacimiento y de las limitaciones de la presión de inyección.
- Se pueden alcanzar las altas temperaturas necesarias para los requerimientos de mejoramiento de CP/XP.
- Es aplicable a pozos someros y/o cercanos a zonas sensibles a la aplicación de otros métodos de recuperación (diques, zonas densamente pobladas, etc.).
- El ser fácilmente direccionable permite su aplicación en zonas productoras delgadas.

En consecuencia, este método pudiera ser ventajoso en los casos que debido a la baja inyectividad del yacimiento, los tiempos de calentamiento por inyección de fluidos son demasiado largos, traduciéndose en grandes pérdidas de calor y reducción del calor remanente en el yacimiento al final del período de inyección^[1].

Entre las desventajas de los métodos de calentamiento eléctrico se encuentran^[1]:

- La energía eléctrica es relativamente costosa comparada con las fuentes de calentamiento convencionales utilizadas en proyectos térmicos; por lo tanto, estos

métodos son económicamente atractivos solamente cuando el incremento en eficiencia térmica (energía) es lo suficientemente grande como para compensar el alto costo de la energía eléctrica.

- La vida activa del equipo disponible y utilizado en el fondo del pozo es inadecuado para operaciones libres de fallas, requiere ser estudiado y optimizado.

II.1.2 Antecedentes del uso de Calentamiento electromagnético en Recuperación Mejorada de petróleo

En la literatura se ha reportado que la aplicación del calentamiento electromagnético depende de la presencia de agua para calentar indirectamente el crudo^[4]. Sin embargo, estudios realizados por Ovalles y col.^[5] han demostrado que los crudos pesados, aunque contienen una gran cantidad de compuestos no polares, poseen en su composición moléculas que son capaces de absorber la radiación electromagnética y transformarla en calor. Este hecho representa una gran ventaja, ya que la utilización de la técnica de calentamiento dieléctrico no depende exclusivamente de la presencia de compuestos polares para transmitir el calor en el yacimiento^[5].

Ovalles y col.^[5,29] en el 2001, evalúan la prefactibilidad del uso de la energía electromagnética (RF/MW) como técnica de calentamiento en yacimientos de CP/XP. Entre los resultados obtenidos se confirma que el calentamiento electromagnético es una técnica efectiva en yacimientos de CP/XP, incluso con respecto a la técnica de Inyección de vapor^[5].

Basado en los resultados de Ovalles y col.^[5,29], Fonseca^[6] en el año 2002, evalúa la aplicación del calentamiento a fondo de pozo con radiación electromagnética (RF y MW) en modelos de crudos medianos y pesados, y su aplicabilidad para Recuperación Mejorada. Para un yacimiento somero de crudo pesado se obtiene un incremento en la producción de hasta un 95% para el calentamiento con radiación electromagnética y al comparar con la técnica de inyección alternada de vapor, se encuentra que el aumento en la producción de crudo obtenido con el calentamiento electromagnético, debido a la energía suministrada por

ésta última técnica, es 2,4 veces superior a la energía entregada por la inyección alternada de vapor.

En el año 2002, Ramírez^[8] estudió la presencia de una fractura hidráulica en el yacimiento, tomando como base los resultados de Ovalles y col.^[5,7,32] y Fonseca^[6]. La fractura se utiliza para mejorar la distribución de calor mediante la introducción de un material apuntalante que mejore la absorción de calor en el medio. En sus resultados se obtiene hasta un 15% de recobro adicional en función del caso de producción sin calentamiento, al considerar profundidades de penetración entre 60 y 140 m, para cualquier potencia aplicada.

Entre sus recomendaciones, Ramírez^[8] indica la necesidad de estudios que permitan definir el impacto de la geometría y longitud de la fractura en el yacimiento calentado por radiación electromagnética, así como el establecimiento de reglas de mezclado entre los materiales con diferentes propiedades de absorción electromagnética.

II.2. MEJORAMIENTO DE CRUDOS CP/XP.

Cualquier proceso que produzca un cambio en las características químicas del crudo, e incremente su valor comercial, se considera un proceso de mejoramiento. El mejoramiento de crudos pesados en subsuelo se presenta como una alternativa con alto potencial debido a que, con una inversión relativamente baja, se obtendría un crudo de mayor calidad en comparación con lo obtenido comúnmente por la inyección de vapor^[9]. La aplicación de un proceso de mejoramiento conlleva a un incremento en la gravedad API y una reducción en la viscosidad del crudo, así como un mayor contenido de destilados y una reducción en el contenido de compuestos sulfurados, metales y fracciones pesadas del crudo (asfaltenos). De la misma manera, conduciría a agregar valor a las reservas de crudos pesados, y a generar ganancias adicionales, tanto para las áreas de producción de petróleo como para las de refinación. Todas estas razones permiten asegurar que un proceso para la conversión en subsuelo de crudos pesados, extrapesados y bitúmenes tiene un gran atractivo económico y grandes posibilidades de éxito comercial^[10].

En la literatura se reportan diferentes vías para el mejoramiento de CP/XP en subsuelo. En la Figura N° 2.2 se presenta un esquema de dichas tecnologías.

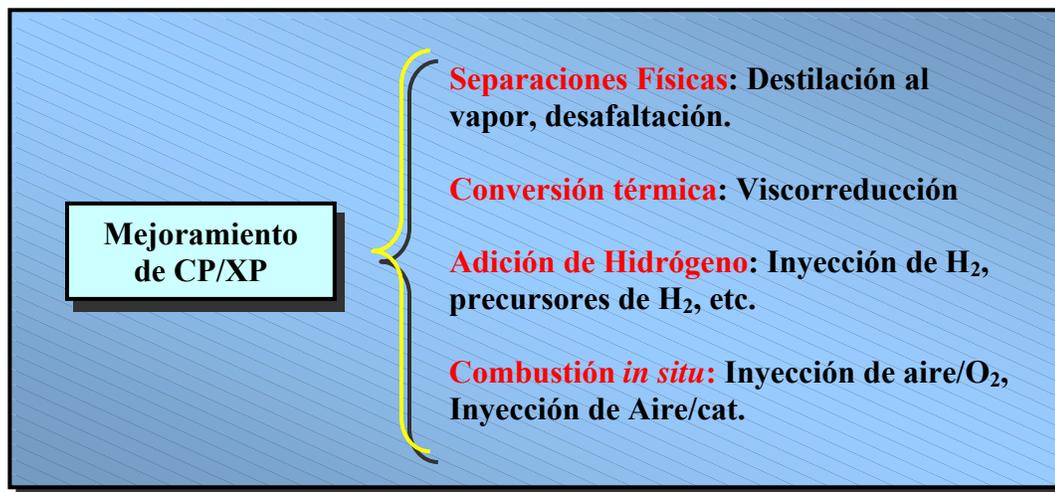


Figura N° 2.2: Clasificación de los métodos de mejoramiento de CP/XP en subsuelo.

Para el propósito de este estudio es de sumo interés conocer acerca de los procesos de Adición de Hidrógeno, por lo cual se presenta una breve descripción de los mismos.

II.2.1. Mejoramiento de CP/XP por Adición de hidrógeno. Antecedentes.

Con la presencia de hidrógeno se puede mejorar químicamente el crudo bajo condiciones de yacimiento, ya que se utilizan los compuestos metálicos disueltos en el crudo o sobre la superficie de la roca como catalizadores de las reacciones de hidrogenación.

Una forma de lograr el mejoramiento con hidrógeno consiste en adicionar un precursor de hidrógeno en fase líquida dentro del flujo de vapor inyectado. Como resultado de dicho proceso se obtiene un crudo mejorado que presenta como características principales: disminución en el contenido de asfaltenos, reducción de la viscosidad, incremento en el contenido de destilados, etc.^[10].

Entre los trabajos publicados en la literatura resaltan los estudios de Ovalles y col.^[30-31] quienes, en el año 2001, desarrollaron un proceso de transformación de crudo a nivel de yacimiento, en el cual el donante de hidrógeno y el vapor de agua se inyectan conjuntamente. La producción de crudo comienza luego de un período de remojo que varía entre 1 y 20 días. La reacción con el crudo se produce en presencia de la formación mineral (catalizador) y de gas natural (metano), a temperaturas del orden de 260-315 °C y presiones del orden de 1600 lpc. Los resultados a nivel de laboratorio muestran una reducción en la viscosidad del crudo de 6200 a 300 cP, un aumento en la gravedad API desde 9° hasta 12° API y una disminución en el contenido de asfaltenos desde 23,5 a 21,8%^[31].

En el año 2001, Ovalles y col.^[11,30] modelaron el proceso de mejoramiento de CP/XP utilizando tetralina como donante de hidrógeno en un yacimiento. Entre los resultados más interesantes se encuentra el relativamente bajo porcentaje de conversión de tetralina (<5%) atribuido a problemas de mezclado durante la coinyección de vapor y donante. A pesar de ello, obtuvieron un crudo mejorado (11 °API promedio en tanque) durante aproximadamente 40 días de producción continua. En este mismo trabajo, los autores recomiendan, en base a los resultados obtenidos, evaluar otras formas diferentes de calentamiento (microondas, eléctrico, etc.) para evitar el uso de vapor y lograr la reacción de mejoramiento entre el donante y el crudo a condiciones de yacimiento^[11].

En el año 2002, Salazar^[9] estudió el uso del calentamiento electromagnético para el proceso de mejoramiento in situ de crudo pesado con tetralina como donante de hidrógeno^[9], tomando como base los estudios realizados por Ovalles y col.^[11, 30-31]. En dicho trabajo se demuestra, desde el punto de vista teórico, la factibilidad técnica del uso de calentamiento electromagnético en mejoramiento de CP/XP. Con ésta técnica se alcanzan mayores temperaturas y gravedades API durante más tiempo de producción, lo que se traduce en una mayor cantidad de crudo mejorado que con la técnica de inyección alternada de vapor.

II.3. CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO.

El calentamiento electromagnético se basa en la transformación de energía radiante en energía interna. La distribución de energía depende de las características dieléctricas de la muestra y de la frecuencia usada^[1].

Las ondas electromagnéticas poseen dos componentes: un campo eléctrico y otro magnético cuyos vectores de amplitud se encuentran dispuestos perpendicularmente^[12] tal y como se ilustra en la Figura 2.3.

El campo eléctrico $E(r,t)$ es perpendicular al campo magnético $H(r,t)$ cuando ambos se orientan sobre la dirección de propagación que señala el vector unitario u . Las amplitudes de onda de estos campos son E_0 y H_0 , cuando las oscilaciones se mueven en las direcciones de los vectores unitarios e y h respectivamente. El factor “ λ ” representa la longitud de onda^[12].

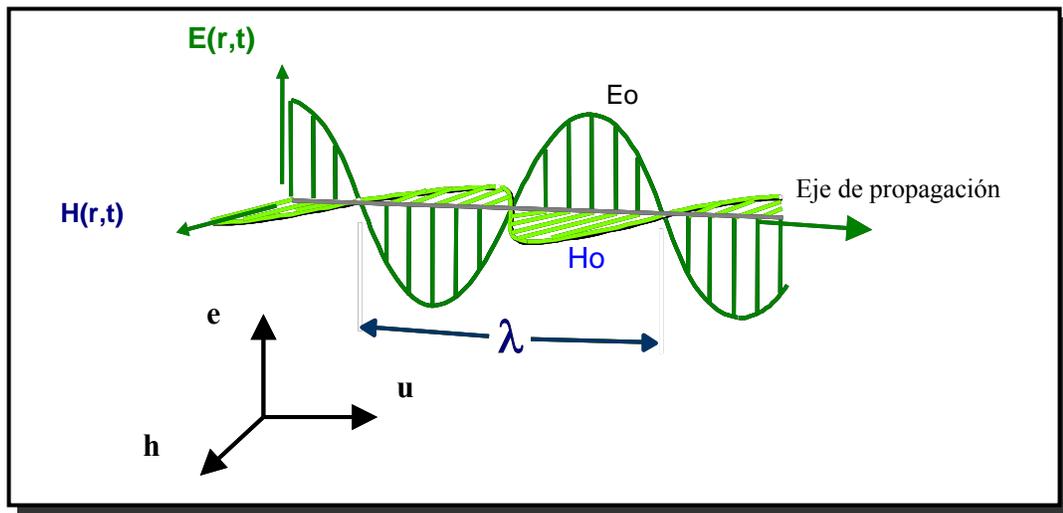


Figura N° 2.3: Disposición espacial para los campos eléctricos y magnéticos que conforman una onda electromagnética.

En la Figura 2.4 se presenta el espectro electromagnético. Se observa que en las regiones comprendidas por radiofrecuencia y microondas se pueden alcanzar longitudes de penetración por encima de los 15 metros. En la medida en que se incrementa la frecuencia, la vibración molecular también aumenta. Por consiguiente

la transformación de energía electromagnética en energía térmica es mayor, ya que la fricción intermolecular es más alta^[13].

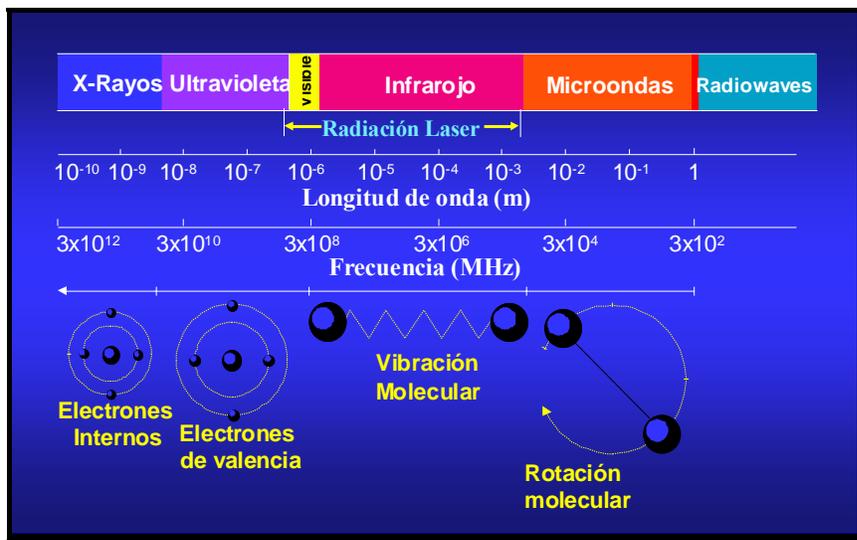


Figura N° 2.4: Regiones del espectro electromagnético.

Las microondas comprenden las longitudes de onda entre 1 cm y 1 metro, las cuales corresponden a frecuencias entre 300 MHz y 30 GHz. En esta región, las longitudes de onda entre 1 y 25 cm se emplean para aplicaciones en radar, el resto se utiliza en telecomunicaciones. Los procesos de calentamiento a consecuencia de la absorción de esta radiación por parte de la materia, son conocidos como calentamiento inducido por microondas^[12]. La radiación electromagnética causa movimiento en las moléculas por migración de iones y/o rotación de dipolos, pero que no causa cambios en la estructura de la molécula.

De acuerdo a tratados internacionales, las frecuencias aprobadas a nivel mundial para el calentamiento dieléctrico de materiales comprenden 915 ± 25 , 2.450 ± 13 , 5.800 ± 75 y 22.125 ± 125 MHz^[14]. De todas estas, la frecuencia de 2450 MHz se emplea en los hornos de microondas caseros, por lo que es la más conocida y utilizada^[14].

II.3.1 Origen del calentamiento electromagnético.

El calentamiento electromagnético se basa esencialmente en la fuerza ejercida por un campo eléctrico sobre las partículas dipolares y/o sobre los iones cargados. La transferencia de energía durante el calentamiento con microondas ocurre principalmente por radiación y luego por conducción, debido a la interacción directa entre las moléculas y el campo eléctrico presente. Para que el calentamiento sea elevado es necesario que las moléculas posean un momento dipolar alto. Los compuestos con alta constante dieléctrica (Ej.: agua, etanol, acetonitrilo, etc.) tienden a calentarse fácilmente bajo radiación de microondas^[14].

Por su parte, las sustancias menos polares (Ej.: hidrocarburos aromáticos y alifáticos, etc.) o sin momento dipolar neto. (Ej: dióxido de carbono, dioxano, tetracloruro de carbono, etc.) y materiales altamente cristalino (NaCl, etc) son pobres absorbentes de radiación^[14].

El calor dieléctrico radica en la capacidad de un campo eléctrico de polarizar las cargas de un material, y en la capacidad de ésta polarización para seguir los cambios de dirección de dicho campo.

Los compuestos polares tratan de alinearse con el campo electromagnético través de movimientos rotacionales. La Figura 2.5 representa a una molécula de agua bajo la radiación de electromagnética. Inicialmente ($t = 0$ ns), el momento dipolar de la molécula se encuentra alineado con el campo eléctrico. A medida que transcurre el tiempo, el dipolo rota en un intento por seguir el campo ($t = 0,1$ ns). Como la velocidad del campo eléctrico es mayor que la del dipolo, éste último vuelve a girar, ahora en sentido contrario, tratando nuevamente de alinearse al campo ($t = 0,2$ ns). Esta rotación y movimiento lateral rápido de cada molécula es lo que se traduce en calor, de una manera similar a la fricción. Este calor producido se denomina calor dieléctrico^[14].

Otro mecanismo de calentamiento es la conducción iónica, en el cual los iones cargados interactúan con el campo eléctrico de las microondas. La Figura 2.6 muestra el efecto de la radiación en un ión cloruro (Cl^-) cuya carga negativa migra hacia el campo eléctrico cuando este es positivo y viceversa.

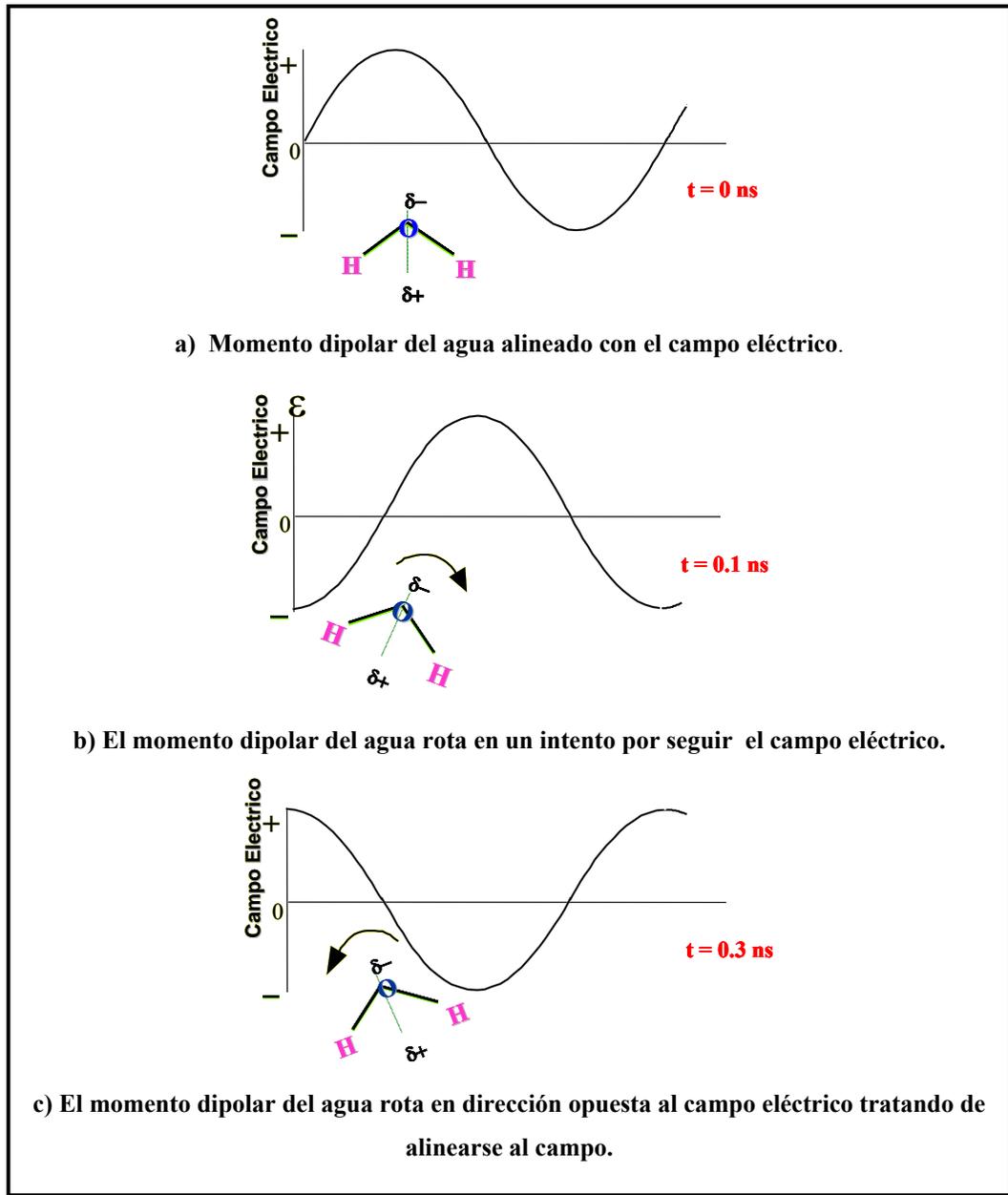


Figura N° 2.5: Interacción entre el campo eléctrico y las moléculas dipolares.

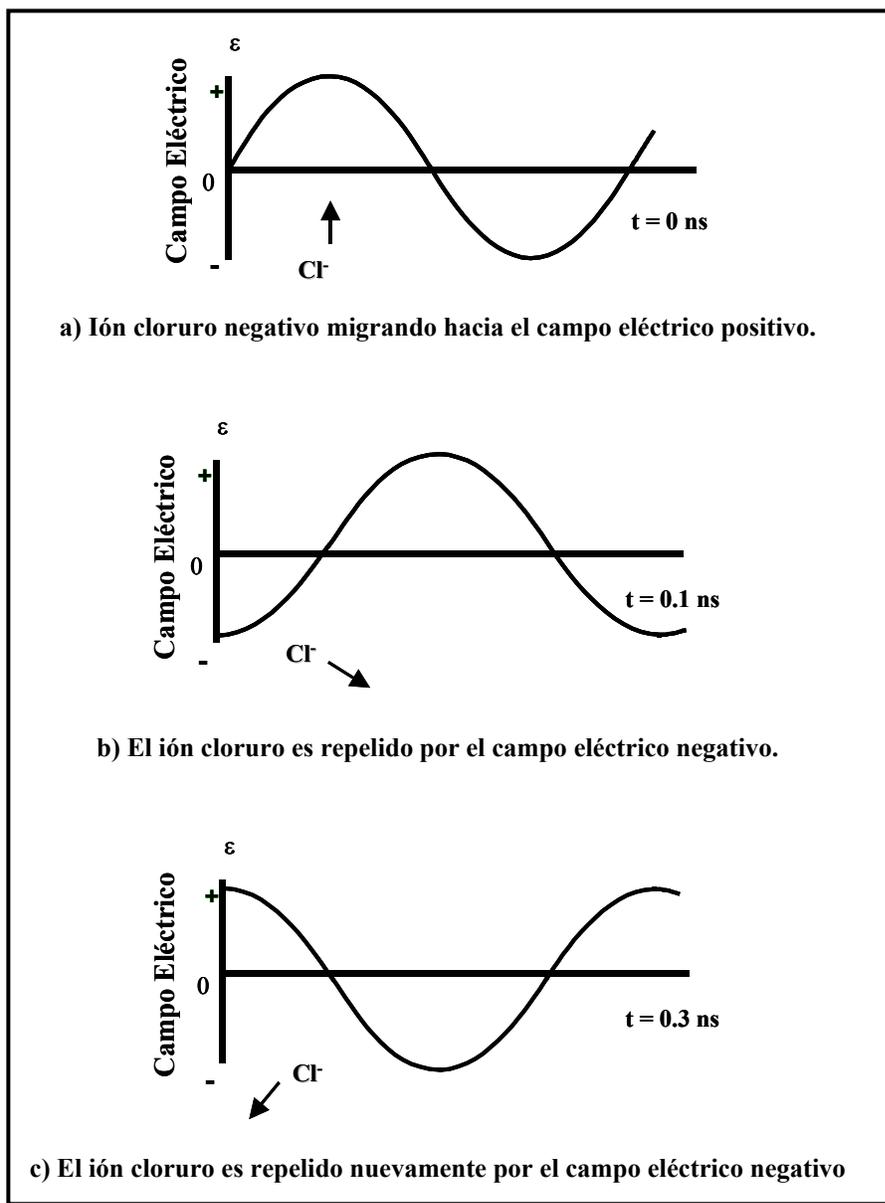


Figura N° 2.6: Interacción por conducción Iónica.

La migración iónica depende del tamaño, carga y conductividad de los iones disueltos y esta sujeta a los efectos de la interacción del ión con las moléculas del solvente. Tanto la conducción como la polarización dieléctrica son fuentes de calentamiento electromagnético ^[14].

II.3.2 Constante dieléctrica.

Una característica importante de la radiación electromagnética es que puede ser reflejada, transmitida o absorbida dependiendo del tipo de material, tal y como se muestra en la Figura 2.7 ^[15].

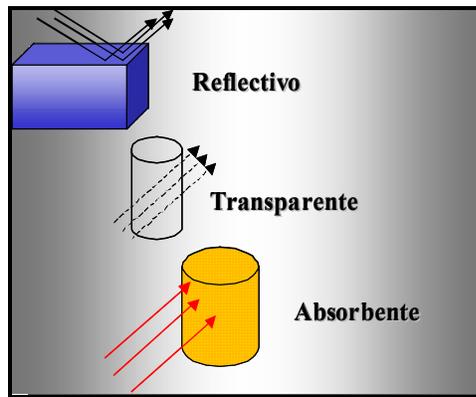


Figura N° 2.7: Comportamiento de la materia frente a la radiación.

El comportamiento de la materia frente a la radiación se debe a un parámetro que describe las propiedades dieléctricas de los materiales y en consecuencia su capacidad de calentarse por absorción de microondas. Este parámetro es la constante dieléctrica o permitividad (ϵ), la cual se define mediante la siguiente ecuación ^[15]:

$$\epsilon = \epsilon_0 (\epsilon' + j\epsilon'') \quad (2.1)$$

donde: ϵ_0 es la conductividad en el vacío ($8,86 \times 10^{-12}$ F/m).

ϵ' representa la capacidad de respuesta del material para almacenar energía electromagnética. Corresponde a la parte real de la ecuación.

ϵ'' representa la capacidad para disipar esta energía en procesos de generación de calor. Corresponde a la parte imaginaria de la ecuación y suele llamarse también factor dieléctrico de pérdidas .

En general, la relación ϵ''/ϵ' describe la habilidad del material en convertir energía electromagnética en energía calórica a una frecuencia y temperatura dada, y viene dada por la ecuación N° 2.2 ^[15]:

$$\tan(\delta) = \varepsilon''/\varepsilon' \quad (2.2)$$

donde: δ es el factor de disipación.

En la Tabla 2.1 se muestran algunos valores de $\tan(\delta)$ para algunos materiales y su capacidad de absorber microondas.

Tabla 2.1: Valores del Factor de Disipación Para Algunos Materiales y su Interacción con las Microondas.

Material	Tan δ	Interacción con microondas
Teflón	4×10^{-4}	Transparente
Alúmina	1×10^{-3}	Poco absorbente
V_2O_5	$4,4 \times 10^{-2}$	Absorbente
Agua destilada	$1,6 \times 10^{-1}$	Muy absorbente

II.3.3 Profundidad de penetración.

La profundidad de penetración (D_p) se define como la profundidad del material donde la potencia de la radiación decae aproximadamente a la mitad de su valor en la superficie, y es aproximadamente el inverso de la atenuación (α). Se puede calcular mediante la siguiente ecuación ^[16]:

$$\frac{1}{\alpha} \cong D_p = \left(\frac{2,998 * 10^2}{2\pi f} \right) \left(\frac{2}{\left[(1 + \tan^2 \delta)^{1/2} - 1 \right] \varepsilon''} \right)^{1/2} \quad (2.3)$$

donde: f es la frecuencia de radiación [MHz].

δ es el factor de disipación.

ε'' es el factor dieléctrico de pérdidas.

Esta ecuación muestra la dependencia inversamente proporcional de la profundidad de penetración con la frecuencia de radiación f .

II.3.4 Ecuaciones de Maxwell.

La radiación electromagnética es descrita y entendida desde el punto de vista teórico con el apoyo del formalismo de las ecuaciones de Maxwell ^[17-20].

$$\begin{aligned} \nabla_x E(r,t) &= \frac{\partial B(r,t)}{\partial t} & \nabla_x H(r,t) &= J(r,t) + \frac{\partial D(r,t)}{\partial t} \\ \nabla \cdot D(r,t) &= \rho & \nabla \cdot B(r,t) &= 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

Las ecuaciones de Maxwell consideran que las ondas electromagnéticas viajan en ambos sentidos del camino seguido por la radiación. Ello permite la inclusión de los efectos de reflexión que delimitan a un material determinado, así como los efectos de interferencia. Por ello, estas ecuaciones son sólo válidas cuando el medio material es, para efectos prácticos, finito en extensión. Esto se debe a que, en estos sistemas, es común el fenómeno de reflexión de las ondas si el material no es lo suficientemente absorbente^[18].

II.3.5 Ley de Lambert .

La absorción de energía electromagnética por la materia puede ser descrita por la Ley de Lambert, en la cual se ignoran todos los efectos derivados de la reflexión en las interfases^[19]. Esta expresión es la más adecuada para la descripción de medios absorbentes con mayor extensión espacial, llamados frecuentemente medios *semi-infinitos*.

La Ley de Lambert es comúnmente empleada para la determinación de la distribución de la potencia. Para una dimensión, en coordenadas radiales y cartesianas la Ley de Lambert viene dada por las ecuaciones N° 2.5 y 2.6 ^[20].

$$P(r) = P_0 e^{(-2\alpha(r-r_0))} \quad (2.5)$$

$$P(x) = P_0 e^{\left(\frac{-2x}{Dp}\right)} \quad (2.6)$$

donde: P(x) ó P(r) es la variación de la potencia con la distancia x ó r.

P_o es el flujo de potencia transmitida dentro del medio [kW].

x ó r es la distancia [m].

α es el coeficiente de atenuación [m^{-1}]

D_p es la profundidad de penetración [m]

Durante el calentamiento electromagnético la cantidad de potencia absorbida por la materia depende de manera no lineal de la magnitud del vector campo eléctrico $E(r,t)$ y de la frecuencia f ^[20].

II.4. FRACTURAMIENTO DE ESTRATOS

El flujo de fluidos hacia el pozo puede encontrarse obstruido por diversas causas, como una baja permeabilidad natural de un yacimiento o la invasión del filtrado a la formación, o ambas^[21]. En estos casos se desea realizar el fracturamiento de la formación para abrir canales que atraviesen la zona dañada y reestablezcan el flujo.

II.4.1 Proceso de Fracturamiento Hidráulico

En una fractura hidráulica el fluido inyectado a alta presión penetra en el estrato como una cuña, con lo cual se abren canales de flujo. Para esto es muy importante tomar en cuenta la viscosidad, peso y composición del fluido de inyección, así como también la presión de ruptura que debe aplicarse para fracturar el estrato. Como la inyección debe concentrarse en un intervalo determinado, es muy importante que la cementación entre el revestidor y el estrato (por encima y por debajo del intervalo deseado) sea sólida y fuerte para evitar canalización y/o fuga del fluido (hacia arriba y/o hacia abajo) a lo largo de la cementación, o que se fracturen intervalos no deseados^[21].

Otra modalidad de fracturamiento consiste en que agregar al fluido (en relación de volumen por volumen) un material sólido llamado *apuntalante*, que generalmente es una arena de determinadas especificaciones: tamaño de granos, geometría, distribución del agregado, resistencia, densidad y calidad. Al inyectarse la mezcla al estrato, el apuntalante va depositándose en los canales como una cuña

estable, porosa y permeable, que impedirá el asentamiento del estrato al desvanecerse la presión de ruptura y, por ende, mantendrá los canales de flujo abiertos ^[21]. En la Figura N° 2.8, se presenta la secuencia descrita del proceso de fracturamiento ^[22].

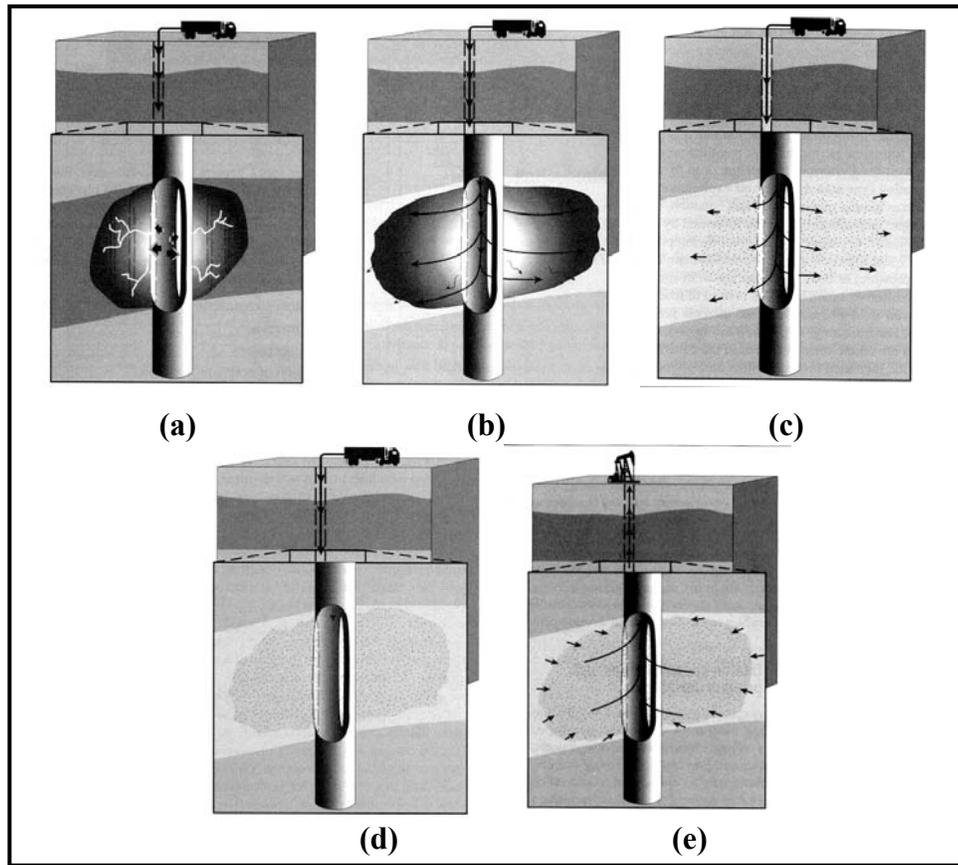


Figura N° 2.8: Proceso de Fracturamiento: a) Cañoneo de la zona de interés; b) Propagación del fluido de inyección; c) Inyección del Apuntalante; d) Desplazamiento y cierre del pozo; e) Producción.

La aplicación del fracturamiento hidráulico ha dado muy buenos resultados y, a medida que se ha acumulado experiencia de campo, la tecnología ha avanzado en lo concerniente al diseño y fabricación de equipos y herramientas requeridas, y en la selección, preparación y utilización de apuntalantes y fluidos de inyección para atender una gran variedad de necesidades ^[21].

II.4.2 Modelaje de una fractura

A mediados de los años 70, dos modelos básicos fueron los primeros en considerar balances volumétricos y mecánica de sólidos: el *PKN* y el *KGD*. Ambos son aplicables a fracturas totalmente confinadas, y difieren entre sí por la suposición que hacen al simplificar el problema de 3D a un problema 2D ^[22].

Khristianovich y Zheltov^[22], autores del modelo *KGD*, suponen que los esfuerzos son constantes en el plano horizontal, es decir, que todas las secciones transversales cortadas en el eje horizontal son independientes e idénticas. Esto equivale a asumir que los cambios en el ancho de la fractura ocurren mas lentamente en la dirección vertical a lo largo de la cara de la fractura que en la dirección horizontal (ver Figura N° 2.9). En la práctica, esto es cierto si la altura de la fractura es mucho mayor que su longitud, o si el cierre de la misma ocurre en los bordes de la arena de interés ^[22].

El modelo *PKN*, desarrollado por Perkins y Kern^[26], supone que cada sección transversal en la dirección vertical actúa independientemente, que es equivalente a suponer que la presión, en cualquier punto, está más afectada por la altura que por la longitud de la fractura (ver Figura N° 2.10). Esto es cierto si la longitud de la fractura es mucho mayor que su altura ^[22].

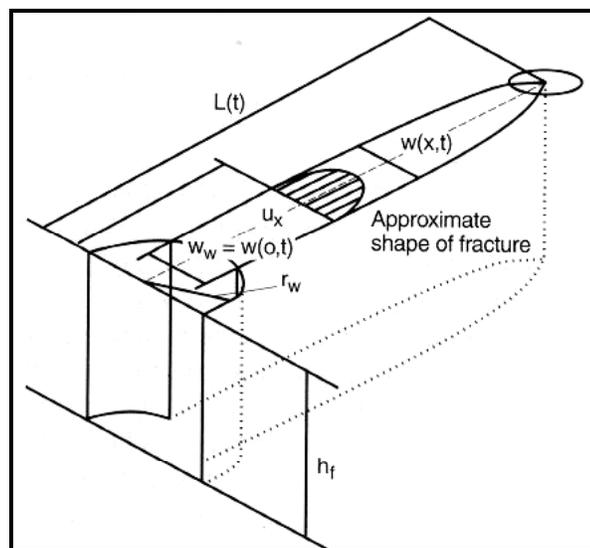


Figura N° 2.9: Modelo KGD

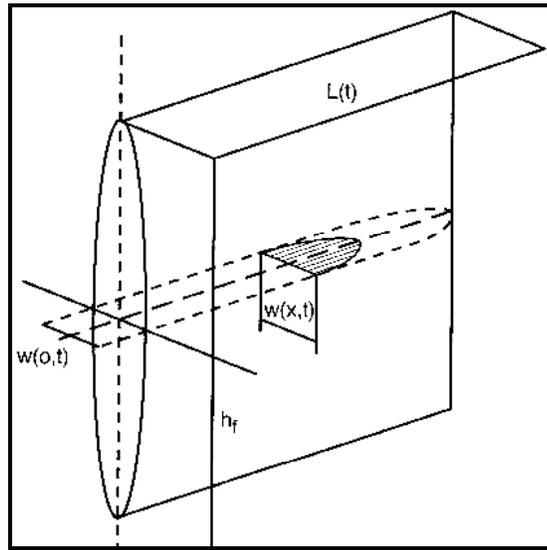


Figura N° 2.10: Modelo PKN

Esta diferencia en la simplificación básica del modelo conlleva a dos maneras diferentes de modelar la fractura, y podrían conducir también a dos resultados distintos en la predicción de su geometría. En el caso del modelo *PKN* los mecanismos y el efecto de cierre de la fractura no son considerados, mientras que en el modelo *KGD* la región de cierre juega un papel mucho más importante, y los gradientes de presión en la fractura pueden ser aproximados ^[22].

Ambos modelos, *PKN* y *KGD* consideran que las fracturas *Radiales* crecen de forma no confinada desde una fuente puntual. Este modelo es aplicable cuando no hay restricciones o barreras para el crecimiento vertical, o en las etapas iniciales de una fractura horizontal ^[22].

II.4.3 Influencia de la permeabilidad del yacimiento en la geometría de la fractura

En la mayoría de las aplicaciones de fracturas, el intervalo de interés del yacimiento se encuentra bordeado por formaciones de rocas no petrolíferas que actúan como sellos laterales de la zona de interés. Generalmente, éstas últimas se

caracterizan por presentar gran resistencia a los esfuerzos de corte y funcionan como una barrera ante el crecimiento de la altura de una fractura, particularmente durante su etapa inicial de propagación. La restricción en el crecimiento de la fractura es importante en formaciones que tienen permeabilidades bajas o moderadas, en donde son necesarias fracturas relativamente largas para lograr una estimulación efectiva. La Figura N° 2.11 muestra la evolución de la geometría de la fractura y de la correspondiente presión de fondo para una fractura que se propaga bajo éstas condiciones^[22].

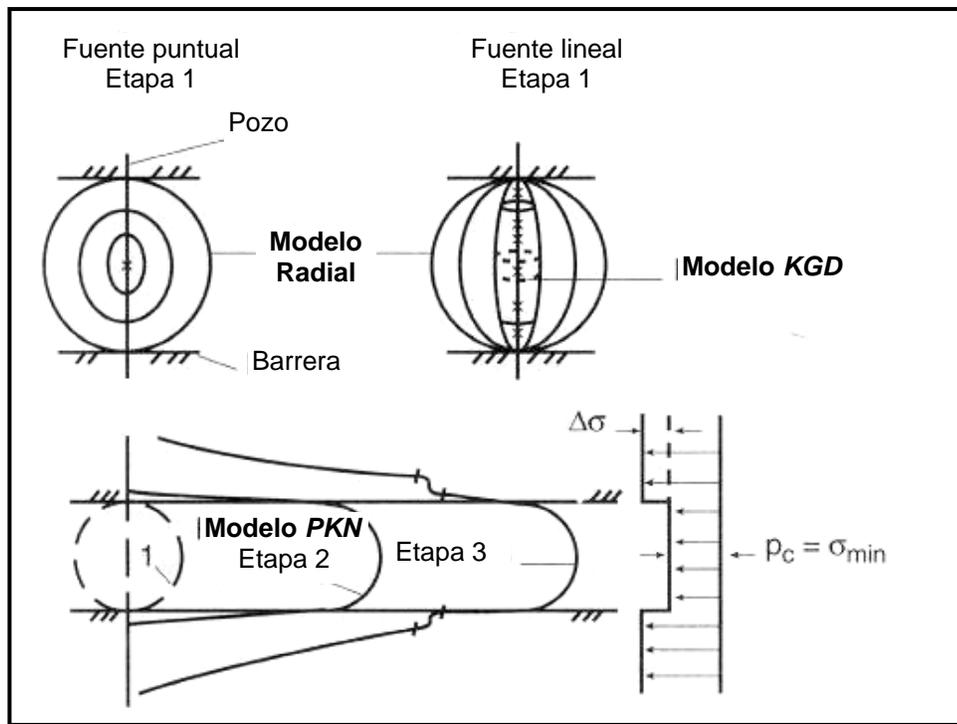


Figura N° 2.11: Evolución de la geometría de la fractura.

El carácter inicial de la propagación de la fractura, conocido como etapa 1, depende de la longitud del intervalo de las perforaciones, lo cual proporciona una entrada de fluido en la fractura que es relativa al espesor del yacimiento. Se describen dos casos límites: uno para una entrada de fluido limitada a una fuente puntual y otro en la que la entrada de fluido ocurre a lo largo de toda la arena cañoneada^[22].

En el primer caso, cuando la entrada de fluido es aproximadamente una fuente puntual, el área de la fractura se incrementa en forma circular alrededor del punto de entrada, por lo cual está bien representada por el modelo de geometría radial. Una entrada de fluido a todo lo largo de la arena cañoneada es aproximada a una fuente lineal, y el área de la fractura evoluciona en forma elíptica. El modelo geométrico KGD describe muy bien ésta fase temprana de la geometría de la fractura.

Para ambos modelos de propagación, radial o elíptica, la presión neta disminuye con la inyección continua de fluido. Este decrecimiento en la presión refleja la preferencia que tiene la fractura para alargarse en la medida en que decrece la resistencia y la restricción en su forma. La etapa 1 puede ocurrir sólo durante un corto período de tiempo, sólo en el inicio de una fractura, o desarrollarse de manera masiva durante todo el tratamiento^[22].

Cuando las barreras de roca no petrolífera se encuentran por encima y por debajo de la zona de interés, el crecimiento de la altura de la fractura puede estar confinado a la etapa 1. Bajo estas condiciones, la fractura tiene preferencia por crecer en forma circular y de propagarse horizontalmente. Este modo de propagación se denota como etapa 2, y resulta en un crecimiento de la presión a medida que la fractura crece en longitud en toda su altura. Este tipo de propagación está descrito por el modelo PKN. La fractura seguirá creciendo y la presión continuará incrementándose, condición que se denota como etapa 3^[22].

CAPITULO III

METODOLOGÍA Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

En este capítulo se presenta la metodología seguida para llevar a cabo la simulación numérica conceptual de un pozo vertical con parámetros típicos de los yacimientos de crudos pesados y extrapesados (CP/XP). En dicha simulación se evalúa el efecto de una fractura hidráulica en conjunto con diferentes esquemas de calentamiento dieléctrico para evaluar su aplicación como una herramienta en la recuperación mejorada de petróleo y en el mejoramiento de crudo en subsuelo.

En primer lugar se describen los yacimientos utilizados y los parámetros de simulación establecidos para su modelaje, así como los cálculos realizados para estimar las propiedades dieléctricas de los materiales utilizados.

El procedimiento para acoplar la tecnología del calentamiento electromagnético en un simulador de yacimientos comercial se muestra a continuación, así como la descripción de las fracturas que se modelan con dicho simulador. Se presentan también los materiales apuntalantes que se estudian como relleno de la fractura y los modelos de calentamiento que se aplicaron para evaluar la técnica de calentamiento electromagnético en el esquema de pozo fracturado.

Por último se describe el procedimiento seguido para evaluar los esquemas Yacimiento-Fractura-Calentamiento y acoplamiento de éste a un modelo de mejoramiento de crudos pesados en subsuelo con donantes de hidrógeno, a través de las simulaciones conceptuales de los yacimientos seleccionados en este estudio.

III.1 DESCRIPCIÓN DE LOS YACIMIENTOS Y PARÁMETROS DE SIMULACIÓN.

En este trabajo se utilizaron los datos de los yacimientos Tía Juana, Cerro Negro y Hamaca, así como las propiedades termodinámicas de los fluidos allí presentes para realizar las simulaciones numéricas conceptuales de un pozo vertical que ha sido fracturado y sometido a calentamiento electromagnético. Estos yacimientos han sido escogidos para este estudio, entre otras razones, porque son

representativos de los yacimientos de crudos pesados y extra pesados (CP/XP) venezolanos y porque se conocen las propiedades dieléctricas de las arenas y las propiedades termodinámicas de los fluidos allí presentes.

Los yacimientos Tía Juana y Cerro Negro se utilizan para el estudio del esquema de Yacimiento-Fractura-Calentamiento. En este escenario, en el cual se analiza el efecto de 5 esquemas de calentamiento dieléctrico, 3 materiales apuntalantes y diferentes geometrías de fractura en la producción de crudo, con el objetivo de evaluar el calentamiento dieléctrico en conjunto con el fracturamiento hidráulico como una técnica de recuperación mejorada de petróleo. Para ello se plantean y comparan entre sí todas las posibles combinaciones de las variables a analizar, hasta llegar a un esquema óptimo de calentamiento para cada caso bajo las condiciones del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento. Esta metodología se detalla más adelante.

El yacimiento Hamaca se utiliza para acoplar el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento a un modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo que es tomado de los estudios de Salazar^[9] y Ovalles y col.^[11,29-31]. Se evaluaron 2 modelos de calentamiento, que se basaron directamente en los resultados de los yacimientos Tía Juana y Cerro Negro. También se tomó de los resultados anteriores la geometría óptima de la fractura para la evaluación de 3 materiales apuntalantes. El objetivo de este caso es evaluar el calentamiento dieléctrico en conjunto con la fractura como una herramienta para el mejoramiento en subsuelo con donantes de hidrógeno. Para ello se plantean y comparan entre sí todas las combinaciones de las variables a analizar con la idea de lograr una producción de crudo mejorado mediante la integración del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento al modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo desarrollado por Ovalles et al^[9,11,29-31].

El simulador comercial utilizado para realizar este estudio es el STARS[®] (“**S**tream **T**hermal and **A**dvanced **P**rocesses **R**eservoir **S**imulator”). Este simulador de yacimientos avanzado fue desarrollado por la empresa *Computer Modelling Group CMG*, para realizar balances de materia, *momentum* y energía, y es ampliamente usado en PDVSA como simulador térmico y químico por excelencia. Fue

seleccionado para realizar las simulaciones de los yacimientos debido a que permite modelar formaciones con fracturas hidráulicas, así como procesos térmicos de recuperación mejorada de crudo. En el Anexo N° A.1 se presenta un archivo de entrada de datos del simulador STARS® correspondiente a cada caso estudiado.

A continuación se presenta la descripción de los yacimientos que fueron seleccionados para la simulación conceptual de un pozo vertical fracturado y sometido a calentamiento electromagnético.

III.1.1 Caso 1: Yacimiento Tía Juana:

La simulación conceptual de un pozo con los datos del yacimiento Tía Juana se llevó a cabo utilizando una malla cartesiana (24x24x3), de 990 pies de largo y 990 pies de ancho, en cual la zona de interés tiene una altura de 140 pies. Esta malla representa la cuarta parte del yacimiento total, lo cual constituye una simplificación geométrica, tal y como se muestra en la Figura N° 3.1.

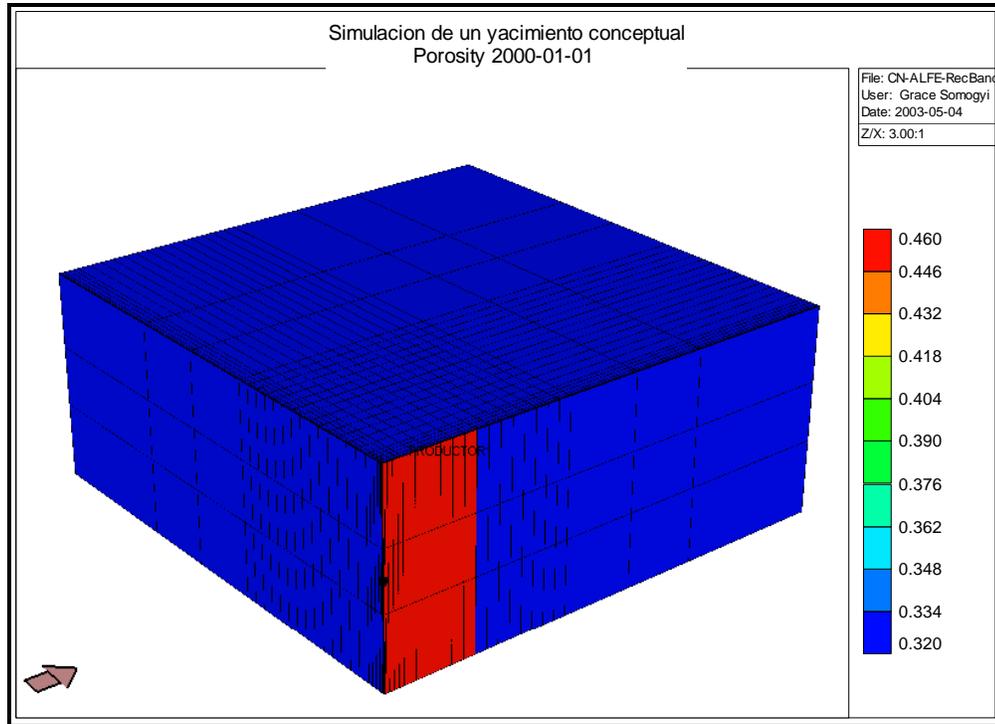


Figura N° 3.1: Malla de simulación utilizada para los casos Tía Juana y Cerro Negro

El pozo productor y la antena emisora de radiación electromagnética se colocaron en una esquina de la malla, específicamente en la celda 24x24x2. Este arreglo se debe a que el calentamiento y la producción de crudo ocurren simultáneamente en la simulación. El pozo se encuentra completado en el centro de la arena productora, lo cual permite hacer sensibilidades en las posibles geometrías que tendría una fractura hidráulica en dicho modelo.

Perpendicular al pozo, específicamente en las celdas (24, j, k), se colocó la fractura hidráulica, que crece en la arena productora de manera radial (tanto horizontal como verticalmente). Las dimensiones de la fractura son un parámetro de análisis de este trabajo, y como tal se explicarán detalladamente más adelante.

El yacimiento Tía Juana se caracteriza por una porosidad de 23% y una permeabilidad de 900 mD. El crudo pesado allí presente tiene una °API de 15,5. Los cálculos referentes a la definición de los fluidos (cálculo de las propiedades térmicas, estimación de las constantes de equilibrio gas/líquido) y a las propiedades roca/fluido (permeabilidades relativas y condiciones iniciales) fueron tomados del trabajo de Ramírez^[8], en donde también se presenta la validación experimental del modelo numérico. El POES para este caso es de $3,2455 \times 10^6$ MMSTB.

Como datos iniciales de la simulación se tomaron: temperatura inicial del yacimiento de 145 °F, presión original de 1300 lpc y saturación inicial de crudo de 74%. También se establecieron dos restricciones para el pozo: una tasa de producción diaria de crudo máxima de 500 bbl/día y una presión de fondo fluyente mínima de 400 lpc. Se estableció una temperatura límite para el calentamiento de 500 °F, debido a que por encima de dicho valor ocurren reacciones que no son deseables en los fluidos del yacimiento.

III.1.2 Caso 2: Yacimiento Cerro Negro:

La simulación conceptual de un pozo con los datos del yacimiento Cerro Negro se llevó a cabo utilizando la malla descrita anteriormente para el yacimiento Tía Juana. El yacimiento Cerro Negro presenta un 32% de porosidad y 12000 mD de permeabilidad, y un crudo extra pesado de 7,7° API.

Los cálculos referentes a la definición de los fluidos (cálculo de las propiedades térmicas, estimación de las constantes de equilibrio gas/líquido) y las propiedades roca/fluido (permeabilidades relativas y condiciones iniciales), fueron tomados del informe de Ovalles y col.^[5,32], en donde también se presenta la validación experimental del modelo numérico. El POES para este caso es de $6,5537 \times 10^4$ bbl.

Como datos recurrentes de la simulación se tomaron: una temperatura inicial del yacimiento de 129 °F, una presión original de 1000 lpc y una saturación inicial de crudo de 71%. También se establecieron dos restricciones: una tasa de producción diaria de crudo máxima de 500 bbl/día y una presión de fondo fluyente mínima de 400 lpc. Se estableció una temperatura límite para el calentamiento de 500 °F, debido a que por encima de dicho valor ocurren reacciones que no son deseables en los fluidos del yacimiento.

III.1.3 Caso 3: Yacimiento Hamaca:

La simulación conceptual de un pozo con los datos del yacimiento Hamaca se realizó utilizando una malla radial (10x9x10) con un radio máximo de 1058 pies y una zona de interés de 95 pies de altura. Esta malla representa la mitad del yacimiento total, lo cual constituye una simplificación geométrica, tal y como se muestra en la Figura N° 3.2. Se colocó el pozo productor, el pozo inyector de donante de hidrógeno y la antena emisora de radiación electromagnética en el centro de la malla. Ambos pozos se encuentran completados a todo lo largo de la zona de interés. Perpendicular al pozo, específicamente en las celdas (i, 5, k), se colocó una fractura hidráulica, que abre en el pozo y crece en el yacimiento de manera radial (tanto horizontal como verticalmente).

El yacimiento Hamaca posee una porosidad de 32,5% y una permeabilidad de 12000 mD, y un crudo extra pesado de 9,8 °API. Los cálculos referentes a la definición de los fluidos (cálculo de las propiedades térmicas, estimación de las constantes de equilibrio gas/líquido) y las propiedades roca/fluido (permeabilidades

relativas y condiciones iniciales), fueron tomados de los estudios de Salazar^[9] y Ovalles^[11-29].

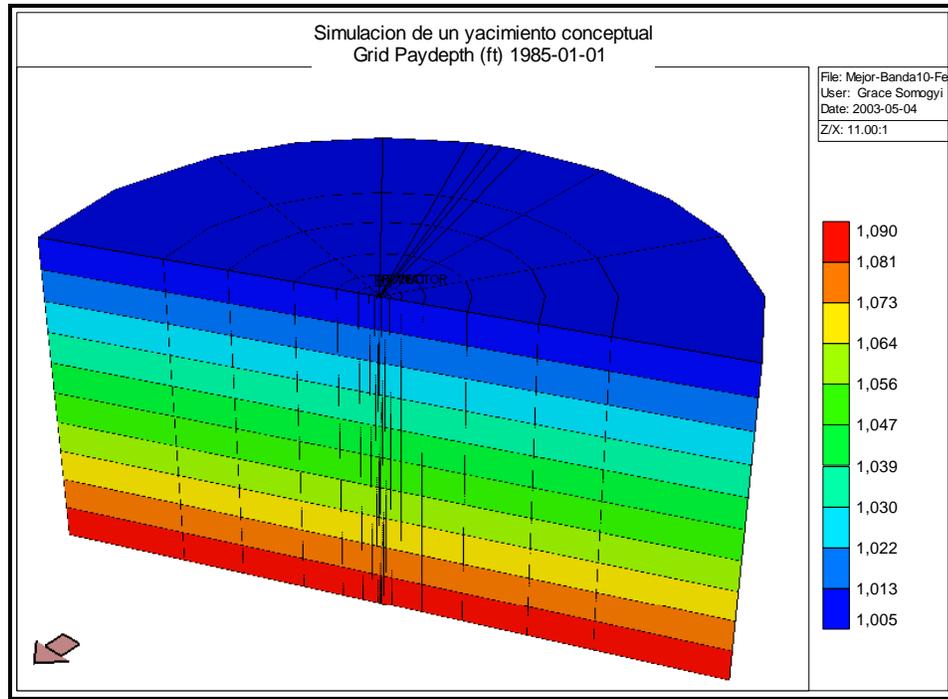


Figura N° 3.2: Descripción de la malla utilizada para el caso Hamaca.

Como datos iniciales de la simulación se tomaron: una temperatura inicial de yacimiento de 137 °F, una presión original de 1160 lpc y una saturación inicial de crudo de 71%. También se establecieron dos restricciones operacionales para el pozo: una tasa de producción diaria de crudo que aumenta con el tiempo y una presión de fondo fluyente mínima de 200 lpc. Debido a que las reacciones de mejoramiento se activan a partir de los 500 °F, se estableció dicho valor como mínimo “set point” de temperatura para la fuente de calentamiento.

III.2 CALENTAMIENTO ELECTROMAGNÉTICO

El calor se estimó de acuerdo a la ley de Lambert, la cual establece una disminución exponencial de la energía absorbida en función de la profundidad del medio ^[4,18-20], expresada en las ecuaciones 2.5 y 2.6, del Marco Teórico.

Las suposiciones de este modelo son las siguientes:

- Las propiedades dieléctricas son aproximadamente constantes con la temperatura.
- El medio poroso es homogéneo, la permeabilidad y la porosidad son constantes en todas las direcciones.
- La propagación de la onda electromagnética se modela sólo en la dirección radial.
- La saturación de agua es menor al < 20%.

Para el cálculo de la potencia absorbida se utilizaron los valores de ϵ' y ϵ'' que se obtienen a partir de las mediciones experimentales realizadas por la compañía Microwave Properties North (MPN)^[23-26], tanto de los materiales individuales como para las mezclas de los crudos, arenas y materiales apuntalantes utilizados en este estudio. En dichos reportes se utiliza una definición de la distancia de penetración D_p que difiere de la presentada en el Marco Teórico, entendiéndose ahora como la profundidad a la cual la potencia se reduce a la mitad de su valor inicial. La constante de atenuación α se calcula a partir de la expresión 3.1:

$$\alpha = \frac{\ln(2)}{2D_p} \quad (3.1)$$

En los informes de MPN^[23-26] las constantes dieléctricas son medidas y reportadas para rangos de bajas frecuencias (54 a 1015 MHz) y altas frecuencias (397 a 2986 MHz), y para temperaturas desde 25 hasta 350 °C. Para los casos estudiados se tomaron los valores de ϵ' y ϵ'' promediados entre la temperatura inicial del yacimiento (que varía para cada caso) y la temperatura límite de cada estudio (500 °F para los casos Tía Juana y Cerro Negro y 650 °F para el caso Hamaca), para cada una de las frecuencias reportadas. En la tabla N° 3.1 se presentan los valores de ϵ' y ϵ'' para una frecuencia de 397 MHz, en donde la zona amarilla representa las temperaturas a las cuales se toman las constantes dieléctricas para calcular el valor promedio, y la zona verde señala los valores promedio de dichos parámetros. Todos los valores de ϵ' y ϵ'' utilizados en este estudio se presentan en el Anexo N° A.2.

Tabla N° 3.1: Valores de ϵ' y ϵ'' de la arena Tía Juana en función de la temperatura para una frecuencia de 397 MHz.

Temperatura (°C)	ϵ'	ϵ''
24	2.93	0.082
52	2.99	0.151
78	3.22	0.293
102	3.4	0.427
127	3.54	0.52
153	3.48	0.499
178	3.04	0.186
203	2.89	0.079
228	2.87	0.076
253	2.91	0.065
279	2.93	0.083
303	2.96	0.082
327	2.97	0.061
351	2.95	0.094
153	3.149	0.255

Con los valores de ϵ' y ϵ'' promedio, y utilizando las ecuaciones 2.3 y 3.1, se calcularon los valores de D_p y α promedio en función de la frecuencia, para cada material de estudio (arenas y apuntalantes), los cuales se muestran a continuación en las Figuras N° 3.3 y 3.4, respectivamente.

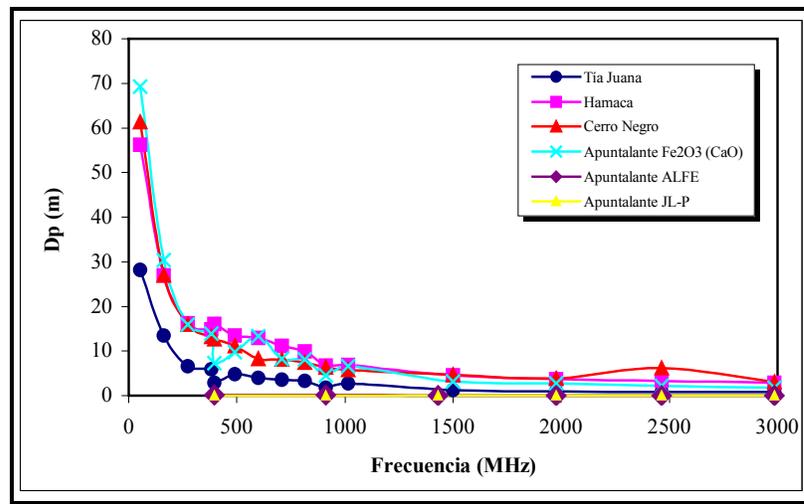


Figura N° 3.3: Valor de D_p vs. frecuencia para los materiales utilizados, en el rango de temperatura de interés.

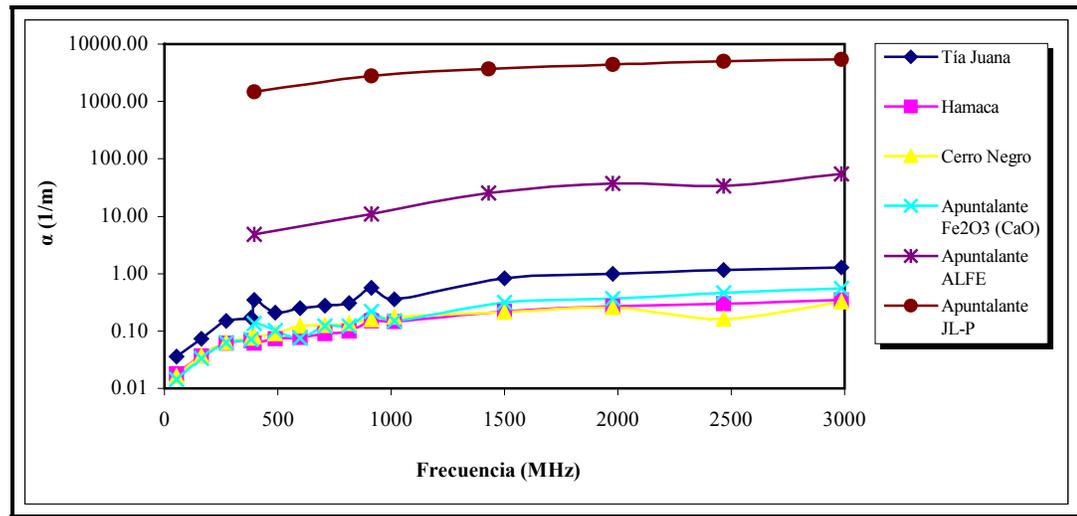


Figura N° 3.4: Valor de α vs. frecuencia para los materiales utilizados, en el rango de temperatura de interés.

Una vez obtenidos los valores de D_p y α promedio para cada frecuencia de radiación y material de estudio, se calcularon los perfiles de potencia incidente y de potencia absorbida para cada celda de la malla, en dirección \hat{i} . Para ello se crearon hojas de cálculo donde se combinaron los valores de las constantes de atenuación, radio del pozo, potencia inicial total, longitud de fractura, material apuntalante de la fractura y, por último, el esquema de calentamiento. En la Tabla N° 3.2 se presenta como es la distribución de calor a lo largo de una línea de celdas en dirección i de la malla de simulación del yacimiento Tía Juana, para una potencia de 80 kW y frecuencias de 13,56; 40; 915 y 2450 MHz.

Tabla N° 3.2: Distribución de calor para una línea de celdas en \hat{i} , para una potencia de 40 kW.

Datos requeridos para el calculo								
Temperatura	145							
r pozo (ft)	0.25							
Po (Watt) Total yac	40000							
Po (Watt) 1/4 yac	10000							
Po(Btu/dia) por K	810964.8							
Cálculo de Dp para las frecuencias comerciales								
Frecuencia (MHz)	13.56	40	915	2450				
Dp (m)	113.46	41.73	2.31	0.93				
a ⁻¹ (m)	327.36	120.41	6.66	2.68				
a ⁻¹ (ft)	1074.03	395.04	21.87	8.80				
Cálculos realizados								
Radios (ft)	Potencia incidente (BTU/día) para 40 kW				Potencia absorbida (BTU/día) para 40 kW			
	13.56	40	915	2450	13.56	40	915	2450
1	809833	807891	757199	683817	1132	3073	53766	127148
4	805322	795713	575494	345694	4511	12178	181705	338123
10	796374	771906	332432	88347	8948	23808	243062	257346
20	781681	733798	133190	9093	14692	38107	199242	79255
30	767260	697572	53363	936	14421	36226	79827	8157
40	753105	663134	21380	96	14155	34438	31983	840
65	718848	584296	2172	0	34256	78839	19208	96
90	686150	514830	221	0	32698	69466	1952	0
115	654939	453623	22	0	31211	61207	198	0
140	625148	399693	2	0	29791	53930	20	0
165	596712	352174	0	0	28436	47519	2	0
190	569570	310305	0	0	27143	41869	0	0
215	543662	273413	0	0	25908	36891	0	0
240	518933	240908	0	0	24729	32506	0	0
265	495328	212267	0	0	23605	28641	0	0
290	472797	187031	0	0	22531	25236	0	0
315	451291	164795	0	0	21506	22236	0	0
340	430763	145203	0	0	20528	19592	0	0
365	411169	127940	0	0	19594	17263	0	0
390	392466	112729	0	0	18703	15211	0	0
540	296821	52750	0	0	95646	59979	0	0
690	224484	24684	0	0	72336	28066	0	0
990	128401	5405	0	0	96083	19279	0	0

La potencia se distribuye uniformemente en dirección radial, por lo que para una malla cartesiana debe tomarse en cuenta el tamaño de las celdas para el cálculo del perfil de la potencia incidente en todo el modelo. El cálculo de la potencia incidente para cada celda está basado en la suposición de que cada celda es parte de una figura con forma de “arandela”, tal y como se ilustra en la Figura N° 3.5. Suponiendo que la “arandela” recibe una potencia total de 800000 BTU/día, la celda señalada en la figura, que pertenece a la arandela, recibe una fracción de dicha potencia que es ponderada de acuerdo al volumen que ocupa dicha celda en la arandela y que viene dada por la ecuación 3.2.

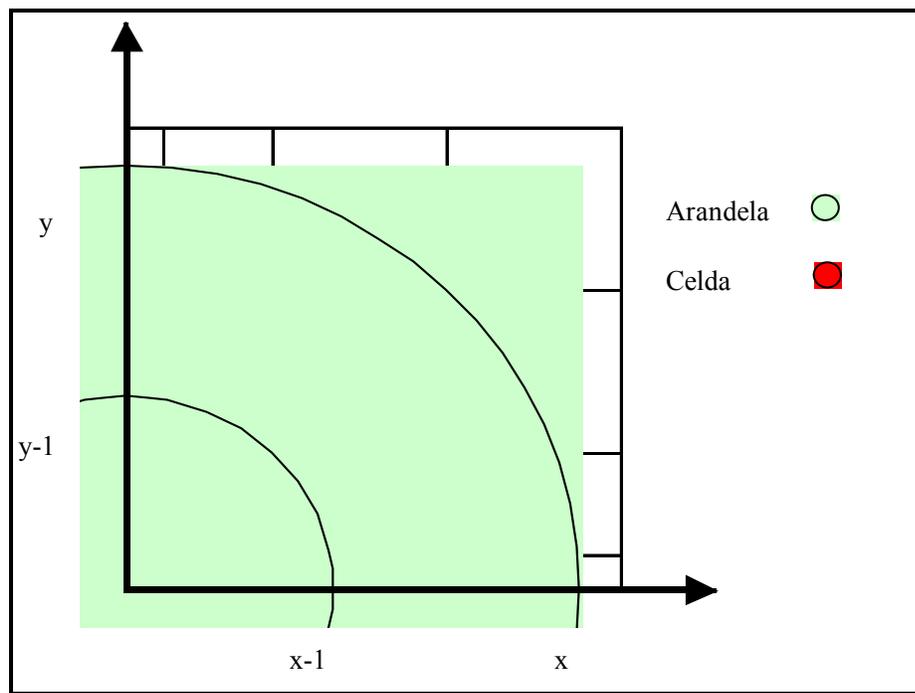


Figura N° 3.5: Diagrama celda-arandela para el cálculo de la potencia incidente.

$$P_i(x) = P(x) \cdot R_v \quad 3.2$$

donde: $P_i(x)$ es la fracción de potencia que corresponde una la celda de la arandela [kW].

$P(x)$ es la potencia incidente en la arandela a una distancia x de la fuente[kW].

Es calculada de acuerdo a las ecuaciones 2.5 y 2.6.

R_v representa la relación entre volumen de la celda y el volumen total de la arandela. Está representada por la ecuación 3.3.

$$R_v = \frac{\text{Volúmen de la celda}}{\text{Volúmen total de la arandela}} \quad 3.3$$

De aquí se obtiene que $P_i(x)$ representa la fracción de potencia que corresponde a una celda de la “arandela” de acuerdo a su tamaño: las celdas más grandes reciben más potencia que las celdas pequeñas. Este esquema de calculo se mantiene para todos los cálculos de potencia incidente en la dirección i .

Tomando en cuenta que el calentamiento se realiza tanto en la fractura como en la arena, es necesario el perfil de absorción de la arena y del material apuntalante, pues al ser materiales con diferentes coeficientes de absorción tienen perfiles de absorción totalmente diferentes entre sí. Además, en el caso del apuntalante es de gran importancia tomar en cuenta límite entre apuntalante (fractura) y arena (yacimiento), en el cual se produce un cambio en la absorción debido a la diferencia entre los coeficientes de absorción de los materiales.

III.3 ACOPLAMIENTO CON EL SIMULADOR STARS®.

Seguidamente se presenta una breve descripción del simulador comercial utilizado, así como de los comandos más importantes utilizados para las simulaciones de este estudio.

III.3.1 Descripción del simulador.

STARS® (“Steam Thermal and Advanced Proceses Reservoir Simulator”) es un simulador robusto de procesos desarrollado por la empresa CMG® para el modelaje de fluidos trifásicos y de múltiples componentes. Permite modelar formaciones complejas, que presentan incluso fracturas naturales o hidráulicas, con o sin dispersión de sólidos. Esta potente herramienta para la simulación numérica, se utiliza para modelar procesos composicionales, de inyección de vapor, geomecánicos (como fracturas, compactación y fallas de rocas), de componentes dispersos (como polímeros, geles, finos, emulsiones y espumas) y de combustión en sitio^[27].

STARS[®] simula una gran variedad de complejos procesos de producción y mejoramiento de crudo, con una capacidad superior a la de los simuladores composicionales o de tipo “black oil”. Aún tratándose de proyectos a escala de campo, piloto, laboratorio o con elementos de simetría, el simulador modela eficientemente procesos como: la generación en subsuelo y el flujo de emulsiones y espumas, incluyendo crudos espumados; la precipitación en sitio de ceras y asfaltenos; tratamientos de pozos para el manejo de la inyección de aditivos químicos; y procesos de recuperación mejorada de crudo^[27].

III.3.2 Comandos utilizados para las simulaciones.

Para modelar el calentamiento de una celda de acuerdo a las necesidades de cada caso estudiado, se emplearon una serie de comandos que posee el simulador y que son detallados a continuación.

Se empleó el comando HEATR desde el primer día de producción para modelar el calentamiento adiabático en cada celda. Este comando permite proporcionar un valor constante de calor a cada celda que conforma la malla del modelo en el tiempo que se desee, de acuerdo con la data recurrente especificada. El calor proporcionado a cada celda es equivalente al valor de $P_i(x)$ calculado a través de la ecuación 3.2, y se modela tal y como se describe en el Manual del usuario del STARS[®] ^[28].

Para los casos en los que se requiere regular la temperatura de calentamiento, se utilizó el comando UHTR en combinación con TMPSET. Estos comandos simulan una la fuente de calentamiento con un controlador de tipo ON/OFF que permite asignar una tasa de transferencia de calor proporcional (UHTR). La fuente de calentamiento se mantendrá encendida mientras la temperatura de la celda sea menor a la temperatura límite ($T < \text{TMPSET}$). Cuando la temperatura de la celda sobrepasa la temperatura límite ($T > \text{TMPSET}$) la fuente se apaga.

El coeficiente de transferencia de calor proporcional se calcula para cada celda con la ecuación 3.4, tal y como lo indica el Manual del usuario del STARS[®] ^[28].

$$UHTR = \frac{P(x)}{TMPSET - T} \quad (3.4)$$

donde: $P(x)$ representa la potencia absorbida en el medio [kW].

$TMPSET$ es la temperatura límite del medio (ó Set Point del controlador) [°F].

T es la temperatura del medio en el tiempo t a una distancia x del pozo [°F].

Para establecer el valor del comando $TMPSET$ se empleó el procedimiento descrito por Ramírez [8]:

- Se estima la distribución de la potencia $P_i(x)$ con la ecuación 3.2.
- Se realiza una primera simulación utilizando el comando $HEATR$, de la cual se obtiene el histórico de las temperaturas hasta el momento en el cual alguna de las celdas del plano de calentamiento alcanza la temperatura límite. En ese momento se detiene la simulación y se toma el perfil de temperaturas. Estas temperaturas corresponderán a los valores del comando $TMPSET$.
- Con el perfil de temperaturas y la distribución de potencias se puede estimar el coeficiente de transferencia de calor proporcional mediante la ecuación 3.4 para cada una de las celdas del plano de calentamiento.

III.4 GEOMETRÍA DE LA FRACTURA

De acuerdo a lo expuesto en el Marco Teórico, la fractura descrita por el modelo Radial, en la cual su largo es equivalente a su altura y su forma es redondeada, resulta el más apropiado para describir la geometría que tendría una fractura real en una arena no consolidada de altas permeabilidades ($k \geq 100$ mD) en donde el pozo se encuentra completado en el centro de la arena en estudio [22]. Una representación de una fractura radial se presenta en la Figura N° 3.6

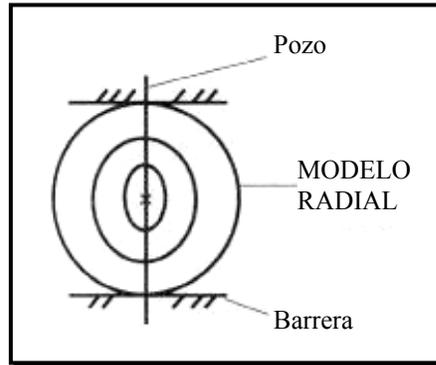


Figura N° 3.6: Diagrama de una fractura descrita bajo el modelo Radial

En este estudio evaluaron tres posibles largos de una fractura radial: 40, 70 y 200 pies. El valor de 40 pies se tomó para evaluar una posible fractura que ha crecido más vertical que horizontalmente, el largo de 70 pies corresponde a una fractura radial y el valor de 200 pies se tomó para evaluar una posible fractura que ha crecido más horizontal que verticalmente, guardando de esta manera consistencia con el estudio de Ramírez ^[8]. En la Figura N° 3.7 se presenta un diagrama de cómo se observarían, en la realidad, las fracturas radiales con los largos definidos anteriormente.

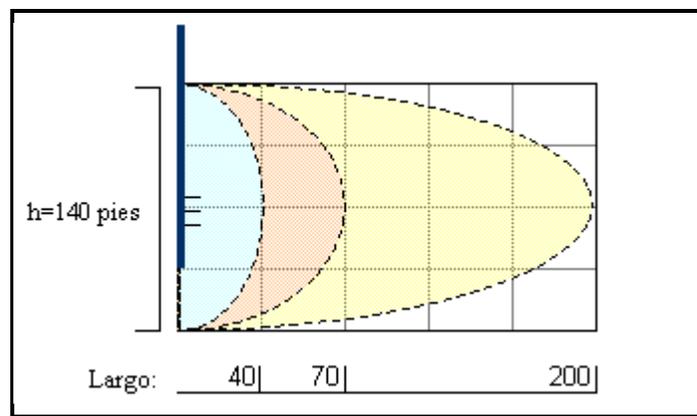


Figura N° 3.7: Diagrama de fracturas reales de tipo Radial para 40, 70 y 200 pies.

Para efectos de modelar la fractura en el simulador es necesario realizar algunas simplificaciones en los bordes y en la forma geométrica de la misma, cuidando siempre de respetar los parámetros de diseño especificados. Por lo tanto, se diseñaron seis simplificaciones de la fractura tipo Radial basándose en el largo y la altura de la fractura. Para los tres largos de la fractura descritos anteriormente se evaluó el efecto de la altura como constante o variable en función de su longitud. La altura inicial de la fractura es siempre constante e igual a la altura de la arena productora (140 pies), lo cual corresponde a suponer que la fractura crece verticalmente hasta encontrar un tope y en ese momento comienza a crecer horizontalmente. El ancho de la fractura se tomó como un parámetro constante en todas las geometrías estudiadas, y se le asignó un valor de 1 pulgada.

En los yacimientos Tía Juana y Cerro Negro, los cuales se modelaron a través de una malla de tipo cartesiano, se colocó la fractura en las celdas (24, j, k), mientras que el yacimiento Hamaca fue modelado a través de una malla radial, por lo cual la fractura se colocó en las celdas (i, 5, k). A continuación se describen las 6 simplificaciones de la fractura radial que fueron estudiadas en este trabajo, comenzando por las de mayor longitud.

III.4.1 Fractura “*ovalada*”

Esta fractura consta de una longitud de 200 pies, un ancho constante de 1 pulgada y una altura inicial de 140 pies que va disminuyendo a medida que aumenta su longitud. Para el modelaje de esta fractura en el simulador se asignó una altura constante de 140 pies desde el inicio hasta los 165 pies, y luego se asignó una altura de 40 pies para los últimos 25 pies de fractura. Un diagrama de esta geometría se presenta en la Figura N° 3.8.a, donde se puede observar la forma real que presentaría la fractura “*ovalada*” y la simplificación para su diseño. Se puede ver claramente cómo se han realizado aproximaciones tanto por exceso como por defecto de la geometría real para el modelaje de la fractura, por lo que el área del modelo es aproximadamente igual al área de la geometría real. En la Figura N° 3.8.b se presenta el modelo final tal y como se observa en la malla cartesiana de la simulación.

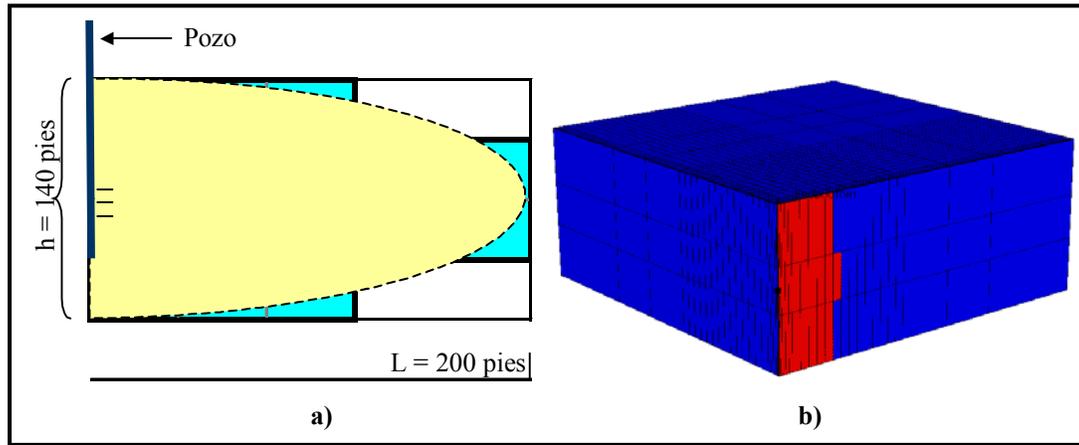


Figura N° 3.8: Diagrama de una fractura “ovalada”: a) geometría real y la simplificación para la simulación; b) modelo final de simulación.

III.4.2 Fractura “*rectangular*”

Esta fractura consta de una longitud de 200 pies, un ancho constante de 1 pulgada y una altura constante de 140 pies en toda su longitud. Un diagrama de esta geometría se presenta en la Figura N° 3.9.a, donde se puede observar la forma real que presentaría la fractura “rectangular” y la simplificación para su modelaje. Se puede ver claramente cómo se ha realizado una aproximación por exceso, por lo que el área del modelo es mucho mayor que el área de la geometría real. En la Figura N° 3.9.b se presenta el modelo final tal y como se observa en la malla cartesiana de la simulación.

III.4.3 Fractura “*triangular*”

Esta fractura consta de una longitud de 70 pies, un ancho constante de 1 pulgada y una altura inicial de 140 pies que va disminuyendo a medida que aumenta su longitud. Para el modelaje de esta fractura en el simulador se asignó una altura constante de 140 pies desde el inicio hasta los 45 pies, y luego se asignó una altura de 40 pies para los últimos 15 pies de fractura. Un diagrama de esta geometría se presenta en la Figura N° 3.10.a, donde se puede observar la forma real que presentaría la fractura “triangular” y la simplificación para su diseño. Se puede ver claramente

cómo se han realizado aproximaciones tanto por exceso como por defecto de la geometría real para el modelaje de la fractura, por lo que el área del modelo es aproximadamente igual al área de la geometría real. En la Figura N° 3.10.b se presenta el modelo final tal y como se observa en la malla cartesiana de la simulación.

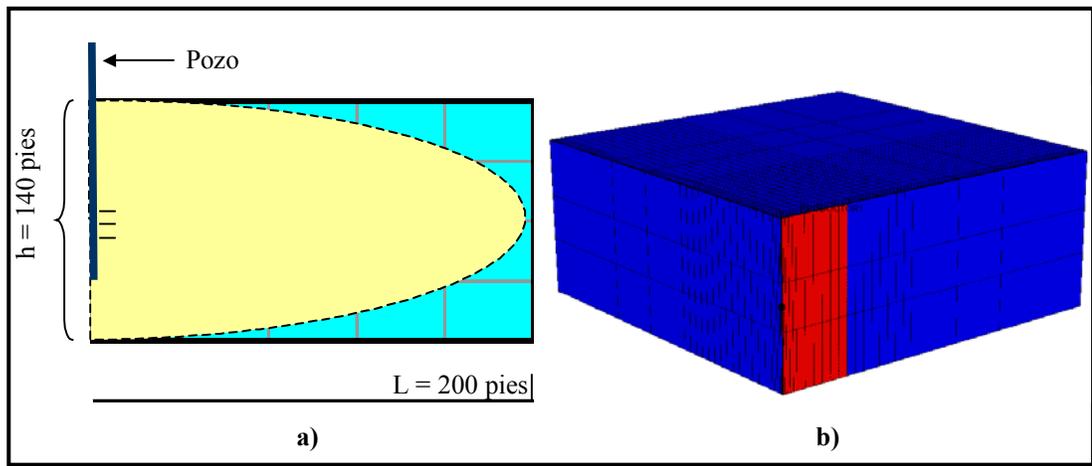


Figura N° 3.9: Diagrama de una fractura "rectangular": a) geometría real y la simplificación para la simulación; b) modelo final de simulación.

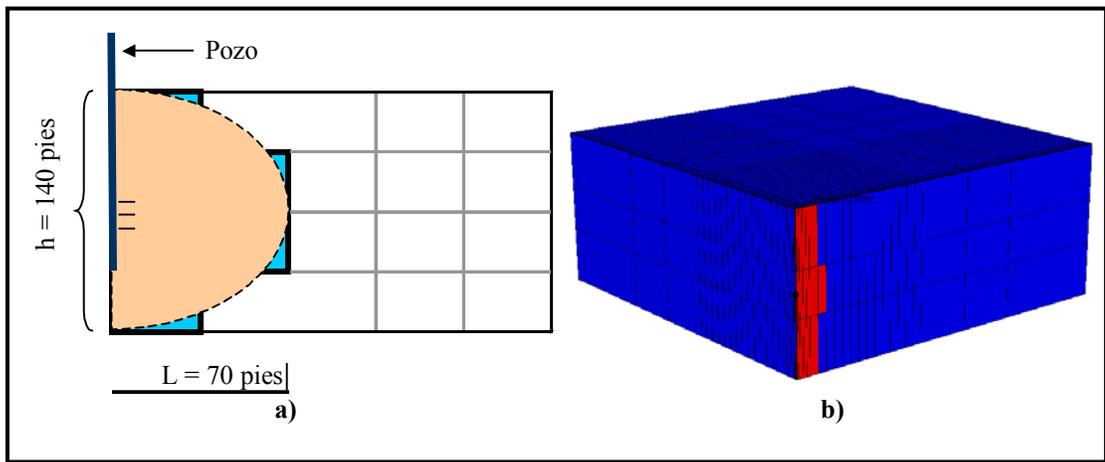


Figura N° 3.10: Diagrama de una fractura "triangular": a) geometría real y la simplificación para la simulación; b) modelo final de simulación.

III.4.4 Fractura “cuadrada”

Esta fractura consta de una longitud de 70 pies, un ancho constante de 1 pulgada y una altura constante de 140 pies en toda su longitud. Un diagrama de esta geometría se presenta en la Figura N° 3.11.a, donde se puede observar la forma real que presentaría la fractura “cuadrada” y la simplificación para su modelaje. Se puede ver claramente cómo se ha realizado una aproximación por exceso, por lo que el área del modelo es mucho mayor que el área de la geometría real. En la Figura N° 3.11.b se presenta el modelo final tal y como se observa en la malla cartesiana de la simulación.

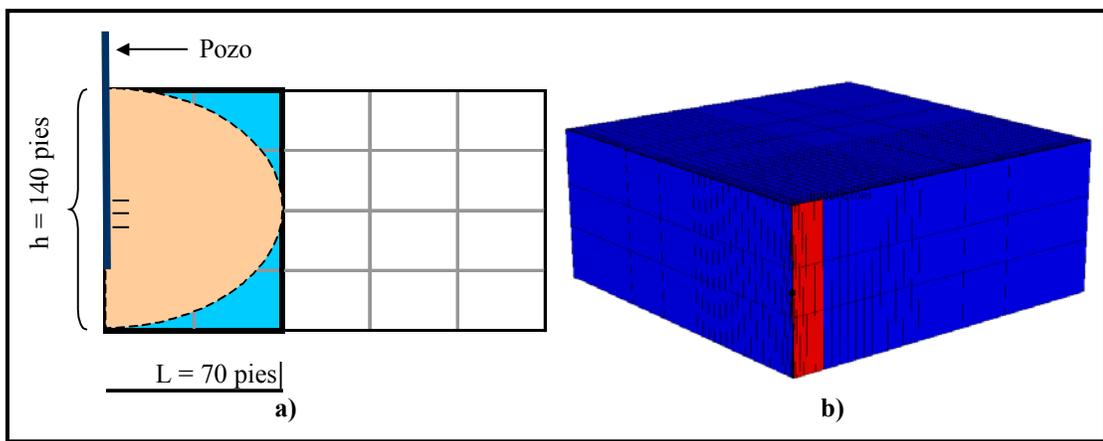


Figura N° 3.11: Diagrama de una fractura “cuadrada”: a) geometría real y la simplificación para la simulación; b) modelo final de simulación.

III.4.5 Fractura “mini-triangular”

Esta fractura consta de una longitud de 40 pies, un ancho constante de 1 pulgada y una altura inicial de 140 pies que va disminuyendo a medida que aumenta su longitud. Para el modelaje de esta fractura en el simulador se asignó una altura constante de 140 pies desde el inicio hasta los 30 pies, y luego se asignó una altura de 40 pies para los últimos 10 pies de fractura. Un diagrama de esta geometría se presenta en la Figura N° 3.12.a, donde se puede observar la forma real que presentaría la fractura “mini-triangular” y la simplificación para su diseño. Se puede ver claramente cómo se han realizado aproximaciones tanto por exceso como por defecto de la geometría real para el modelaje de la fractura, por lo que el área del modelo es

aproximadamente igual al área de la geometría real. En la Figura N° 3.12.b se presenta el modelo final tal y como se observa en la malla cartesiana de la simulación.

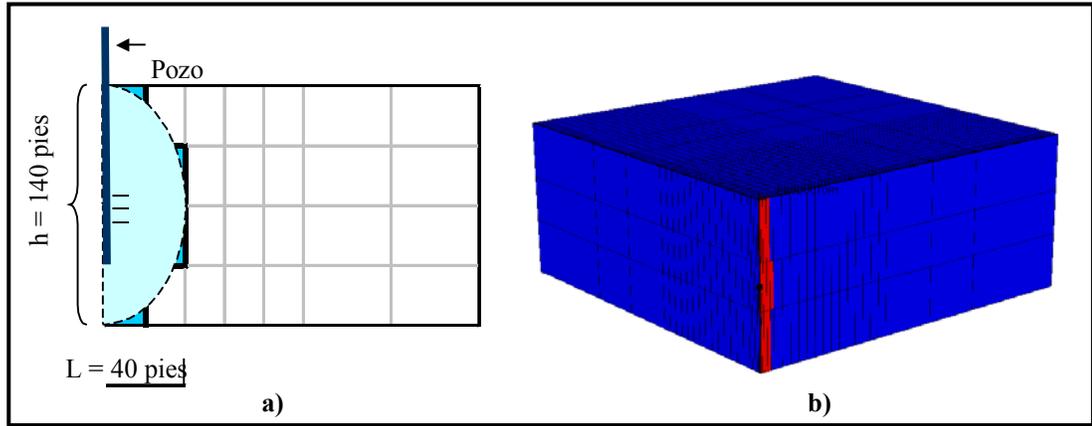


Figura N° 3.12: Diagrama de una fractura “mini-triangular”: a) geometría real y la simplificación para la simulación; b) modelo final de simulación.

III.4.6 Fractura “mini-cuadrada”

Esta fractura consta de una longitud de 40 pies, un ancho constante de 1 pulgada y una altura constante de 140 pies en toda su longitud. Un diagrama de esta geometría se presenta en la Figura N° 3.13.a, donde se puede observar la forma real que presentaría la fractura “mini-cuadrada” y la simplificación para su modelaje. Se puede ver claramente cómo se ha realizado una aproximación por exceso, por lo que el área del modelo es mucho mayor que el área de la geometría real. En la Figura N° 3.13.b se presenta el modelo final tal y como se observa en la malla cartesiana de la simulación.

III.4.7 Fractura “cuadrada” para el caso del yacimiento Hamaca (acoplamiento con el modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo).

Para las simulaciones conceptuales de un pozo con los datos del yacimiento Hamaca se utilizó una malla de tipo radial, por lo cual se modeló únicamente la fractura tipo “cuadrada”. Para este caso dicha fractura tiene una altura constante de 95 pies y una longitud de 70 pies.

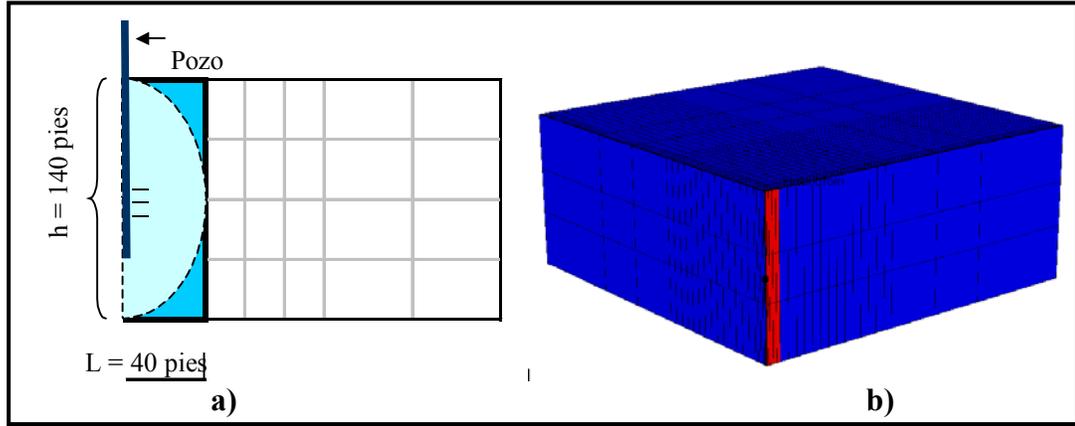


Figura N° 3.13: Diagrama de una fractura “mini-cuadrada”: a) geometría real y la simplificación para la simulación; b) modelo final de simulación.

Para un valor determinado del ángulo, la malla radial aumenta su ancho al alejarse del pozo. Al escoger una fractura de 70 pies de longitud, que es una longitud pequeña en comparación al largo total del yacimiento (1058 pies), se puede suponer que el ancho de la fractura es prácticamente constante en toda su extensión. Este ancho se fijó nuevamente en 1 pulgada.

Un diagrama de la geometría descrita anteriormente se presenta en la Figura N° 3.14.a, donde se puede observar la forma real que presentaría la fractura “cuadrada” y la simplificación para su modelaje. Se puede ver que se ha realizado una aproximación por exceso, por lo que el área del modelo es mucho mayor que el área de la geometría real. En la Figura N° 3.14.b se presenta el modelo final tal y como se observa en la malla radial de la simulación.

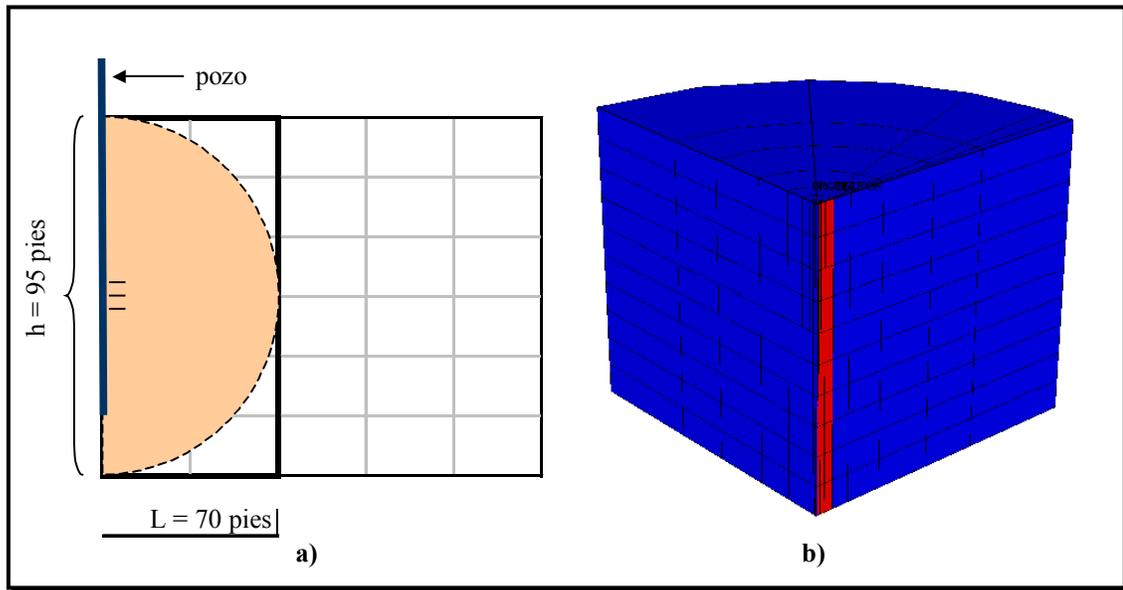


Figura N° 3.14: Diagrama de una fractura “cuadrada” del modelo Hamaca: a) geometría real y la simplificación para la simulación; b) modelo final de simulación para la malla Radial.

III.5 MATERIAL APUNTALANTE

En este trabajo se van a analizar 3 tipos de materiales apuntalantes de la fractura, que se diferencian por el orden de magnitud de los valores de sus coeficientes de potencia absorbida, o constante de atenuación (α).

- JL-P: valores de α desde 10^{-3} hasta 10^{-1} (pies $^{-1}$)
- ALFE: valores de α desde 10^{-1} hasta 10^2 (pies $^{-1}$)
- Fe₂O₃: valores de α desde 10^1 hasta 10^3 (pies $^{-1}$)

Las propiedades dieléctricas y los cálculos requeridos para obtener los valores de D_p y α que fueron especificados en la sección III.3. En las Figuras 3.3 y 3.4 se pueden observar los valores de éstos parámetros, los cuales fueron obtenidos promediando los valores de ϵ' y ϵ'' entre la temperatura inicial del yacimiento y la temperatura límite del estudio que es de 500 °F.

Se calculó para los materiales apuntalantes por la $\text{Tan}(\delta)$, que representa la habilidad de un material en convertir la energía electromagnética en energía calórica a una frecuencia y temperatura dada. Para ello se utilizó la ecuación 2.2 y se tomaron

las temperaturas en el intervalo de interés para cada caso. Los resultados en función de la frecuencia se presentan en la Figura N° 3.15.

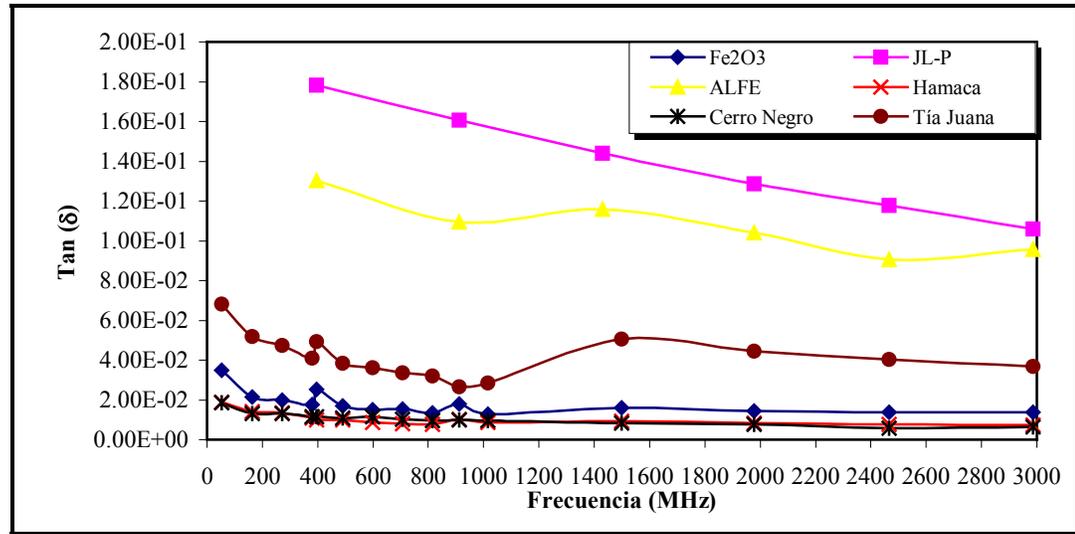


Figura N° 3.15: Valores de Tan (δ) para comparar la capacidad de absorción de microondas de los materiales estudiados.

Se puede observar que el material apuntalante JL-P es el más absorbente, seguido de ALFE, que es un material con una capacidad de absorción intermedia y por último el Fe₂O₃, cuya absorción es menor incluso que la de las arenas estudiadas.

III.6 MODELOS DE CALENTAMIENTO

En este trabajo se proponen 5 modelos de calentamiento para la aplicación de calentamiento electromagnético en un pozo conceptual. Estos modelos propuestos están basados en la suposición inicial de que, al calentar un área determinada con una cantidad de energía dada, las temperaturas obtenidas serán mayores al reducir la extensión de dicha área, puesto que esta energía está siendo concentrada.

Estos modelos se diferencian entre sí por el tamaño del área en la cual está siendo aplicado el calentamiento. En el modelo de menor área se calienta exclusivamente la zona de la fractura. A partir de allí el arco de radiación se va abriendo para calentar un área cada vez mayor, por lo que la zona de calentamiento

incluye ahora a la fractura y a parte de la arena productora y, en el caso de mayor arco de radiación, la zona de calentamiento incluye la fractura y toda la arena productora.

A continuación se describen los modelos de calentamiento propuestos, los cuales se clasifican en calentamiento en *bandas* de ancho constante, en los que los perfiles de calentamiento que se distribuyen en dirección \hat{i} , y calentamiento *radial* de todo el yacimiento.

III.6.1 Calentamiento en Banda 0.

También es conocido como *Calentamiento enfocado en la fractura*, se caracteriza porque el calor es radiado en las celdas que contienen a la fractura, en una banda de ancho constante de 0,083 pies (1 pulgada).

Teniendo en cuenta la suposición inicial que se planteó para los modelos de calentamiento, el calentamiento focalizado en la fractura es el modelo que concentra la energía en una menor área, por lo que se espera que presente las mayores temperaturas.

Este esquema de calentamiento fue estudiado previamente por Ramírez^[8], quien evaluó el calentamiento electromagnético focalizado en la fractura en un pozo que ha sido fracturado con materiales apuntalantes de propiedades dieléctricas conceptuales. Estos materiales presentaron una profundidad de penetración (D_p) que va desde 0 hasta 250 m. Ramírez^[8] encontró que con materiales cuya profundidad de penetración se encuentra entre 60 y 140 m se obtienen incrementos en la producción acumulada de crudo de hasta de 15%, con respecto al caso de un yacimiento fracturado sin calentamiento.

III.6.2 Calentamiento en Banda 1.

Es el primer modelo en el cual el área de calentamiento es mixta. El calor es radiado en una banda de un ancho constante de 1 pie, que incluye las celdas en dirección \hat{i} que contienen a la fractura y las celdas en dirección \hat{i} que se encuentran adyacentes a la fractura. Esta área corresponde a las celdas (24,j,2) y (23,j,2)

En este modelo propone la radiación de un área compuesta en un 92% por la arena productora y en un 8% por el material apuntalante de la fractura, por lo que fue necesario obtener los perfiles de potencia incidente de la fractura y de la arena productora, siguiendo el procedimiento descrito en la sección III.2.

III.6.3 Calentamiento en Banda 10.

En este modelo el calor es radiado en una banda de un ancho constante de 10 pies, que incluye las celdas en dirección \hat{i} que contienen a la fractura y las 4 líneas de celdas en dirección \hat{i} adyacentes a la fractura, desde la celda (24,j,2) hasta la celda (20,j,2)

En este modelo propone la radiación de un área compuesta en un 99,18 % por la arena productora y en un 0,82% por el material apuntalante de la fractura, por lo que fue necesario obtener los perfiles de potencia incidente de la fractura y de la arena productora, siguiendo el procedimiento descrito en la sección III.2.

III.6.4 Calentamiento en Banda 20.

En este modelo el calor es radiado en una banda de un ancho constante de 20 pies, que incluye las celdas en dirección \hat{i} que contienen a la fractura y las 5 líneas de celdas en dirección \hat{i} adyacentes a la fractura, desde la celda (24,j,2) hasta la celda (19,j,2)

En este modelo propone la radiación de un área compuesta en un 99,6 % por la arena productora y en un 0,4% por el material apuntalante de la fractura, por lo que fue necesario obtener los perfiles de potencia incidente de la fractura y de la arena productora, siguiendo el procedimiento descrito en la sección III.2.

III.6.5 Calentamiento Radial.

Este modelo se caracteriza por tener la mayor área de calentamiento, pues el calor es radiado a toda la arena productora, haciendo que la energía se reparta en toda su extensión. Este modelo ha sido estudiado previamente en los trabajos de Ovalles y col. ^[5,12, 32] y Fonseca ^[6]. Allí se evalúa el calentamiento dieléctrico radial en diversos

yacimientos de crudos medianos, pesados y extra pesados de propiedades dieléctricas conocidas. Los resultados obtenidos y se comparan con otros métodos térmicos de recuperación mejorada, tales como la inyección continua de vapor y la inyección alterna de vapor.

En la Figura N° 3.16 se presenta un diagrama de los modelos de calentamiento donde se observa en colores cada una de las bandas de calentamiento analizadas. Para el calentamiento por bandas de ancho constante se supuso que las bandas son prácticamente líneas rectas, aun cuando el calor viaja en dirección i y de manera angular. Esto es posible ya que, como se vio anteriormente en el calentamiento por bandas, el área ocupada por la fractura es prácticamente despreciable comparada con el resto del yacimiento, por lo tanto se puede que el calor viaja en dirección \hat{i} por cada una de las líneas que componen las bandas, haciendo que se puedan usar las ecuaciones 2.5 y 2.6.

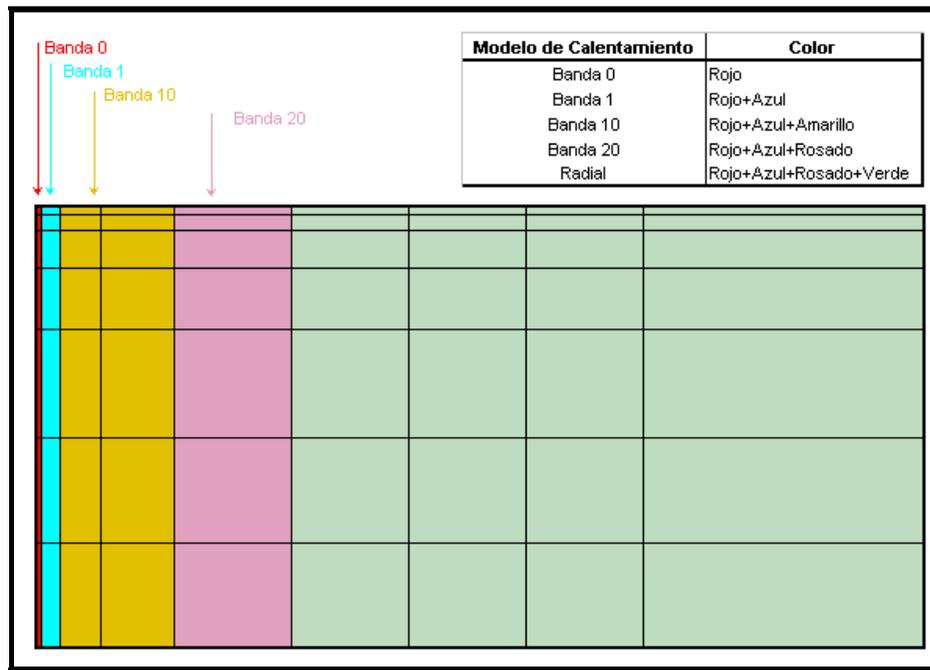


Figura N° 3.16: Diagrama del esquema de calentamiento por bandas

Para el caso de la simulación conceptual de un pozo con los datos del yacimiento Hamaca se analizaron los esquemas de calentamiento radial, Banda 0 y Banda 1 y Banda 10, luego de monitorear la distribución del donante del hidrógeno en el yacimiento, tal y como se presentará en la sección de Resultados. El modelo de calentamiento radial fue estudiado por Salazar ^[9], encontrando que con ésta herramienta se alcanzan mayores temperaturas ($T > 250$ °C) y mayores gravedades API ($API > 22$ °) durante más tiempo que con la técnica de Inyección Alternada de Vapor.

III.7 ANÁLISIS DEL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO

Para el análisis del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento fue necesario realizar algunos estudios previos de esquemas más simplificados. Dichos esquemas consisten en analizar separadamente la tecnología del fracturamiento hidráulico y del calentamiento electromagnético. Los resultados obtenidos contribuyen al acoplamiento del esquema final de calentamiento y fractura para su posterior análisis.

En primer lugar se realizó la simulación numérica conceptual del caso “base”, el cual contempla la producción natural de un pozo vertical con los parámetros de los yacimientos Tía Juana y Cerro Negro, incluyendo las propiedades de los fluidos allí presentes. Estos resultados se tomaron como “base” para la evaluación de las simulaciones de los pozos fracturados con o sin calentamiento dieléctrico. Entre las variables observadas se encuentran: la producción acumulada de crudo, tasa de producción diaria, presión promedio del yacimiento, relación Gas-Petróleo (RGP), viscosidad del crudo en la boca del pozo y la presión de fondo fluyente, todos en función del tiempo.

Seguidamente se estudió la simulación conceptual de un pozo vertical con fractura sin calentamiento (esquema Yacimiento-Fractura). Este esquema sirvió para asegurar la convergencia del modelo y para conocer el efecto de los parámetros más importantes de una fractura hidráulica en la producción del pozo. La técnica de

fracturamiento en yacimientos de crudos pesados y extra pesados (CP/XP) no es común, ya que la mayor parte de éstos se encuentran constituidos por arenas no consolidadas. Por esta razón, la realización de una fractura en el modelo estudiado se utilizó con la finalidad de introducir en el yacimiento un material con mayor capacidad de absorción de ondas electromagnéticas (RF o MW) en comparación con las arenas y los fluidos allí presentes.

Para este modelo se realizaron sensibilidades en el largo de la fractura, considerando valores de 40, 70 y 200 pies, y tomando la altura como constante y variable con la longitud de la misma, lo cual corresponde a simplificaciones de una fractura Radial. Al no observar cambios en la producción de crudo debido a la variación en el largo de la fractura, se realizaron sensibilidades en la permeabilidad del yacimiento hasta observar cambios en la producción de crudo por efecto de dicho parámetro. También se repitió la simulación del caso base (producción natural sin fractura) para los valores de permeabilidad estudiados. Se fijó una permeabilidad de la arena de 100 mD y se analizó la variación en la altura de la fractura, considerando que ésta crece verticalmente en la zona de interés hasta llegar a una barrera o tope ^[22] a la altura de 140 pies. Se estudiaron 2 casos de altura: constante y variable con la distancia, que se corresponden con las geometrías presentadas anteriormente. Finalmente, se seleccionó una geometría de fractura para la realización de los análisis del caso Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

En la Tabla N° 3.3 se presenta un resumen de los análisis realizados para evaluar el esquema Yacimiento-Fractura, incluyendo el rango de valores estudiados para cada variable.

Tabla N° 3.3: Variables de análisis del modelo Yacimiento-Fractura.

Variable a analizar	Rango
Permeabilidad	Tía Juana: 9 a 900 mD Cerro Negro: 75 a 12000 mD
Largo de la fractura	40-200 pies
Altura de la fractura	Constante y variable con la distancia

Una vez analizado el esquema Yacimiento-Fractura, se prosiguió con el análisis del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento. Para ello se proponen 5 modelos de calentamiento para la aplicación de calentamiento electromagnético: Banda 0, Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial, que fueron descritos en la sección III.6. Para cada uno de estos modelos se realizaron los análisis que se describen a continuación utilizando el comando HEATR, tal y como se explicó en la sección III.3.

Se estudió el rango de potencias aplicables y se determinó el intervalo de frecuencias con las que se obtiene una mayor producción de crudo. Para ello se estudio la variación de la producción acumulada de crudo y la temperatura máxima del yacimiento obtenida del modelo de simulación, para un rango de potencias seleccionadas y para las frecuencias comerciales de radiación que van desde los 13,56 hasta los 2450 MHz. Esto se repitió para cada material apuntalante estudiado (Fe_2O_3 , ALFE y JL-P). Con todos estos datos se seleccionó una potencia de calentamiento en la que ninguna combinación de apuntalante, frecuencia y potencia presentara temperaturas superiores a 500 ° F, que corresponde a la temperatura máxima en este estudio. A esta potencia fija se observó la frecuencia de radiación que aporta la mayor producción de crudo para cada apuntalante, y se compararon estos casos para así obtener un esquema de frecuencia óptima y material apuntalante óptimo para cada modelo de calentamiento.

Con el esquema óptimo de frecuencia y apuntalante para cada modelo de calentamiento se analizó el efecto de la geometría de la fractura para corroborar si los resultados tenían un comportamiento similar al del caso Yacimiento-Fractura. Se realizaron sensibilidades en la frecuencia para cada uno de los largos de fractura estudiados (40, 70 y 200 pies) para comprobar el cambio de frecuencia óptima con la longitud de la fractura.

También se verificó la frecuencia óptima de calentamiento, evaluando valores de frecuencia no comerciales que fueron tomados de los trabajos de Mouris y col. [23-36], los cuales son utilizadas para la medición de las constantes dieléctricas de los

materiales estudiados. Dichos valores se reportan en la Tabla N° 3.4 con su valor correspondiente de Dp, el cual fue calculado a través de la expresión 2.3.

Tabla N° 3.4: Valores de las frecuencias no comerciales y su valor de Dp correspondiente.

Frecuencia (MHz)	54	163	272	381	397
Dp(m)	69,2	30,3	15,9	13,9	7,3
Frecuencia (MHz)	490	599	707	814	912
Dp(m)	9,7	13,3	8,2	8,1	4,5
Frecuencia (MHz)	1015	1499	1977	2466	2986
Dp(m)	6,7	3,2	2,7	2,2	1,8

Para el modelo de calentamiento Banda 0 y el caso Tía Juana se analizó el impacto de la variación de la conductividad térmica del apuntalante en la temperatura de las celdas: (24,23,2) y (24,15,2) ubicadas en la fractura, (22,23,2) y (22,15,2) que se encuentran cercanas a la fractura y (20,23,2), (20,15,2), (18,23,2) y (18,15,2) que se encuentran alejadas de la fractura. Para ello se tomaron valores de la conductividad del apuntalante de 2, 4, 6 y 10 veces su valor inicial y se observó el impacto de dicha variación en la temperatura de las celdas.

En la Tabla N° 3.5. se presenta un esquema de las variables y los análisis realizados para la simulación conceptual bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Tabla N° 3.5 : Variables de análisis del modelo Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Variable a analizar	Rango de análisis
Potencia de la fuente	Tía Juana: 0-200 kW; Cerro Negro: 0-50 kW
Frecuencias comerciales	13,56; 40; 163; 915 y 2450 MHz
Otras frecuencias no comerciales	54, 272, 381, 490, 599, 707, 814, 1015 MHz.
Largo de la fractura	40, 70 y 200 pies
Altura de la fractura	Constante y variable con la distancia
Tipo de Material Apuntalante	AlFe, JL-P, Fe ₂ O ₃
Modelo de Calentamiento	Banda 0, Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial.
Conductividad Térmica (CT)	Calentando en modelo Banda 0: 2, 4, 6 y 10 veces el valor real de la CT (Sólo Yacimiento Tía Juana)

III.8 ANÁLISIS DEL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO ACOPLADO AL MODELO DE MEJORAMIENTO DE CRUDO EN SUBSUELO CON DONANTES DE HIDRÓGENO.

Para el análisis del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento integrado al modelo de mejoramiento de crudo desarrollado y validado por Ovalles et al. ^[11,29-31] y Fonseca ^[9], fue necesario realizar algunos estudios previos de esquemas más simplificados, cuyos resultados contribuyen la convergencia del esquema final de calentamiento y fractura.

En primer lugar se realizó la simulación del modelo de mejoramiento haciendo una comparación entre el calentamiento dieléctrico la inyección de vapor, ambas técnicas usadas como fuente de calentamiento para la reacción de mejoramiento. Los cálculos y restricciones aplicadas para este análisis se presentan más adelante en esta misma sección.

Seguidamente se realizaron simulaciones utilizando el calentamiento dieléctrico en el modelo Yacimiento-Calentamiento (sin fractura), lo cual sirvió como caso “base” para la evaluar el efecto de la fractura en el modelo de mejoramiento. En este caso se utilizó el modelo de calentamiento Radial, tal y como se encuentra explicado en la sección III.6.5. Se examinaron los rangos de potencia y las frecuencias comerciales de calentamiento con la finalidad de establecer una combinación de potencia mínima y frecuencia de radiación con la cual la temperatura supere los 500 °F, que corresponde al valor mínimo en este estudio. Se tomó como base de evaluación la temperatura de la zona más caliente del modelo de simulación, correspondiente a la celda (2,5,5). Dicha celda se encuentra contigua al pozo, pertenece a la fractura y está a una altura intermedia de la zona de interés.

Una vez establecida la combinación de potencia y frecuencia de calentamiento, se analizó la variación de la °API de crudo acumulado en tanque en función del tiempo, para diferentes temperaturas máximas de calentamiento. La temperatura máxima de calentamiento viene dada por el uso del comando UHTR, tal y como se explicó en la sección III.3. Dicho comando emula el uso de un controlador de tipo “on/off”, el cual maneja la tasa de transferencia de calor proporcional para controlar la temperatura del yacimiento. De esta manera, se controlan las temperaturas de manera que no se sobrepasen los valores máximos establecidos.

En la Tabla N° 3.6 se presenta un resumen de los análisis realizados para evaluar el esquema Yacimiento-Calentamiento, incluyendo el rango de valores estudiados para cada variable.

Tabla N° 3.6: Variables de análisis del modelo Yacimiento-Calentamiento.

Variable a analizar	Rango
Potencia de calentamiento (kW)	200, 300, 400, 500, 600
Frecuencia de radiación (MHz)	13,56; 40; 163; 915; 2450
Temperatura máxima de la fuente de calentamiento (°F)	500, 550, 600, 650

Luego se evaluó el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento en donde se utilizó una malla de simulación que incluye la fractura, tal como se presentó en la sección III.4.7. Para la selección del modelo de calentamiento, se llevó a cabo un seguimiento de la concentración del donante de hidrógeno para observar su recorrido por el yacimiento durante el proceso de inyección, el cual se describe en detalle más adelante.

Para la simulación del calentamiento dieléctrico se evaluaron dos modelos de calentamiento: Banda 0 y Banda 10. Ambos modelos se encuentran explicados con detalle en las secciones III.6.1 y III.6.3. De igual forma, se estudió el aporte de los materiales apuntalantes Fe_2O_3 , ALFE y JL-P para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento. Al igual que para el estudio del esquema Yacimiento-Calentamiento, se examinaron los rangos de potencia y las frecuencias comerciales de calentamiento para cada apuntalante y modelo de calentamiento, para establecer una combinación de potencia mínima y una frecuencia de radiación en la cual la temperatura supere los 500 °F (temperatura mínima). Una vez establecida la combinación de potencia y frecuencia de calentamiento óptima para cada apuntalante y modelo de calentamiento, se analizó la variación de la °API de crudo acumulado en tanque en función del tiempo, para diferentes temperaturas máximas de calentamiento.

Tomando en cuenta la variación de la gravedad API del crudo acumulado en tanque en función del tiempo se realiza la comparación entre los casos que producen el mayor volumen de crudo mejorado con el objetivo de establecer un escenario óptimo para cada modelo de calentamiento. También se estima el volumen de crudo producido por cada uno de los escenarios óptimos de los modelos de calentamiento. En la Tabla N° 3.7 se presenta un resumen de los análisis realizados para evaluar el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, incluyendo el rango de valores estudiados para cada variable.

Tabla N° 3.7: Variables de análisis del modelo Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Variable a analizar	Rango
Modelo de calentamiento	Banda 0, Banda 10
Materiales apuntalantes	Fe ₂ O ₃ , ALFE, JL-P
Potencia de calentamiento (kW)	Banda 0: 200, 300, 400 Banda 10: 200, 300, 400, 500, 600
Frecuencia de radiación (MHz)	13,56; 40; 163; 915; 2450
Temperatura máxima de la fuente de calentamiento (°F)	500, 550, 600, 650

Finalmente, todos los casos óptimos de cada modelo fueron comparados para llegar a un resultado global del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento en subsuelo con donantes de hidrógeno. En la simulación del caso óptimo se estudian los perfiles de flujo tanto del crudo como del donante en el yacimiento, así como el perfil de temperaturas producto del calentamiento dieléctrico.

III.8.1 Cálculos para el análisis de isoenergía.

Se calculó la energía total entregada al yacimiento como la energía que entrega el vapor al condensarse. Por lo tanto, la energía que proviene de los 27000 bbls de vapor de agua que se inyectan en el caso del calentamiento con vapor se igualó al caso del calentamiento dieléctrico, utilizando altas potencias para así lograr una comparación a la cual se denominó “isoenergética”. Para el cálculo de la energía entregada por los 27000 bbls de vapor se siguieron los pasos descritos a continuación:

- La temperatura de inyección del vapor de agua es de 590 °F. A esta temperatura, y tomando las lecturas de las tablas de vapor suministradas por el simulador Stars, los valores de la entalpía de líquido y vapor saturado son: $H_f=10339$ BTU/lbmol y $H_g=20602$ BTU/lbmol.
- El vapor de agua inyectado se estima con una calidad $q=0.75$.

- La entalpía de la mezcla líquido-vapor viene dada por la relación: $H_m = H_f + q \cdot (H_g - H_f)$. Haciendo el cálculo para la entalpía de la mezcla se obtiene un valor de $H_m = 18047 \text{ BTU/lbmol} = 1003 \text{ BTU/lb}$.
- Se inyectaron 27000 bbls de vapor (que equivalen a 9487996 lb), por lo que el aporte total de energía será: $E = 1003 \text{ BTU/lb} \times 9487996 \text{ lb} = 9,52 \times 10^9 \text{ BTU}$. Por lo tanto, la cantidad de energía que se debe inyectar en el yacimiento para hacer una comparación isoenergética con la técnica de inyección de vapor es de $9,52 \times 10^9 \text{ BTU}$.

Para la comparación “isoenergética” entre el calentamiento con inyección de vapor y con energía electromagnética se tomaron las siguientes condiciones:

- La malla de simulación utilizada para el modelo con calentamiento dieléctrico es exactamente igual al usado por Salazar ^[9] con Inyección de vapor. Esta malla es de tipo Radial y no presenta fracturamiento hidráulico, por lo que se utiliza como caso “base” de este estudio (Yacimiento-Calentamiento, sin fractura). Se puede observar con detalle en la Figura N°. 3.17

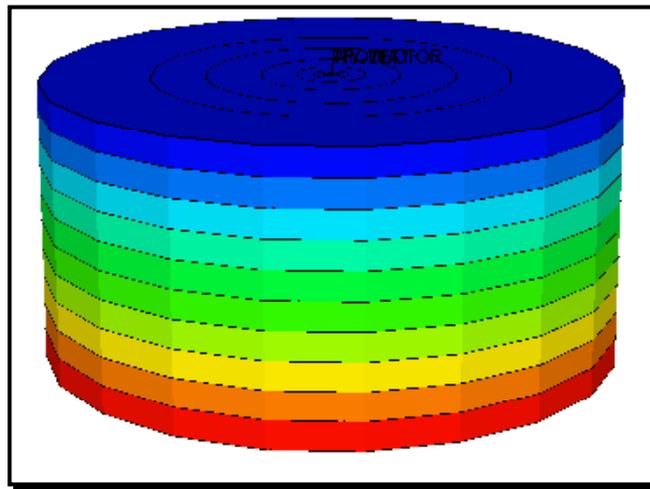


Figura N° 3.17: Malla utilizada para modelar el caso Yacimiento-Calentamiento, en el estudio “isoenergético” entre calentamiento dieléctrico e IAV.

- El volumen total de donante de hidrógeno inyectado al yacimiento es de 27.000 bbls en ambos casos.

- La fuente de calentamiento “on/off” que se apaga a los 120 días, lo cual corresponde al mismo tiempo que dura un ciclo completo de Inyección de vapor.
- La restricción más importante consistió en lograr que la energía total suministrada por la fuente del calentamiento dieléctrico fuese de un valor cercano a la entregada en el caso de la inyección de vapor. Para ello se realizaron sensibilidades aumentando la potencia de calentamiento hasta que el valor de la energía acumulada que se entrega al yacimiento durante 360 días (valor que se obtiene directamente del simulador Stars) es, al menos, del mismo orden de magnitud que el valor arrojado por la inyección de vapor: 10^9 BTU.

III.8.2 Selección de los modelos de calentamiento.

Una de las limitantes del modelo de mejoramiento radica en que la reacción química requiere de un mínimo de concentración de donante de hidrógeno y de crudo (0,4%), además de que ambos se encuentran en iguales proporciones (1:1). Adicionalmente, la reacción se activa por encima de los 500 °F, por lo tanto también es necesario tener temperaturas superiores a este valor.

Para seleccionar los modelos de calentamiento más apropiados para la evaluación del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, se llevó a cabo un seguimiento del donante de hidrógeno, para observar su recorrido por el yacimiento durante el proceso de inyección, a fin de ubicar las zonas que se encuentran en contacto directo con dicho fluido.

El seguimiento en la concentración del donante de hidrógeno se realizó a través de simulaciones numéricas del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, en donde se anularon las reacciones químicas para poder ver el recorrido del volumen total inyectado. Para el día 20 de simulación se había inyectado todo el donante, por lo que se chequearon los perfiles de concentración de donante para este tiempo. En las Figuras N° 3.18-20 se presentan los perfiles de concentración del donante de hidrógeno, en todo el yacimiento (Fig. 3.18), a través de una vista areal (Fig. 3.19) y a través de un corte transversal en el área de la fractura (Fig. 3.20).

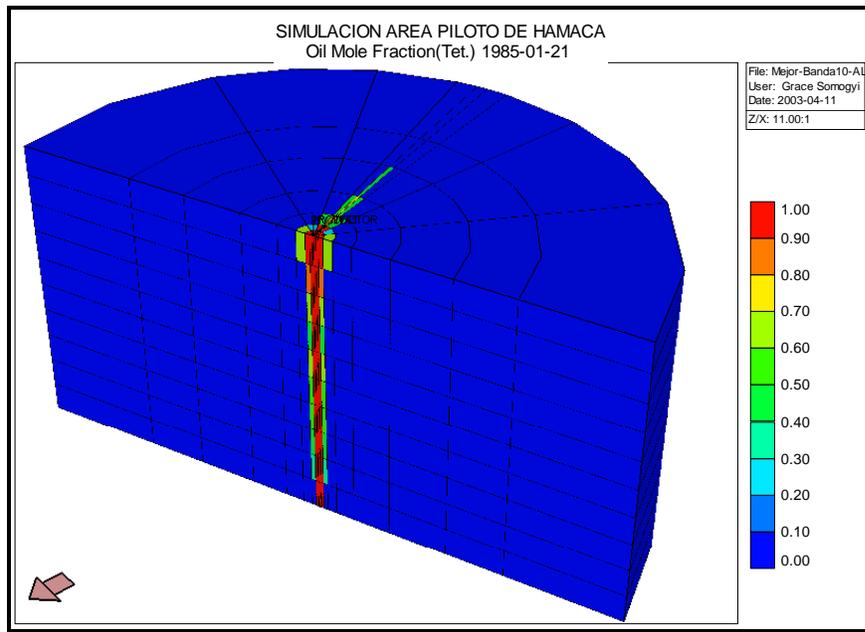


Figura N° 3.18: Perfiles de concentración del donante de hidrógeno en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, para el día 20 de simulación.

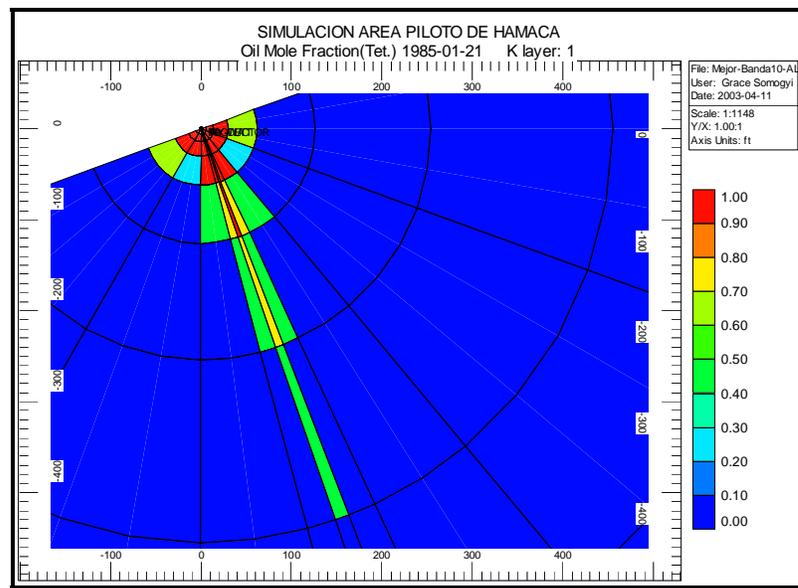


Figura N° 3.19: Perfiles de concentración del donante de hidrógeno en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el día 20 de simulación. Vista areal de la parte superior de la malla.

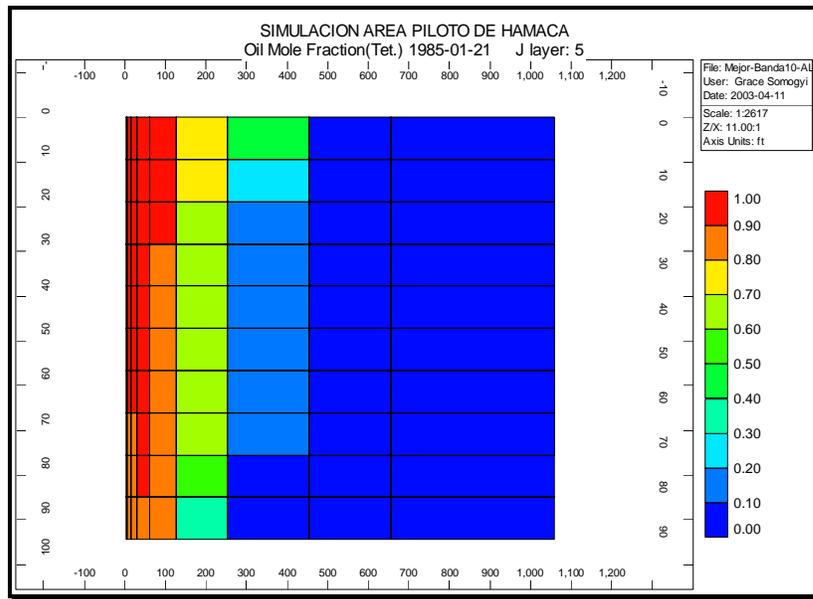


Figura N° 3.20: Perfiles de concentración del donante de hidrógeno en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el día 20 de simulación. Vista lateral de las celdas que componen la fractura.

Se puede ver que el donante de hidrógeno contacta toda el área circundante al pozo, tal y como se muestra en la Figura N° 3.18. Las mayores concentraciones se presentan en las celdas que contienen a la fractura. Este resultado es lógico considerando que la fractura es un canal de alta permeabilidad. Debido a lo anterior, se observa que el donante penetra en el yacimiento a través de la fractura, como se muestra en la Figura N° 3.19.

Analizando los resultados obtenidos, se tiene que las concentraciones de interés de donante de hidrógeno (mayores a 0,4 %) se presentan en:

- Las celdas alrededor del pozo hasta un radio de 30 pies.
- Las celdas que contienen la fractura, hasta una longitud de 254 pies hacia el interior del yacimiento.
- Las celdas adyacentes a la fractura, hasta una longitud de 126 pies hacia el interior del yacimiento.

Por lo tanto, la zona a calentar es la zona compuesta por la fractura y por las celdas que se encuentran adyacentes a la misma. Revisando entre los modelos de

calentamiento detallados en la sección III.6 se tiene que los modelos Banda 0 y Banda 10 son los adecuados para realizar el calentamiento de las zonas.

III.8.3 Cálculo del volumen de reacción del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento y de los perfiles de temperatura y flujo de fluidos.

Para el cálculo del volumen de reacción en el yacimiento se tomaron las secciones del modelo de simulación que, al finalizar el período de 20 días de inyección de donante y calentamiento, cumplen con las siguientes condiciones:

- Temperaturas iguales o mayores a 500 °F
- Saturación del donante de hidrógeno por encima de un 40%
- Saturación de crudo por encima de 40%.

Los perfiles de temperatura, saturación de donante de hidrógeno y saturación de crudo para el día 20 de simulación se obtienen del simulador STARS[®], para los modelos de calentamiento Banda 0 y Banda10. Una vista de las celdas de la fractura con los perfiles mencionados se presentan a continuación en las Figuras N° 3.21-23 para el modelo de calentamiento Banda 0.

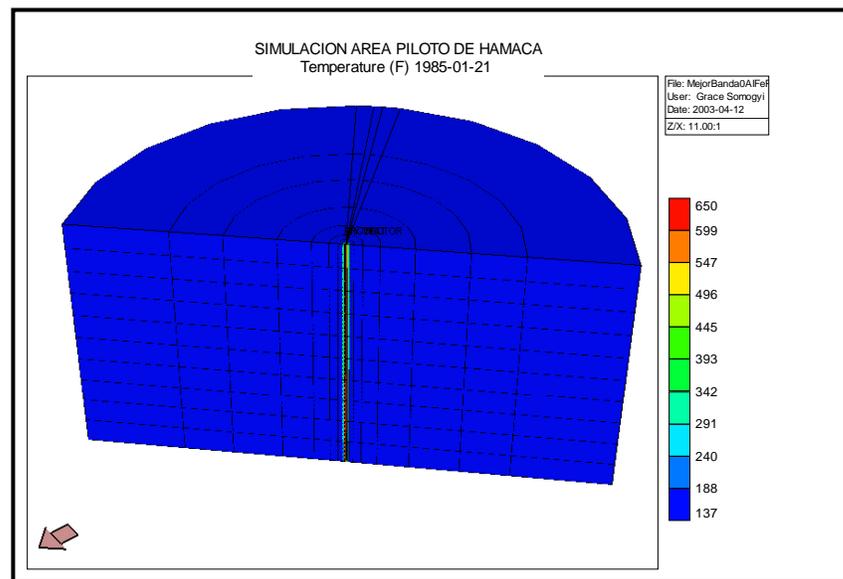


Figura N° 3.21: Perfil de Temperatura en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el día 20 de simulación. Vista completa del yacimiento. Modelo Banda 0.

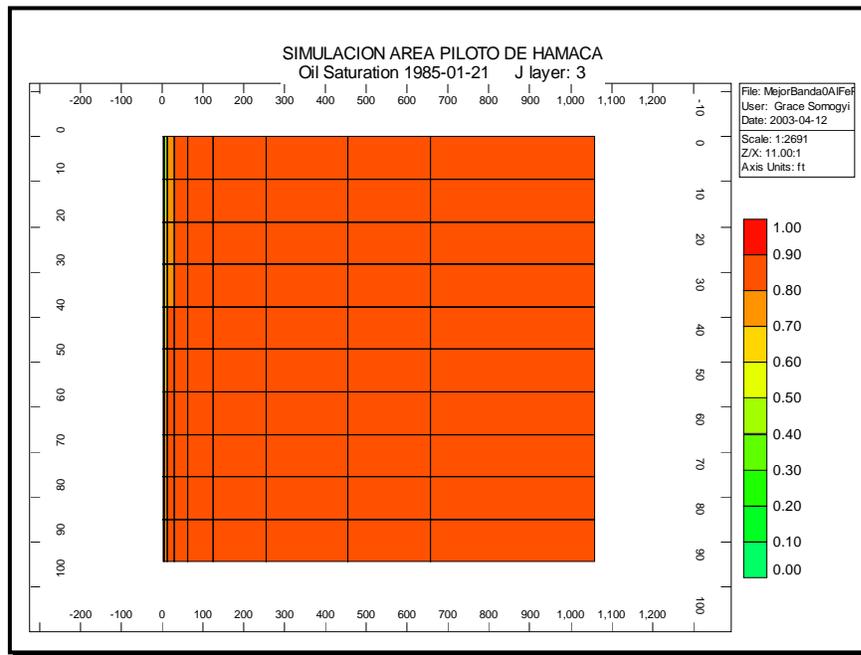


Figura N° 3.22: Perfil de concentración de crudo en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el día 20 de simulación. Vista lateral de la fractura. Modelo Banda 0.

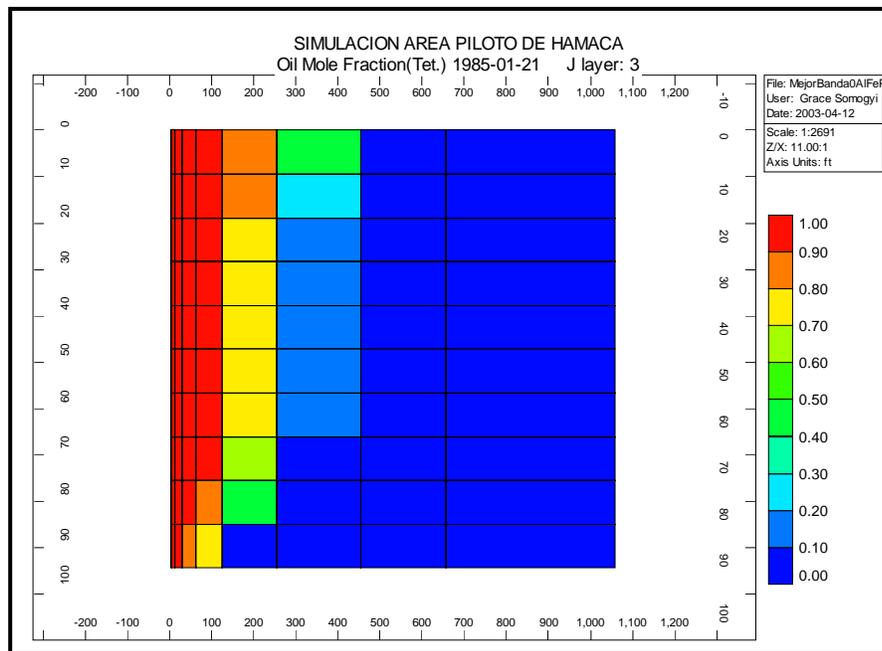


Figura N° 3.23: Perfil de concentración de crudo en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el día 20 de simulación. Vista lateral de la fractura para el modelo Banda 0.

Se observa que las temperaturas por encima de los 500 °F se presentan en el centro de la arena productora en el área adyacente al pozo. De igual manera se tiene que la saturación de crudo es alta en las celdas alejadas al pozo, y baja en el área adyacente al mismo. Finalmente se puede ver que las concentraciones de donante de hidrógeno son altas en las cercanías al pozo, y que decaen hacia el interior del yacimiento.

Para llegar al volumen de arena en que está ocurriendo la reacción, se realizó la comparación entre las celdas que presentan las condiciones de temperatura y saturación de fluidos. A continuación se presenta, en la Tabla N° 3.8, una muestra de cómo se realizó dicha comparación para las celdas (i,5,1), que corresponden a las celdas que componen la fractura en la capa 1 del yacimiento. Se puede ver en color rojo aquellas celdas que cumplen con las condiciones deseadas y en amarillo el volumen de reacción que aportan las celdas al modelo. Este procedimiento se repitió para todas las celdas del modelo de calentamiento Banda 10.

Tabla N° 3.8: Saturación de Donante de hidrógeno, Crudo y Temperatura de las celdas de la fractura en la capa 1 del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, para el modelo Banda 0.

Coordenadas de la celda	Saturación de Donante de hidrógeno (%)	Saturación de Crudo (%)	Temperatura (°F)	Volumen de la celda (ft3)
2,5,1	0,71	0,60	599,9	5,27
3,5,1	0,73	0,71	447,1	26,37
4,5,1	0,73	0,79	399,4	116,01
5,5,1	0,74	0,85	210,7	485,14
6,5,1	0,82	0,87	139,3	1982,76
7,5,1	0,85	0,87	137,3	8015,42
8,5,1	0,53	0,87	137,3	23484,10
9,5,1	0,08	0,87	137,1	36799,60
10,5,1	0,00	0,87	136,9	113545,00

Finalmente, los cálculos indican que el volumen de reacción calculado para el modelo de calentamiento en Banda 0 corresponde a 1678 pies³ mientras que para el modelo de calentamiento en Banda 10 es considerablemente mayor, y corresponde a 4380 pies³.

Para realizar los perfiles de temperatura, de saturación de donante de hidrógeno y de saturación de crudo en función del tiempo se siguió un proceso similar al descrito anteriormente, pero para varios valores en el tiempo. Se estimaron los perfiles para la zona comprendida por la fractura y se tomaron valores para tiempos de 5, 10 y 20 días, correspondiente al tiempo de inyección del donante de hidrógeno. En estos tiempos se buscaron las celdas de la malla que presentaran: a) temperaturas superiores a 500 °F para el caso del perfil de temperaturas, b) saturación de crudo por encima de 40% para el caso del perfil de saturación de crudo y, c) saturación de donante por encima de 40% para el caso del perfil de saturación de donante de hidrógeno.

CAPÍTULO IV

APLICACIÓN DEL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA- CALENTAMIENTO PARA RECUPERACION MEJORADA DE PETROLEO

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones numéricas conceptuales de un pozo vertical con parámetros típicos de yacimientos de crudos pesados y extra pesados (CP/XP). En estas simulaciones se evalúa el efecto de una fractura hidráulica en conjunto con diferentes esquemas de calentamiento dieléctrico, en donde esta última técnica se utiliza como una herramienta para la recuperación mejorada de petróleo.

En este trabajo se utilizaron los datos de los yacimientos Tía Juana y Cerro Negro, así como las propiedades termodinámicas de los fluidos allí presentes para realizar las simulaciones. Estos dos yacimientos han sido escogidos para este estudio por varias razones: 1) poseen características típicas de CP/XP venezolanos; 2) los fluidos que contienen dichos yacimientos presentan propiedades, tales como ° API, cuyos valores se encuentran en los límites del rango establecido para este tipo de crudos; 3) se conocen las propiedades dieléctricas y termodinámicas de las arenas y fluidos, etc.

Los resultados se encuentran divididos en dos secciones, una para cada yacimiento estudiado. Las simulaciones numéricas conceptuales de los yacimientos se iniciaron con el modelaje del caso “base”, el cual contempla la producción natural de un pozo vertical. Luego se realizó la evaluación de diferentes escenarios del caso “base” los cuales incluyen la simulación conceptual de un pozo con fractura sin calentamiento (esquema Yacimiento-Fractura) y la de un pozo con calentamiento pero sin fractura (Yacimiento-Calentamiento). La evaluación del esquema Yacimiento-Fractura en frío sirvió para asegurar la convergencia del modelo y conocer el efecto de los parámetros más importantes de una fractura en la producción del pozo. La evaluación de la técnica de calentamiento a fondo de pozo con energía electromagnética (RF o MW) con los yacimientos seleccionados se basó en los resultados de los trabajos de Ovalles y col.^[5,6,12]. Por último se analizó el esquema

Yacimiento-Fractura-Calentamiento mediante la simulación conceptual de un pozo fracturado y calentado con energía electromagnética (RF o MW) de los yacimientos Tía Juana y Cerro Negro. El efecto de parámetros tales como potencia de calentamiento, frecuencia de radiación, material de relleno y geometría de la fractura, y modelo de calentamiento se evaluaron observando su impacto sobre la producción acumulada de crudo y la temperatura del yacimiento. Asimismo se verificó la geometría óptima de la fractura, a través de la evaluación de su largo y su altura, y se determinó el material apuntalante óptimo.

IV.1 ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO CUANDO ES APLICADO AL YACIMIENTO TÍA JUANA

Seguidamente se presentan los resultados de las simulaciones numéricas conceptuales de un pozo vertical que ha sido modelado con parámetros del yacimiento Tía Juana, y con las propiedades de los fluidos allí presentes. En dicho modelo, el pozo ha sido fracturado hidráulicamente y es calentado con energía electromagnética. Esta última técnica se evalúa como una herramienta para la recuperación mejorada de petróleo, y se aplica mediante diferentes esquemas que son analizados a continuación.

IV.1.1 Simulación conceptual de un pozo bajo producción natural para el caso Tía Juana

Para determinar el efecto del calentamiento electromagnético en un pozo fracturado fue necesario estudiar un pozo con producción natural. Estos resultados se tomaron como caso “base” para la evaluación de las simulaciones de los pozos fracturados con o sin calentamiento dieléctrico.

Los resultados de la simulación conceptual para la producción natural del yacimiento Tía Juana se presentan en las Figuras N° 4.1.a-f. En ellas se presenta la producción acumulada de crudo, tasa de producción diaria, presión promedio del yacimiento, relación Gas-Petróleo (RGP), viscosidad del crudo en la boca del pozo y la presión de fondo fluyente, todos en función del tiempo.

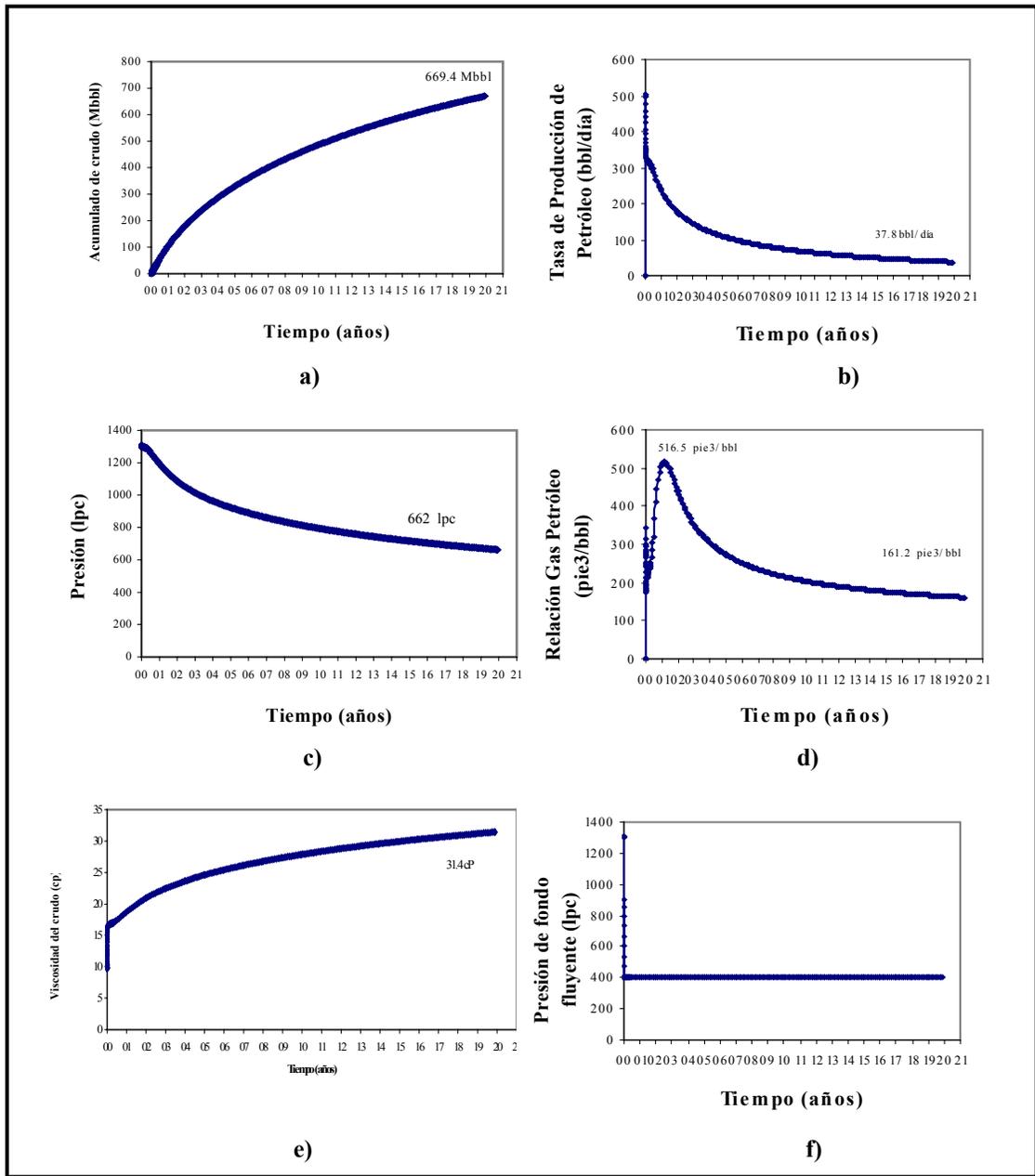


Figura N° 4.1: Simulación conceptual de un pozo con los datos del Yacimiento Tía Juana: a) Producción acumulado de crudo, b) Tasa de producción diaria, c) Presión promedio del yacimiento, d) Relación Gas Petróleo, e) Viscosidad del crudo en tanque, f) Presión de fondo fluente.

Se observó que la producción acumulada de crudo aumenta en función del tiempo, hasta llegar a un valor de 669,4 Mbbbl en 20 años. La tasa de producción

diaria decae progresivamente, desde el valor máximo asignado al simulador (500 bbl/día) hasta 37,8 bbl/día, lo cual equivale a una producción promedio de casi 92 bbl/día. La presión promedio del yacimiento disminuye desde su valor inicial en 1300 hasta 662 lpc.

La relación gas-petróleo (RPG) inicial (día 1 de la simulación) es de 315 pie³/bbl, y este valor va aumentando hasta llegar al máximo en el segundo año de producción de 516 pie³/bbl, para luego disminuir hasta 161 pie³/bbl al final de la simulación. Este comportamiento se debe al desprendimiento del gas disuelto presente en el crudo a medida que la presión del yacimiento disminuye. En los primeros dos años de producción, en los que la presión promedio del yacimiento es alta, se produce la liberación de la mayor parte del gas que se encuentra en el crudo, y como la movilidad de ésta fase es mayor que la del crudo, se produce un incremento en la RGP. Seguidamente el gas comienza a agotarse y la presión en el yacimiento continúa cayendo, haciendo que la energía natural con la cual se produce el crudo disminuya.

La viscosidad del crudo aumenta con el tiempo, como consecuencia de la caída en la presión del yacimiento. Este resultado es lo esperado, pues al tratarse de crudo vivo la cantidad de gas que se encuentra disuelta en el crudo disminuye con la caída de la presión, por lo que la viscosidad aumenta. La presión de fondo fluyente se corresponde con la presión del yacimiento para el momento en que comienza la simulación, y luego disminuye abruptamente hasta estabilizarse en 400 lpc, manteniéndose constante durante toda la simulación.

IV.1.2 Simulación conceptual de un pozo bajo el esquema Yacimiento-Fractura sin calentamiento para el caso Tía Juana.

Una vez conocido el comportamiento del pozo en producción natural, se realizó la simulación conceptual de un pozo fracturado, que en este trabajo se conoce como esquema Yacimiento-Fractura, en donde aún no se ha aplicado calentamiento electromagnético. Esto permitió asegurar la convergencia del modelo de simulación y

determinar el impacto de los parámetros más importantes de la técnica de fracturamiento hidráulico en la producción del pozo.

El análisis del esquema Yacimiento-Fractura se realizó a través de la simulación conceptual de un pozo vertical con una fractura horizontal. La técnica de fracturamiento en yacimientos de crudos pesados y extra pesados (CP/XP) no es común, ya que la mayor parte de éstos se encuentran constituidos por arenas no consolidadas. Cabe destacar que la fractura se utilizó para introducir en el yacimiento un material de mayor absorción de ondas electromagnéticas (RF o MW) que la de las arenas y los crudos allí presentes.

El impacto de la geometría de la fractura en el esquema Yacimiento-Fractura fue evaluado a través de sensibilidades en el largo de la fractura, considerando valores de 40, 70 y 200 pies y tomando la altura como constante con la longitud de la misma. Los resultados se presentan a continuación en las Figuras N° 4.2.

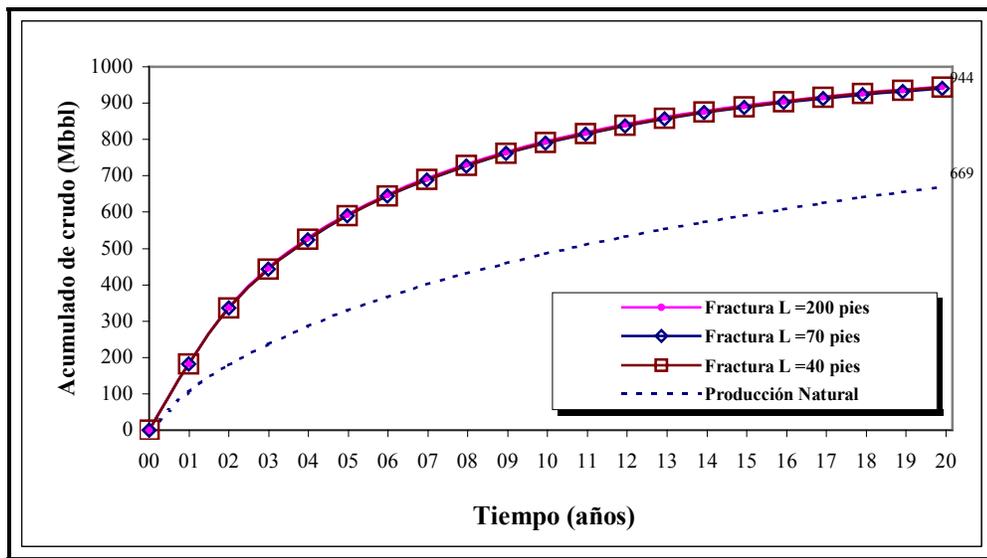


Figura N° 4.2: Variación del largo de la fractura (L) en el esquema Yacimiento-Fractura para el caso Tía Juana (permeabilidad de 900 mD).

En ninguno de los casos estudiados se aprecian diferencias en la producción de crudo por efecto de la variación en el largo la fractura. Sin embargo, al comparar

con el caso base de producción natural, se observa un aumento de 41% en la producción al introducir la fractura.

Por lo antes expuesto se consideró hacer sensibilidades en otras variables de importancia antes de evaluar el efecto de la altura de la fractura en la producción acumulada de crudo. Al analizar los diferentes parámetros que afectan la producción de crudo se encuentra que la transmisibilidad ($T=k \cdot h$) es una de las propiedades más importantes en lo que respecta a la capacidad de movimiento de un fluido en un medio poroso. Por dicha razón, se escogió variar la permeabilidad del yacimiento hasta observar cambios en la producción de crudo por efecto de la variación en el largo de la fractura.

Tomando en cuenta la permeabilidad real del yacimiento (900 mD), se realizaron sensibilidades en el rango de 900 a 9 mD. Para ilustrar la tendencia de la producción en función de la permeabilidad, se analiza en primer lugar la producción acumulada de crudo para los largos de fractura estudiados, con permeabilidades de yacimiento de 500 y 100 mD. Para poder realizar comparaciones con el caso base de producción natural, se realizaron nuevamente simulaciones de este caso para los valores de permeabilidad antes expuestos. Los resultados se presentan en las Figuras N° 4.3-4.

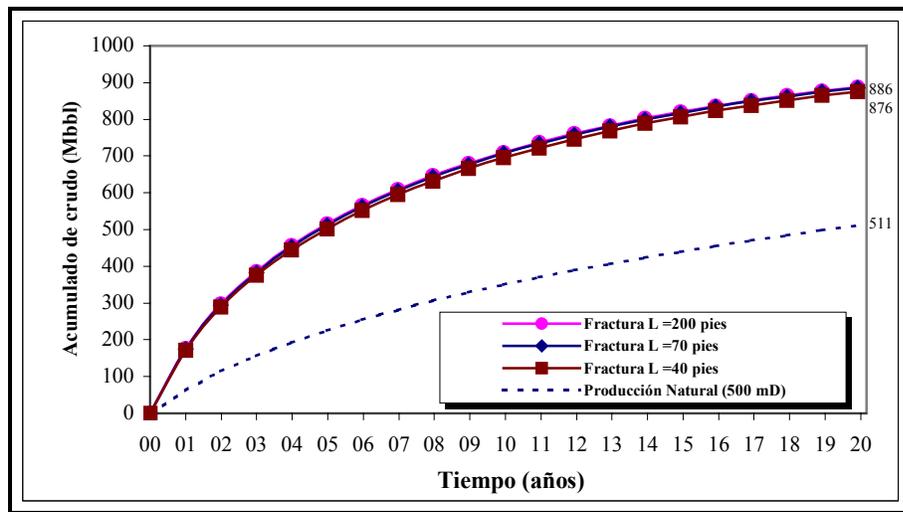


Figura N° 4.3: Producción acumulada de crudo variando del largo de la fractura, en el esquema Yacimiento-Fractura para el caso Tía Juana (500 mD).

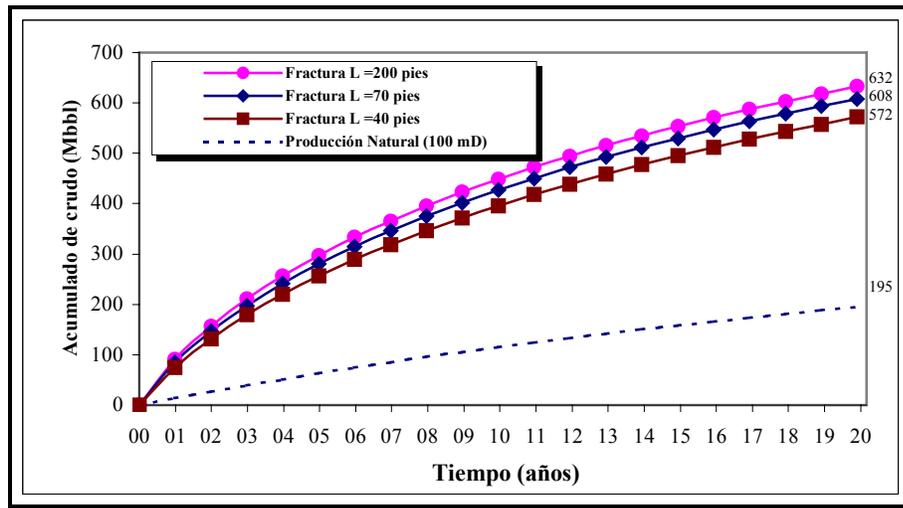


Figura N° 4.4: Producción acumulada de crudo variando del largo de la fractura, en el esquema Yacimiento-Fractura para el caso Tía Juana (100 mD).

A medida que la permeabilidad disminuye se observa un efecto en la producción acumulada de crudo con el largo de la fractura. Aún cuando continúa viéndose un aumento de la producción por la presencia de la fractura (aproximadamente 73% con 500 mD y 211% con 100 mD, con respecto a la producción natural para cada valor de permeabilidad), también se evidencia una disminución en la producción como consecuencia de la reducción de la permeabilidad del yacimiento. Esta disminución es aún más marcada en los casos de producción natural. Este resultado es de esperarse, puesto que la producción de crudo depende directamente de la permeabilidad de la arena: a menor permeabilidad, menor producción de crudo.

Con una permeabilidad de la arena de 100 mD se observa significativamente el efecto de la longitud de la fractura en la producción, obteniéndose una mayor producción a medida que se aumenta la longitud de fractura.

Para cuantificar el incremento de la producción de crudo debido al largo de la fractura se calculó el porcentaje de incremento para fracturas de diferentes largos (200 vs. 70 vs. 40 pies), con respecto al caso base, para cada permeabilidad evaluada.

También se calculó la diferencia de los porcentajes entre fracturas de diferentes largos. Los resultados se presentan en la Tabla N° 4.1.

Tabla N° 4.1: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes longitudes y con respecto al caso de producción natural, para diferentes permeabilidades del yacimiento Tía Juana.

% Incremento: Esquema Yacimiento-Fractura vs. Producción Natural			
Longitud de la fractura (L)	900 mD	500 mD	100 mD
40 pies	40,6%	71,4%	193,8%
70 pies	41,0%	73,4%	212,5%
200 pies	41,2%	73,8%	224,9%
Diferencia de % Incremento			
70 pies - 40 pies	0,5%	1,9%	18,7%
200 pies - 40 pies	0,7%	2,4%	31,2%
200 pies - 70 pies	0,2%	0,4%	12,5%

En todos los casos comparados se observa un incremento en la producción a medida que la permeabilidad disminuye. Para 40 pies de largo, la producción se incrementa en un 31% y luego en un 122%, al pasar de 900 a 500 y a 100 mD, respectivamente. Lo mismo ocurre con las longitudes de 70 y 200 pies.

También se ve cómo el % de incremento en la producción aumenta con el largo de la fractura. Se observa que la menor diferencia de producción se encuentra al restar los valores de 200 y 70 pies de longitud (0,2%, 0,4% y 12,5% para 900, 500 y 100 mD, respectivamente) lo cual evidencia que, para fracturas muy largas el impacto de la técnica de fracturamiento deja de ser notable. Para la permeabilidad de 100 mD se observan los mayores efectos en el aumento del largo de la fractura, pues al pasar de 40 a 70 pies de largo, se produce un incremento de 18,7%, mientras que al pasar de 70 a 200 pies el incremento es del 12,5%.

Debido a la necesidad de tener un escenario en el cual se pueda estudiar el efecto de la geometría de la fractura, y dado que con la permeabilidad real del yacimiento esto no es posible, se escogió disminuir este valor a 100 mD para el

estudio de los esquemas Yacimiento-Fractura y Yacimiento-Fractura-Calentamiento. La elección del valor de permeabilidad en 100 mD se debe a que, tal como se explicó anteriormente, para este valor las diferencias de producción de los yacimientos con diferentes largos de fractura son evidentemente notables, lo cual facilita el estudio de los parámetros relacionados con dicha técnica. En el Apéndice A se presenta un breve estudio de los esquemas Yacimiento-Fractura y Yacimiento-Fractura-Calentamiento utilizando la permeabilidad real de la arena (900 mD).

Igual al estudio del efecto del largo de la fractura, se analizó el efecto que tendría la variación en la altura de la fractura en la producción del esquema Yacimiento-Fractura. Este análisis se llevó a cabo tomando el valor de la permeabilidad del yacimiento de 100 mD previamente seleccionado. Se consideró que la fractura crece verticalmente en la zona de interés hasta llegar a una barrera o tope^[22], que se encuentra por encima y por debajo de la misma, por lo que, la fractura tendrá una altura inicial total de 140 pies.

Se estudiaron 2 casos de altura: constante y variable, para cada largo de fractura (40, 70 y 200 pies). Por consiguiente, se estudian 6 geometrías en total, tal y como se presentó en la sección III.4. Una representación de dichas geometrías se encuentra esquematizada en las Figura N° 4.5.a-b.

Las fracturas de altura constante tiene un área mayor que las de altura variable, por lo cual se desea analizar el impacto de ésta diferencia de altura en la producción de crudo. Para ello se realizaron simulaciones del esquema Yacimiento-Fractura haciendo sensibilidades en la altura de la fractura (constante o variable) para los largos estudiados. Los resultados se presentan en la Figura N° 4.6.

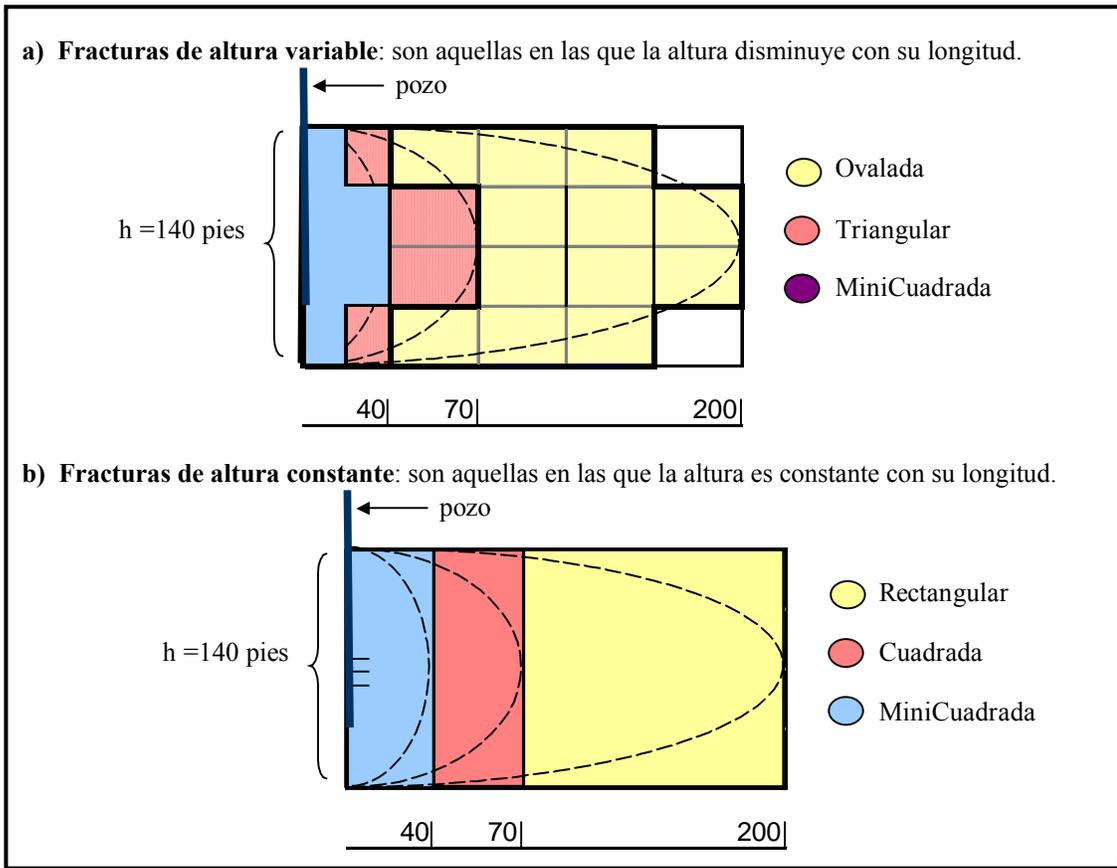


Figura N° 4.5: Diagrama de las geometrías de fractura estudiadas: a) altura variable y b) altura constante.

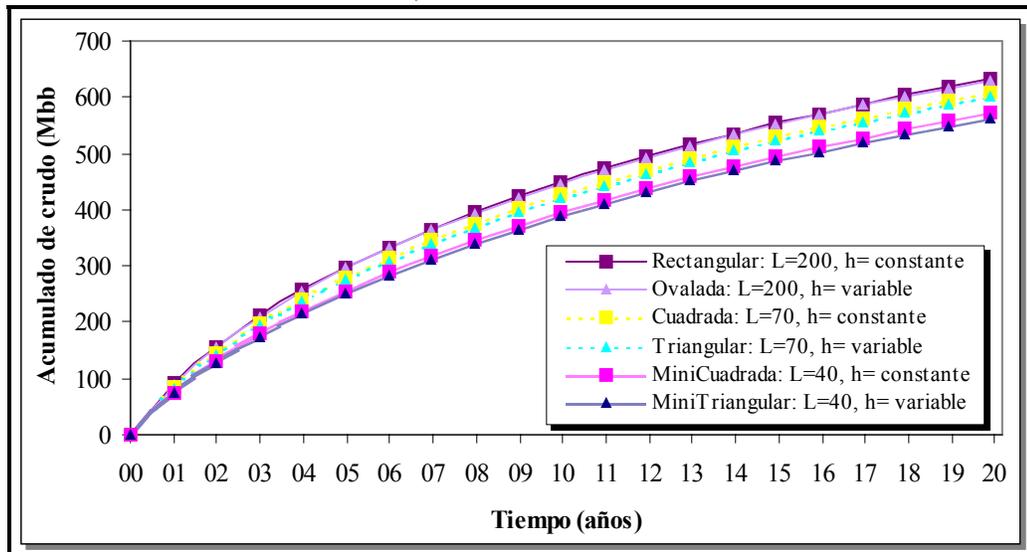


Figura N° 4.6: Variación de la geometría de la fractura en el esquema Yacimiento-Fractura para el caso Tía Juana con permeabilidad de 100 mD.

Para todos los largos evaluados, las fracturas con altura constante presentan una mayor producción acumulada de crudo con respecto a las fracturas de altura variable. A medida que la fractura es más corta, se nota más la diferencia de la producción acumulada de crudo entre fracturas con altura constante y variable: para 200 pies la diferencia es del 0,37%, mientras que para 70 y 40 pies es de 1,3% y 1,5%, respectivamente. La mayor diferencia de producción al comparar fracturas de diferentes alturas se presenta para 40 pies de largo.

Para cuantificar el incremento de la producción de crudo debido a la altura de la fractura se calculó el porcentaje de incremento de las fracturas de altura constante y variable para los largos estudiados (200 vs. 70 vs. 40 pies), con respecto al caso “base” (producción natural). También se calculó la diferencia entre los valores de altura constante y los de altura variable. Los resultados se presentan en la Tabla N° 4.2.

Tabla N° 4.2: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes alturas en el esquema Yacimiento-Fractura, yacimiento Tía Juana.

Longitud de la fractura (L)	% Incremento: Esquema Yacimiento-Fractura vs. Producción Natural		
	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-cte - h-var)
40 pies	193,8%	189,4%	4,4%
70 pies	212,5%	208,5%	4,0%
200 pies	224,9%	223,7%	1,2%

Tanto para las fracturas de altura variable como de altura constante, el porcentaje de incremento aumenta con el largo de la fractura. Se observa que la diferencia en el acumulado de crudo disminuye al aumentar el largo al comparar fracturas de diferentes alturas: decrece desde 4,4% a 4,0% y a 1,2% para 40, 70 y 200 pies de largo. Por lo tanto, la mayor diferencia se obtiene al comparar fracturas de diferentes alturas y 40 pies de largo. Este resultado indica que en los casos en que la longitud de la fractura esté por debajo de este valor, valdría la pena considerar la

altura de la fractura como un parámetro de importancia. Para valores cuya diferencia es menor al 5%, se considera que la variación de la producción por efecto de la altura de la fractura es despreciable.

A raíz de los resultados obtenidos se concluye que el efecto de las diferentes variables (longitud y altura) en la geometría de la fractura viene dada por:

- No se observó un efecto significativo de la variación de la altura de la fractura en la producción acumulada de crudo, puesto que la diferencia de producción obtenida al comparar fracturas de diferentes alturas es menor al 5% para todos los largos estudiados. Por esto se escogió modelar la fractura con una altura constante de 140 pies en toda su longitud.
- Para una zona de alta permeabilidad ($k \geq 100$ mD) la fractura va a crecer primero de manera vertical hasta llegar al tope de la arena productora y luego va a crecer de manera horizontal, lo cual se corresponde con el modelo *KGD*^[22]. Considerando que el pozo se encuentra completado en el centro de la arena en estudio la fractura crecerá bajo una forma radial^[22].
- Aún cuando siempre se observa un aumento de la producción de crudo con el largo de la fractura, la diferencia con respecto a al caso “base” disminuye con el largo de la fractura. De esta manera, al pasar de 40 a 70 pies del largo se observa una diferencia 1,5 veces superior de la que se observa al pasar de 70 a 200 pies de largo.

Considerando lo anterior, se escogió utilizar para este estudio una fractura de geometría radial, con una longitud de 70 pies y una altura constante de 140 pies. Esta geometría se corresponde con una fractura “Cuadrada”, en la cual el porcentaje de incremento en la producción con respecto al caso base es de 194%. El diseño de este tipo de fractura requiere una simplificación del modelo Radial^[22] que fue explicado con detalle en la sección III.4.4.

IV.1.3 Simulación conceptual de un pozo bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

En esta sección se presentan los resultados de la simulación conceptual de un pozo fracturado y calentado con energía electromagnética (RF o MW). Para ello se utilizaron los datos del yacimiento Tía Juana así como las propiedades de los fluidos allí presentes.

En este trabajo se proponen 5 modelos para la aplicación del calentamiento electromagnético en el pozo conceptual (ver sección III.6). Estos modelos propuestos están fundamentados en la suposición inicial de que, al calentar un área determinada con una cantidad de energía dada, las temperaturas obtenidas serán mayores al reducir la extensión de dicha área, debido a que dicha energía se encuentra concentrada. Teniendo en cuenta lo anterior, el calentamiento focalizado en la fractura es el modelo que concentra la energía en una menor área, por lo que se espera que presente las mayores temperaturas. Este modelo corresponde al modelo de calentamiento Banda 0.

Este esquema de calentamiento fue estudiado previamente por Ramírez^[8], quien evaluó el calentamiento electromagnético focalizado en la fractura en un pozo fracturado con agentes apuntalantes cuya profundidad de penetración (D_p) varía desde 0 hasta 250 m. Como se mencionó en el capítulo II, Ramírez^[8] encontró que con materiales con un D_p comprendido entre 60 y 140 m se obtienen incrementos en la producción acumulada de crudo hasta del 15%, con respecto al caso de un yacimiento fracturado sin calentamiento.

A partir del calentamiento focalizado en la fractura, se proponen cuatro modelos en los que el arco de radiación se va abriendo para calentar un área cada vez mayor comprendida por la fractura y por la arena productora. De acuerdo a la longitud del área que se está calentando estos modelos se denominaron *Banda 1*, *Banda 10* y *Banda 20*. El modelo en el cual la energía se reparte en toda la extensión del yacimiento se conocerá como calentamiento *Radial*, y se corresponde con los estudios de Ovalles y col^[5,6,12], como se mencionó en el capítulo II.

Para este trabajo se seleccionaron 3 materiales apuntalantes con propiedades dieléctricas conocidas: Fe_2O_3 , ALFE y JL-P, en los que la profundidad de penetración se encuentra en el rango de 0 a 70 m (ver Figura N° 3.3), tal y como se presentó en la sección de Metodología. Estas propiedades indican que los materiales seleccionados son buenos absorbentes de la radiación electromagnética, por lo que se desea estudiar su aporte al esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Se analizaron los rangos aplicables de potencia con la finalidad de seleccionar un valor apropiado y se determinó la frecuencia de radiación que produce un mayor acumulado de crudo para cada uno de los apuntalantes y modelo de calentamiento. Luego se realiza la comparación entre los casos estudiados para establecer un escenario óptimo en cada modelo de calentamiento.

Adicionalmente se analizó el efecto de la geometría de la fractura para verificar si se sigue una tendencia similar a la obtenida en el caso Yacimiento-Fractura descrito en la sección III.7. De igual manera se determinó la frecuencia de radiación óptima para cada largo de fractura estudiados y para cada modelo de calentamiento. Por último, para el modelo Banda 0 se analizó el efecto de la conductividad térmica del apuntalante en la temperatura del yacimiento.

IV.1.3.1 Análisis del modelo de calentamiento focalizado en la fractura (Banda 0) bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Tía Juana.

En esta sección se presentan los resultados del análisis del modelo de calentamiento focalizado en la fractura, el cual se definió como Banda 0. Se realizaron simulaciones conceptuales variando los valores de la potencia y de la frecuencia de radiación para cada uno de los tres apuntalantes estudiados para así obtener los intervalos óptimos de frecuencia para cada material apuntalante en el rango de potencias estudiado.

La temperatura más alta del yacimiento se encuentra dentro de la fractura en la celda que sigue al pozo y se denota (24,23,2). Por esta razón se seleccionó la potencia óptima tomando como criterio que la temperatura máxima del yacimiento no debe

exceder los 500 °F. Luego se determinó la frecuencia de radiación óptima para este valor de potencia y para cada uno de los apuntalantes estudiados. Estos últimos fueron comparados entre sí con la finalidad obtener la combinación de apuntalante, potencia y frecuencia más apropiada para el calentamiento en Banda 0.

Seguidamente, se realizaron sensibilidades en la geometría de la fractura para determinar la frecuencia óptima para cada uno de los largos estudiados. Igualmente se estudió la altura de la fractura, para verificar su impacto como parámetro de diseño en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento. Por último, se analizó el efecto de la conductividad térmica del apuntalante tanto en la temperatura del yacimiento como en la producción acumulada de crudo.

IV.1.3.1.1 Análisis de la potencia óptima de calentamiento para el modelo *Banda 0* en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales del caso Tía Juana bajo el modelo de calentamiento Banda 0, en las que se analizaron los rangos de potencia aplicables según el material apuntalante utilizado.

IV.1.3.1.1.a Análisis del Apuntalante Fe_2O_3

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo con una fractura “cuadrada” rellena de apuntalante Fe_2O_3 . Los valores de la producción acumulada de crudo en un tiempo de 20 años, para potencias desde 40 hasta 200 kW y frecuencias desde 13,56 hasta 2450 MHz son mostrados en la Figura N° 4.7.

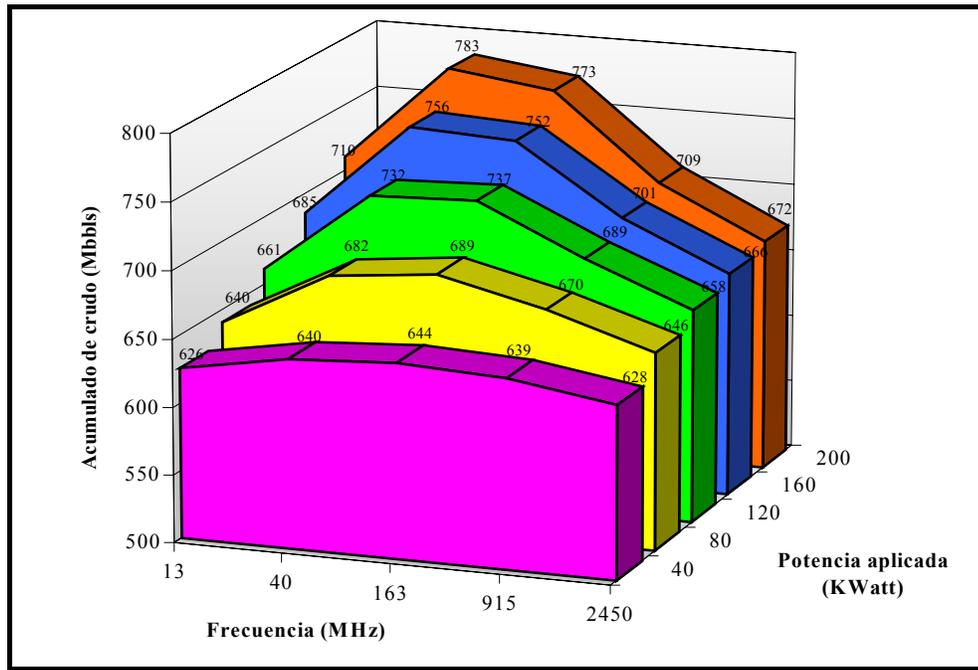


Figura N° 4.7: Producción de crudo acumulada en 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentamiento en Banda 0 para el caso Tía Juana (100 mD).

Se observa que la producción acumulada de crudo aumenta con el incremento de la potencia desde 40 hasta 200 kW. Los mayores valores de producción de crudo se observan en el intervalo de 40 a 163 MHz (desde 640-644 Mbbbls para 40 kW hasta 783-773 Mbbbls para 200 kW), lo cual sugiere que el valor óptimo de la frecuencia para éste apuntalante y esquema de calentamiento se encuentra en dicho rango.

Los resultados de la variación de la temperatura de la celda más caliente del yacimiento en función de la potencia y frecuencia aplicadas, a los 20 años de simulación se presentan en la Figuras N° 4.8.

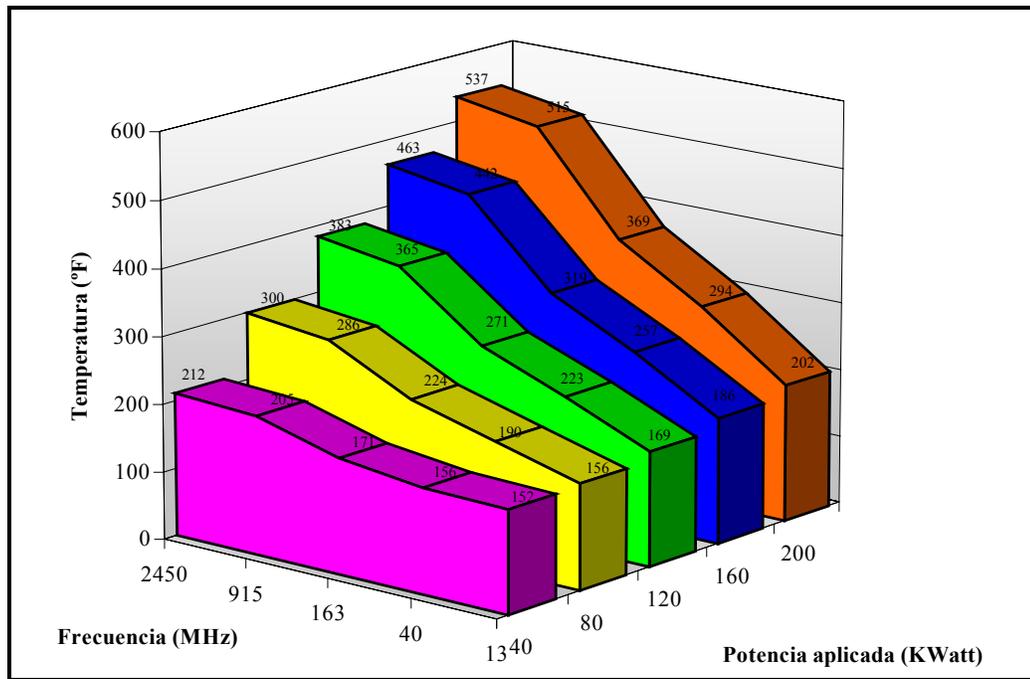


Figura N° 4.8: Temperatura de la celda más caliente del yacimiento a 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentamiento en Banda 0 para el caso Tía Juana (100 mD).

Se observa que la temperatura aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento y de la frecuencia de radiación. Al aumentar el valor de la frecuencia, el valor de D_p disminuye, por lo que la absorción de la radiación electromagnética se concentra en un área menor (celdas adyacentes a la fuente de calentamiento), haciendo que la temperatura de dicha área aumente. De aquí que las mayores temperaturas se presenten para la frecuencia de 2450 MHz.

Se encontró que la temperatura sobrepasa los 500 °F cuando se calienta con una potencia de 200 kW a frecuencias de 915 y 2450 MHz. Como esta condición no es deseable para este estudio (ver sección III.1), se tomó como rango de potencias aplicables para este apuntalante los valores entre 40 hasta 160 kW.

IV.1.1.1.a Análisis del Apuntalante ALFE

A continuación, en la Figura N° 4.9, se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo con una fractura “cuadrada” rellena de

apuntalante ALFE. Allí se encuentran los valores de la producción acumulada de crudo en un tiempo de 20 años, para potencias desde 40 hasta 200 kW y frecuencias desde 13,56 hasta 2450 MHz.

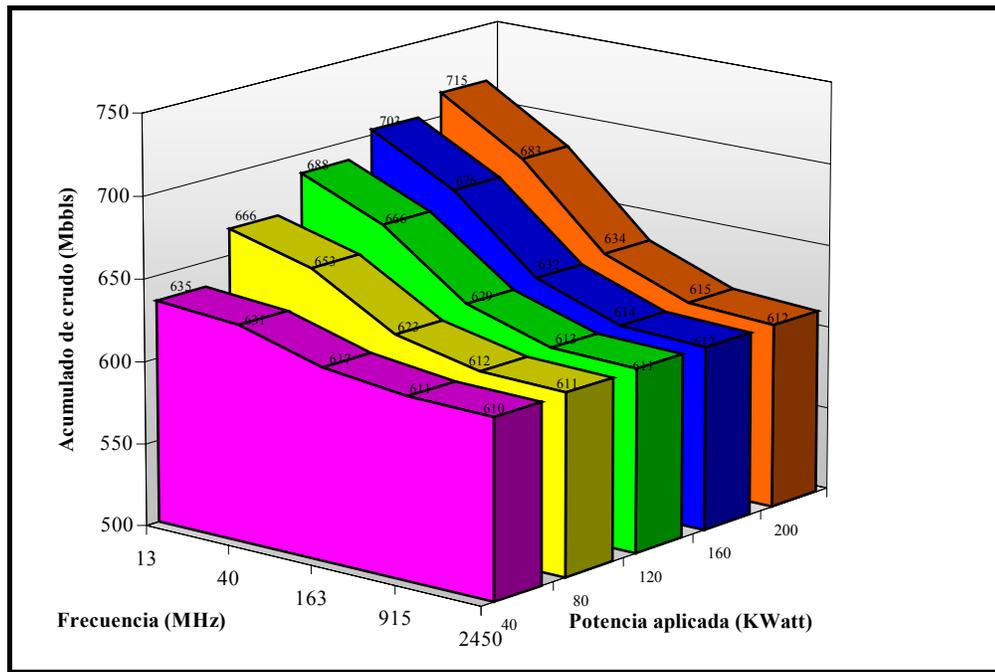


Figura N° 4.9: Producción de crudo acumulada en 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante ALFE y calentamiento en Banda 0 para el caso Tía Juana (100 mD).

Se observa que la producción aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento desde 40 hasta 200 kW. También se puede ver que en todos los valores de potencia estudiados el mayor valor de producción se tiene para la frecuencia de 13,56 MHz (desde 635 hasta 715 Mbbls, para 40 y 200 kW, respectivamente), por lo cual se puede fijar éste valor como óptimo de frecuencia para éste apuntalante y esquema de calentamiento.

Los resultados de la variación de la temperatura de la celda más caliente del yacimiento en función de la potencia y frecuencia aplicadas, a los 20 años de simulación se presentan en la Figuras N° 4.10.

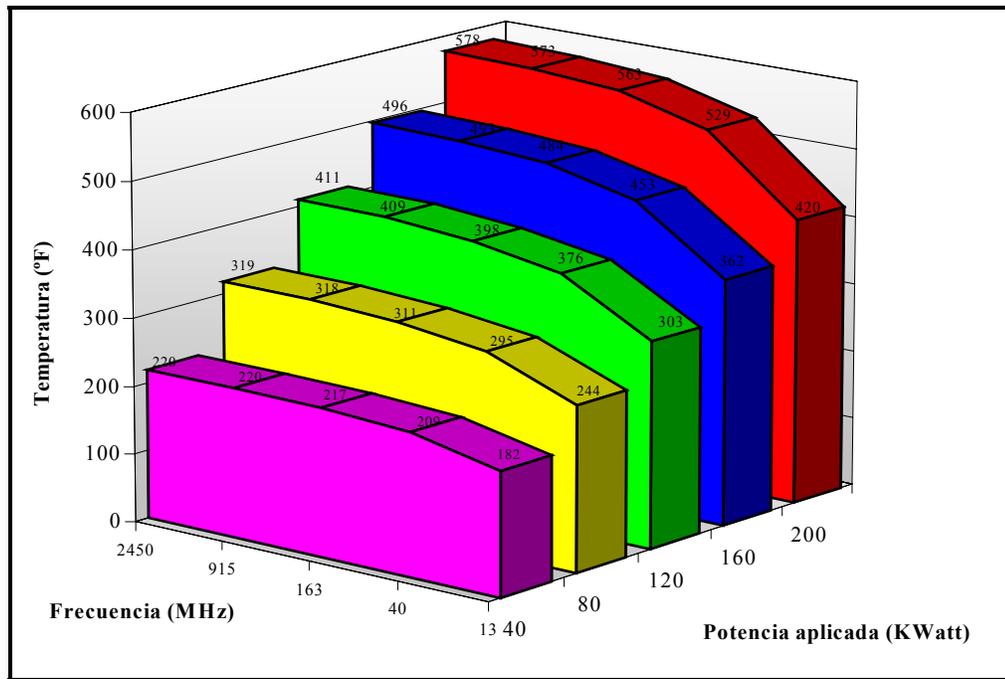


Figura N° 4.10: Temperatura de la celda (24,23,3) a 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante ALFE y calentamiento en Banda 0 para el caso Tía Juana (100 mD).

Se observa que la temperatura aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento y de la frecuencia de radiación. Al aumentar el valor de la frecuencia, el valor de D_p disminuye, por lo que la absorción de la radiación electromagnética se concentra en un área menor (celdas adyacentes a la fuente de calentamiento), haciendo que la temperatura de dicha área aumente. De aquí que las mayores temperaturas se presenten para la frecuencia de 2450 MHz.

Se encontró que la temperatura sobrepasa los 500 °F cuando se calienta con una potencia de 200 kW en casi todo el rango de las frecuencias, exceptuando 13,56 MHz. Como esta condición no es deseable para este estudio (ver sección III.1), se tomó como rango de potencias permitidas desde 40 hasta 160 kW.

IV.1.1.1.b Análisis del Apuntalante JL-P

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo con una fractura “cuadrada” rellena de apuntalante JL-P. Los valores de la

producción acumulada de crudo en un tiempo de 20 años, para potencias desde 40 hasta 200 kW y frecuencias desde 13,56 hasta 2450 MHz se presentan en la Figura N° 4.11.

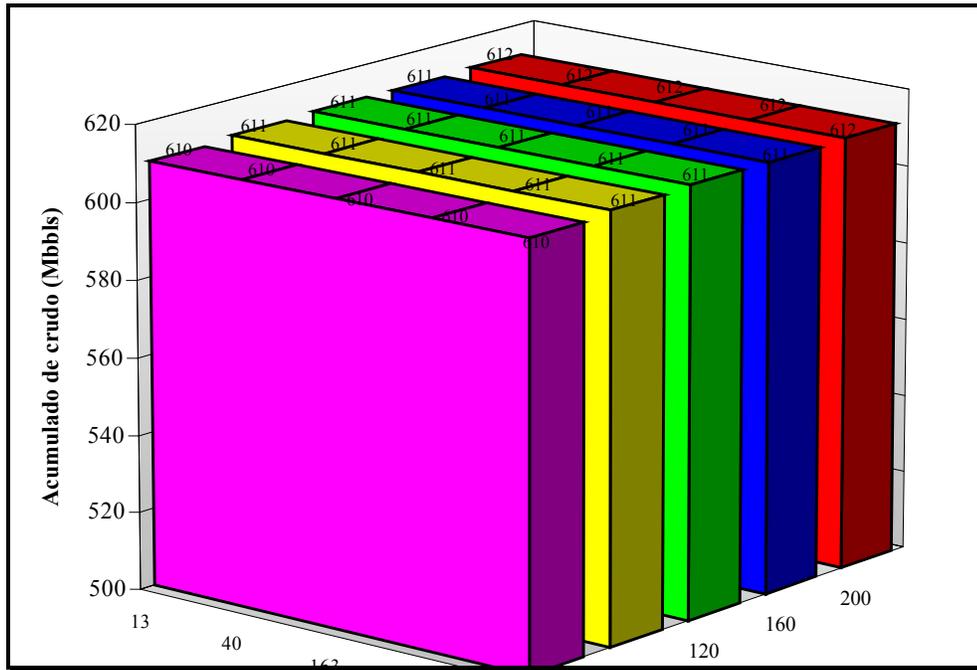


Figura N° 4.11: Producción de crudo acumulada en 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante JL-P y calentamiento en Banda 0 para el caso Tía Juana (100 mD).

Se observa que la producción se mantiene casi constante con el incremento de la potencia, y que no varía con el aumento de la frecuencia. Esto se debe a que el apuntalante JL-P es un material muy absorbente de la radiación electromagnética (con un D_p que se aproxima a 0 pies) por lo que toda la potencia aplicada es absorbida por la primera celda de la malla. Esto ocurre para todas las frecuencias estudiadas y por eso no se observan cambios en la producción acumulada como consecuencia de la variación de dicho parámetro. En este caso no se puede definir una frecuencia óptima para el calentamiento.

Los resultados de la variación de la temperatura de la celda más caliente del yacimiento en función de la potencia y frecuencia aplicadas, a los 20 años de simulación se presentan en la Figuras N° 4.12.

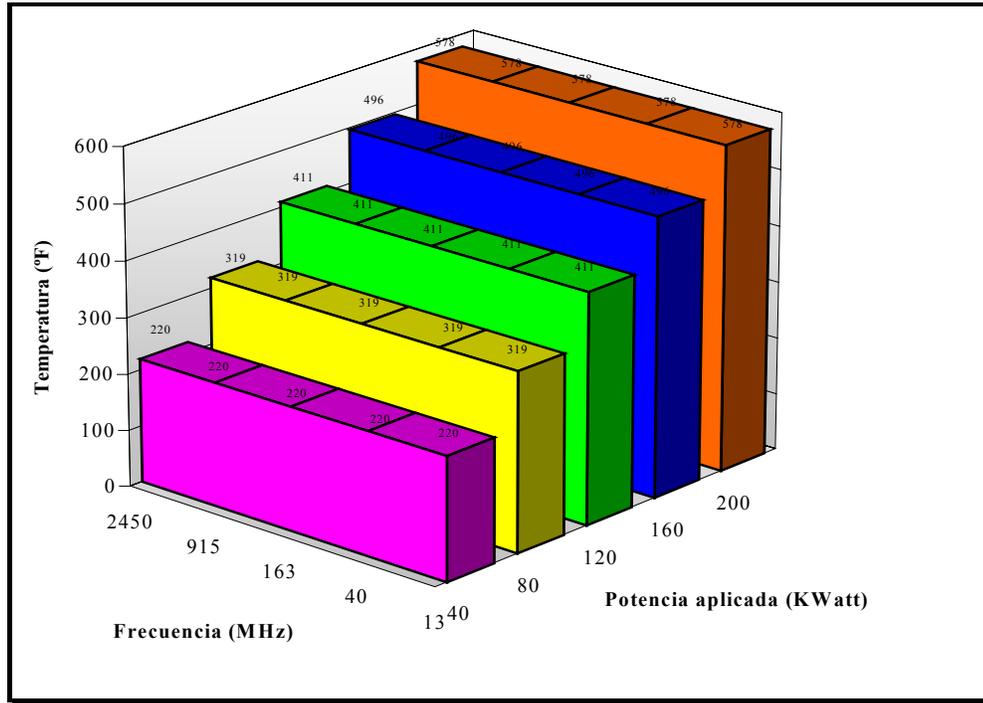


Figura N° 4.12: Temperatura de la celda (24,23,3) a 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante JL-P y calentamiento en Banda 0 para el caso Tía Juana (100 mD).

Se observa que la temperatura aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento, pero no se observan cambios con la variación de la frecuencia. Esto se debe a que el apuntalante JL-P es muy absorbente de la radiación, por lo que toda la energía es concentrada en la primera celda de la malla. Esto ocurre para todas las frecuencias estudiadas y por eso no se observan cambios en la temperatura como consecuencia de la variación de dicho parámetro. Se observa que la temperatura alcanza los 500 °F al calentar con 160 kW, y los supera ampliamente para los 200 kW. Como esta condición no es deseable para este estudio (ver sección III.1), el rango de potencias permitidas para este esquema va desde 40 a 120 kW.

Haciendo un análisis global de los resultados para el modelo de calentamiento focalizado en la fractura, Banda 0, en el caso Yacimiento-Fractura-Calentamiento, se puede concluir que el valor de la potencia de calentamiento óptimo es de 120 kW debido a que la temperatura de la celda más caliente de la malla se encuentra siempre por debajo de 500 °F para todos los materiales apuntalantes estudiados en cualquier valor de frecuencia.

IV.1.1.1.2 Análisis de la frecuencia óptima de radiación para el modelo de Calentamiento Banda 0 bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Se analizó la producción acumulada de crudo en función de la frecuencia de radiación para cada uno de los apuntalantes, fijando como potencia de calentamiento el valor de 120 kW. Los resultados de estas simulaciones se presentan en la Figura N° 4.13.

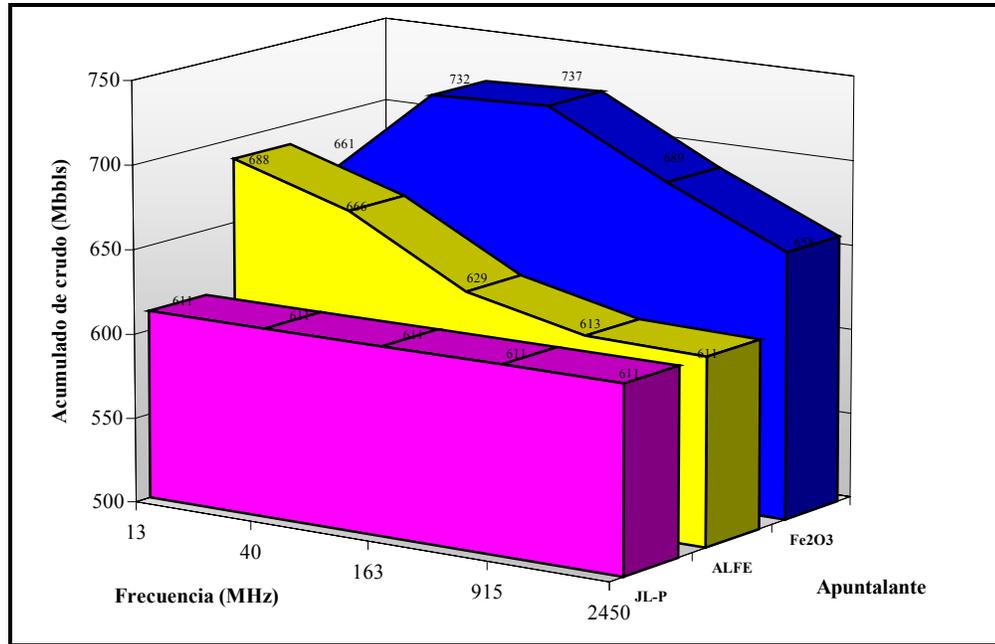


Figura N° 4.13: Producción acumulada de crudo en 20 años variando la frecuencia y el material apuntalante para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con calentamiento en Banda 0 para el caso Tía Juana (100 mD).

Se puede ver que el valor óptimo de frecuencia de radiación para el apuntalante ALFE está en los 13,56 MHz, ya que allí se observa la mayor producción acumulada de crudo (688 Mbbls). En el caso del apuntalante JL-P no se observaron cambios con el valor de la frecuencia, lo cual no permite determinar un valor óptimo para dicho parámetro. Finalmente, se observa que el apuntalante Fe_2O_3 presenta una región de valores óptimos para la frecuencia que va desde 40 hasta 915 MHz, siendo 163 MHz quien presenta el mayor valor de producción acumulada (725 Mbbls).

De los resultados obtenidos de las simulaciones con los tres apuntalantes estudiados, los mayores valores de producción acumulada de crudo se presentaron con el apuntalante Fe_2O_3 . Por lo tanto se decidió tomar este apuntalante como óptimo para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, calentando bajo el modelo Banda 0. A continuación se hace un estudio detallado de la frecuencia óptima en esta región.

Para verificar la frecuencia óptima de calentamiento se compararon los resultados obtenidos con los trabajos publicados anteriormente sobre este yacimiento. En los resultados publicados por Ramírez^[8], en los cuales se realizaron simulaciones conceptuales de un pozo del yacimiento Tía Juana con una fractura de 200 pies de largo en donde se aplica el calentamiento focalizado en la fractura, se reporta como óptimo un esquema de frecuencia de radiación y material apuntalante con un valor de D_p de 60 m. En el esquema óptimo de calentamiento obtenido para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, calentando bajo el modelo Banda 0, se observa que el valor de 163 MHz del apuntalante Fe_2O_3 se corresponde con un D_p de 30 m (ver Tabla No 3.3 del capítulo III), siendo éste el valor que más se aproxima al reportado por Ramírez^[8].

Para profundizar el estudio de este parámetro se evaluaron, con el apuntalante Fe_2O_3 , otras frecuencias consideradas como no comerciales, que son tomados del estudio de Mouris y col. ^[23-26], quienes las utilizaron para la medición de las constantes dieléctricas de los materiales estudiados (ver Tabla No 3.4 de la sección III). Los valores de las frecuencias no comerciales que se tomaron son: 54, 272, 381,

490, 599, 707, 814 MHz, pues estos se encuentran en la región de frecuencias en las que el apuntalante Fe_2O_3 produce una mayor producción acumulada de crudo.

A continuación se presentan en la Figura N° 4.14, los valores de la producción de crudo para las frecuencias comerciales y no comerciales en el rango comprendido entre 40 y 915 MHz, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con calentamiento en Banda 0 para una fractura de 70 pies de largo rellena de apuntalante Fe_2O_3 .

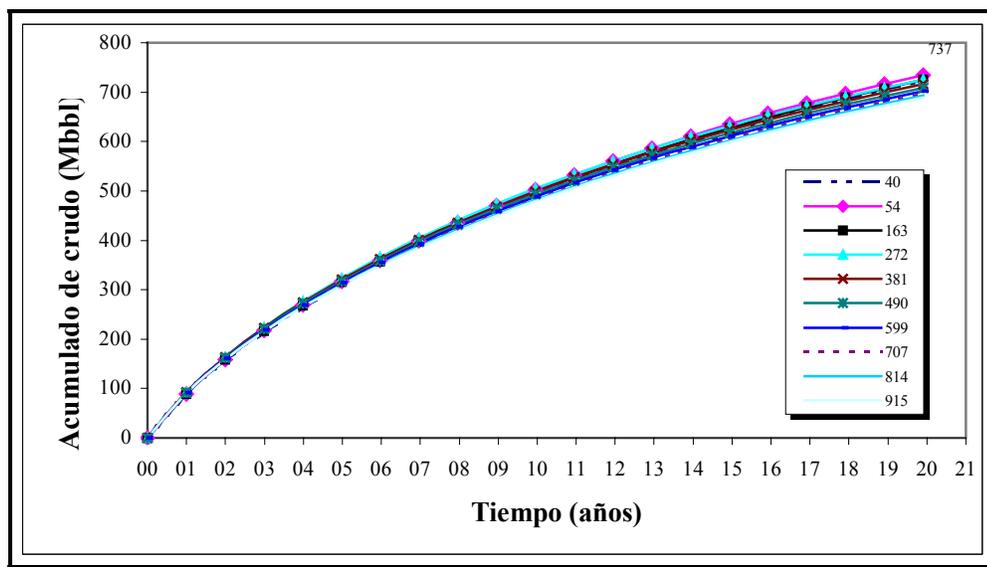


Figura N° 4.14: Producción de crudo para los valores de frecuencias comerciales y no comerciales comprendidos entre 40 y 915 kW para el modelo Banda 0, calentando a 120 kW y con los datos del yacimiento Tía Juana (100 mD), para una fractura de 70 pies de largo rellena de apuntalante Fe_2O_3 .

El valor de frecuencia correspondiente a la mayor producción de crudo (737 Mbbls) es de 54 MHz. Para el apuntalante Fe_2O_3 , el valor de D_p correspondiente a esta frecuencia es de 70 m, que es un valor mucho más cercano al de 60 m. Por lo tanto, se puede concluir que este resultado coincide con lo reportado por Ramírez^[8] en su trabajo y se tomará como frecuencia óptima de los próximos análisis con el apuntalante Fe_2O_3 .

En la Figura N° 4.15 se presenta la producción acumulada de crudo en función del tiempo para los materiales apuntalantes estudiados calentando con el modelo

Banda 0 a 120 kW y a las frecuencias óptimas de radiación según cada material: 54 MHz para Fe_2O_3 , 13,56 MHz para ALFE y 163 MHz para JL-P. Allí se observa que el apuntalante Fe_2O_3 , con una frecuencia de 54 MHz, produce un mayor volumen de crudo (737,5 Mbbls), por lo tanto se considera que este escenario es el óptimo para este esquema de calentamiento. Se tomó este esquema como base para los análisis de variación en la geometría y en la conductividad térmica.

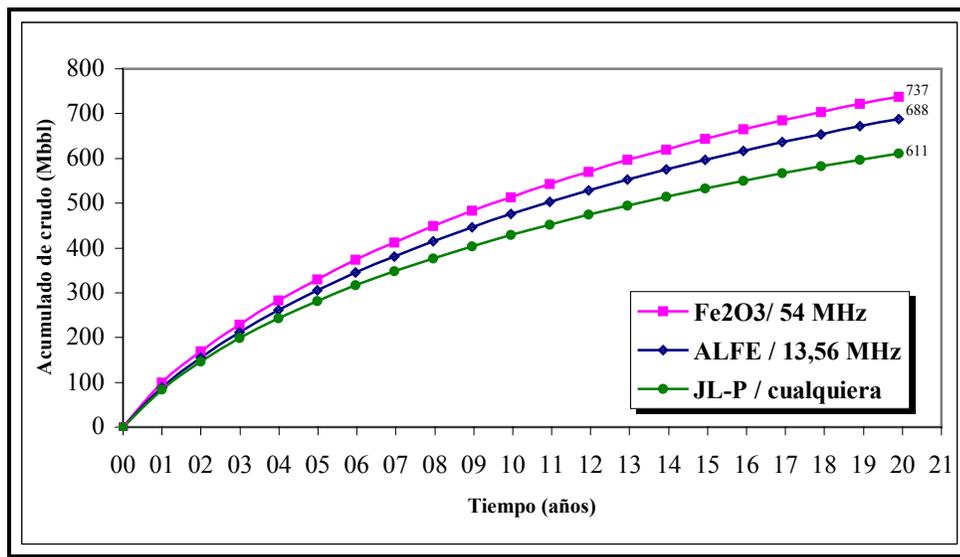


Figura N° 4.15: Producción de crudo para los óptimos de frecuencia del modelo de calentamiento Banda 0, calentando a 120 kW y con los datos del yacimiento Tía Juana (100 mD), para una fractura de 70 pies de largo rellena de los materiales apuntalantes estudiados.

IV.1.1.1.3 Análisis de la Geometría de la Fractura para el caso de calentamiento Banda 0, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Tía Juana.

En la sección IV.2 se analizó el impacto de la longitud y de la altura de la fractura en el esquema de Yacimiento-Fractura. Debido a que la cantidad de material apuntalante es diferente para cada longitud, se analizó el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para verificar que la variación en la geometría de la fractura siga la misma tendencia que en el caso sin calentamiento.

A continuación se presenta la producción acumulada de crudo en función del tiempo al variar el largo y la altura de la fractura bajo las especificaciones del esquema óptimo del modelo Banda 0. Los resultados para las geometrías estudiadas (ver sección III.4) se presentan en la Figura N° 4.16.

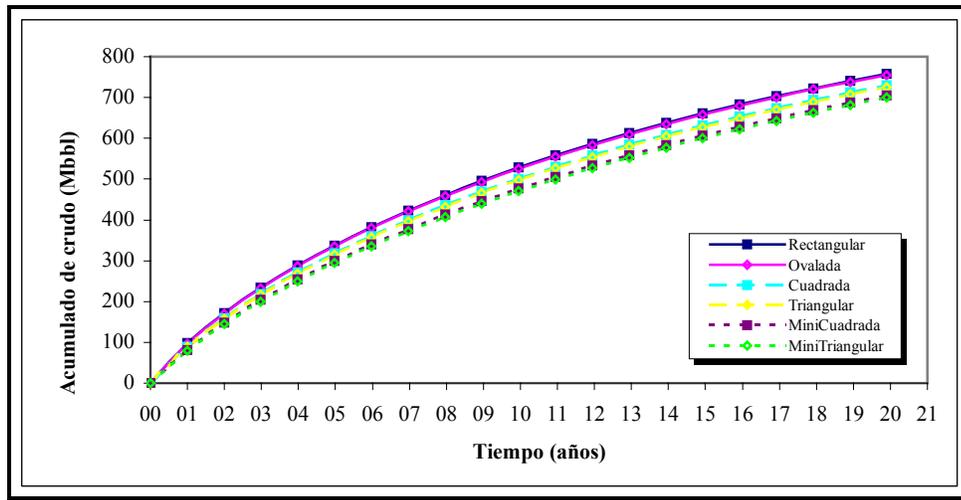


Figura N° 4.16: Variación de la geometría de la fractura para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento bajo calentamiento en Banda 0. Caso óptimo del yacimiento Tía Juana (100 mD): Fe₂O₃ calentando a 120 kW y 54 MHz.

Al igual que en caso Yacimiento-Fractura, a medida que aumenta el largo de la fractura se observa un incremento en la producción de crudo. Para las fracturas de altura constante (“minicuadrada”, “cuadrada” y “rectangular”) al aumentar la longitud de la fractura en 40, 70 y 200 pies, la producción aumenta de 705 a 729 y 758 Mbbbls, respectivamente. En todos los largos estudiados se observa una diferencia entre las fracturas de altura constante y variable, que se vuelve más notoria a medida que el largo de la fractura disminuye.

Para cuantificar la diferencia de producción de acumulada de crudo por efecto de la altura de la fractura se calculó su porcentaje de incremento con respecto al caso Yacimiento-Fractura, para los largos estudiados. Luego se calculó la diferencia entre las fracturas de altura constante y variable. Los resultados se presentan en la Tabla N° 4.3.

Tabla N° 4.3: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes alturas para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el calentamiento en Banda 0.

% Incremento: Esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento vs. Esquema Yacimiento-Fractura			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-var - h-cte)
40 pies	23,4%	24,2%	0,8%
70 pies	19,9%	20,4%	0,5%
200 pies	19,8%	19,9%	0,1%

Se observa que el porcentaje de incremento es mayor en las fracturas de altura variable al comparar con las fracturas de altura constante (24,2% vs. 23,4% para 40 pies). Este resultado indica que las geometrías de altura variable (“minitriangular”, “triangular” y “ovalada”) son más sensibles al calentamiento dieléctrico que las geometrías de altura constante (“minicuadrada”, “cuadrada” y “rectangular”).

Al igual que en el caso Yacimiento-Fractura, se observa una disminución en el porcentaje de incremento con el aumento de la longitud de la fractura, que disminuye desde 24,2% hasta 19,9% al pasar de 40 a 200 pies de largo.

La diferencia entre los % de incremento de las fracturas de altura constante menos altura variable se encuentran por debajo del 1% para todas las longitudes estudiadas. La mayor diferencia se obtiene para el caso de fracturas de 40 pies de largo (0,8%), lo cual indica que para longitudes mucho menores de 40 pies, se debe analizar la altura de la fractura para verificar su efecto en la producción de crudo.

Por lo tanto, es posible decir que el diseño de la altura de la fractura no es un parámetro apreciable para fracturas de grandes longitudes, mientras que para fracturas cortas la altura comienza a tener una connotación importante en el diseño de la fractura.

A fin de verificar el efecto de la longitud de la fractura en la frecuencia de radiación, se analizó la producción acumulada de crudo para largos de 40 y 200 pies de largo (diferentes del valor óptimo de 70 pies) al variar la frecuencia de radiación. Los resultados se presentan en las Figuras N° 4.17.a-b. Allí se puede ver que el valor de la frecuencia óptima de radiación se mantiene constante en el caso del apuntalante

Fe₂O₃, y coincide con el valor de 163 MHz, que es el valor óptimo que se reportó para las frecuencias comerciales.

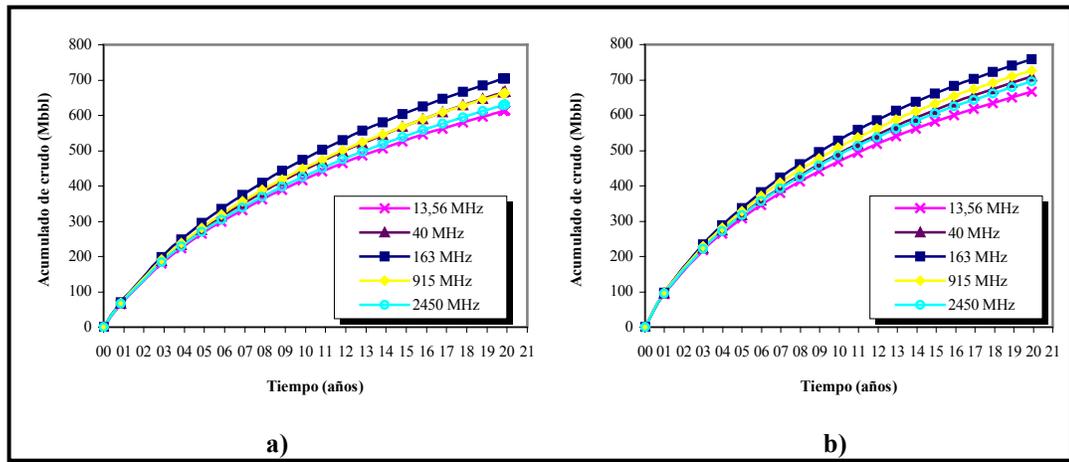


Figura N° 4.17: Variación en el largo de la fractura para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento. Caso Tía Juana (100 mD), calentando a 120 kW bajo el modelo Banda 0. Material apuntalante Fe₂O₃. Largos: a) 40 pies y b) 200 pies

Este análisis se repitió para los apuntalantes ALFE y JL-P y los resultados de la frecuencia óptima en función de los diferentes materiales y longitudes de fractura se presentan en la Tabla N° 4.4.

Tabla N° 4.4: Valores de la frecuencia óptima para cada longitud de fractura y material apuntalante, para el caso Tía Juana bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento y el modelo Banda 0.

Largo de la fractura (pies) / forma	Frecuencia óptima (MHz) para el apuntalante:		
	Fe ₂ O ₃	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	163	13,56	-
70 / Cuadrada	54	13,56	-
200 / Rectangular	163	13,56	-

Analizando la tabla anterior se verifica que la frecuencia óptima de calentamiento se mantiene para cada uno de los materiales apuntalantes, independientemente de la geometría de la fractura. En el caso de 70 pies de largo, se

observa que aún cuando el valor óptimo de frecuencia es de 54 MHz, el valor usado en campo corresponde a 163 MHz, pues este valor se encuentra comprendido entre las frecuencias comerciales internacionales. En el caso del apuntalante JL-P no se observó que ninguna frecuencia óptima, comportamiento que ha sido explicado anteriormente.

IV.1.1.1.4 Análisis de la variación en la Conductividad Térmica para caso óptimo del modelo de calentamiento Banda 0.

Para el análisis de la conductividad térmica del apuntalante (CT) se tomó el caso óptimo del modelo de calentamiento Banda 0 (fractura de 70 pies, apuntalante Fe_2O_3 y frecuencia de calentamiento de 163 MHz) y se varió el valor de la conductividad térmica del apuntalante en 2, 4, 6 y 10 veces su valor original (106,6 BTU/pie-día-°F).

A continuación, en las Figuras N° 4.18-21, se presenta la temperatura de diferentes celdas de la malla de simulación en función de la variación en la conductividad térmica del apuntalante (CT). Se espera un cambio en las temperaturas del yacimiento por efecto de dicho parámetro. Las celdas a analizar se seleccionaron de acuerdo a su posición con respecto a la fuente de calentamiento:

- (24,23,2) y (24,15,2) son celdas que pertenecen a la fractura, donde la primera se encuentra adyacente a la fuente y la última está alejada de la fuente de calentamiento.
- (22,23,2) y (22,15,2) son las celdas adyacentes a la fractura, cerca y lejos de la fuente de calentamiento, respectivamente.
- (20,23,2) y (20,15,2) son celdas que se encuentran a 20 pies de la fractura y de la fuente de calentamiento.
- (18,23,2) y (18,15,2) son celdas que se encuentran en la mitad de la malla (aproximadamente a 500 pies), alejadas de la fractura y de la fuente de calentamiento.

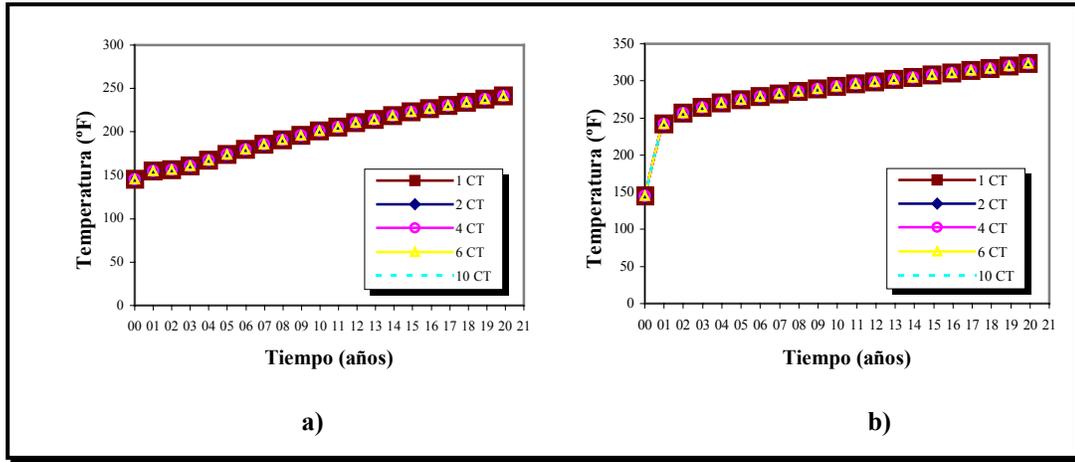


Figura N° 4.18: Temperatura de las celdas de la fractura al variar conductividad térmica del apuntalante en 2,4,6,y 10 veces su valor original, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento en el caso Tía Juana (100 mD), con una fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 , calentando en Banda 0 a 120 kW y 163 MHz. Celdas: a) (24,23,2) y b) (24,15,2)

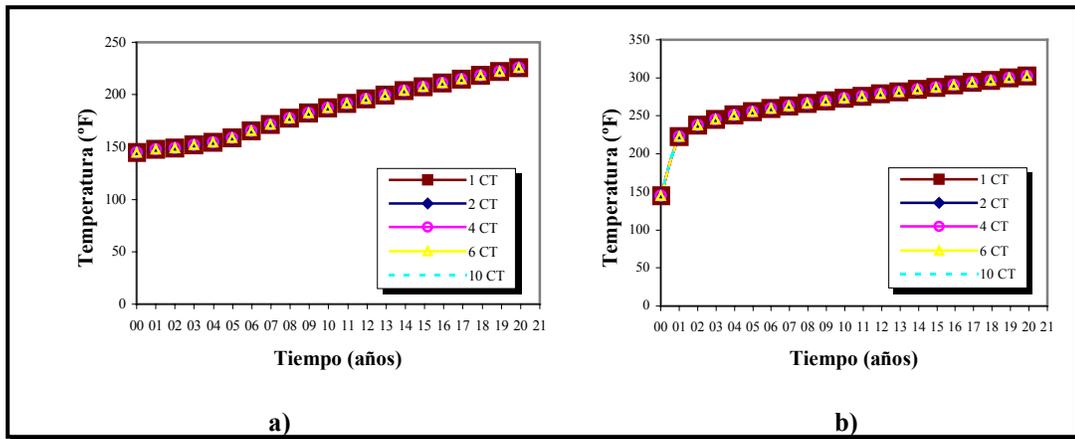


Figura N° 4.19: Temperatura de las celdas adyacentes a la fractura al variar conductividad térmica del apuntalante en 2,4,6,y 10 veces su valor original, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento en el caso Tía Juana (100 mD), con una fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 , calentando en Banda 0 a 120 kW y 163 MHz. Celdas: a) (22,23,2) y b) (22,15,2)

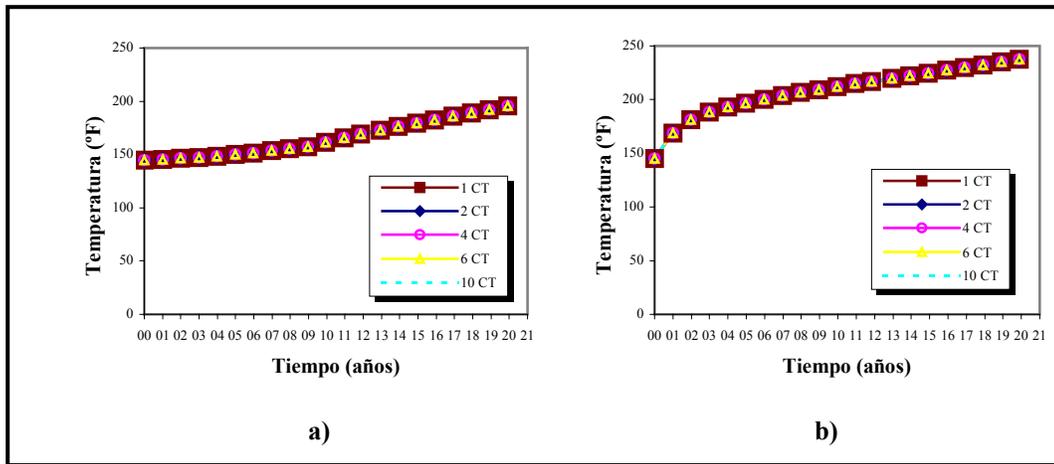


Figura N° 4.20: Temperatura de las celdas adyacentes a la fractura al variar conductividad térmica del apuntalante en 2,4,6,y 10 veces su valor original, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento en el caso Tía Juana (100 mD), con una fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 , calentando en Banda 0 a 120 kW y 163 MHz. Celdas: a) (20,23,2) y b) (20,15,2)

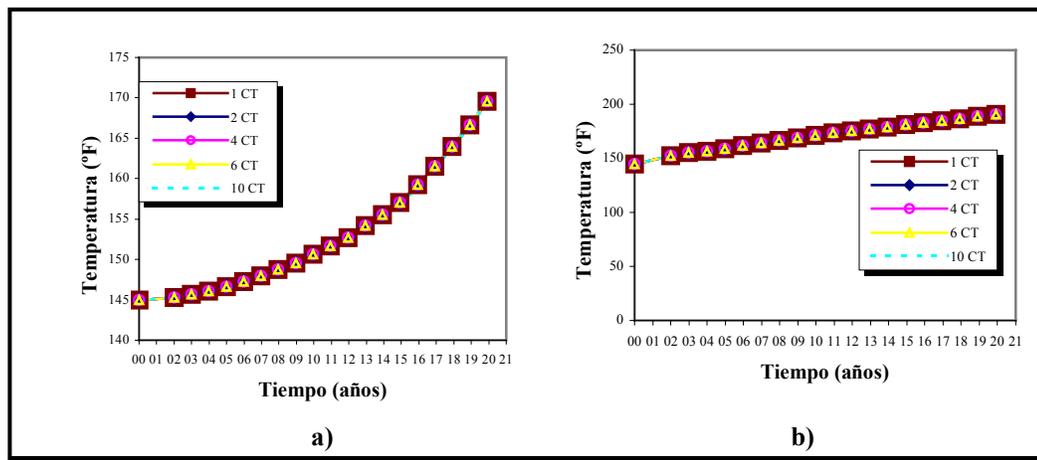


Figura N° 4.21: Temperatura de las celdas adyacentes a la fractura al variar conductividad térmica del apuntalante en 2,4,6,y 10 veces su valor original, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento en el caso Tía Juana (100 mD), con una fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 , calentando en Banda 0 a 120 kW y 163 MHz. Celdas: a) (18,23,2) y b) (18,15,2)

Se observa en todas las celdas estudiadas la temperatura permanece constante con la conductividad térmica del apuntalante (CT). Este resultado es lógico ya que el apuntalante tiene un área infinitamente pequeña al compararlo con el resto de la arena

productora. Esto hace que aún cuando el valor de CT del apuntalante sea hasta 10 veces mayor que el de la arena, su aporte al esquema es despreciable.

Al no observar cambios en la temperatura por efecto de la conductividad térmica con el modelo de calentamiento Banda 0, siendo éste esquema el que presenta las temperaturas más altas del estudio, menos aún se esperan cambios en el resto de los modelos de calentamiento. Por lo tanto se puede concluir que la conductividad térmica es un parámetro que no afecta el diseño del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

IV.1.3.2 Análisis del modelo de calentamiento en bandas de 1, 10 y 20 pies de ancho (Banda 1, Banda 10 y Banda 20) y Radial, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Tía Juana.

En esta sección se presentan de manera sintetizada los resultados de los análisis del modelo de calentamiento en bandas de 1, 10 y 20 pies de ancho, que en este estudio son llamados Banda 1, Banda 10 y Banda 20, y del modelo de calentamiento Radial. En estos modelos se calientan dos áreas del yacimiento con propiedades diferentes (arena productora y apuntalante de la fractura). La zona de calentamiento incluye a la fractura y a las celdas en dirección \hat{i} que se encuentran adyacentes a la fractura, con la diferencia en el tamaño de la arena calentada; la suma de ambas regiones suman 1, 10 y 20 pies de ancho, respectivamente para cada modelo. El modelo de calentamiento radial se considera análogo al caso de utilizar una malla radial en vez de una malla cartesiana, lo cual se estudia en los trabajos de Ovalles y col.^[5] y Fonseca^[6].

Se realizaron simulaciones conceptuales variando la potencia y la frecuencia de calentamiento y, tomando como criterio que la temperatura máxima del yacimiento no debe exceder los 500 °F, se seleccionó una potencia óptima de calentamiento y una frecuencia óptima de radiación para cada uno de los tres apuntalantes estudiados. Estos óptimos fueron comparados entre sí con la finalidad obtener la combinación de apuntalante, potencia y frecuencia más apropiada para los modelos de calentamiento en Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial.

Por último, se realizaron sensibilidades en la geometría de la fractura, a fin de determinar la frecuencia óptima para cada uno de los largos de fractura estudiados y se estudio la altura de la fractura para verificar su impacto como parámetro de diseño.

IV.1.3.2.1 Análisis de la potencia óptima de calentamiento y de la frecuencia óptima de radiación para los modelos de calentamiento Banda 1, Banda 10 y Banda 20 y Radial, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

A continuación se presenta un resumen de los resultados de las simulaciones conceptuales del yacimiento Tía Juana bajo los modelos Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial, en donde se analizaron los rangos de potencia aplicables y de frecuencias óptimas según el material apuntalante utilizado. Para ello se siguió la metodología planteada en la sección III, y que ha sido especificada para el modelo de calentamiento Banda 0. Un análisis detallado de los resultados de ésta sección se presenta en el Apéndice N° B.

Para la selección del rango de potencias aplicables se tomó como criterio que la temperatura más alta del modelo (que se presenta en la celda 24,23,2) no debe sobrepasar los 500 °F, mientras que para la selección del rango de frecuencias se tomaron aquellas que producen mayor volumen de crudo en 20 años. Finalmente se escogió un valor óptimo de potencia y frecuencia para cada apuntalante y modelo de calentamiento. Estos resultados se presentan en la Tabla N° 4.5.

Tabla N° 4.5: Rangos de potencia aplicables y de frecuencias óptimas para cada material apuntalante, calentando bajo los modelos Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial, para el caso Tía Juana.

Modelo de calentamiento Banda 1					
Apuntalante	Rango de potencias aplicables	Rango de frecuencias óptimas	Potencia óptima de calentamiento	Frecuencia óptima de radiación	Producción de crudo en 20 años
Fe ₂ O ₃	40-160 kW	40-163 MHz	120 kW	163 MHz	724 Mbbls
ALFE	40-160 kW	13,56-40 MHz	120 kW	40 MHz	681 Mbbls
JL-P	40-160 kW	40-163 MHz	120 kW	163 MHz	675 Mbbls
Modelo de calentamiento Banda 10					
Apuntalante	Rango de potencias aplicables	Rango de frecuencias óptimas	Potencia óptima de calentamiento	Frecuencia óptima de radiación	Producción de crudo en 20 años
Fe ₂ O ₃	40-200 kW	40-163 MHz	120 kW	163 MHz	726 Mbbls
ALFE	40-200 kW	40-163 MHz	120 kW	163 MHz	704 Mbbls
JL-P	40-160 kW	40-163 MHz	120 kW	163 MHz	701 Mbbls
Modelo de calentamiento Banda 20					
Apuntalante	Rango de potencias aplicables	Rango de frecuencias óptimas	Potencia óptima de calentamiento	Frecuencia óptima de radiación	Producción de crudo en 20 años
Fe ₂ O ₃	40-200 kW	40-163 MHz	120 kW	163 MHz	727 Mbbls
ALFE	40-200 kW	40-163 MHz	120 kW	163 MHz	710 Mbbls
JL-P	40-200 kW	40-163 MHz	120 kW	163 MHz	708 Mbbls
Modelo de calentamiento Radial					
Apuntalante	Rango de potencias aplicables	Rango de frecuencias óptimas	Potencia óptima de calentamiento	Frecuencia óptima de radiación	Producción de crudo en 20 años
Fe ₂ O ₃	40-200 kW	40-163 MHz	120 kW	163 MHz	720 Mbbls
ALFE	40-200 kW	40-163 MHz	120 kW	163 MHz	718 Mbbls
JL-P	40-200 kW	40-163 MHz	120 kW	163 MHz	720 Mbbls

Del análisis de la variación de la potencia y frecuencia para cada material apuntalante y modelo de calentamiento (ver Tabla N° 4.5) se pueden extraer los siguientes resultados:

- Para los tres apuntalantes y modelos de calentamiento estudiados se observó que al aumentar la potencia de calentamiento desde 40 hasta 200 kW, tanto la producción de crudo como la temperatura de la celda (24,23,2) aumentan.

- Se observó que todos los apuntalantes presentaron un máximo de temperatura al calentar con una frecuencia de 2450 MHz al variar la potencia desde 40 hasta 200 kW. Esto se produce debido a que, al aumentar el valor de la frecuencia, el valor de D_p disminuye, por lo que la absorción de la radiación electromagnética se concentra en un área menor (celdas adyacentes a la fuente de calentamiento), haciendo que la temperatura de dicha área aumente.

Aún cuando en algunos casos es posible utilizar a mayores potencias de calentamiento, se escogió el valor de 120 kW para guardar consistencia entre todos los modelos de calentamiento. Para este valor, la temperatura de la celda más caliente del modelo siempre se encuentra por debajo de 500 °F para todas las frecuencias y materiales apuntalantes estudiados.

Al comparar los resultados del modelo de calentamiento Banda 1 se puede ver que los valores óptimos de frecuencia de radiación están en 40 MHz para el apuntalante ALFE y en 163 MHz para los apuntalantes JL-P y Fe_2O_3 , siendo este último quien presenta el mayor valor de producción acumulada (724 Mbbls). Para los modelos Banda 10 y Banda 20 los mayores valores de acumulado de crudo se presentan en la frecuencia de 163 MHz para los tres apuntalantes estudiados, siendo el apuntalante Fe_2O_3 quien presenta los mayores valores de producción acumulada (726 y 727 Mbbls, respectivamente). En el modelo de calentamiento Radial se observan los mayores valores de acumulado de crudo en la frecuencia de 163 MHz para los tres apuntalantes estudiados. La producción de crudo presenta una diferencia menor al 1% al comparar los materiales apuntalantes en esta frecuencia óptima, sin embargo se tomará como óptimo el JL-P, ya que tiene el mayor volumen de crudo (720 Mbbls).

Para profundizar el estudio de la frecuencia óptima se evaluaron otras frecuencias consideradas como no comerciales, tal y como se explicó en la sección IV.1.3.1.2. Sin embargo no se observó ninguna variación en la frecuencia óptima de los apuntalantes para los modelos de calentamiento estudiados. Este estudio se presenta con detalle en el Apéndice B.

Ya que los materiales calentados presentan valores de la distancia de penetración (Dp) diferentes al ser radiados a la misma frecuencia, se calculó un valor de Dp como un promedio ponderado en función del área radiada de cada material. El resultado de estos cálculos se presenta a continuación en la Tabla N° 4.6 para los modelos de calentamiento estudiados.

Tabla N° 4.6: Valor del Dp promedio de los materiales individuales y del área total calentada para el yacimiento Tía Juana, al ser calentados bajo los óptimos de los modelos Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial.

Modelo de Calentamiento Banda 1			
Material	Ancho del área calentada (pies)	% que ocupa del área total	Dp del material (m)
Arena Tía Juana	1,00	92,3%	11,38
Apuntalante Fe2O3	0,083	7,7%	27,36
Arena Tía Juana + Apuntalante	1,083	100,0%	12,60
Modelo de Calentamiento Banda 10			
Material	Ancho del área calentada (pies)	% que ocupa del área total	Dp del material (m)
Arena Tía Juana	10,00	99,2%	11,38
Apuntalante Fe2O3	0,083	0,8%	27,36
Arena Tía Juana + Apuntalante	10,083	100,0%	11,51
Modelo de Calentamiento Banda 20			
Material	Ancho del área calentada (pies)	% que ocupa del área total	Dp del material (m)
Arena Tía Juana	20,00	99,6%	11,38
Apuntalante Fe2O3	0,083	0,4%	27,36
Arena Tía Juana + Apuntalante	20,083	100,0%	11,45
Modelo de Calentamiento Radial			
Material	Ancho del área calentada (pies)	% que ocupa del área total	Dp del material (m)
Arena Tía Juana	990,00	100,0%	11,38
Apuntalante JL-P	0,083	0,0%	0,0002
Arena Tía Juana + Apuntalante	990,083	100,0%	11,38

Para el modelo de calentamiento Banda 1 la arena Tía Juana representa el 92,3% del área total calentada, por lo que se observa que el Dp promedio del área total tiene un valor muy cercano al de la arena (11,38 m). Esto se debe a que el área

calentada está compuesta por más arena que apuntalante, por lo que predomina el valor de Dp de la primera. A medida que la zona radiada es mayor, el Dp promedio del área calentada se aproxima más al valor de la arena Tía Juana. El caso límite viene representado por el modelo Radial, en el cual el valor de Dp es igual al de la arena (11,38 m), con lo cual se puede tomar como despreciable la presencia del apuntalante para el calentamiento del yacimiento.

IV.1.3.2.2 Análisis de la Geometría de la Fractura para los modelos de calentamiento Banda 1, Banda 10 y Banda 20 y Radial, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Para verificar que la variación en la geometría de la fractura siga la misma tendencia que en los casos Yacimiento-Fractura (sin calentamiento) y Yacimiento-Fractura-Calentamiento bajo el esquema Banda 0, se realizaron sensibilidades en la forma y la longitud de la fractura con los modelos de calentamiento Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial. Siguiendo la metodología aplicada en la sección IV.1.3.1.3, y calentando los apuntalantes Fe₂O₃ y JL-P a 120 kW y 163 MHz, se evaluaron fracturas de 40, 70 y 200 pies de largo, de altura constante y variable, tal y como se especificó en la sección III.4. Un análisis detallado de los resultados de ésta sección se presentan en el Apéndice N° B.

Los resultados indicaron que se presenta la misma tendencia que para el modelo de calentamiento Banda 0:

- Para las fracturas de altura constante (“minicuadrada”, “cuadrada” y “rectangular”) a medida que aumenta el largo de la fractura de 40 a 70 a 200 pies, también aumenta la producción.
- En todos los largos estudiados se observa que la diferencia entre fracturas de alturas diferentes (constante vs. variable) disminuye con el largo de la fractura.

Para cuantificar el efecto de la altura de la fractura en la producción de crudo, se calculó el porcentaje de incremento con respecto al caso Yacimiento-Fractura para cada largo de fractura estudiado (40, 70 y 200 pies). Luego se calculó la diferencia

entre los valores de altura constante y los de altura variable. Los resultados para los modelos de calentamiento Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial se presentan en la Tabla N° 4.7.

Tabla N° 4.7: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes alturas para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento bajo los esquemas Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial.

% Incremento: Esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento vs. Esquema Yacimiento-Fractura			
Modelo de calentamiento Banda 1			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-var - h-cte)
40 pies	21,9%	22,7%	0,8%
70 pies	19,2%	19,5%	0,4%
200 pies	19,2%	19,2%	0,01%
Modelo de calentamiento Banda 10			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-var - h-cte)
40 pies	21,6%	21,7%	0,1%
70 pies	19,4%	19,8%	0,4%
200 pies	19,3%	19,3%	0,02%
Modelo de calentamiento Banda 20			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-var - h-cte)
40 pies	21,9%	22,0%	0,1%
70 pies	19,5%	19,7%	0,2%
200 pies	19,4%	19,4%	0,02%
Modelo de calentamiento Radial			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-var - h-cte)
40 pies	21,1%	22,0%	0,9%
70 pies	18,3%	18,4%	0,5%
200 pies	17,4%	17,4%	0,02%

Al igual que ocurre para el modelo Banda 0, se observa que el porcentaje de incremento es mayor en las fracturas de altura variable al comparar con las fracturas de altura constante. Por ejemplo, para el modelo Banda 1, el porcentaje de incremento

es de 21,9% vs. 22,7% para fracturas de 40 pies con altura constante y variable, respectivamente. Lo mismo ocurre para los modelos Banda 10, Banda 20 y Radial, y para todos los largos de fractura. Este resultado indica que las geometrías de altura variable (“minitriangular”, “triangular” y “ovalada”) son más sensibles al calentamiento dieléctrico que las geometrías de altura constante (“minicuadrada”, “cuadrada” y “rectangular”).

También se observa una disminución en el porcentaje de incremento con el aumento de la longitud de la fractura para todas las geometrías. Por ejemplo, para el modelo Radial, el porcentaje de incremento disminuye desde 21,1% hasta 17,4% al pasar de 40 a 200 pies de largo en una fractura de altura constante. Esto se repite en los modelos Banda 1, Banda 10 y Banda 20.

Se observó que la diferencia del % de incremento de las fracturas de altura constante menos altura variable se encuentra por debajo del 1% en todas las longitudes y en todos los modelos de calentamiento evaluados. La mayor diferencia en el porcentaje de incremento se obtiene para los casos de fracturas de 40 pies de largo (0,01% para Banda 1 y 0,02% para Banda 10, Banda 20 y Radial), lo cual indica que la altura de la fractura no es significativa como parámetro de diseño, pues no afecta al esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento. Sin embargo, es importante evaluar su impacto para el diseño de fracturas con longitudes mucho menores a 40 pies.

A fin de verificar el impacto de la longitud de la fractura en la frecuencia de radiación, se analizó la producción acumulada de crudo para largos de 40 y 200 pies de largo (diferentes del valor óptimo de 70 pies). Para ello se realizaron sensibilidades en los apuntalantes Fe_2O_3 , ALFE y JL-P, calentando a 120 kW con los valores comerciales la frecuencia de radiación y bajo los modelos de calentamiento Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial. Los resultados de la frecuencia óptima en función de los diferentes materiales y longitudes de fractura se presentan a continuación en la Tabla N° 4.8.

Tabla N° 4.8: Frecuencia óptima para cada longitud de fractura y apuntalante, para el caso Tía Juana bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento y los modelos Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial

Modelo de Calentamiento Banda 1			
Largo de la fractura (pies) / forma	Fe₂O₃	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	163	40	163
70 / Cuadrada	163	40	163
200 / Rectangular	163	13,56	163
Modelo de Calentamiento Banda 10			
Largo de la fractura (pies) / forma	Fe₂O₃	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	163	163	163
70 / Cuadrada	163	54	163
200 / Rectangular	163	54	163
Modelo de Calentamiento Banda 20			
Largo de la fractura (pies) / forma	Fe₂O₃	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	163	163	163
70 / Cuadrada	163	163	163
200 / Rectangular	163	54	163
Modelo de Calentamiento Radial			
Largo de la fractura (pies) / forma	Fe₂O₃	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	163	163	163
70 / Cuadrada	163	163	163
200 / Rectangular	163	163	163

Se puede observar que la frecuencia óptima de calentamiento se mantiene con el largo en los apuntalantes Fe₂O₃ y JL-P. Sin embargo, se observa que para el apuntalante ALFE la frecuencia óptima varía desde 40 a 13,56 MHz para las fracturas de 70 y 200 pies de largo, respectivamente, en el modelo Banda 1. Para ambos largos dicha frecuencia presenta un valor de 54 MHz en el modelo Banda 10, que aumenta a 163 MHz cuando se evalúa para los modelos Banda 20 y Radial. De éste análisis se puede concluir que el apuntalante ALFE es el más sensible a la variación de la frecuencia de calentamiento con la longitud de la fractura.

IV.1.3.2.3 Análisis global del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento óptimo para el caso Tía Juana.

Luego de haber realizado las simulaciones conceptuales de un pozo fracturado con los datos del yacimiento Tía Juana y bajo las características del esquema

Yacimiento-Fractura-Calentamiento, es necesario un análisis que englobe todos los modelos de calentamiento estudiados, para obtener resultados generales.

En esta sección se presenta un resumen de los resultados anteriores, y se llega a un esquema óptimo de apuntalante, frecuencia y modelo de calentamiento para su aplicación en el yacimiento Tía Juana. Este esquema óptimo se estudió con detalle, haciendo especial énfasis en parámetros como producción acumulada de crudo, tasa de producción diaria, perfiles de presión y temperatura, etc.

Como primer parámetro, se determinaron las frecuencias óptimas para cada apuntalante y modelo de calentamiento. De aquí se obtiene una combinación de apuntalante y frecuencia de radiación que aporta la mayor producción en cada modelo. Estos resultados se presentan en la Figura N° 4.22. Allí se puede ver que el modelo de calentamiento Banda 0 es quien aporta la mayor producción de crudo, por lo que se considera el modelo óptimo para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, para el caso Tía Juana. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que la diferencia de acumulado con respecto a los demás casos es menor al 2.5%, por lo que sería necesario hacer una evaluación económica del direccionamiento de la energía antes de escoger el esquema final de calentamiento.

En la Tabla N° 4.9 se presentan los valores de factor de recobro y porcentaje de incremento, calculados a partir de los valores óptimos de cada modelo de calentamiento. El factor de recobro se determinó dividiendo la producción acumulada en 20 años del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento entre el POES del caso Tía Juana ($3,2455 \times 10^6$ bbl). El porcentaje incremental se calculó con respecto al esquema Yacimiento-Fractura sin calentamiento (ver sección IV.2). Para el caso de una fractura de 70 pies bajo el esquema Yacimiento-Fractura, el valor del acumulado de producción en 20 años es de 608,2 Mbbl.

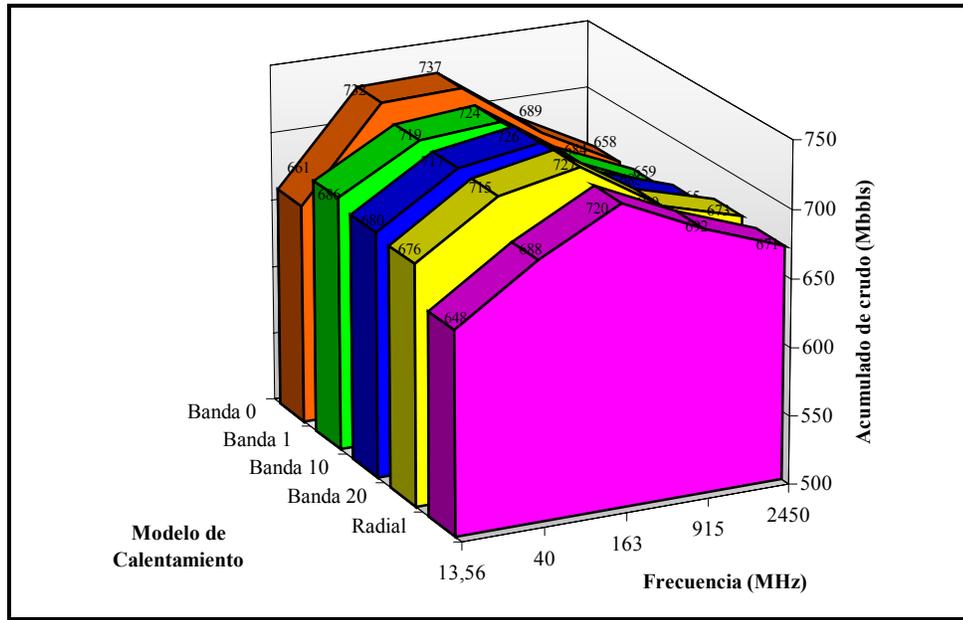


Figura N° 4.22: Apuntalantes y frecuencias óptimas para cada modelo de calentamiento estudiado en el caso Tía Juana, con una fractura de 70 pies y bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Tabla N° 4.9: Factor de recobro y % de incremento para cada óptimo de los modelos de calentamiento estudiados en el caso Tía Juana, para 70 pies de largo.

Modelo de calentamiento	Apuntalante/Frecuencia	Factor de Recobro	% Incremento
Radial	JL-P/163	22,19 %	18,38 %
Banda 20	Fe ₂ O ₃ /163	22,41 %	19,55 %
Banda 10	Fe ₂ O ₃ /163	22,38 %	19,40 %
Banda 1	Fe ₂ O ₃ /163	22,30 %	18,97 %
Banda 0	Fe ₂ O ₃ /54	22,72 %	21,24 %

Se observa que los valores del factor de recobro son iguales para los modelos de calentamiento estudiados, por lo que no se utiliza éste parámetro para determinar el modelo de calentamiento óptimo. Sin embargo, en cuanto al % de incremento se aprecia que el modelo de calentamiento Banda 0 presenta el mayor valor con respecto a los demás modelos estudiados (21,2 %).

En la Tabla N° 4.10 se presentan los valores de la producción acumulada de crudo para los esquemas Yacimiento-Fractura-Calentamiento y Yacimiento-Calentamiento. También se calcula la relación entre la producción de los modelos de

calentamiento con y sin fractura, mediante la división de la producción del pozo fracturado (esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento) por el pozo sin fracturar pero con aplicación de calentamiento (esquema Yacimiento-Calentamiento). Esta relación se utiliza para evaluar el incremento de la producción debido a la fractura. Ambos esquemas fueron calentados con los valores óptimos de potencia y frecuencia de cada modelo de calentamiento.

Tabla N° 4.10: Relación entre yacimientos con y sin fractura para cada óptimo de los modelos de calentamiento estudiados en el caso Tía Juana, para 70 pies.

Modelo de calentamiento	Apuntalante/Frecuencia Óptimos	Producción de YFC ^a (Mbbls)	Producción de YC ^b (Mbbls)	Relación
Radial	JL-P/163	720,1	429,6	1,68
Banda 20	Fe ₂ O ₃ /163	727,2	436,8	1,66
Banda 10	Fe ₂ O ₃ /163	726,2	437,8	1,66
Banda 1	Fe ₂ O ₃ /163	723,6	436,8	1,66
Banda 0	Fe ₂ O ₃ /54	737,5	436,6	1,69

a=Yacimiento-Fractura-Calentamiento, b=Yacimiento-Calentamiento

De la Tabla 4.10 se puede ver que no existen diferencias entre los modelos de calentamiento estudiados al comparar los valores la relación “yacimiento fracturado/yacimiento sin fracturar”.

De los resultados anteriores se puede afirmar que, para las simulaciones conceptuales del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Tía Juana, el modelo óptimo para la producción de crudo corresponde al Banda 0. Este modelo es el que presenta la mayor producción acumulada de crudo (737,5 Mbbls) y la mayor aceleración de la producción, con un porcentaje de incremento del 21,2% con respecto al caso de producción natural. Por lo tanto, este caso será analizado detalladamente a continuación.

En las Figuras N° 4.23 y 4.24 se presentan los resultados de la producción de crudo y de la tasa de producción diaria en función del tiempo para el caso óptimo del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, que corresponde a la combinación de un pozo vertical, con una fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe₂O₃ y calentando bajo el modelo Banda 0 a 120 kW y 54 MHz. Este esquema óptimo se

compara con otros esquemas de producción, como son: Yacimiento-Fractura (ver sección IV.1.2), Yacimiento-Calentamiento (el yacimiento es calentado en la misma área donde estaría la fractura, pero el pozo no está fracturado) y el caso de producción natural (ver sección IV.1.1).

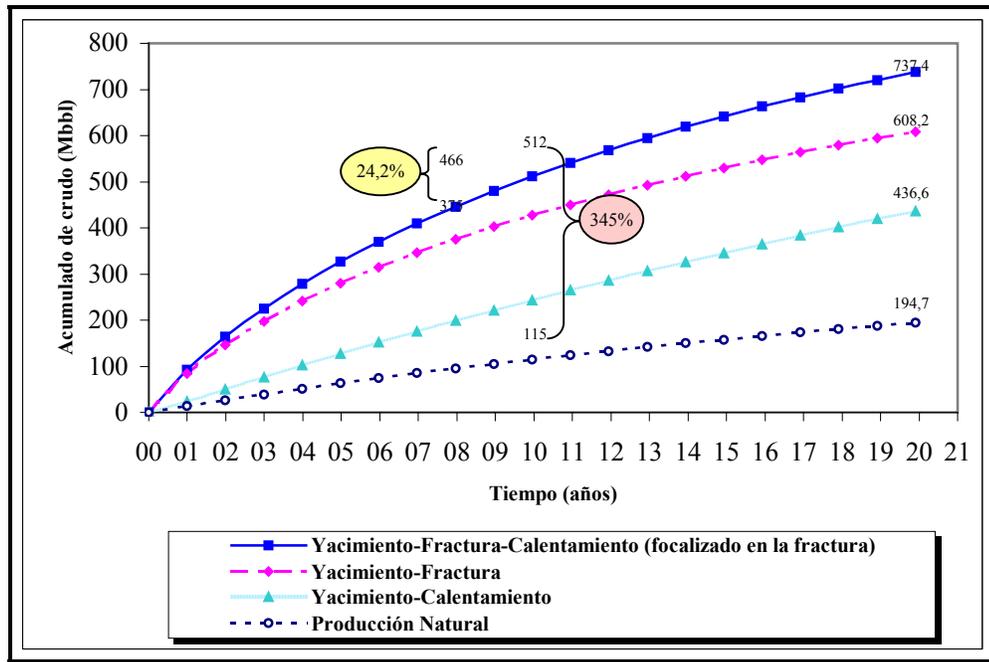


Figura N° 4.23: Producción para el caso óptimo del yacimiento Tía Juana (100 mD) bajo diferentes esquemas: Yacimiento-Fractura-Calentamiento, Yacimiento-Fractura, Yacimiento-Calentamiento y producción natural.

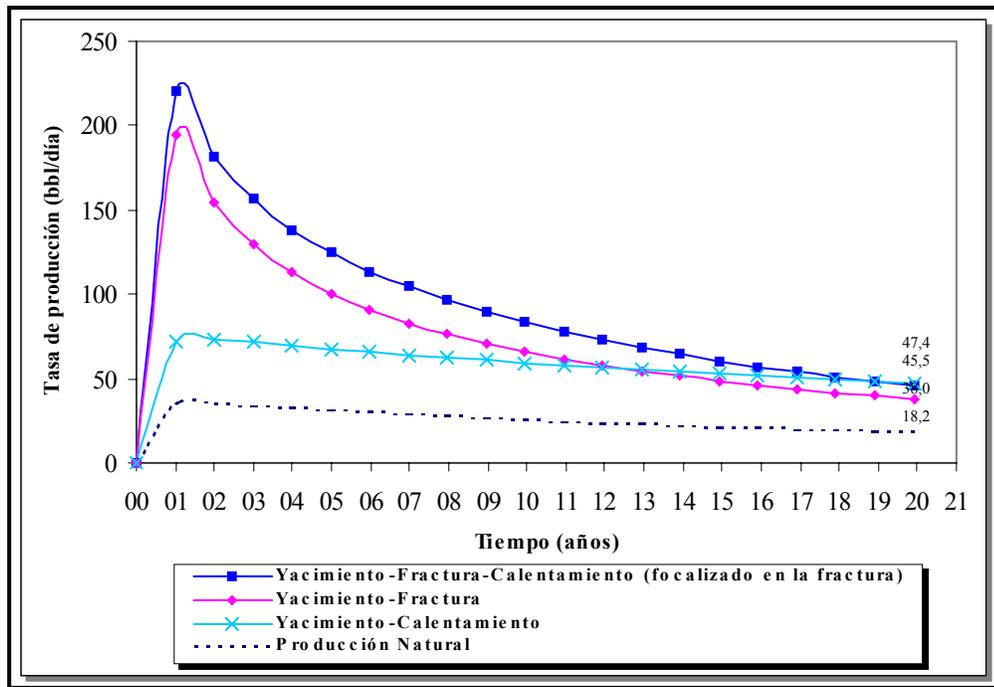


Figura N° 4.24: Producción para el caso óptimo del yacimiento Tía Juana (100 mD) bajo diferentes esquemas: Yacimiento-Fractura-Calentamiento, Yacimiento-Fractura, Yacimiento-Calentamiento y producción natural.

En ambas figuras se puede ver que el esquema con una mayor tasa de producción y con un mayor acumulado de crudo es el modelo Yacimiento-Fractura-Calentamiento. El factor de recobro que reporta dicho caso es de 22,7% (ver Tabla N° 4.10), el porcentaje de incremento es de un 21,24%, con respecto al caso Yacimiento-Fractura (ver sección IV.2), y de un 280% con respecto al caso de producción natural. Además, la tasa de producción diaria que se reporta a los 20 años de producción para el caso Yacimiento-Fractura-Calentamiento es mucho mayor al compararlo con el caso Yacimiento-Fractura (47,5 vs. 38,0 bbl/día, respectivamente). De estos resultados se puede ver una notable aceleración en la producción de crudo como consecuencia de la fractura y del calentamiento (modelo Banda 0).

Para hacer la comparación con los resultados de Ramírez^[8] se calculó el factor de recobro y el porcentaje de incremento con respecto al caso Yacimiento-Fractura en un tiempo de 8,2 años, obteniéndose valores de 14,3% y 24,2%. Tanto el factor de recobro como el incremento en la producción presentan valores superiores a los

el mismo período de tiempo y condiciones de calentamiento (120 kW y Dp de 60 m). Esta variación se atribuye a la diferencia existente entre la fractura escogida como modelo óptimo y la estudiada por Ramírez^[8], cuya longitud es de 200 pies (correspondiente a la geometría “rectangular”, ver sección III.4). Aunque se determinó que la producción acumulada de crudo aumenta con el largo de la fractura, también se demostró que la geometría “cuadrada” es la más apropiada para el diseño del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, y que la diferencia de incremento en la producción entre ambas geometrías es despreciable (<0,1%, ver Tabla 4.3).

En los estudios de Fonseca^[6] y Ovalles y col.^[32] se reporta un incremento en la producción (con respecto a la producción natural) de 86% al aplicar calentamiento dieléctrico a un yacimiento de crudo pesado (11° API) durante 10 años. En este caso el calentamiento es aplicado de manera radial, con una potencia de 50 kW y una frecuencia de 915 MHz. Para realizar una comparación de estos resultados con los obtenidos en el presente estudio, se calculó el porcentaje de incremento en la producción para el modelo de calentamiento óptimo del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento (calentamiento en Banda 0 con 120 kW y 163 MHz), con respecto al caso de producción natural (ver secciones IV.1.1 y IV.1.2), en un tiempo de 10 años. El porcentaje de incremento correspondiente es de 345%, que es mucho mayor al reportado por Fonseca^[6] y Ovalles y col.^[32], lo cual se atribuye a la presencia de la fractura y al direccionamiento del calentamiento.

El perfil de temperaturas en función del tiempo para el caso óptimo del caso Tía Juana se presenta en la Figura N° 4.25, en la que se puede ver el efecto del calentamiento en el área central del yacimiento, correspondiente a la fractura. A medida que transcurre el tiempo se produce un aumento en la temperatura, que alcanza los 340 °F en las cercanías del pozo. Por efecto del modelo de calentamiento (que focaliza la energía en la fractura), se observa un aumento en la temperatura que se extiende más allá de la fractura (70 pies de largo), alcanzando la arena productora. Este resultado es el esperado, puesto que al concentrar la energía en la fractura se espera un calentamiento mucho mayor en ésta área que en el resto del yacimiento

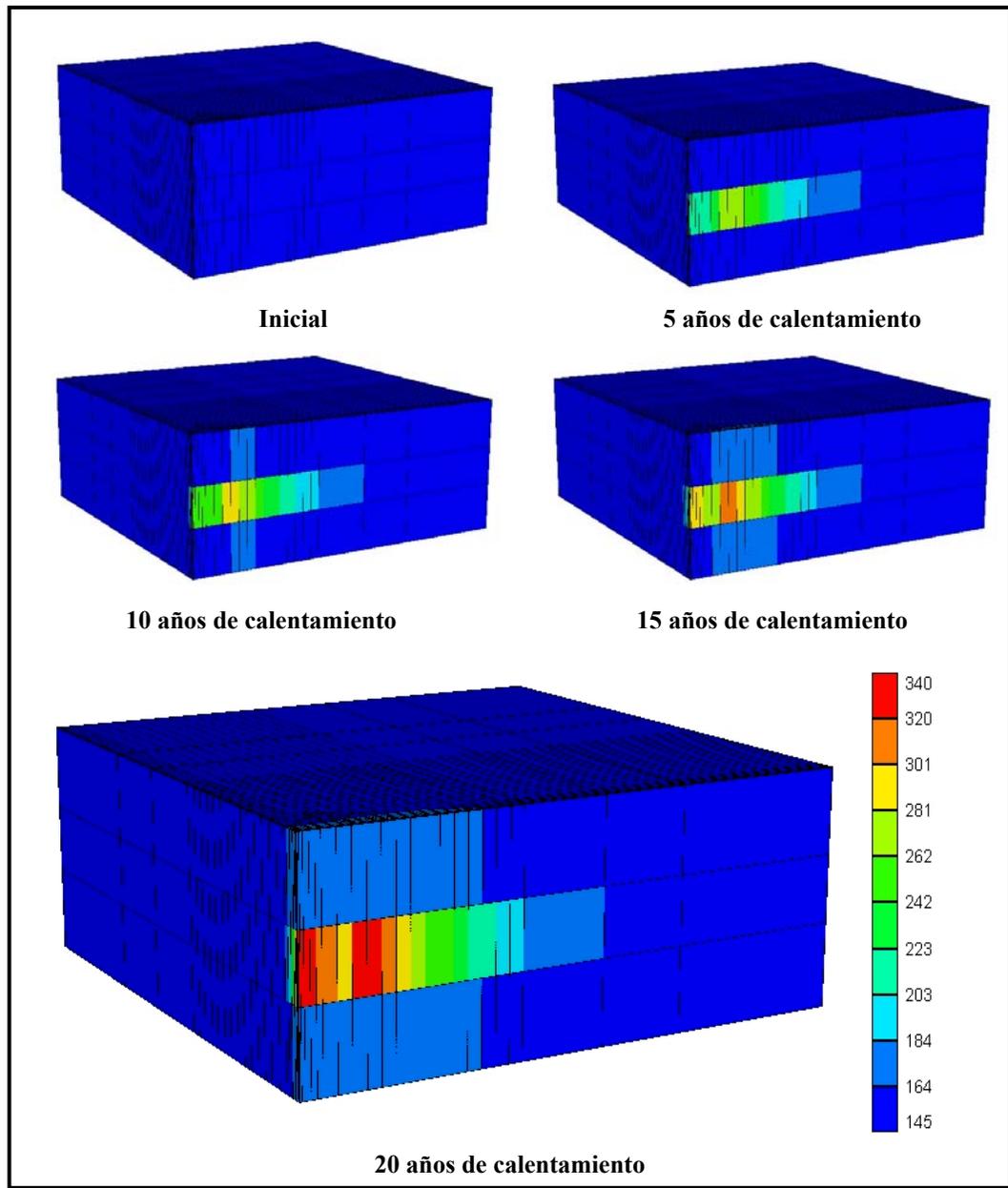


Figura N° 4.25: Perfil de temperaturas para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Tía Juana (100 mD). Caso óptimo de calentamiento: fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentando en la fractura a 120 kW y 163 MHz.

Ramírez^[8] reporta en su estudio un perfil de temperaturas en el cual el aumento se observa solamente en las cercanías del pozo. Esta distribución es esperada cuando el calentamiento es radial, tal y como lo reporta Fonseca^[6] en sus resultados. Al comparar el perfil obtenido en el presente trabajo con el de Ramírez^[8], se puede

Yacimiento-Fractura-Calentamiento presenta un perfil de temperaturas acorde con lo esperado para el caso en estudio.

En la Figura N° 4.26 se presenta el perfil de temperaturas en función de la distancia a los 20 años de simulación. Allí se aprecia la forma de “toroide”, que se ajusta al comportamiento esperado para el modelo óptimo de calentamiento (Banda 0) del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

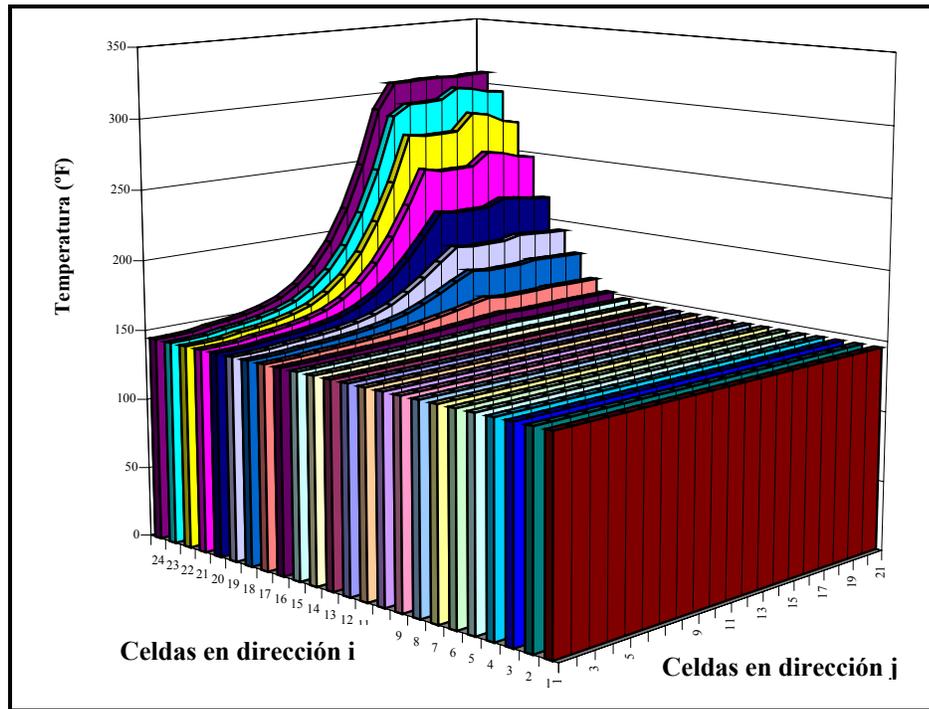


Figura N° 4.26: Perfil de temperatura en la capa intermedia de la malla para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Tía Juana (100 mD). Caso óptimo de calentamiento: fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentando en la fractura a 120 kW y 163 MHz.

En la Figura N° 4.27 se presenta el perfil de presiones en función del tiempo para el caso optimo del yacimiento Tía Juana.

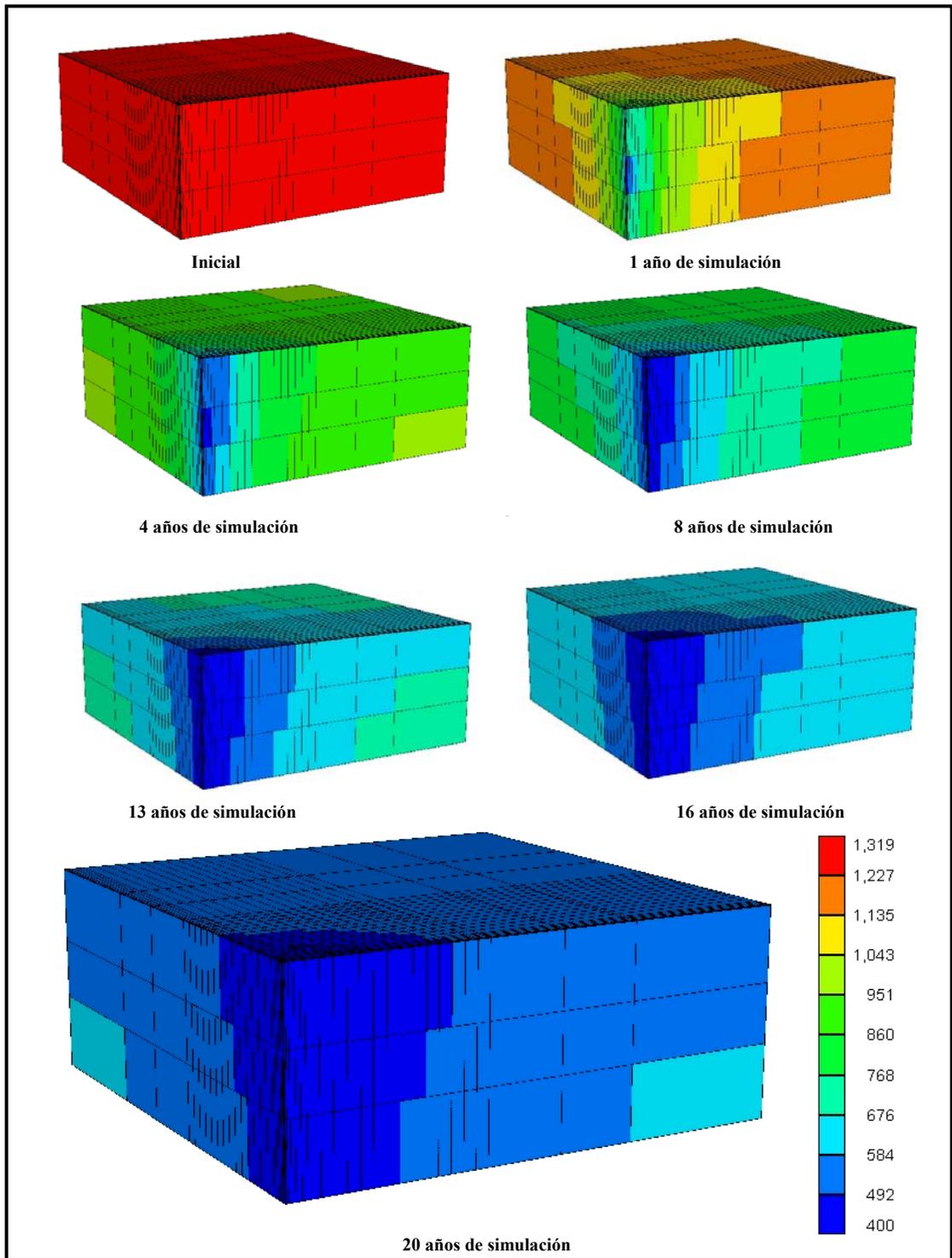


Figura N° 4.27: Perfil de presión para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Tía Juana (100 mD). Caso óptimo de calentamiento: fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentando en la fractura a 120 kW y 163 MHz.

Se observa que la distribución de las presiones a lo largo del yacimiento no es homogénea y que disminuye continuamente a medida que transcurre el tiempo. Para el año 13 se puede ver cómo se ha agotado la mayor parte de la energía interna del yacimiento, y al final de la simulación la presión ha alcanzado un valor de 400 lpc en las zonas cercanas al pozo, que corresponde a la presión de fondo fluvente del pozo. Este perfil es similar al reportado por Ramírez^[8] en su estudio, y concuerda con lo esperado para éste trabajo.

IV.2 ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO CUANDO ES APLICADO AL YACIMIENTO CERRO NEGRO

Seguidamente se presentan los resultados de las simulaciones numéricas conceptuales de un pozo vertical que ha sido modelado con parámetros del yacimiento Cerro Negro, y con las propiedades de los fluidos allí presentes. En dicho modelo, el pozo ha sido fracturado hidráulicamente y es calentado con energía electromagnética.

Para la evaluación de esta técnica como una herramienta para la recuperación mejorada de petróleo utiliza la metodología explicada en la sección III.7, y que fue aplicada en el estudio del yacimiento Tía Juana. Debido a que ya se conoce el procedimiento de análisis, los resultados para el caso del yacimiento Cerro Negro serán presentados brevemente en este capítulo, y se encuentran descritos con detalle en el Apéndice C.

IV.2.1 Simulación conceptual de un pozo bajo producción natural para el caso Cerro Negro

Los resultados de la simulación conceptual para el caso de la producción natural del yacimiento Cerro Negro se presentan en las Figuras N° 4.28.a-f. En ellas se presenta la producción acumulada de crudo, tasa de producción diaria, presión promedio del yacimiento, relación Gas-Petróleo (RGP), viscosidad del crudo en la boca del pozo y la presión de fondo fluvente, todos en función del tiempo.

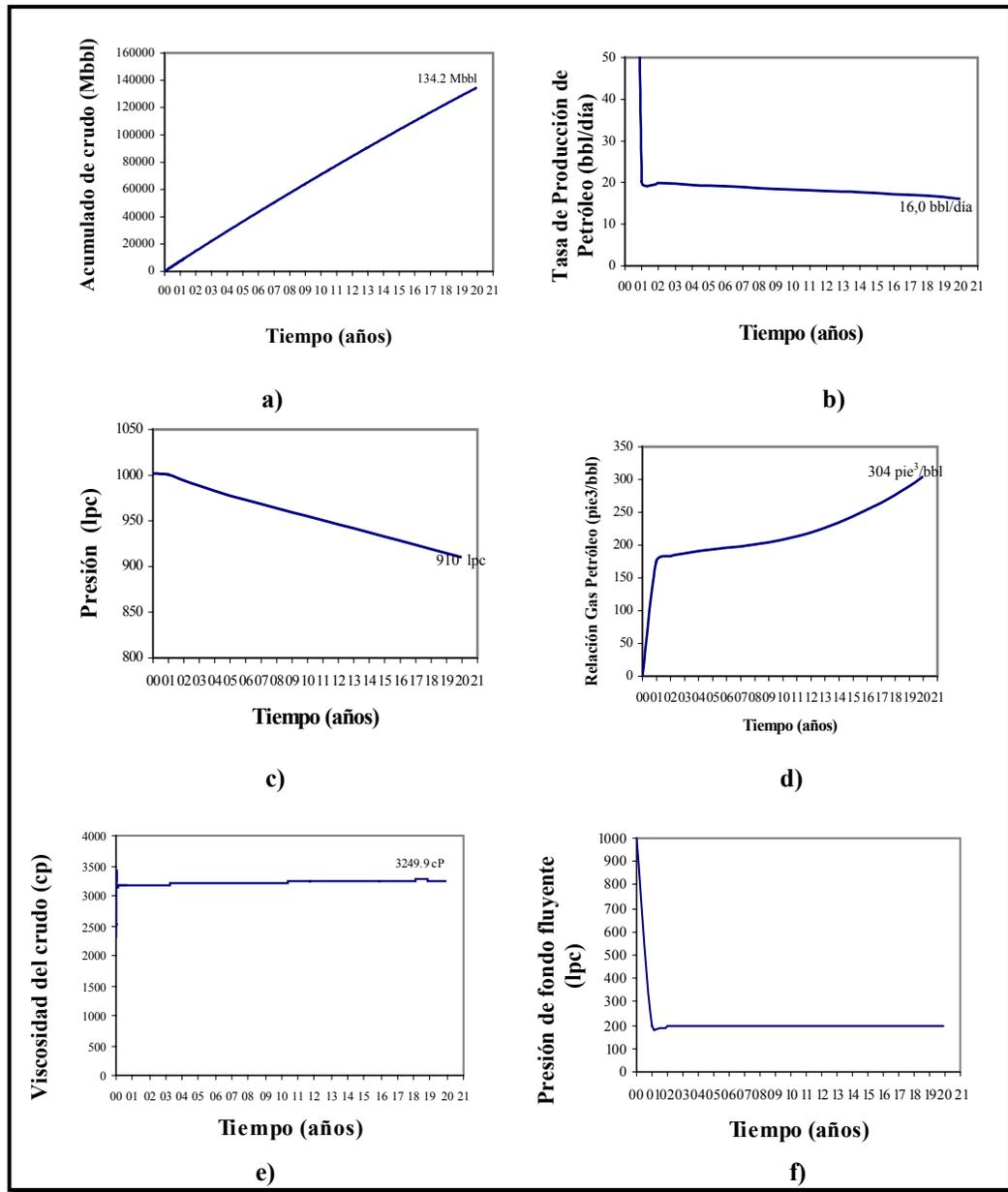


Figura N° 4.28: Simulación conceptual de un pozo con los datos del Yacimiento Cerro Negro: a) Producción acumulada de crudo, b) Tasa de producción diaria, c) Presión promedio del yacimiento, d) Relación Gas Petróleo, e) Viscosidad del crudo, f) Presión de fondo fluyente.

Se observó que la producción acumulada de crudo aumenta en función del tiempo, hasta llegar a un valor de 134.2 Mbbls en 20 años. La tasa de producción diaria decae abruptamente en los primeros días de producción desde 50 hasta 16 bbl/día. La presión promedio del yacimiento disminuye desde su valor inicial en 1000 hasta 910 lpc.

La relación gas-petróleo (RGP) inicial (1^{er} día de simulación) es de 66,5 pie³/bbl, y este valor va aumentando hasta llegar a un valor de 175 pie³/bbl en el primer año de producción. A partir de ese momento la RGP aumenta progresivamente hasta llegar a un valor 304 pie³/bbl al final de la simulación. Este comportamiento se debe al desprendimiento del gas disuelto presente en el crudo a medida que la presión del yacimiento disminuye.

La viscosidad del crudo aumenta con el tiempo, como consecuencia de la caída en la presión del yacimiento. Este resultado es lo esperado, pues al tratarse de crudo vivo la cantidad de gas que se encuentra disuelta en el crudo disminuye con la caída de la presión, por lo que la viscosidad aumenta. La presión de fondo fluyente se corresponde con la presión del yacimiento para el momento en que comienza la simulación, y luego disminuye abruptamente hasta estabilizarse en 200 lpc, manteniéndose constante durante el resto de la simulación.

IV.2.2 Simulación conceptual de un pozo bajo el esquema Yacimiento-Fractura sin calentamiento para el caso Cerro Negro.

Se analizó el esquema Yacimiento-Fractura sin la aplicación del calentamiento electromagnético, siguiendo el mismo procedimiento que se utilizó para el análisis del yacimiento Tía Juana.

El impacto de la geometría de la fractura en el esquema Yacimiento-Fractura fue evaluado a través de sensibilidades en el largo de la fractura, considerando valores de 40, 70 y 200 pies y tomando la altura como constante con la longitud de la misma. Debido a que no se aprecian diferencias en la producción de crudo por efecto de la variación en el largo la fractura cuando se utiliza la permeabilidad real de la arena (12 D), se realizaron sensibilidades disminuyendo dicho parámetro, lo cual permitió analizar el efecto de la geometría de la fractura en la producción acumulada de crudo. Los resultados para 100 mD se presentan a continuación en la Figura N° 4.29.

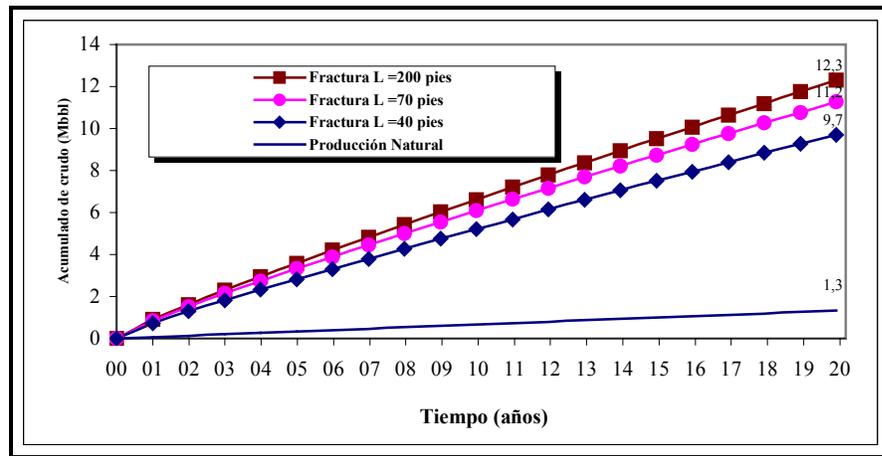


Figura N° 4.29: Producción acumulada de crudo variando del largo de la fractura, en el esquema Yacimiento-Fractura para el caso Cerro Negro (100 mD).

Con una permeabilidad de la arena de 100 mD se observa significativamente el efecto de la longitud de la fractura en la producción, obteniéndose una mayor producción (desde 9,7 hasta 12, 3 Mbbls) a medida que se aumenta la longitud de fractura (desde 70 hasta 200 pies). En el Apéndice A se presenta un breve estudio de los esquemas Yacimiento-Fractura y Yacimiento-Fractura-Calentamiento utilizando la permeabilidad real de la arena (900 mD).

A continuación se analizó el efecto del largo y de la altura de la fractura en el esquema Yacimiento-Fractura. Al igual que en el yacimiento Tía Juana, se consideró que la fractura crece verticalmente en la zona de interés hasta llegar a una barrera o tope^[22], que se encuentra por encima y por debajo de la misma, con lo que la fractura tendrá una altura inicial total de 140 pies.

Se estudiaron 2 casos de altura: constante y variable, para cada largo de fractura (40, 70 y 200 pies). Por consiguiente, se estudian 6 geometrías en total, tal y como se presentó en la sección III.4. Para ello cual se realizaron simulaciones del esquema Yacimiento-Fractura haciendo sensibilidades en el largo y en la altura de la fractura. Los resultados se presentan en la Figura N° 4.30.

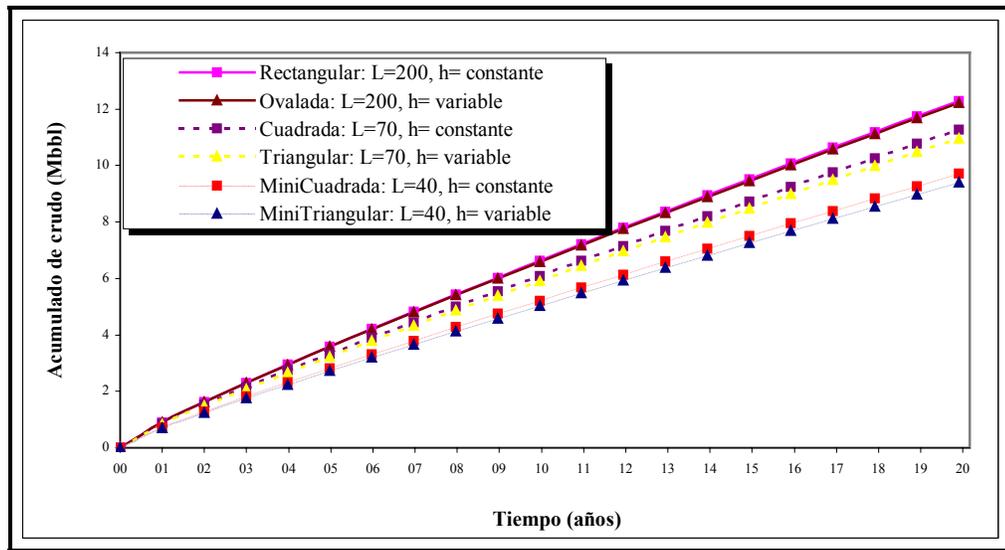


Figura N° 4.30: Variación de la geometría de la fractura en el esquema Yacimiento-Fractura para el caso Cerro Negro con permeabilidad de la arena de 100 mD.

Se observa que la producción acumulada de crudo aumenta con el largo de la fractura. Tomando la altura como constante, la producción acumulada aumenta de 9,7 a 12,2 bbls al pasar de 40 a 200 pies de largo. Para todos los largos evaluados, las fracturas con altura constante presentan una mayor producción acumulada de crudo con respecto a las fracturas de altura variable. Para cuantificar este incremento de producción de crudo se calculó el porcentaje de incremento de las fracturas de altura constante y variable para los largos estudiados (200 vs. 70 vs. 40 pies), con respecto al caso “base” (producción natural). También se calculó la diferencia entre los valores de altura constante y los de altura variable. Los resultados se presentan en la Tabla N° 4.11.

Tabla N° 4.11: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes alturas para el esquema Yacimiento-Fractura, para Cerro Negro

	% Incremento: Esquema Yacimiento-Fractura vs. Producción Natural		
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-cte- h-var)
40 pies	631,5%	608,1%	23,4%
70 pies	748,9%	725,8%	23,2%
200 pies	826,2%	820,2%	6,0%

Las fracturas con altura constante presentan una mayor producción acumulada de crudo con respecto a las fracturas de altura variable: 631% vs. 608%, respectivamente para 40 pies, y similar para los otros largos. Tanto para las fracturas de altura constante como de altura variable, el porcentaje de incremento aumenta con el largo de la fractura. Se observa que la diferencia en el acumulado de crudo disminuye al aumentar el largo, al comparar fracturas de diferentes alturas: decrece desde 23,4% hasta 6% al aumentar el largo de 40 a 200 pies. Por lo tanto, la mayor diferencia se obtiene al comparar fracturas de diferentes alturas y 40 pies de largo: 23,4%.

Este resultado indica que es necesario considerar la altura de la fractura como un parámetro de importancia pues la diferencia al comparar fracturas de diferentes alturas es mayor al 5% en todos los largos estudiados, a diferencia del resultado obtenido para el caso Tía Juana.

Analizando los resultados obtenidos, y para guardar consistencia con el estudio del yacimiento Tía Juana, se escogió utilizar una fractura de geometría radial, con una longitud de 70 pies y una altura constante de 140 pies para realizar el análisis del yacimiento Cerro Negro bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento. Esta geometría se corresponde con una fractura “cuadrada”, en la cual el porcentaje de incremento en la producción con respecto al caso base es de aproximadamente 750%. El diseño de este tipo de fractura requiere una simplificación del modelo Radial ^[22] que fue explicado con detalle en la sección III.4.4.

IV.2.3 Simulación conceptual de un pozo bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

En esta sección se presentan de manera sintetizada los resultados de la simulación conceptual de un pozo fracturado y calentado con energía electromagnética (RF o MW). Para ello se utilizaron los datos del yacimiento Cerro Negro así como las propiedades de los fluidos allí presentes.

Para el estudio de este yacimiento se van a utilizar los mismos modelos de calentamiento que fueron evaluados para yacimiento Tía Juana y que son explicados con detalle en la sección III.6: Banda 0, Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial. De igual forma, se estudió el aporte de los materiales apuntalantes Fe_2O_3 , ALFE y JL-P al esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, con las características del yacimiento Cerro Negro.

Se analizaron los rangos aplicables de potencia con la finalidad de seleccionar un valor apropiado y se determinó la frecuencia de radiación que produce un mayor acumulado de crudo para cada uno de los apuntalantes y modelo de calentamiento. Luego se realiza la comparación entre los casos estudiados para establecer un escenario óptimo en cada modelo de calentamiento. Para ello se realizaron simulaciones conceptuales variando la potencia y la frecuencia de calentamiento y, tomando como criterio que la temperatura máxima del yacimiento no debe exceder los 500 °F.

Adicionalmente se analizó el efecto de la geometría de la fractura para verificar si se sigue una tendencia similar a la obtenida en el caso Yacimiento-Fractura descrito en la sección III.7. De igual manera se determinó la frecuencia de radiación óptima para cada largo de fractura estudiados y para cada modelo de calentamiento.

IV.2.3.1.1 Análisis de la potencia óptima de calentamiento para los modelos *Banda 0, Banda 1, Banda 10, Banda 20* y *Radial* en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

A continuación se presenta un resumen de los resultados de las simulaciones conceptuales del yacimiento Cerro Negro bajo los modelos Banda 0, Banda1, Banda 10, Banda 20 y Radial, en donde se analizaron los rangos de potencia aplicables y de frecuencias óptimas según el material apuntalante utilizado. Para ello se siguió la metodología planteada en la sección III, y que ha sido utilizada en el estudio del yacimiento Tía Juana. Un análisis detallado de los resultados de ésta sección se presenta en el Apéndice N° C.

Para la selección del rango de potencias aplicables se tomó como criterio que la temperatura más alta del modelo (que se presenta en la celda 24,23,2) no

debe sobrepasar los 500 °F, mientras que para la selección del rango de frecuencias se tomaron aquellas que producen mayor volumen de crudo en 20 años. Finalmente se seleccionó la potencia y la frecuencia más adecuada para cada apuntalante y modelo de calentamiento según las condiciones antes presentadas. Estos resultados se presentan en la Tabla N° 4.12.

Del análisis de la variación de la potencia y frecuencia para cada material apuntalante y modelo de calentamiento (ver Tabla N° 4.12) se pueden extraer los siguientes resultados:

- Para los tres apuntalantes y modelos de calentamiento estudiados se observó que al aumentar la potencia de calentamiento desde 10 hasta 50 kW, tanto la producción de crudo como la temperatura de la celda (24,23,2) aumentan.
- Se observó que todos los apuntalantes presentaron un máximo de temperatura al calentar con una frecuencia de 2450 MHz al variar la potencia desde 10 hasta 50 kW (ver sección IV.1.3.2.1).
- Aún cuando en algunos casos es posible utilizar a mayores potencias de calentamiento, se escogió el valor de 20 kW para guardar consistencia entre todos los modelos de calentamiento.

Se puede ver que, para el modelo Banda 0 las frecuencias óptimas de calentamiento de los apuntalantes ALFE y Fe_2O_3 están en 40 y 1499 MHz, respectivamente. En el caso del JL-P no se observó que ninguna frecuencia resalte como óptima, lo cual ha sido explicado anteriormente. Para el modelo Banda 1, el valor óptimo de la frecuencia se mantiene en 1499 MHz para el apuntalante Fe_2O_3 , aumenta a 2450 MHz para el ALFE y presenta un valor de 915 MHz para el JL-P. Para el modelo de calentamiento en Banda 10, los apuntalantes Fe_2O_3 y ALFE mantienen los valores de frecuencia óptima en 1499 y 2450 MHz, mientras que el apuntalante JL-P presenta un valor de 2450 MHz. Los modelos Banda 20 y Radial presentaron un valor de frecuencia óptima de 2450 MHz.

Tabla N° 4.12: Rangos de potencia aplicables y de frecuencias óptimas para cada material apuntalante, calentando bajo los modelos Banda 0, Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial, para el caso Cerro Negro.

Modelo de calentamiento Banda 0					
Apuntalante	Rango de potencias aplicables	Rango de frecuencias óptimas	Potencia óptima de calentamiento	Frecuencia óptima de radiación	Producción de crudo en 20 años (Mbbls)
Fe ₂ O ₃	10-50 kW	915-2450 MHz	20 kW	1499 MHz	16,1
ALFE	10-20 kW	40-163 MHz	20 kW	40 MHz	15,9
JL-P	10-20 kW	Todas las frecuencias presentan igual producción de crudo (ver sección IV.1.3.1.1.c)	20 kW	No se puede determinar un valor óptimo (ver sección IV.1.3.1.1.c)	14,3
Modelo de calentamiento Banda 1					
Apuntalante	Rango de potencias aplicables	Rango de frecuencias óptimas	Potencia óptima de calentamiento	Frecuencia óptima de radiación	Producción de crudo en 20 años (Mbbls)
Fe ₂ O ₃	10-50 kW	915-2450 MHz	20 kW	1499 MHz	16,0
ALFE	10-30 kW	163-2450 MHz	20 kW	2450 MHz	15,2
JL-P	10-30 kW	915-2450 MHz	20 kW	915 MHz	15,1
Modelo de calentamiento Banda 10					
Apuntalante	Rango de potencias aplicables	Rango de frecuencias óptimas	Potencia óptima de calentamiento	Frecuencia óptima de radiación	Producción de crudo en 20 años (Mbbls)
Fe ₂ O ₃	10-50 kW	915-2450 MHz	20 kW	1499 MHz	15,9
ALFE	10-40 kW	915-2450 MHz	20 kW	2450 MHz	15,6
JL-P	10-40 kW	915-2450 MHz	20 kW	2450 MHz	15,6
Modelo de calentamiento Banda 20					
Apuntalante	Rango de potencias aplicables	Rango de frecuencias óptimas	Potencia óptima de calentamiento	Frecuencia óptima de radiación	Producción de crudo en 20 años (Mbbls)
Fe ₂ O ₃	10-50 kW	915-2450 MHz	20 kW	2450 MHz	15,9
ALFE	10-50 kW	915-2450 MHz	20 kW	2450 MHz	15,6
JL-P	10-50 kW	915-2450 MHz	20 kW	2450 MHz	15,6
Modelo de calentamiento Radial					
Apuntalante	Rango de potencias aplicables	Rango de frecuencias óptimas	Potencia óptima de calentamiento	Frecuencia óptima de radiación	Producción de crudo en 20 años (Mbbls)
Fe ₂ O ₃	10-50 kW	915-2450 MHz	20 kW	2450 MHz	15,3
ALFE	10-50 kW	915-2450 MHz	20 kW	2450 MHz	15,7
JL-P	10-50 kW	915-2450 MHz	20 kW	2450 MHz	15,7

Analizando la Tabla N° 4.12, se observa que el apuntalante Fe₂O₃ presentó la mayor producción acumulada de crudo en los modelos Banda 0 a Banda 20, mientras que el apuntalante JL-P reportó los mayores valores para el modelo Radial. Sin embargo, aunque la diferencia entre los valores de producción de los óptimos de cada modelo es menor al 1%, se tomará como óptimo de calentamiento el modelo Banda 0, ya que presenta el mayor volumen de crudo de todas las combinaciones estudiadas (16 Mbbls).

Para los modelos de calentamiento que van desde Banda 1 hasta Radial, los materiales que están siendo calentados (arena y apuntalante) se pueden representar con un valor promedio de la distancia de penetración (Dp promedio), que es función del área radiada de cada material: arena + apuntalante (ver sección IV.1.3.2.1). Los cálculos de dicho valor, para los modelos Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial, se presentan a continuación en la Tabla N° 4.13.

Tabla N° 4.13: Valor del Dp promedio de los materiales individuales y del área total calentada para el yacimiento Cerro Negro, al ser calentados bajo los óptimos de los modelos Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial.

Modelo de Calentamiento Banda 1			
Material	Ancho del área calentada (pies)	% que ocupa del área total	Dp del material (m)
Arena Cerro Negro	1,00	92,3%	3,66
Apuntalante Fe₂O₃	0,083	7,7%	5,07
Arena Cerro Negro + Apuntalante	1,083	100,0%	3,78
Modelo de Calentamiento Banda 10			
Material	Ancho del área calentada (pies)	% que ocupa del área total	Dp del material (m)
Arena Cerro Negro	10,00	99,2%	3,66
Apuntalante Fe₂O₃	0,083	0,8%	5,07
Arena Cerro Negro + Apuntalante	10,083	100,0%	3,67
Modelo de Calentamiento Banda 20			
Material	Ancho del área calentada (pies)	% que ocupa del área total	Dp del material (m)
Arena Cerro Negro	20,00	99,6%	3,58
Apuntalante Fe₂O₃	0,083	0,4%	2,35
Arena Cerro Negro + Apuntalante	20,083	100,0%	3,575
Modelo de Calentamiento Radial			
Material	Ancho del área calentada (pies)	% que ocupa del área total	Dp del material (m)
Arena Cerro Negro	990,00	100,0%	3,58
Apuntalante JL-P	0,083	0,0%	0,0002
Arena Cerro Negro + Apuntalante	990,083	100,0%	3,58

Para el modelo de calentamiento Banda 1 la arena Cerro Negro representa el 92,3% del área total calentada, por lo que se observa que el Dp promedio del área total tiene un valor muy cercano al de la arena (3,78 m). Esto se debe a que el área calentada está compuesta por más arena que apuntalante, por lo que predomina el valor de Dp de la primera. A medida que la zona radiada es mayor, el Dp promedio del área calentada se aproxima más al valor de la arena Cerro Negro. Se observa que la variación en el Dp promedio es mucho menor a la que se estudio para el caso Tía Juana debido a que la arena del yacimiento Cerro Negro y el apuntalante Fe_2O_3 presentan valores muy cercanos de Dp (son del mismo orden de magnitud).

El caso límite viene representado por el modelo Radial, en el cual el valor de Dp es igual al de la arena (3,58 m), aun cuando el apuntalante JL-P presenta un valor que es 10^4 veces menor. De esto último se puede tomar como despreciable la presencia del apuntalante para el calentamiento del yacimiento.

IV.2.3.1.2 Análisis de la Geometría de la Fractura para los casos de calentamiento *Banda 0, Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial*, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Cerro Negro.

En esta sección se realizaron sensibilidades en la forma y la longitud de la fractura con los modelos de calentamiento Banda 0, Banda1, Banda 10, Banda 20 y Radial. Siguiendo la metodología aplicada en la sección IV.1.3.1.3, y calentando los apuntalantes Fe_2O_3 y JL-P a 20 kW y a las frecuencias óptimas, se evaluaron fracturas de 40, 70 y 200 pies de largo, de altura constante y variable, tal y como se especificó en la sección III.4. Un análisis detallado de los resultados de ésta sección se presentan en el Apéndice N° C.

Los resultados indicaron que se presenta la misma tendencia que para el caso Cerro Negro: 1) Para las fracturas de altura constante (“minicuadrada”, “cuadrada” y “rectangular”) a medida que aumenta el largo de la fractura de 40 a 70 a 200 pies, también aumenta la producción; 2) En todos los largos estudiados se observa que la diferencia entre fracturas de alturas diferentes (constante vs. variable) disminuye con el largo de la fractura.

Para cuantificar el efecto de la altura de la fractura en la producción de crudo, se calculó el porcentaje de incremento con respecto al caso Yacimiento-Fractura para cada largo de fractura estudiado (40, 70 y 200 pies). Luego se calculó la diferencia entre los valores de altura constante y los de altura variable. Los resultados para los modelos de calentamiento Banda 0, Banda1, Banda 10, Banda 20 y Radial se presentan en la Tabla N° 4.14.

Tabla N° 4.14: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes alturas para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento bajo los esquemas Banda 0, Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial.

% Incremento: Esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento vs. Esquema Yacimiento-Fractura			
Modelo de calentamiento Banda 0			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-var - h-cte)
40 pies	42,0%	40,5%	1,6%
70 pies	42,2%	41,1%	1,1%
200 pies	45,4%	44,9%	0,5%
Modelo de calentamiento Banda 1			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-var - h-cte)
40 pies	41,8%	40,3%	1,5%
70 pies	42,2%	40,9%	1,2%
200 pies	45,5%	44,9%	0,5%
Modelo de calentamiento Banda 10			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-var - h-cte)
40 pies	42,4%	41,2%	1,2%
70 pies	41,8%	40,7%	1,1%
200 pies	44,6%	44,1%	0,5%
Modelo de calentamiento Banda 20			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-var - h-cte)
40 pies	42,2%	41,0%	1,2%
70 pies	41,1%	40,2%	0,9%
200 pies	44,1%	43,6%	0,5%
Modelo de calentamiento Radial			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-var - h-cte)
40 pies	44,6%	43,4%	1,2%
70 pies	40,2%	39,1%	1,0%
200 pies	42,7%	42,3%	0,4%

Se observa que el porcentaje de incremento es mayor en las fracturas de altura variable al comparar con las fracturas de altura constante. Por ejemplo, para el modelo Banda 0 el porcentaje de incremento es de 42,4 vs. 41,2% para fracturas de 40 pies con altura constante y variable, respectivamente. Lo mismo ocurre para los modelos Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial, y para todos los largos de fractura. Este resultado indica que las geometrías de altura variable (“minitriangular”, “triangular” y “ovalada”) son más sensibles al calentamiento dieléctrico que las geometrías de altura constante (“minicuadrada”, “cuadrada” y “rectangular”).

No se ve una tendencia en el porcentaje de incremento con el aumento de la longitud de la fractura ya que, independientemente de la altura de la fractura, presenta una disminución al pasar de 40 a 70 pies, y luego un aumento al pasar de 70 a 200 pies. Este resultados, se observa en todos los modelos de calentamiento, contrasta con la tendencia observada en el caso de la arena Tía Juana.

A fin de verificar el impacto de la longitud de la fractura en la frecuencia de radiación, se analizó la producción acumulada de crudo para largos de 40 y 200 pies de largo (diferentes del valor óptimo de 70 pies). Para ello se realizaron sensibilidades en los apuntalantes Fe_2O_3 , ALFE y JL-P, calentando a 20 kW con los valores comerciales la frecuencia de radiación y bajo los modelos de calentamiento Banda 0, Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial. Los resultados de la frecuencia óptima en función de los diferentes materiales y longitudes de fractura se presentan a continuación en la Tabla N° 4.15.

Analizando la tabla 4.15 se puede ver que para el modelo de calentamiento Banda 0 la frecuencia óptima depende de la longitud de la fractura en el caso del apuntalante Fe_2O_3 (pasa de 2450 a 1499 y a 915 MHz al aumentar el largo de 40 a 70 y a 200 pies), mientras que para el ALFE la frecuencia se mantiene en 40 MHz independientemente de la longitud de la fractura. En el caso del apuntalante JL-P no se observó que ninguna frecuencia óptima, comportamiento que ha sido explicado anteriormente. De este resultado se puede concluir que el apuntalante Fe_2O_3 es más sensible al diseño del largo de la fractura que el resto de los apuntalantes estudiados. Del modelo de calentamiento Banda 1 al Radial se

observa que las frecuencias óptimas de calentamiento se mantienen entre los valores de 915 y 2450 MHz, para todos los largos y apuntalantes estudiados.

Tabla N° 4.15: Valores de la frecuencia óptima para cada longitud de fractura y material apuntalante, para el caso Cerro Negro bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento y los modelos Banda 1, Banda 10, Banda 20 y Radial

Modelo de Calentamiento Banda 0			
Largo de la fractura (pies) / forma	Fe₂O₃	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	2450	40	-
70 / Cuadrada	1499	40	-
200 / Rectangular	915	40	-
Modelo de Calentamiento Banda 1			
Largo de la fractura (pies) / forma	Fe₂O₃	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	2450	2450	2450
70 / Cuadrada	1499	915	915
200 / Rectangular	915	915	915
Modelo de Calentamiento Banda 10			
Largo de la fractura (pies) / forma	Fe₂O₃	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	2450	2450	2450
70 / Cuadrada	1499	2450	2450
200 / Rectangular	2450	915	2450
Modelo de Calentamiento Banda 20			
Largo de la fractura (pies) / forma	Fe₂O₃	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	2450	2450	2450
70 / Cuadrada	2450	2450	2450
200 / Rectangular	2450	2450	2450
Modelo de Calentamiento Radial			
Largo de la fractura (pies) / forma	Fe₂O₃	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	2450	2450	2450
70 / Cuadrada	2450	2450	2450
200 / Rectangular	915	915	915

IV.2.3.1.3 Análisis global del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento óptimo para el caso Cerro Negro.

Luego de haber realizado las simulaciones conceptuales de un pozo fracturado con los datos del yacimiento Cerro Negro y bajo las características del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, es necesario un análisis que englobe todos los modelos de calentamiento estudiados, para obtener resultados más generales.

En esta sección se presenta un resumen de los resultados anteriores, y se llega a un esquema óptimo de apuntalante, frecuencia y modelo de calentamiento para su aplicación en el yacimiento Cerro Negro. Este esquema óptimo se estudió con detalle, haciendo especial énfasis en parámetros como la producción acumulada de crudo, tasa de producción diaria, perfiles de presión y temperatura, etc.

Como primer parámetro, se determinaron las frecuencias óptimas para cada apuntalante y modelo de calentamiento. De aquí se obtiene una combinación de apuntalante y frecuencia de radiación que aporta la mayor producción en cada modelo. Estos resultados se presentan en la Figura N° 4.31.

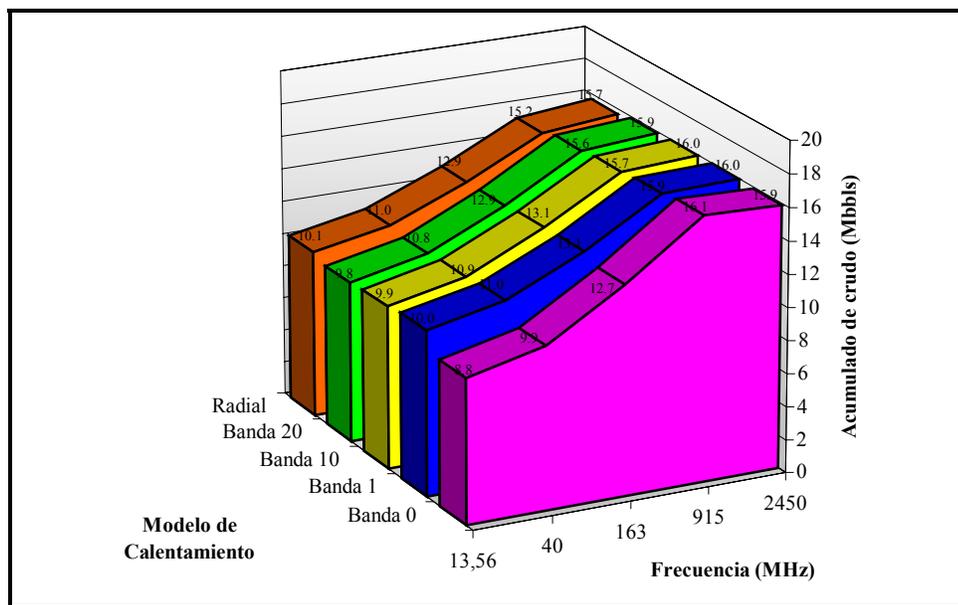


Figura N° 4.31: Apuntalantes y frecuencias óptimas para cada modelo de calentamiento estudiado en el caso Cerro Negro, con una fractura de 70 pies y bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Se puede ver que el modelo de calentamiento Banda 0 a una frecuencia de 915 MHz es quien aporta la mayor producción de crudo, por lo que se considera modelo óptimo para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, para el caso Cerro Negro. Sin embargo, es importante tomar en cuenta que la diferencia de acumulado con respecto a los demás casos es menor al 1%, por lo que sería necesario hacer una evaluación económica del direccionamiento de la energía antes de escoger el esquema final de calentamiento.

En la Tabla N° 4.16 se presentan los valores de factor de recobro y del porcentaje de incremento, calculados a partir de los valores óptimos de cada modelo de calentamiento. El factor de recobro se determinó dividiendo la producción acumulada en 20 años del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento entre el POES del caso Cerro Negro ($6,5537 \times 10^6$ MMSTB). El porcentaje incremental se calculó con respecto al esquema Yacimiento-Fractura (ver sección IV.2). Para el caso de una fractura de 70 pies bajo el esquema Yacimiento-Fractura sin calentamiento, el valor del acumulado de producción en 20 años es de 11,3 Mbbls.

Tabla N° 4.16: Factor de recobro y % de incremento para cada óptimo de los modelos de calentamiento estudiados en el caso Cerro Negro, para una fractura de 70 pies de largo.

Modelo de calentamiento	Apuntalante/Frecuencia	Factor de Recobro (%)	% Incremento
Radial	JL-P/2450	23,9%	39,1%
Banda 20	Fe ₂ O ₃ /2450	24,3%	41,1%
Banda 10	Fe ₂ O ₃ /1499	24,4%	41,8%
Banda 1	Fe ₂ O ₃ /1499	24,5%	42,2%
Banda 0	Fe ₂ O ₃ /1499	24,5%	42,3%

Se observa que los valores del factor de recobro son iguales para los modelos de calentamiento estudiados, por lo que no se utiliza éste parámetro para determinar el modelo de calentamiento óptimo. Sin embargo, en cuanto al % de incremento se aprecia que el modelo de calentamiento Banda 0 presenta el mayor valor con respecto a los demás modelos estudiados (42,3%).

En la Tabla N° 4.17 se presentan los valores de la producción acumulada de crudo para los esquemas Yacimiento-Fractura-Calentamiento y Yacimiento-Calentamiento. También se calcula la relación entre la producción de los modelos de calentamiento con y sin fractura, mediante la división de la producción del pozo fracturado (esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento) por el pozo sin fracturar pero con aplicación de calentamiento (esquema Yacimiento-Calentamiento). Esta relación se utiliza para evaluar el incremento de la producción debido a la fractura. Ambos esquemas fueron calentados con los valores óptimos de potencia y frecuencia de cada modelo de calentamiento.

Tabla N° 4.17: Relación entre yacimientos con y sin fractura para cada óptimo de los modelos de calentamiento estudiados en el caso Cerro Negro, para una fractura de 70 pies de largo.

Modelo de calentamiento	Apuntalante/Frecuencia Óptimos	Producción de YFC ^a (Mbbls)	Producción de YC ^b (Mbbls)	Relación
Radial	JL-P/2450	15,68	8,48	1,89
Banda 20	Fe ₂ O ₃ /2450	15,9	6,76	2,35
Banda 10	Fe ₂ O ₃ /1499	15,98	7,21	2,22
Banda 1	Fe ₂ O ₃ /1499	16,02	6,76	2,37
Banda 0	Fe ₂ O ₃ /1499	16,03	7,23	2,23

a=Yacimiento-Fractura-Calentamiento, b=Yacimiento-Calentamiento

De la Tabla 4.17 se puede ver que, al comparar los valores la relación “yacimiento fracturado/yacimiento sin fracturar”, la diferencia entre los modelos de calentamiento es menor al 1% .

De los resultados anteriores se puede afirmar que, para las simulaciones conceptuales del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Cerro Negro, el modelo óptimo para la producción de crudo corresponde al Banda 0. Este modelo es el que presenta la mayor producción acumulada de crudo (16,1 Mbbls) y la mayor aceleración de la producción, con un porcentaje de incremento del 42,3% con respecto al caso de producción natural. Por lo tanto, este caso será analizado detalladamente a continuación.

En las Figuras N° 4.32 y 4.33 se presentan los resultados de la producción de crudo y de la tasa de producción diaria en función del tiempo para el caso óptimo del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, que corresponde a la combinación de un pozo vertical, con una fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe₂O₃ y calentando bajo el modelo Banda 0 a 20 kW y 1499 MHz. Este esquema óptimo se compara con otros esquemas de producción, como son: Yacimiento-Fractura (sección IV.2.2), Yacimiento-Calentamiento (el yacimiento es calentado en la misma área donde estaría la fractura, pero el pozo no está fracturado) y el caso de producción natural (ver sección IV.2.1).

En ambas figuras se puede ver que el esquema con una mayor tasa de producción y con un mayor acumulado de crudo es el modelo Yacimiento-Fractura-Calentamiento. El factor de recobro que reporta este caso es de 24,5% (ver Tabla N° 4.16), el porcentaje de incremento es de un 42,2% con respecto al

caso Yacimiento-Fractura (ver sección IV.2), y de 1100% con respecto al caso de producción natural. Además, la tasa de producción diaria que se reporta a los 20 años de producción para el caso Yacimiento-Fractura-Calentamiento es mucho mayor al compararlo con el caso de producción natural (1,9 vs. 0,2 bbl/día, respectivamente). De estos resultados se puede ver una notable aceleración en la producción de crudo como consecuencia de la fractura y del calentamiento (modelo Banda 0).

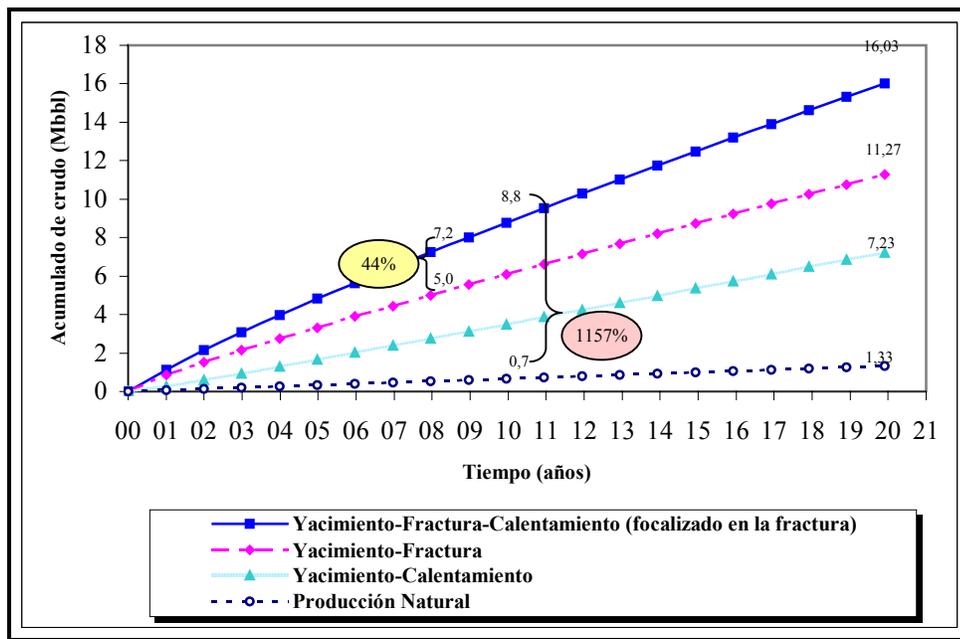


Figura N° 4.32: Producción para el caso óptimo del yacimiento Cerro Negro (100 mD) bajo diferentes esquemas: Yacimiento-Fractura-Calentamiento, Yacimiento-Fractura, Yacimiento-Calentamiento y producción natural.

Para hacer la comparación con los resultados de Ramírez^[8] se calculó el factor de recobro y el porcentaje de incremento con respecto al caso Yacimiento-Fractura en un tiempo de 8 años, obteniéndose valores de 11% y 44%. Tanto el factor de recobro como el incremento en la producción presentan valores superiores a los reportados por Ramírez^[8], quien reporta un 5,2% y un 11,8%, respectivamente, para el mismo período de tiempo. En ambos casos se utiliza el mismo modelo de calentamiento pero diferentes potencias y frecuencias: Ramírez calienta a 120 kW y con un Dp de 60 m, mientras que en éste trabajo se utiliza 20 kW y 1499 MHz con apuntalante Fe₂O₃ (que

equivale a un D_p de 5m). La variación entre los valores de factor de recobro y porcentaje de incremento se atribuyen a la diferencia existente entre la fractura escogida como modelo óptimo y la estudiada por Ramírez^[8], cuya longitud es de 200 pies (correspondiente a la geometría “rectangular”, ver sección III.4).

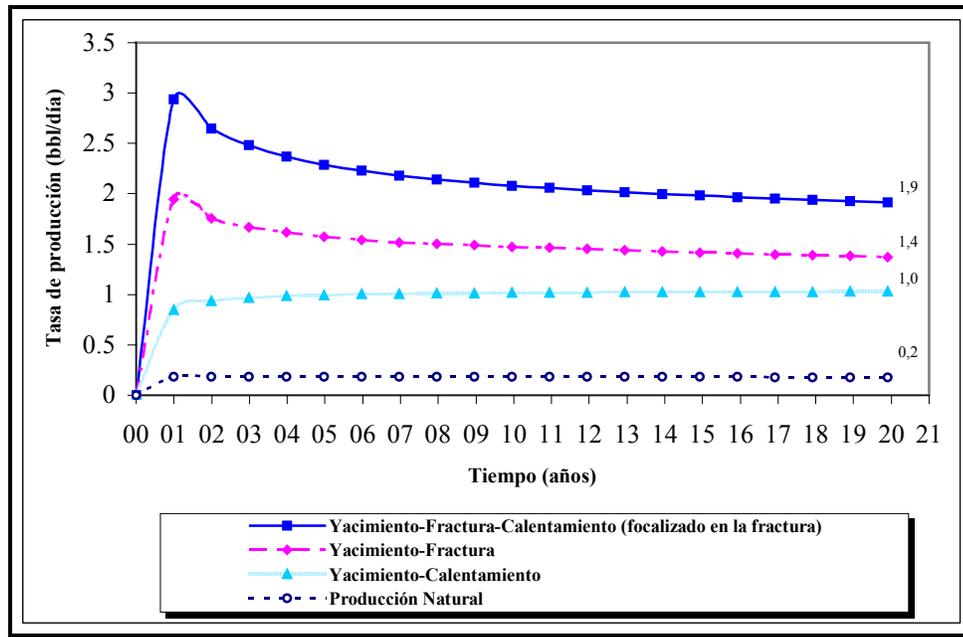


Figura N° 4.33: Producción para el caso óptimo del yacimiento Cerro Negro (100 mD) bajo diferentes esquemas: Yacimiento-Fractura-Calentamiento, Yacimiento-Fractura, Yacimiento-Calentamiento y producción natural.

En los estudios de Ovalles y col.^[5, 32] se reporta un incremento en la producción (con respecto a la producción natural) de 76% al aplicar calentamiento dieléctrico a un yacimiento de crudo extra pesado (7,7° API) durante 10 años. En este caso el calentamiento es aplicado de manera radial, con una potencia de 160 kW y una frecuencia de 915 MHz. Para realizar una comparación de estos resultados con los obtenidos en el presente estudio, se calculó el porcentaje de incremento en la producción para el modelo de calentamiento óptimo del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento (calentamiento en Banda 0 con 20 kW y 1499 MHz), con respecto al caso de producción natural (ver secciones IV.1.1 y IV.1.2), en un tiempo de 10 años. El porcentaje de incremento correspondiente es de 1157%, que es mucho

mayor al reportado Ovalles y col.^[5,32], lo cual se atribuye a la presencia de la fractura y al direccionamiento del calentamiento.

Seguidamente, en la Figuras N° 4.34 se presenta el perfil de temperaturas en función del tiempo para el caso óptimo del yacimiento Cerro Negro.

Se puede ver el efecto del calentamiento en el área central del yacimiento, que corresponde a la fractura. A medida que transcurre el tiempo se produce un aumento en la temperatura, que alcanza los 252 °F en las cercanías del pozo. Por efecto del modelo de calentamiento (que focaliza la energía en la fractura), se observa un aumento en la temperatura que no se extiende hasta el final de la fractura (70 pies de largo), en contraste con el resultado del caso Tía Juana. Este resultado se asemeja al reportado por Ramírez^[8], en el cual el aumento en las temperaturas se observan solamente en las cercanías del pozo. Un perfil de temperaturas de este tipo se espera cuando el calentamiento es radial, tal y como lo reporta Ovalles y col.^[5, 32] en sus resultados.

En la Figura N° 4.35 se presenta el perfil de temperaturas en función de la distancia a los 20 años de simulación. Allí se aprecia la forma de “toroide”, que se ajusta al comportamiento esperado para el modelo óptimo de calentamiento (Banda 0) del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

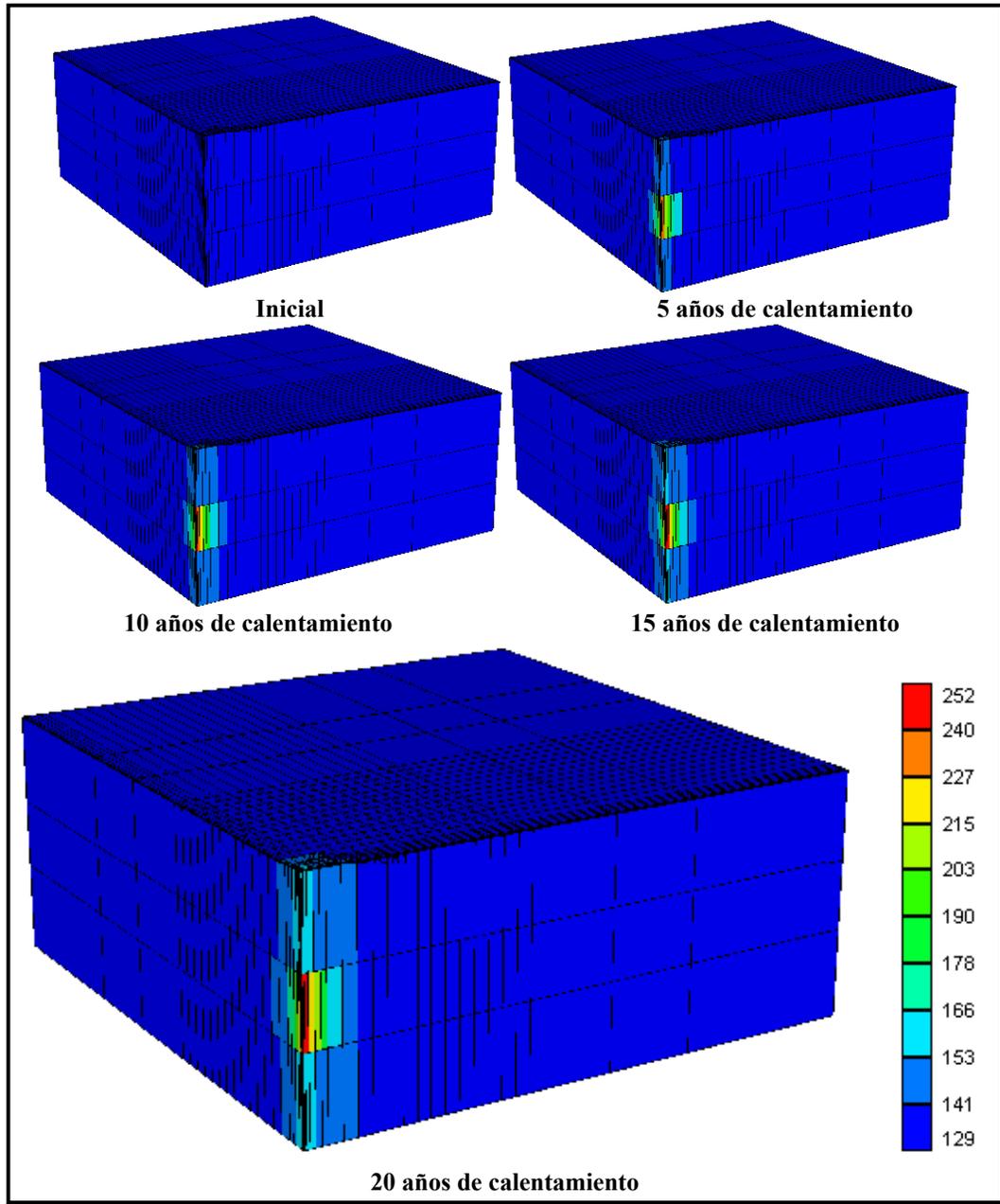


Figura N° 4.34: Perfil de temperaturas para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Cerro Negro (100 mD). Caso óptimo de calentamiento: fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentando en la fractura a 20 kW y 1499 MHz.

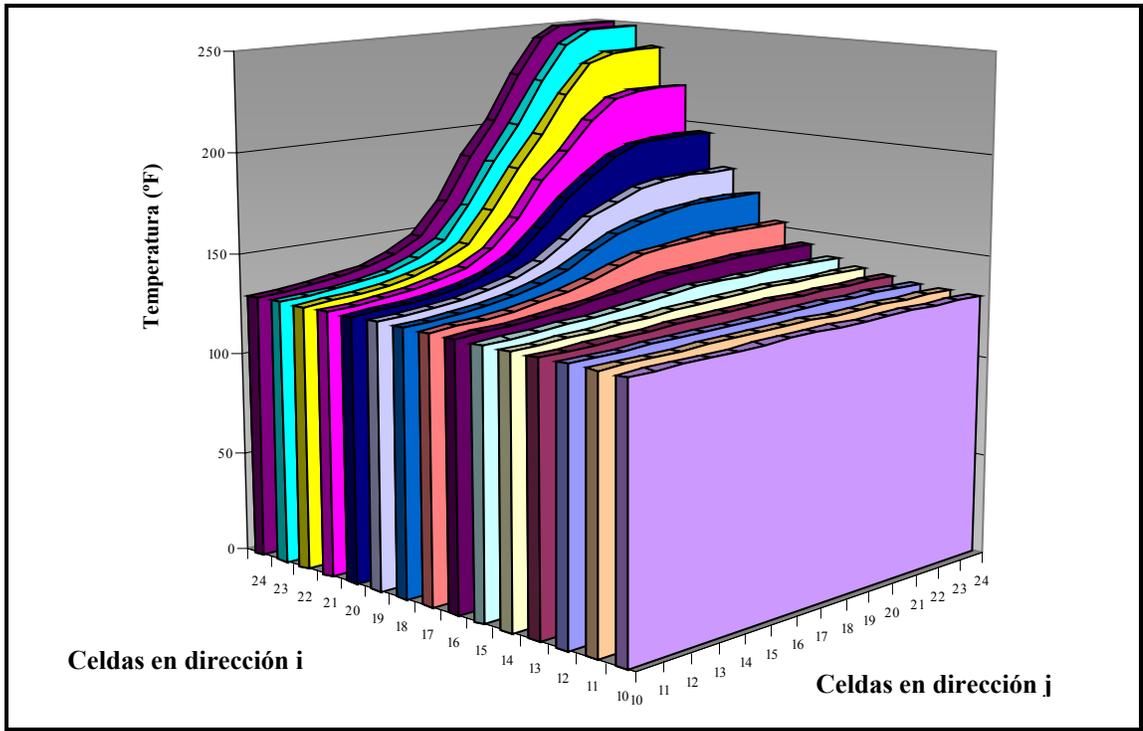


Figura N° 4.35: Perfil de temperatura en la capa intermedia de la malla para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Cerro Negro (100 mD). Caso óptimo de calentamiento: fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentando a 20 kW y 1499 MHz.

En la Figura N° 4.36 se presenta el perfil de presiones en función del tiempo para el caso óptimo del yacimiento Cerro Negro.

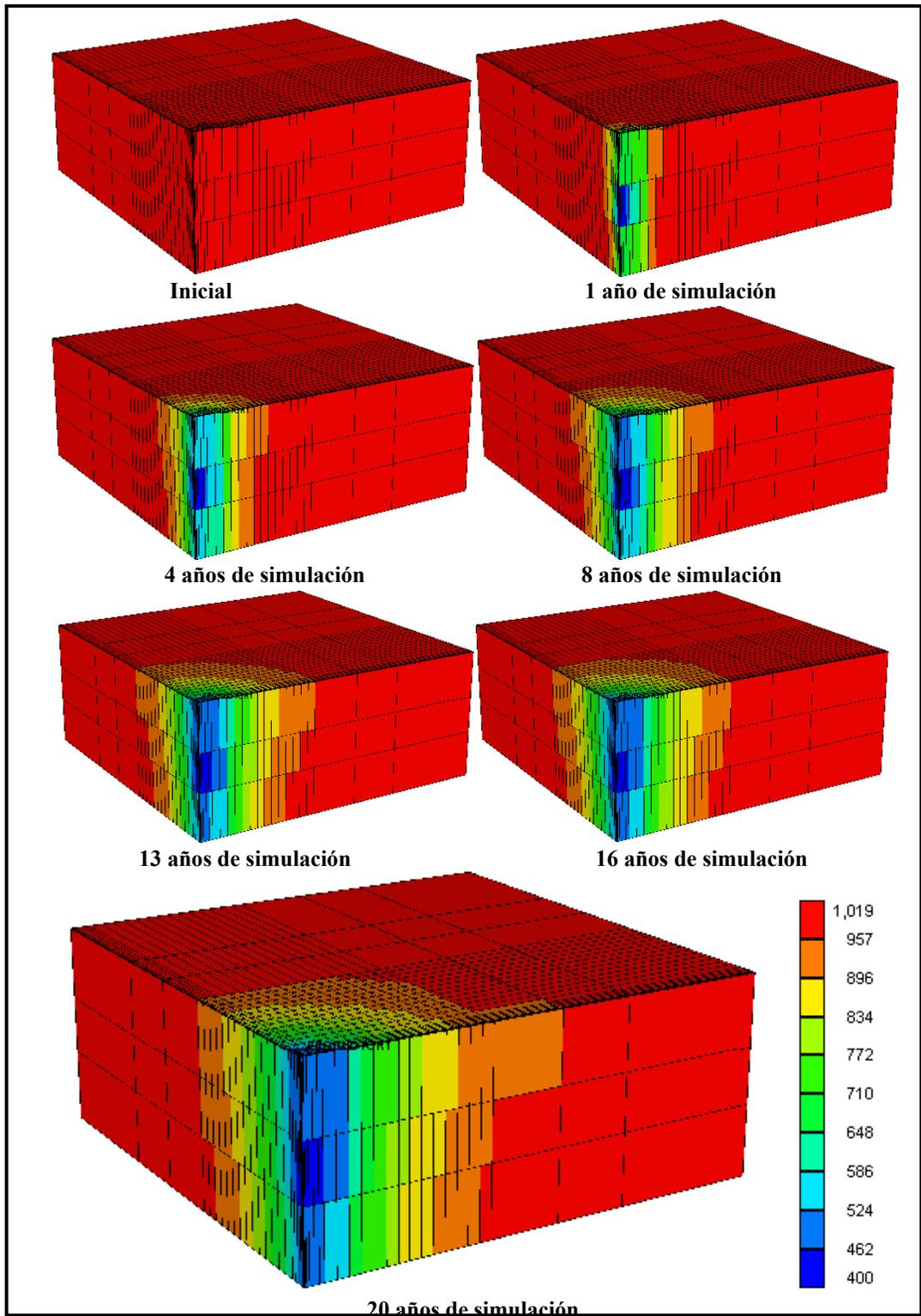


Figura N° 4.36: Perfil de presión para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Cerro Negro (100 mD). Caso óptimo de calentamiento: fractura de 70 pies rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentando en la fractura a 20 kW y 1499 MHz.

Se observa que la distribución de las presiones a lo largo del yacimiento no es homogénea y que disminuye continuamente a medida que transcurre el tiempo. Al final de la simulación la presión ha alcanzado un valor de 400 lpc en las zonas cercanas al pozo, que corresponde a la presión de fondo fluyente del pozo, sin embargo la mayor parte del mismo continúa manteniendo su presión inicial. Este perfil es similar al reportado por Ramírez^[8] en su estudio, y concuerda con lo esperado para éste trabajo.

IV.3 COMPARACION DE LOS RESULTADOS DE LOS CASOS TÍA JUANA Y CERRO NEGRO BAJO EL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO

Como un análisis final de este capítulo, se presenta la comparación entre los resultados de los casos estudiados ante la aplicación del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Para ambos casos se obtuvo que el esquema óptimo de calentamiento corresponde al modelo Banda 0, en el cual la energía se concentra en la fractura. El apuntalante óptimo para este modelo resultó ser el Fe_2O_3 para los dos casos estudiados. Este apuntalante presenta altos valores de la constante de atenuación (ver sección III.5), lo cual hace que dicho material tenga poca capacidad de absorción de la energía electromagnética y altos valores de D_p .

En el caso de la arena Tía Juana se obtuvo un calentamiento óptimo con una potencia de 120 kW y 163 MHz. Para esta combinación de frecuencia y apuntalante, el D_p calculado (70 m) se corresponde con lo reportado por Ramírez^[8] (60 m). Para el caso Cerro Negro se determinó un calentamiento óptimo con una potencia de 20 kW y una frecuencia de 2450 MHz, que se aproxima a lo reportado por Ovalles y col.^[5,32] (160 kW y 915 MHz) para un calentamiento de tipo Radial en un yacimiento de crudo extra pesado de característica similares al estudiado. Por lo tanto, se puede afirmar que los resultados obtenidos de la evaluación de los yacimientos Tía Juana y Cerro Negro se encuentran entre los términos que reporta la literatura.

En base a los resultados obtenidos, se puede decir que el modelo de calentamiento Banda 0 es el más óptimo para la aplicación del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento en yacimientos cuyos crudos presentan gravedades API entre los 7,7° y los 15,5° (correspondientes a los casos Cerro Negro y Tía Juana). Tomando como base esta conclusión, éste esquema se puede aplicar en crudos cuya gravedad API esté dentro del rango anterior, como el caso del yacimiento Hamaca (ver sección III.1.3) cuyo crudo es de 9,8 °API. Por lo tanto, se tomará el modelo de calentamiento Banda 0 como punto de partida para el estudio del acoplamiento del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con el modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo con donantes de hidrógeno

CAPITULO V

INTEGRACIÓN DEL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA- CALENTAMIENTO A UN ESQUEMA DE MEJORAMIENTO DE CRUDO EN SUBSUELO CON DONANTES DE HIDRÓGENO.

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones numéricas conceptuales de un pozo vertical con parámetros típicos de un yacimiento de crudo extra pesado, en las que se evalúa el efecto de una fractura hidráulica en conjunto con diferentes esquemas de calentamiento dieléctrico al ser aplicados como una herramienta para un modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo con donantes de hidrógeno.

En esta parte del trabajo se acoplaron los datos del modelo de mejoramiento desarrollado y validado por Ovalles et al. ^[11,30,31,32] con el calentamiento electromagnético desarrollado por Fonseca^[9], en presencia o no de la fractura. Se utilizó el campo Hamaca, así como las propiedades termodinámicas de los fluidos allí presentes para realizar las simulaciones, puesto que ha sido estudiado en ocasiones anteriores y porque se conocen las propiedades dieléctricas y termodinámicas de sus arenas y fluidos^[23-26].

Las simulaciones numéricas conceptuales del modelo de mejoramiento se iniciaron con la comparación del calentamiento dieléctrico con respecto a la utilización de inyección alternada de vapor como fuente de calentamiento. Con este estudio se verificó la eficiencia de ambas técnicas de calentamiento tomando como base de comparación una misma cantidad de energía entregada al yacimiento, que en este estudio se denominó análisis de “isoenergía” (ver sección III.8.1).

Seguidamente se realizaron simulaciones utilizando el calentamiento dieléctrico en el modelo Yacimiento-Calentamiento (sin fractura), lo cual sirvió como caso “base” para la evaluar el efecto de éste último en el modelo de mejoramiento. En este caso se calentó con un modelo Radial, tal y como se detalló en la sección III.6.5. Luego se evaluó el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento en donde se utilizó una malla equivalente donde se incluye la fractura del yacimiento. Para la selección

del modelo de calentamiento, se llevó a cabo un seguimiento del recorrido del donante de hidrógeno por el yacimiento durante el proceso de inyección, tal y como se explicó en la sección III.8.2. Se seleccionaron dos modelos que son apropiados para calentar el área donde se encuentra el donante de hidrógeno: Banda 0 y Banda 10. Se realizó un estudio de las temperaturas máximas de calentamiento para cada modelo y para los apuntalantes Fe₂O₃, ALFE y JL-P que se utilizan como relleno de la fractura, al igual que en las secciones anteriores. Finalmente se reporta el mejoramiento del crudo extra pesado en términos de la °API en función del tiempo para cada modelo estudiado, y se plantean los perfiles de temperatura, de saturación de crudo y de saturación de donante de hidrógeno en el yacimiento, como medio para explicar los resultados finales.

V.1 SIMULACIÓN CONCEPTUAL DEL MODELO DE MEJORAMIENTO DE CRUDO CON DIFERENTES FUENTES DE CALENTAMIENTO. ANÁLISIS DE ISOENERGÍA

Se realizó la comparación entre la inyección alternada de vapor y el calentamiento dieléctrico tomando como referencia la misma cantidad de energía (BTU/día) entregada al yacimiento por cada tecnología, tal y como se encuentra explicado en la sección III.8.1.

Los resultados de la comparación isoenergética entre las dos técnicas de calentamiento se presentan a continuación en las Figuras N° 5.2-3. Allí se puede apreciar la variación de la gravedad API en función del tiempo para los casos de inyección de vapor y de calentamiento dieléctrico. En la Figura N° 5.2 se presentan sensibilidades en la potencia inicial entre los valores de 300 y 600 kW, con una frecuencia de radiación de 2450 MHz y con un valor de temperatura máxima de la fuente de 590 °F (que corresponde a la temperatura de inyección del vapor). Este valor de frecuencia fue escogido debido a que, en los resultados de los yacimientos estudiados anteriormente, para este valor se obtienen las más altas temperaturas del modelo. Con el aumento de la potencia de calentamiento se llegó a un valor de energía entregada al yacimiento del mismo orden de magnitud al que se obtiene con

la inyección alternada de vapor (10^9 BTU). Las reglas de mezclado que fueron utilizadas para el desarrollo del modelo de mejoramiento no son confiables para valores de gravedades API > 22° por lo que para los análisis a realizar se tomaron en cuenta los valores de °API que se encuentran por debajo de 22.

En la Figura N° 5.1 se puede ver que, en los casos de calentamiento dieléctrico, la °API del crudo acumulado en tanque es mucho mayor con respecto al caso de inyección de vapor. Esto se debe a que al inyectar vapor se produce un arrastre del frente de crudo hacia el interior del yacimiento, lejos del pozo. Este fenómeno no ocurre con el calentamiento dieléctrico ya que no hay invasión de fluidos a la formación. Al tener mayor cantidad de crudo en las cercanías del pozo (que es donde se está inyectando el donante) se aceleran considerablemente las reacciones de mejoramiento del crudo pesado. De igual manera se observa que al aumentar la potencia de calentamiento aumenta también la °API del crudo. Sin embargo, estos casos no resultan muy confiables, debido a que aún se presenta una marcada diferencia con respecto al valor de energía entregada por la inyección de vapor, que es de $9,5 \times 10^9$ BTU.

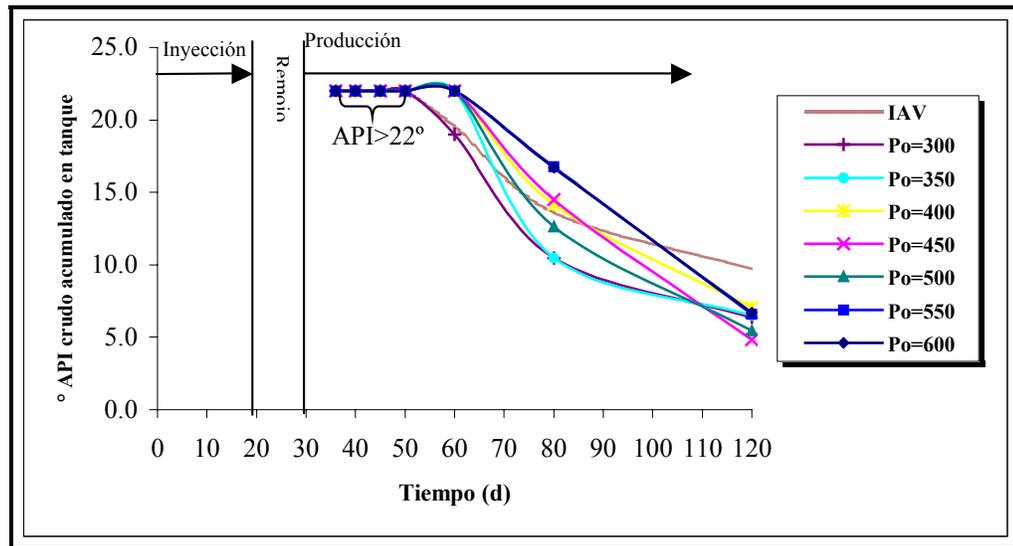


Figura N° 5.1: °API en función del tiempo para análisis de isoenergía del calentamiento dieléctrico y la IAV. Energía = 10^9 BTU (Po=300-600 kW).

En la Figura N° 5.2 se presenta el caso de calentamiento dieléctrico en donde se llegó al valor de la energía entregada por la inyección de vapor ($9,5 \times 10^9$ BTU). Este caso resultó ser un calentamiento con una potencia inicial de 6500 kW, una frecuencia de radiación de 2450 MHz y la temperatura máxima de la fuente constante en 590 °F.

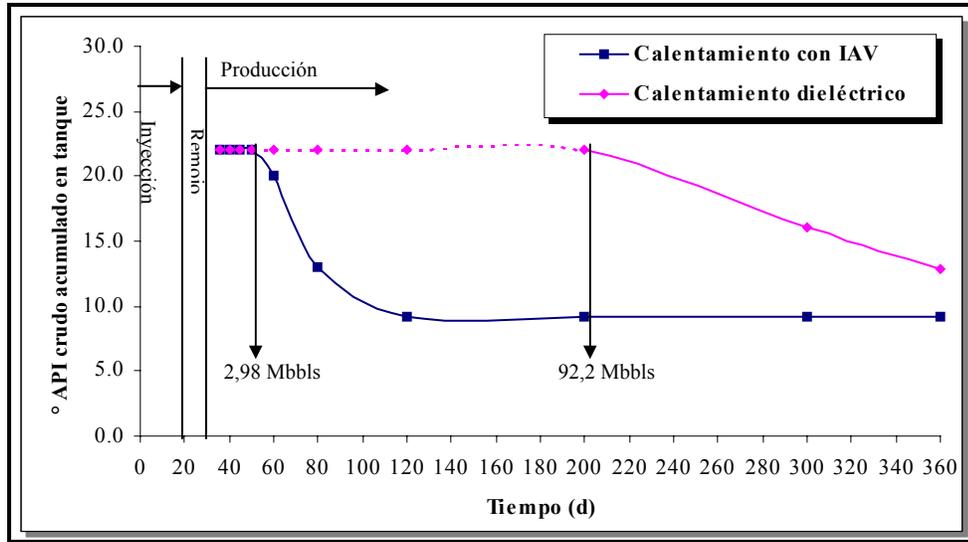


Figura N° 5.2: °API en función del tiempo para la comparación a isoenergía del caso calentamiento dieléctrico y la IAV. Energía acumulada de $9,5 \times 10^9$ BTU. La línea discontinua representa °API > 22.

Se puede apreciar que el calentamiento dieléctrico mantiene la °API de crudo acumulado en tanque en un valor máximo de 22° por mayor tiempo que en el calentamiento con inyección de vapor. El crudo mejorado con °API > 22 se obtiene durante 56 días de producción con el modelo con inyección de vapor mientras que con calentamiento dieléctrico se obtiene producción de crudo mejorado hasta el día 200 de producción. Esto representa un aumento de 31 veces más volumen de crudo al utilizar el calentamiento dieléctrico como fuente de calor para el modelo de mejoramiento, para el mismo valor de energía entregada al yacimiento. Una posible razón por la que esto ocurre es que, al no haber invasión de fluidos al yacimiento, las reacciones de mejoramiento se aceleran, con el consecuente aumento de la producción de crudo mejorado.

V.2 ANÁLISIS DEL ESQUEMA YACIMIENTO-CALENTAMIENTO PARA EL MODELO DE MEJORAMIENTO DE CRUDO EN SUBSUELO CON DONANTES DE HIDRÓGENO.

Para determinar el efecto de la fractura en conjunto con el calentamiento electromagnético fue necesario estudiar previamente el efecto de éste último de manera individual, pues dicho análisis es tomado como caso “base” para la evaluación del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento en el modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo. Para llevar a cabo este análisis se realizaron simulaciones del modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo utilizando como fuente de calentamiento el modelo de calentamiento dieléctrico Radial. Para determinar la potencia y frecuencia más apropiadas para el calentamiento dieléctrico se efectuaron sensibilidades en dichos parámetros, hasta encontrar la combinación con la cual se obtienen temperaturas superiores a los 500 °F en las zonas cercanas al pozo.

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales del esquema Yacimiento-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo. Los valores de la temperatura de la celda (2,5,5) en el día 30 de simulación para las frecuencias comerciales entre 13,56 y 2450 MHz y para potencias iniciales entre 200 y 600 kW se muestran en la Figura N° 5.3. La celda (2,5,5) corresponde a la zona más caliente del yacimiento bajo el esquema estudiado, y se encuentra contigua al pozo y en el centro de la zona de interés.

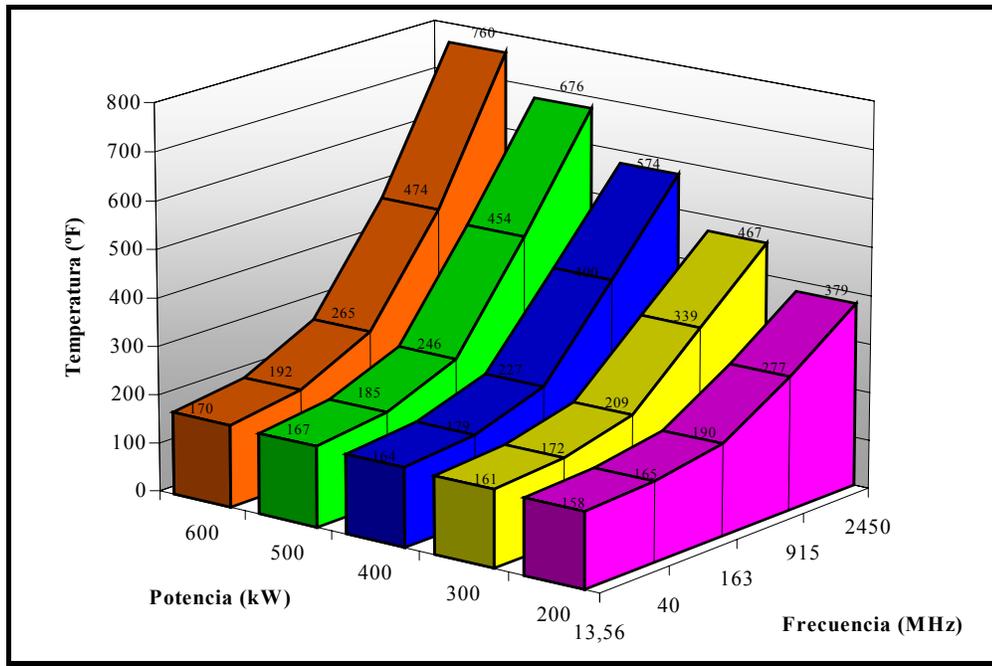


Figura N° 5.3: Temperatura de la ceda (2,5,5) en el día 30 de simulación, calentando bajo el esquema Yacimiento-Calentamiento con frecuencias comerciales y potencias desde 200 a 600 kW.

Se observa que solamente en la frecuencia de 2450 MHz y en los rangos de potencia comprendidos entre 400 y 600 kW se obtienen temperaturas superiores a 500 °F. Por lo tanto, para analizar el modelo Yacimiento-Calentamiento se utilizará el modelo de calentamiento radial calentando en un rango de 400-600 kW y a una frecuencia de 2450 MHz.

Para el análisis de la °API se realizaron sensibilidades en la temperatura máxima de la fuente, utilizando valores desde 500 hasta 650 °F. De esta manera, el calentamiento es continuo pero controlado por una fuente on/off, que regula la potencia de la fuente, de manera que las temperaturas más altas en el yacimiento no superen el valor asignado (500, 550, 600 ó 650 °F). Los resultados de la °API de crudo acumulado en tanque en función del tiempo se presentan en las Figuras N° 5.4-5, para potencias de calentamiento de 400 y 500 kW, respectivamente.

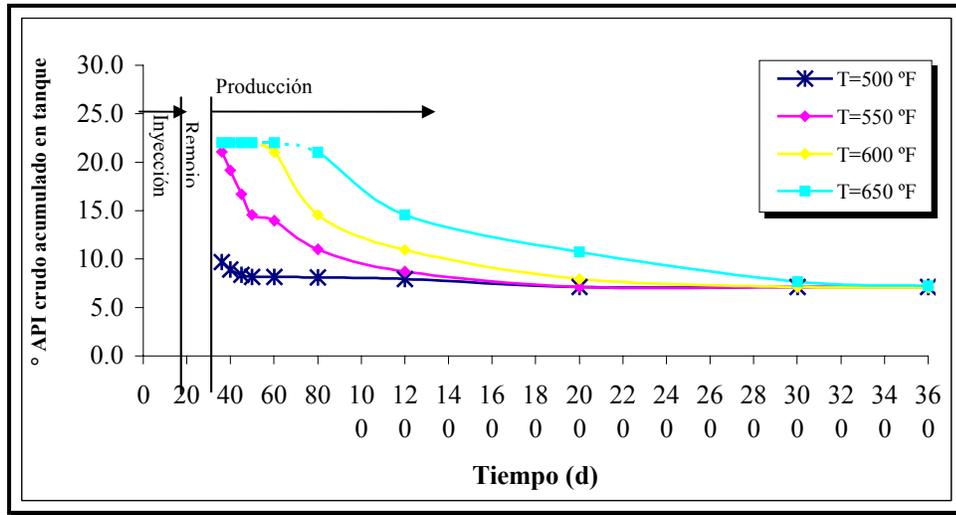


Figura N° 5.4: °API en función del tiempo variando la temperatura máxima de calentamiento para el esquema Yacimiento-Calentamiento, a una potencia de 400 kW. La línea discontinua representa °API>22.

Se observa que para todo el rango de potencias estudiado, la °API comienza con valores de 22° y disminuye con el tiempo. Esto se atribuye al hecho de que las fracciones livianas presentan mayor movilidad que las fracciones pesadas. Este fenómeno ha sido estudiado y reportado por Ovalles et al.^[30].

De igual manera, la °API se mantiene mayor tiempo por encima de los 22° a medida que se aumenta la temperatura máxima, presentándose la mayor cantidad de crudo acumulado en tanque a los 650 °F. Como la tasa de producción diaria se encuentra controlada por el modelo de mejoramiento, la cantidad de crudo mejorado es función del tiempo (días) en que se esté produciendo crudo con °API mayor a 22. En las figuras se aprecia una variación en la °API de crudo acumulado en tanque cuando se calienta con la misma temperatura máxima a diferentes potencias, debido a la cantidad de crudo mejorado aumenta con la potencia. Como la mayor variación en la °API viene dada por la temperatura máxima y no por la potencia, se tomarán los menores valores de potencia de calentamiento para el análisis de los esquemas de calentamiento.

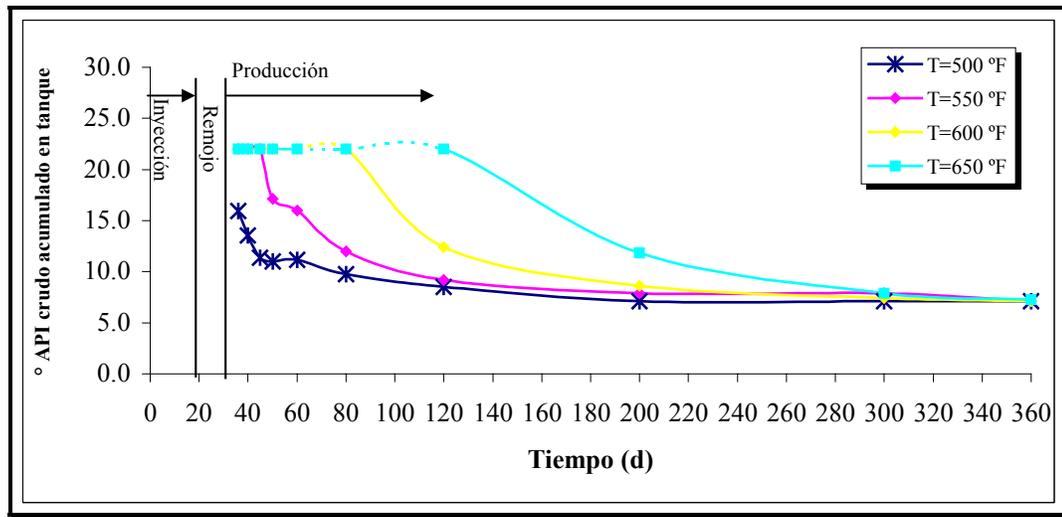


Figura N° 5.5: °API en función del tiempo variando la temperatura máxima de calentamiento para el esquema Yacimiento-Calentamiento, a una potencia de 500 kW. La línea discontinua representa °API > 22.

Seguidamente, en la Figura N° 5.6, se presenta el acumulado de crudo mejorado en función del tiempo como resultado del calentamiento a 500 kW y variando la temperatura máxima para un ciclo del modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo.

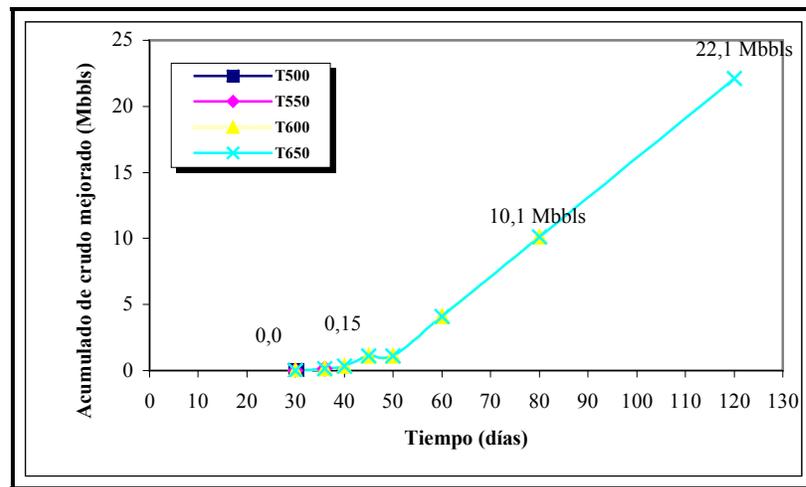


Figura N° 5.6: Acumulado de crudo mejorado (°API > 22) en función del tiempo al calentar a $P_o = 500$ kW y variando la temperatura máxima de calentamiento en el esquema Yacimiento-Calentamiento.

Se aprecia que la temperatura de 650 °F es la que produce mayor volumen de crudo mejorado: 22,1 Mbbls, en contraste con la temperatura de 600 °F (que produce 10,1 Mbbls) y de 550 °F (que produce 0,15 Mbbls). Para la temperatura de 500 °F la producción de crudo mejorado no llegó a los 22 °API.

V.3 ANÁLISIS DEL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO PARA EL MODELO DE MEJORAMIENTO DE CRUDO EN SUBSUELO CON DONANTES DE HIDRÓGENO.

En esta sección se presentan los resultados de la simulación conceptual de un pozo fracturado y calentado con energía electromagnética (RF o MW) acoplado al modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo con donantes de hidrógeno.

Para la simulación del calentamiento dieléctrico se evaluaron dos modelos de calentamiento: focalizado en la fractura o Banda 0 y calentamiento en Banda 10. Ambos modelos se discutieron en la sección anterior y explicados con detalle en la sección III.6. De igual forma, se estudió el aporte de los materiales apuntalantes estudiados anteriormente para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento: Fe₂O₃, ALFE y JL-P. Estos materiales se utilizan como relleno de la fractura, que para este caso es de una geometría constante de 70 pies de largo y 95 pies de alto (la altura es constante para todo el largo de la fractura)

Se examinaron los rangos de potencia aplicables y las frecuencias comerciales de calentamiento para cada apuntalante y modelo de calentamiento, con la finalidad de establecer una combinación de potencia mínima y una frecuencia de radiación con la cual la temperatura superara los 500 °F. Luego se analizó la variación de la °API de crudo acumulado en tanque en función del tiempo, para diferentes temperaturas máximas de calentamiento. Con esto se realiza la comparación entre los casos que producen la mayor cantidad de crudo mejorado y así establecer un escenario óptimo para cada modelo de calentamiento. A continuación se presentan los resultados para los modelos de calentamiento en Banda 0 y en Banda 10.

V.3.1 Análisis del modelo de calentamiento focalizado en la fractura (Banda 0) bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo con donantes de hidrógeno.

En esta sección se realizó la evaluación del modelo de calentamiento focalizado en la fractura, Banda 0. Para ello se realizaron simulaciones conceptuales variando los valores de la potencia y la frecuencia de radiación para cada uno de los tres apuntalantes estudiados. De esta manera se obtiene el rango de potencias aplicable y la frecuencia que cumplan con la restricción de que la temperatura máxima del yacimiento debe sobrepasar los 500 °F. Luego se estudia el valor de la °API de crudo acumulado en tanque en función del tiempo para varias temperaturas máximas de la fuente de calentamiento, de manera de determinar cual de estas produce la mayor cantidad de crudo mejorado.

V.3.1.1 Análisis del Apuntalante Fe_2O_3

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo fracturado (esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento) usando el apuntalante Fe_2O_3 , y que ha sido calentado con el modelo Banda 0. Los valores de la temperatura de la celda más caliente del modelo a los 15 días de simulación, para potencias desde 200 hasta 400 kW y frecuencias desde 13,56 hasta 2450 MHz son mostrados en la Figura N° 5.7.

Se observa que la temperatura aumenta con el incremento en la potencia y en la frecuencia de radiación, y solamente para la frecuencia de 2450 MHz calentando a potencias de 350 y 400 kW se obtienen temperaturas superiores a 500 °F. Por lo tanto, se utilizará la potencia de 400 kW y la frecuencia de 2450 MHz para los análisis de la producción de crudo mejorado.

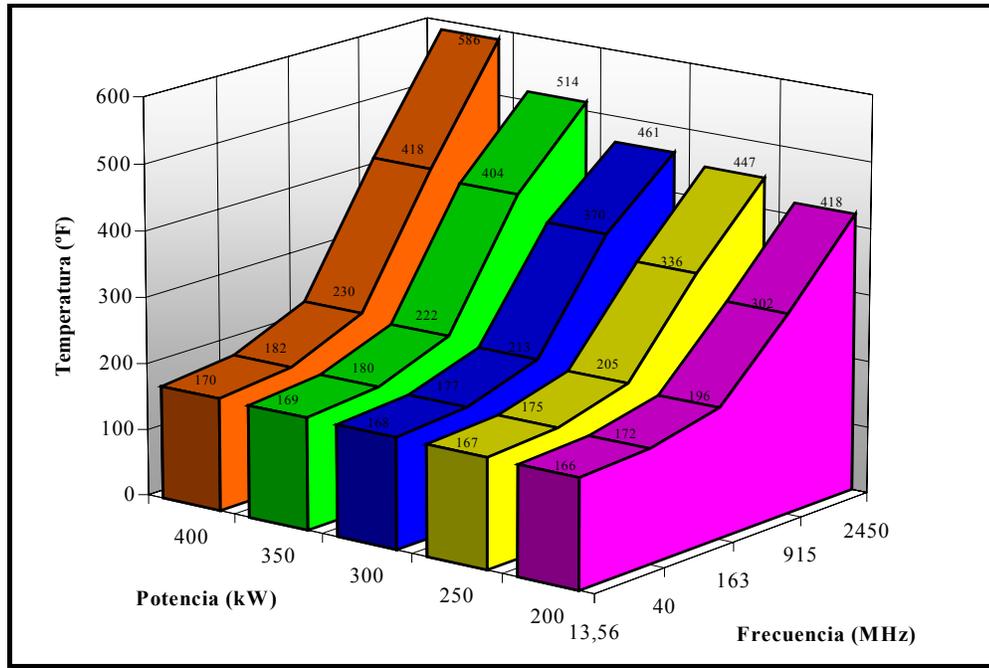


Figura N° 5.7: Temperatura de la celda (2,5,5) en el día 30 de simulación, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 0, apuntalante Fe₂O₃.

Para el análisis de la °API de crudo acumulada en tanque, se realizaron sensibilidades en la temperatura máxima asignada a la fuente, utilizando valores desde 500 hasta 650 °F. De esta manera, el calentamiento es continuo pero controlado por una fuente on/off, que regula la potencia de la fuente, de manera que las temperaturas más altas en el yacimiento no superen el valor asignado. Los resultados de la °API de crudo en función del tiempo al calentar bajo el modelo Banda 0 con una potencia de 400 kW y frecuencia de 2450 MHz en una fractura rellena de apuntalante Fe₂O₃ se presentan a continuación en las Figuras N° 5.8.

Se observa que la °API de crudo acumulado en tanque comienza con valores de 22° y disminuye con el tiempo. De igual manera, éste parámetro se mantiene por mayor tiempo a medida que se aumenta la temperatura máxima, presentándose la mayor cantidad de crudo acumulado en tanque en las temperaturas 600 y 650 °F, ésta última con los mayores valores. Para las temperaturas de 500 y 550 °F la °API de crudo mejorado no llegó a 22°

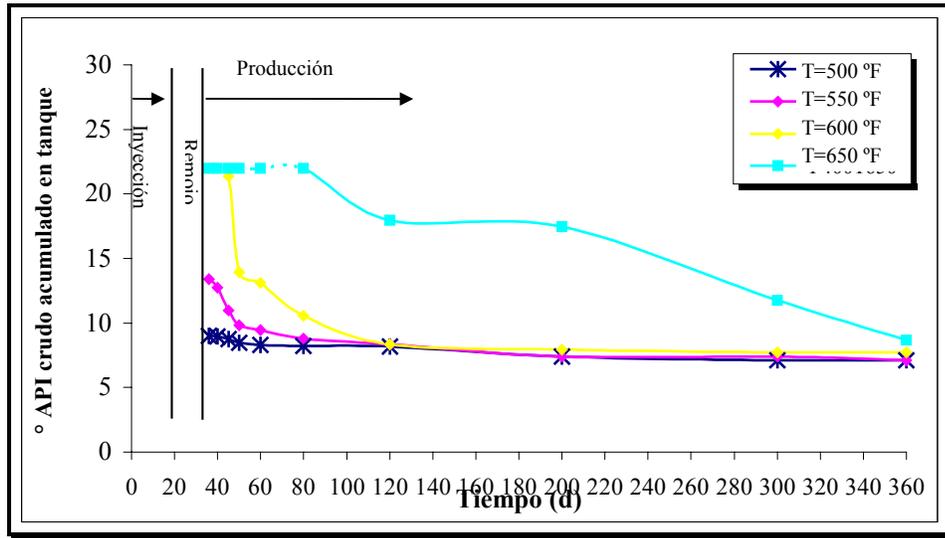


Figura N° 5.8: °API en función del tiempo variando la temperatura asignada a la fuente de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 0 a 400 kW, apuntalante Fe₂O₃. La línea discontinua representa °API>22.

V.3.1.2 Análisis del Apuntalante ALFE

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo fracturado (esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento) usando el apuntalante ALFE, y que ha sido calentado con el modelo Banda 0. Los valores de la temperatura de la celda más caliente del modelo a los 15 días de simulación, para potencias desde 200 hasta 600 kW y frecuencias desde 13,56 hasta 2450 MHz son mostrados en la Figura N° 5.9.

Se observa que la temperatura aumenta con el incremento de la potencia para cada frecuencia de radiación y, para cada valor de potencia, la temperatura aumenta con la frecuencia, llega a un máximo en el valor de 163 MHz y luego disminuye. Para la frecuencia de 163 MHz se obtienen temperaturas superiores a 500 °F en todo el rango de potencias estudiado, así como para las frecuencias de 915 y 2450 MHz a partir de los 300 kW. Por lo tanto, se utilizará la potencia de 200 kW y la frecuencia de 163 MHz para los análisis de la producción de crudo mejorado.

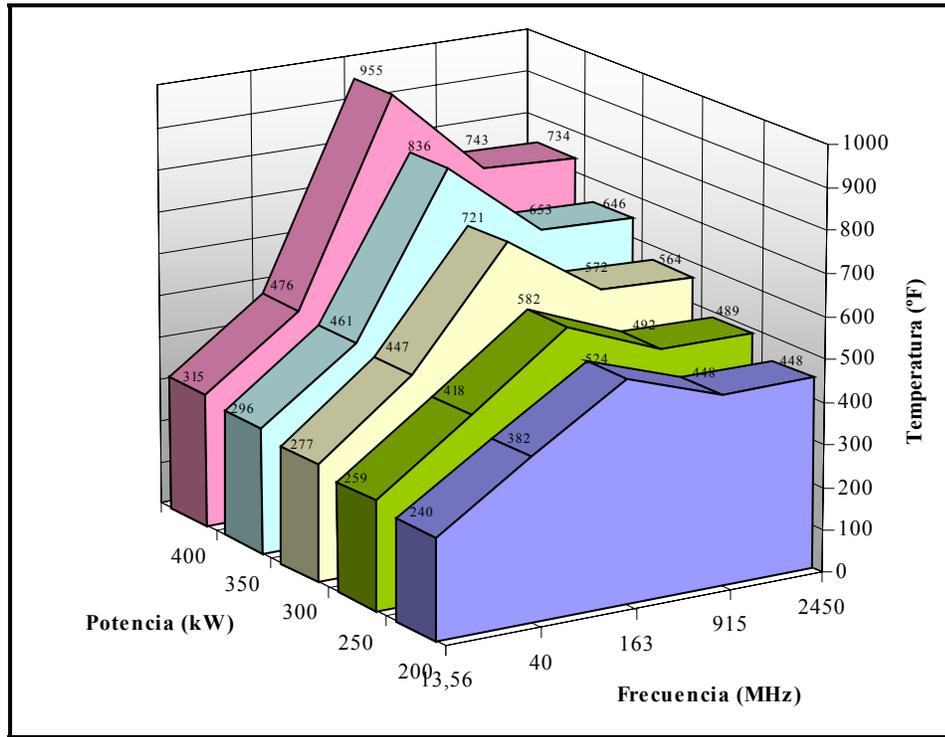


Figura N° 5.9: Temperatura de la ceda (2,5,5) en el día 30 de simulación, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 0, apuntalante ALFE.

Para el análisis de la °API se realizaron sensibilidades en la temperatura máxima asignada a la fuente, utilizando valores desde 500 hasta 650 °F. Los resultados de la °API de crudo acumulado en tanque en función del tiempo se presentan a continuación en las Figuras N° 5.10, para una potencia de 200 kW y una frecuencia de 163 MHz, al calentar bajo el modelo Banda 0 con una fractura rellena de apuntalante ALFE. Se observa que la °API de crudo acumulado en tanque comienza con valores altos y disminuye con el tiempo, pero no se observa producción de crudo mejorado de 22 °API para ninguna de las temperaturas máximas de estudiadas. Por lo tanto se decidió estudiar el apuntalante ALFE con potencias de calentamiento mayores y con diferentes frecuencias de calentamiento.

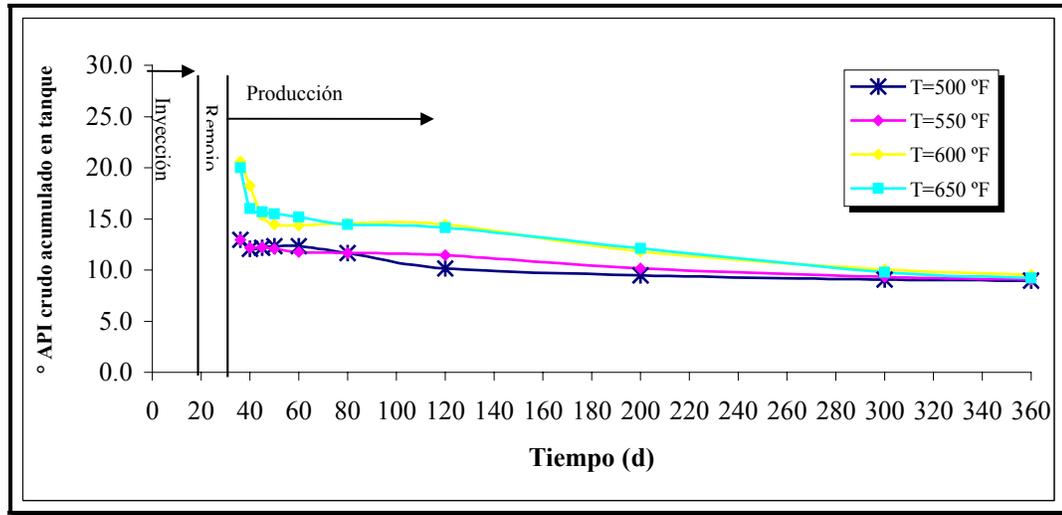


Figura N° 5.10: °API en función del tiempo variando la temperatura de la fuente de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 0 a 200 kW, apuntalante ALFE.

En la Figura N° 5.11, se presentan los resultados de la °API de crudo acumulado en tanque en función del tiempo para una potencia de 300 kW y una frecuencia de 2450 MHz, al calentar bajo el modelo Banda 0 con una fractura rellena de apuntalante ALFE.

Para este esquema se observa °API de crudo acumulado en tanque con valores de 22°, comenzando la producción con valores muy altos y disminuyendo con el tiempo. También se observa que la °API se mantiene más tiempo por encima de los 22° para las temperaturas máximas más altas (600 y 650 °F). Para las temperaturas de 500 y 550 °F la °API de crudo mejorado no llegó a 22°

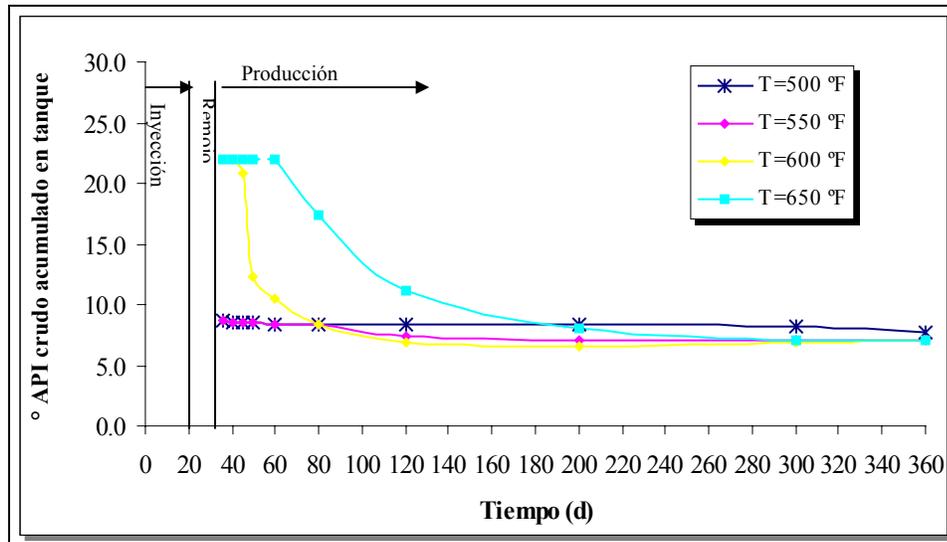


Figura N° 5.11: °API en función del tiempo variando la temperatura asignada a la fuente de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 0 a 300 kW, apuntalante ALFE. La línea discontinua representa °API>22.

Seguidamente se analizó el perfil de temperaturas en un corte transversal de la malla estudiada, cuando se ha calentado durante 20 días bajo el modelo Banda 0 y apuntalante ALFE. En las Figuras N° 5.12.a-b se encuentran los perfiles de temperatura en la fractura, cuando se calienta con las combinaciones de potencia y frecuencia 200 kW-163 MHz y 300 kW-2450 MHz, respectivamente.

En las Figuras N° 5.13.a-b se puede apreciar la diferencia en el calentamiento para las dos combinaciones de potencia y frecuencia estudiadas: para el calentamiento con 200 kW y 163 MHz se observa que el aumento en las temperaturas se prolonga más hacia adentro del yacimiento que en el caso del calentamiento con 300 kW y 2450 MHz, lo cual se traduce en una mayor área calentada. Sin embargo, ésta última combinación arroja temperaturas mayores en las cercanías del pozo, donde ocurre la reacción de mejoramiento. Debido a lo anterior, se puede sugerir que el calentamiento a 300 kW y 2450 MHz presenta un mayor volumen de crudo mejorado debido a que las altas temperaturas obtenidas con este esquema están en la zona de reacción, por lo que las reacciones de mejoramiento se aceleran. Sin embargo, en el calentamiento

con 200 kW y 163 MHz la zona calentada es mucho mayor, y se desperdicia energía que no está siendo aprovechada en el mejoramiento del crudo.

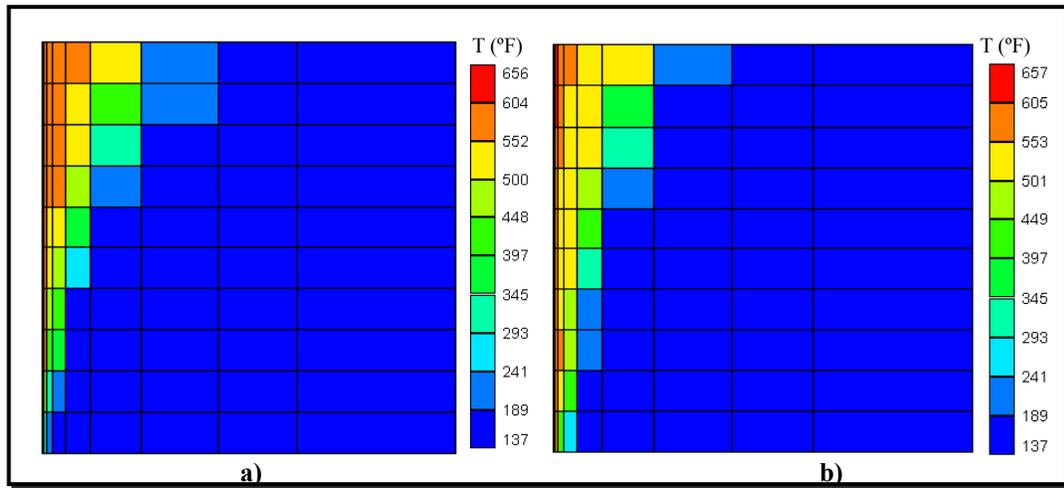


Figura N° 5.12: Perfil de temperatura en la fractura para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, para Calentamiento en Banda 0 en una fractura rellena de apuntalante ALFE calentando: a) a 200 kW y 163 MHz y b) a 300 kW y 2450 MHz.

V.3.1.3 Análisis del Apuntalante *JL-P*

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo fracturado (esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento) usando el apuntalante *JL-P*, y que ha sido calentado con el modelo Banda 0. Los valores de la temperatura de la celda más caliente del modelo a los 15 días de simulación, para potencias desde 200 hasta 600 kW y frecuencias desde 13,56 hasta 2450 MHz son mostrados en la Figura N° 5.13.

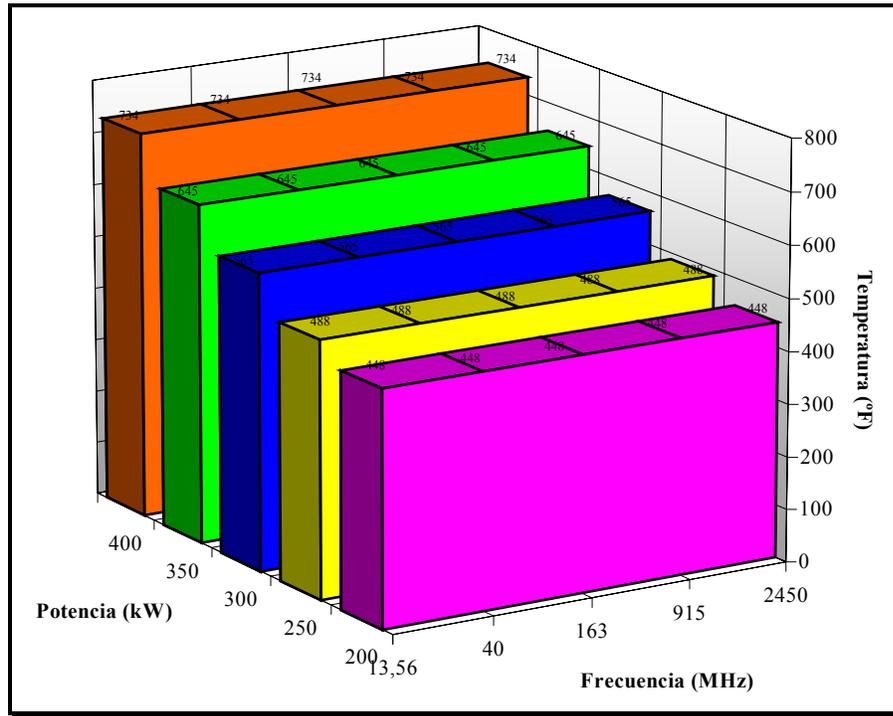


Figura N° 5.13: Temperatura de la ceda (2,5,5) en el día 30 de simulación, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando con el modelo Banda 0, apuntalante JL-P.

Se observa que la temperatura aumenta con el incremento de la potencia para cada frecuencia de radiación pero no se observan variaciones en la temperatura al variar la frecuencia para cada valor de potencia. Esto se debe, como ya se ha explicado anteriormente, a que el apuntalante JL-P es un material muy absorbente de la radiación electromagnética, por lo que a cualquier frecuencia que se irradie el apuntalante absorbe toda la energía en la primera celda de la fractura. Así, indistintamente de la frecuencia utilizada, el valor de la temperatura es constante para cada potencia de calentamiento. A partir de 300 kW, se observan temperaturas superiores a 500 °F, por lo que se tomará este valor para los análisis de la producción de crudo mejorado.

Se realizaron sensibilidades en la temperatura máxima asignada a la fuente, utilizando valores desde 500 hasta 650 °F. Los resultados de la °API de crudo

acumulado en tanque en función del tiempo se presentan a continuación en la Figura N° 5.14, para una potencia de 300 kW al calentar bajo el modelo Banda 0 con una fractura rellena de apuntalante JL-P.

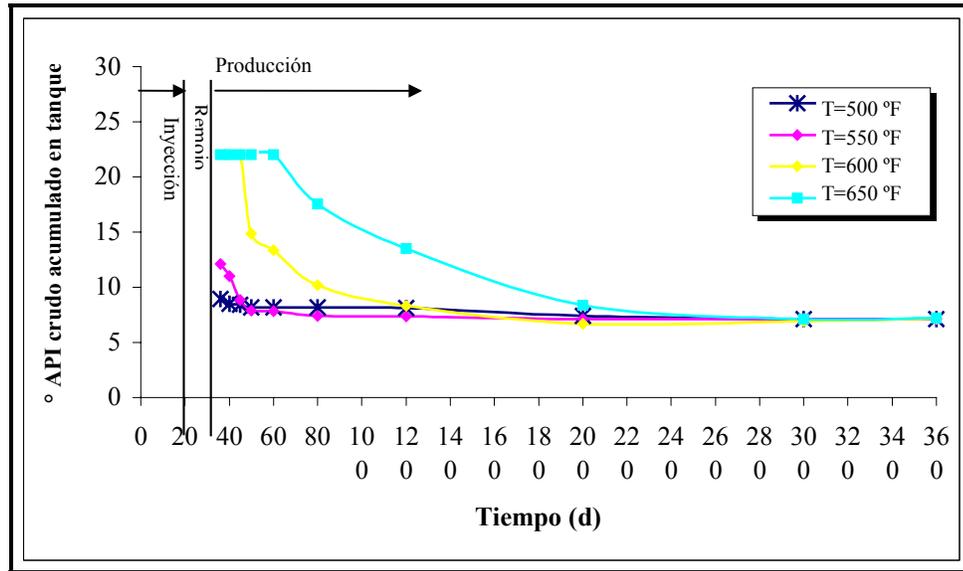


Figura N° 5.14: °API en función del tiempo variando la temperatura asignada a la fuente de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, para Calentamiento en Banda 0, apuntalante JL-P. La línea discontinua representa °API>22.

Se observa que la °API de crudo acumulado en tanque comienza con valores altos, por encima de los 22° y disminuye con el tiempo. De igual manera, la °API se mantiene mayor tiempo por encima de los 22° a medida que se aumenta la temperatura máxima, presentándose la mayor cantidad de crudo acumulado en tanque en las temperaturas 600 y 650 °F, ésta última con los mayores valores. Para las temperaturas de 500 y 550 °F no se observó producción de crudo mejorado con °API por encima de 22.

V.3.1.4 Análisis del apuntalante óptimo para el modelo de calentamiento Banda 0.

Con la idea de determinar cual es el mejor apuntalante para este esquema de calentamiento, se compararon la producción de crudo mejorado variando los apuntalantes de la fractura cuando se calienta a una potencia, frecuencia y temperatura máxima de calentamiento previamente establecidos. De esta manera se puede observar el comportamiento de cada material bajo las mismas condiciones de energía suministrada al yacimiento. Los resultados de la °API de crudo acumulado en función del tiempo se presentan en la Figura N° 5.15 para el calentamiento en Banda 0 variando el apuntalante de la fractura, para una potencia de calentamiento de 400 kW y una frecuencia de radiación de 2450 MHz.

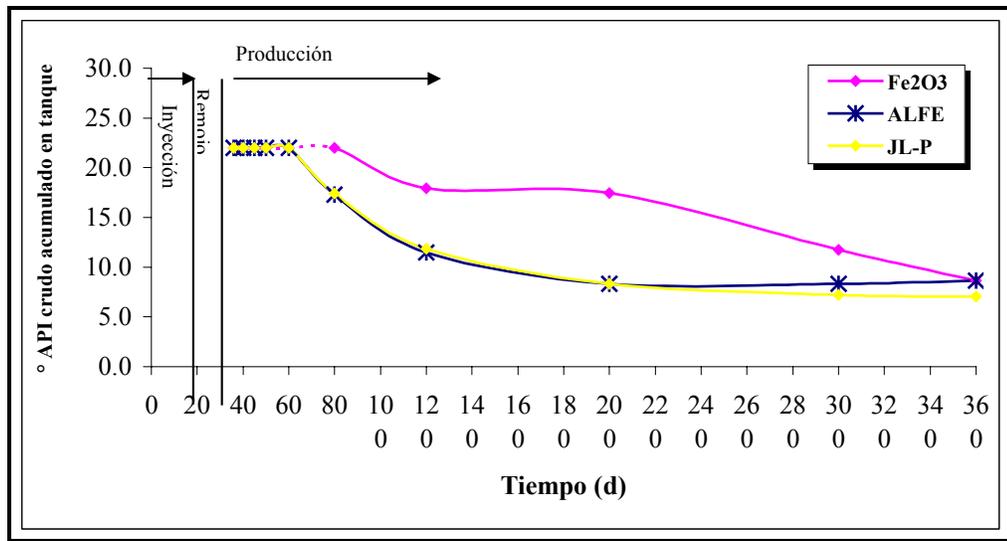


Figura N° 5.15: °API en función del tiempo variando el material apuntalante para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 0 calentando a 400 kW y 2450 MHz. La línea discontinua representa °API > 22.

Se aprecia que el material que mantiene durante mayor tiempo la producción de crudo mejorado con una °API en tanque mayor a 22, es el apuntalante Fe₂O₃. Se puede ver que los apuntalantes ALFE y JL-P presentan el mismo perfil de producción. Esto se debe a que son materiales muy absorbentes de la radiación

electromagnética, y para las frecuencias estudiadas, ambos absorben toda la energía radiada en las primeras celdas que constituyen la fractura.

Seguidamente, en la Figura N° 5.16, se presenta la producción acumulada de crudo en función del tiempo para cada material apuntalante estudiado.

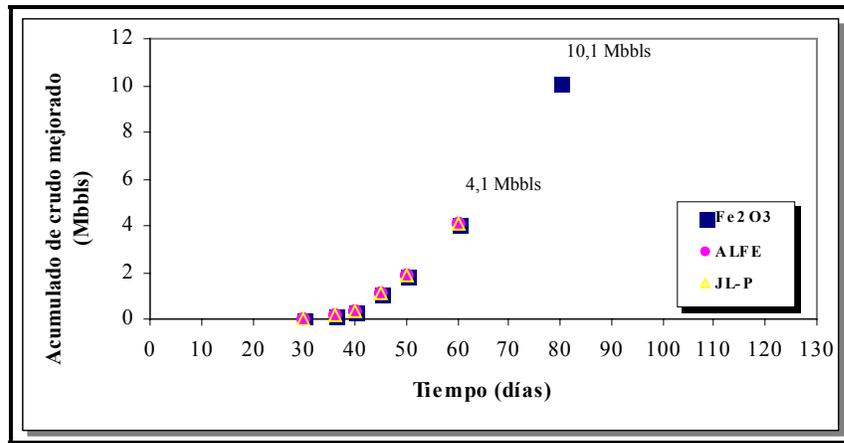


Figura N° 5.16: Acumulado de crudo mejorado ($^{\circ}$ API > 22) en función del tiempo al calentar con 400 kW y 2450 MHz, variando el material apuntalante para el calentamiento en Banda 0 bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Se puede ver que para el apuntalante Fe_2O_3 , la mayor producción de crudo mejorado corresponde a 20,2 Mbbls, en contraste con los apuntalantes ALFE y JL-P, que producen aproximadamente la mitad (8,2 Mbbls). Por lo tanto, se considera que el apuntalante Fe_2O_3 es el óptimo para el modelo de calentamiento en Banda 0.

V.3.2 Análisis del modelo de calentamiento *Banda 10* bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo con donantes de hidrógeno.

A continuación se presenta la evaluación del modelo de calentamiento en una banda de 10 pies de ancho ó Banda 10. Esta zona de calentamiento incluye a la fractura y a línea de celdas en dirección \hat{i} que se encuentran adyacentes a la fractura; ambas regiones suman 10 pies de ancho. Es importante recordar que, al igual que se

presentó en la sección IV, en el esquema Banda 10 se está realizando el calentamiento de dos materiales con propiedades dieléctricas diferentes: la arena del yacimiento y el apuntalante de la fractura.

Para éste análisis se realizaron simulaciones conceptuales variando los valores de la potencia y la frecuencia de radiación para cada uno de los tres apuntalantes estudiados. De esta manera se obtiene el rango de potencias aplicable y la frecuencia que cumplan con la restricción de que la temperatura máxima del yacimiento debe sobrepasar los 500 °F. Luego se estudia el valor de la °API de crudo acumulado en tanque en función del tiempo para varias temperaturas máximas de la fuente de calentamiento, de manera de determinar cual de estas produce la mayor cantidad de crudo mejorado.

V.3.2.1 Análisis del Apuntalante Fe_2O_3

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo fracturado (esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento) usando el apuntalante Fe_2O_3 , y que ha sido calentado con el modelo Banda 10. Los valores de la temperatura de la celda más caliente del modelo a los 15 días de simulación, para potencias desde 200 hasta 600 kW y frecuencias desde 13,56 hasta 2450 MHz son mostrados en la Figura N° 5.17.

Se observa que la temperatura aumenta con el incremento en la potencia y en la frecuencia de radiación, y solamente para la frecuencia de 2450 MHz calentando a potencias de 500 y 600 kW se obtienen temperaturas superiores a 500 °F. Por lo tanto, se utilizará la potencia de 500 kW y la frecuencia de 2450 MHz para los análisis de la producción de crudo mejorado.

Para el análisis de la °API de crudo acumulada en tanque, se realizaron sensibilidades en la temperatura máxima asignada a la fuente, utilizando valores desde 500 hasta 650 °F. De esta manera, el calentamiento es continuo pero controlado por una fuente on/off, que regula la potencia de la fuente, de manera que las temperaturas más altas en el yacimiento no superen el valor asignado. Los resultados de la °API de crudo en función del tiempo al calentar bajo el modelo Banda 10 con

una potencia de 500 kW y frecuencia de 2450 MHz en una fractura rellena de apuntalante Fe_2O_3 se presenta a continuación en la Figura N° 5.18.

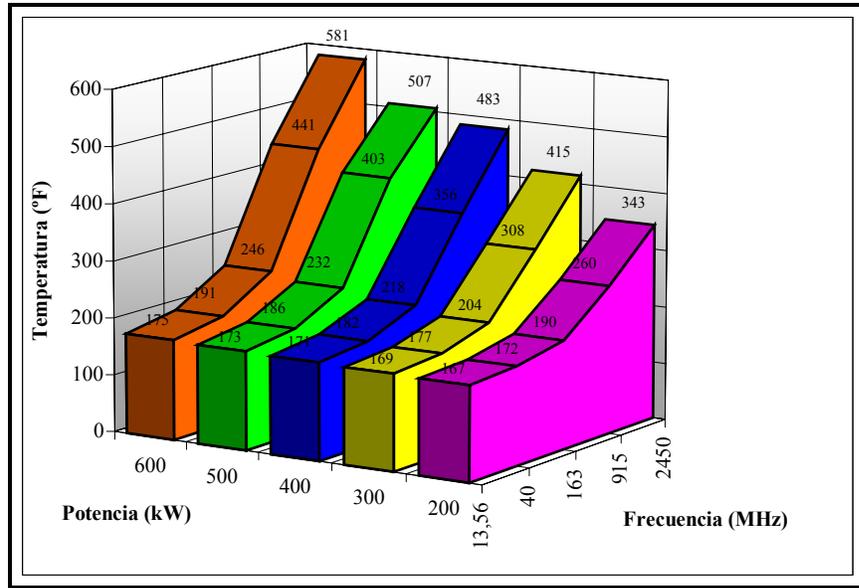


Figura N° 5.17: Temperatura de la ceda (2,5,5) en el día 15 de simulación, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 10, apuntalante Fe_2O_3 .

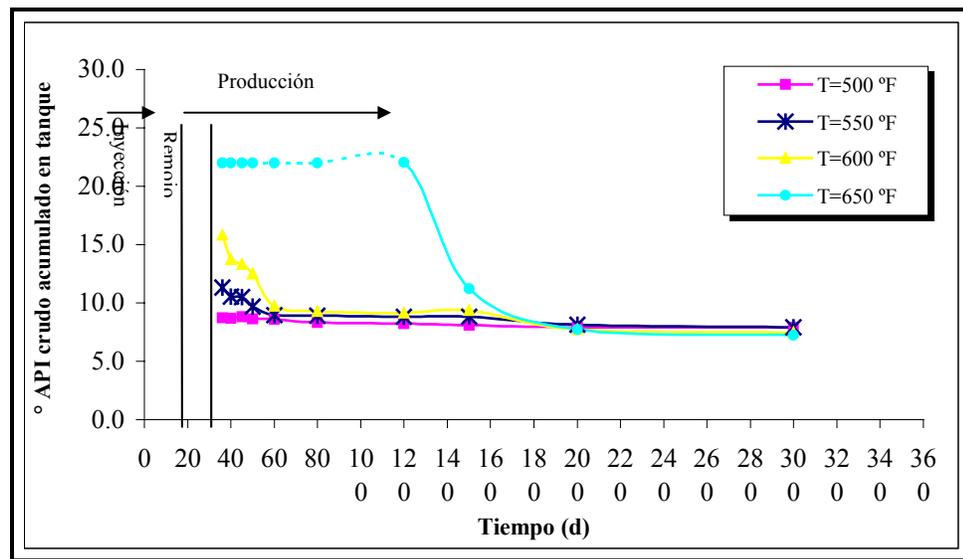


Figura N° 5.18: °API en función del tiempo variando la temperatura asignada a la fuente de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 10, apuntalante Fe_2O_3 . La línea discontinua representa °API>22.

Se observa que la °API de crudo acumulado en tanque disminuye con el tiempo y con la disminución de la temperatura máxima de la fuente de calentamiento. La mayor cantidad de crudo mejorado con °API promedio mayor a 22 se presenta para el calentamiento con una temperatura máxima de 650 °F, mientras que para las menores a este valor no se observó producción de crudo mejorado de 22 °API .

V.3.2.2 Análisis del Apuntalante ALFE

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo fracturado (esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento) usando el apuntalante ALFE, y que ha sido calentado con el modelo Banda 10. Los valores de la temperatura de la celda más caliente del modelo a los 15 días de simulación, para potencias desde 200 hasta 600 kW y frecuencias desde 13,56 hasta 2450 MHz son mostrados en la Figura N° 5.19.

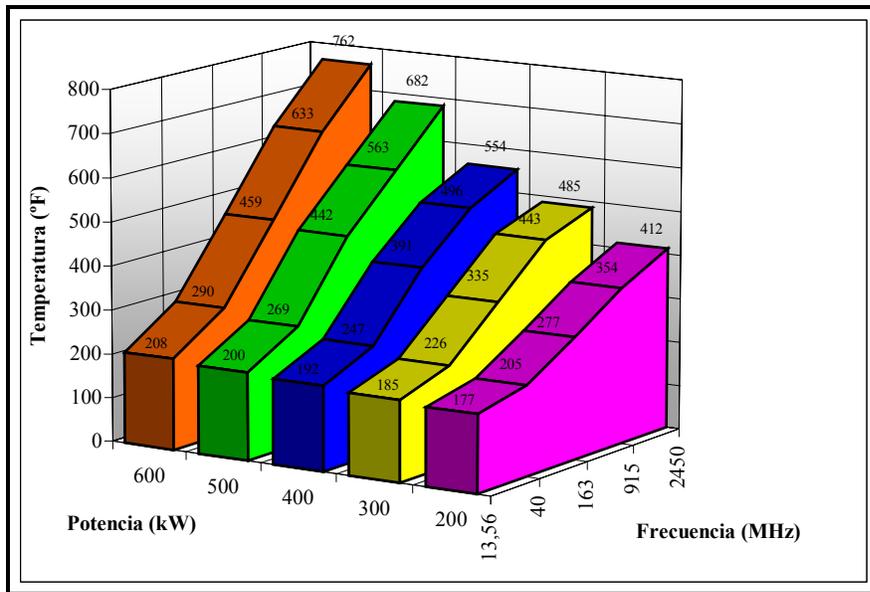


Figura N° 5.19: Temperatura de la celda (2,5,5) en el día 15 de simulación, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando con el modelo Banda 10, apuntalante ALFE.

Se observa que la temperatura aumenta con el incremento en la potencia y en la frecuencia de radiación, al igual que con el apuntalante Fe_2O_3 . Se obtienen temperaturas superiores a 500 °F para la frecuencia de 915 MHz calentando a potencias por encima de 500 y para la frecuencia de 2450 MHz calentando a potencias desde y 400 kW. Por lo tanto, se utilizará la potencia de 400 kW y la frecuencia de 2450 MHz para los análisis de la producción de crudo mejorado de este esquema.

Para el análisis de la °API se realizaron sensibilidades en la temperatura máxima asignada a la fuente, utilizando valores desde 500 hasta 650 °F. Los resultados de la °API de crudo acumulado en tanque en función del tiempo se presentan a continuación en las Figuras N° 5.20, para una potencia de 400 kW y una frecuencia de 2450 MHz, al calentar bajo el modelo Banda 10 con una fractura rellena de apuntalante ALFE.

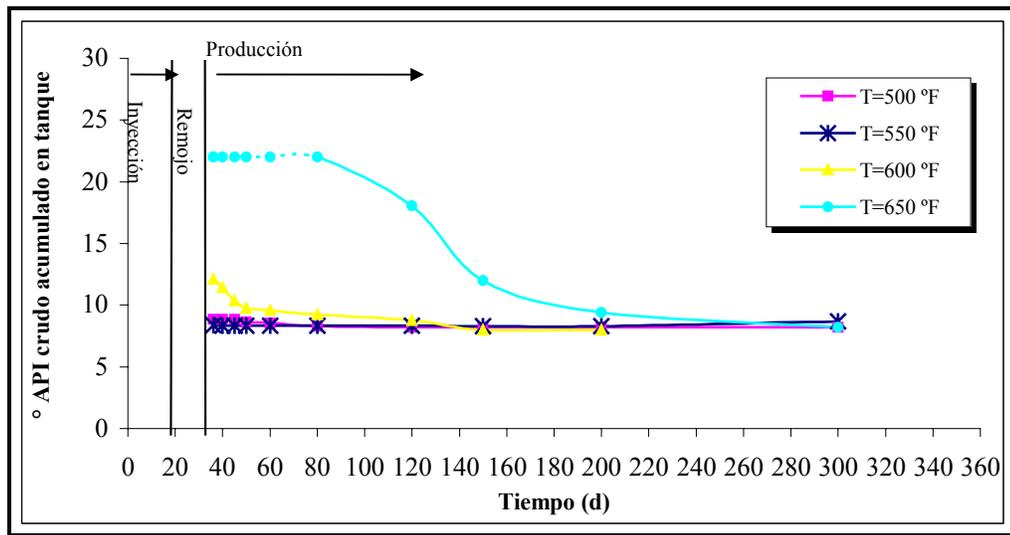


Figura N° 5.20: °API en función del tiempo variando la temperatura asignada a la fuente de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentamiento en Banda 10, apuntalante ALFE. La línea discontinua representa °API > 22.

Al igual que para el apuntalante Fe_2O_3 , en este caso se observa que la °API de crudo acumulado en tanque disminuye con el tiempo y con la disminución de la

temperatura máxima de la fuente de calentamiento. La mayor cantidad de crudo mejorado con °API promedio mayor a 22 también se presenta para el calentamiento con una temperatura máxima de 650 °F, mientras que para las temperaturas menores a este valor no se observó producción de crudo mejorado con °API por encima de 22.

V.3.2.3 Análisis del Apuntalante JL-P

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo fracturado (esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento) usando el apuntalante JL-P, y que ha sido calentado con el modelo Banda 10. Los valores de la temperatura de la celda más caliente del modelo a los 15 días de simulación, para potencias desde 200 hasta 600 kW y frecuencias desde 13,56 hasta 2450 MHz son mostrados en la Figura N° 5.21.

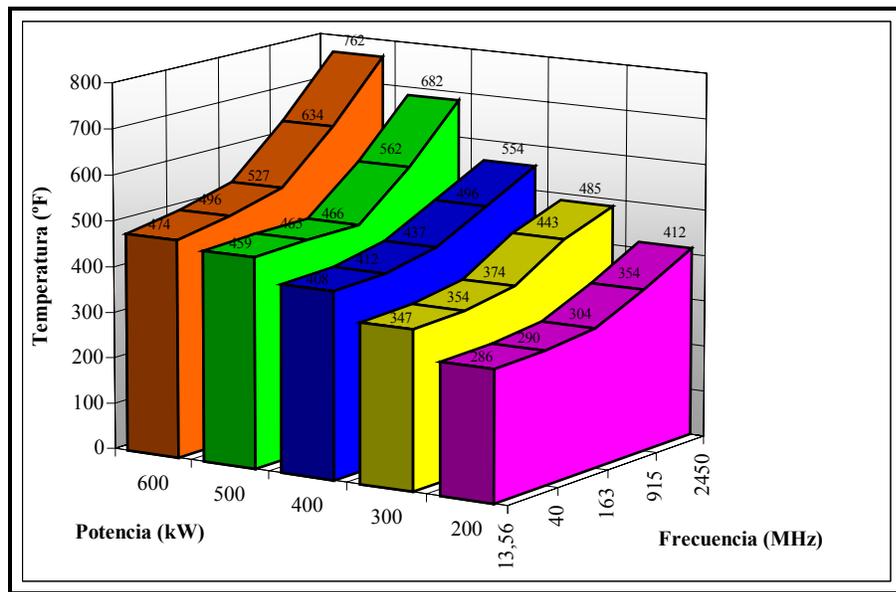


Figura N° 5.21: Temperatura de la celda (2,5,5) en el día 15 de simulación, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentando en Banda 10, apuntalante JL-P.

Se observa que la temperatura aumenta con el incremento en la potencia y en la frecuencia de radiación. Se obtienen temperaturas muy parecidas a las obtenidas con el apuntalante ALFE al radiar con frecuencias altas. Los valores de la

temperatura sobrepasan los 500 °F para la frecuencia de 163 MHz calentando a una potencia de 600 kW, para la frecuencia de 915 MHz calentando a potencias por encima de 500 kW y para la frecuencia de 2450 MHz calentando a potencias desde 400 kW. Por lo tanto, se utilizará la potencia de 400 kW y la frecuencia de 2450 MHz para los análisis de la producción de crudo mejorado de este esquema.

Para el análisis de la °API se realizaron sensibilidades en la temperatura máxima asignada a la fuente, utilizando valores desde 500 hasta 650 °F. Los resultados de la °API de crudo acumulado en tanque en función del tiempo se presentan a continuación en las Figuras N° 5.22, para una potencia de 400 kW y una frecuencia de 2450 MHz, al calentar bajo el modelo Banda 10 con una fractura rellena de apuntalante JL-P.

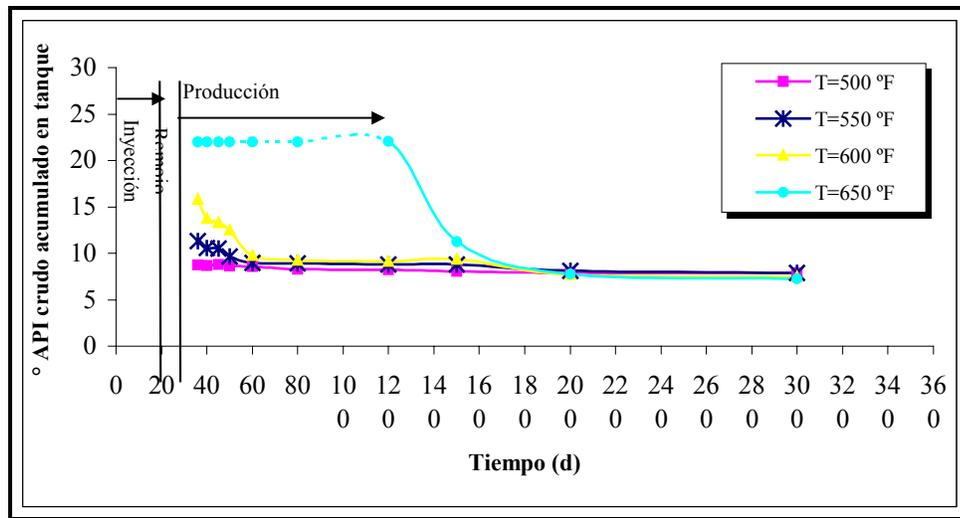


Figura N° 5.22: °API en función del tiempo variando la temperatura de la fuente de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentamiento en Banda 10, apuntalante JL-P. La línea discontinua representa °API>22.

Al igual que para los apuntalantes anteriores, se observa que la °API de crudo acumulado en tanque disminuye con el tiempo y con la disminución de la temperatura máxima de la fuente de calentamiento. La mayor cantidad de crudo mejorado con °API promedio mayor a 22 se presenta para el calentamiento con una temperatura

máxima de 650 °F, mientras que para las temperaturas que se encuentran por debajo de este valor no se observó producción de crudo mejorado con °API por encima de 22.

V.3.2.4 Análisis del apuntalante óptimo para el modelo de calentamiento Banda 10.

Con la idea de determinar cual es el mejor apuntalante para el modelo de calentamiento Banda 10, se compararon la producción de crudo mejorado variando los apuntalantes de la fractura cuando se calienta a una potencia, frecuencia y temperatura máxima de calentamiento previamente establecidos. De esta manera se puede observar el comportamiento de cada material bajo las mismas condiciones de energía suministrada al yacimiento. Los resultados de la °API de crudo acumulado en función del tiempo se presentan en la Figura N° 5.23 para el calentamiento en Banda 10 variando el apuntalante de la fractura, para una potencia de calentamiento de 500 kW y una frecuencia de radiación de 2450 MHz.

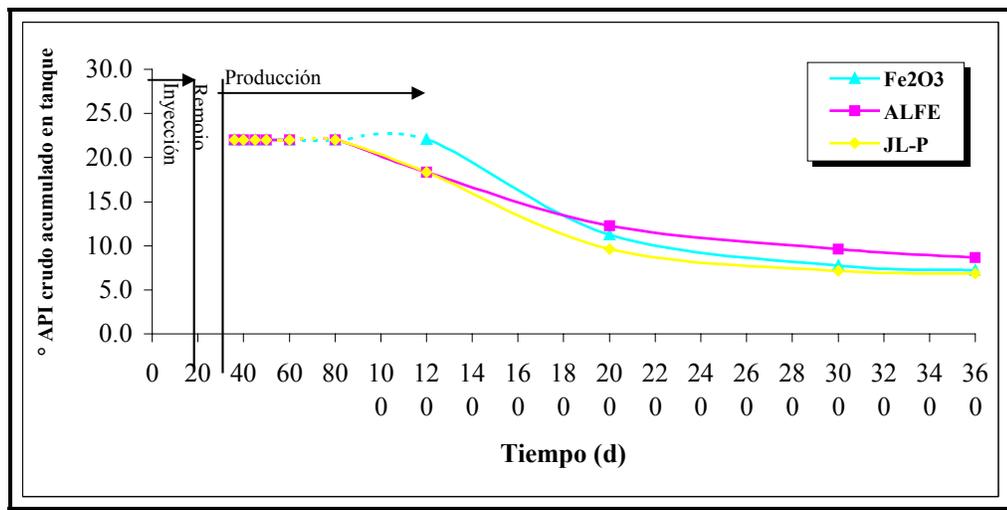


Figura N° 5.23: °API en función del tiempo variando el material apuntalante para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento, calentamiento en Banda 10 a 500 kW y 2450 MHz. La línea discontinua representa °API > 22.

Se puede ver que el material que mantiene durante mayor tiempo la producción de crudo mejorado con una °API en tanque mayor a 22, es el apuntalante Fe_2O_3 . La producción acumulada de crudo en función del tiempo para cada material apuntalante estudiado se presenta a continuación en la Figura N° 5.24.

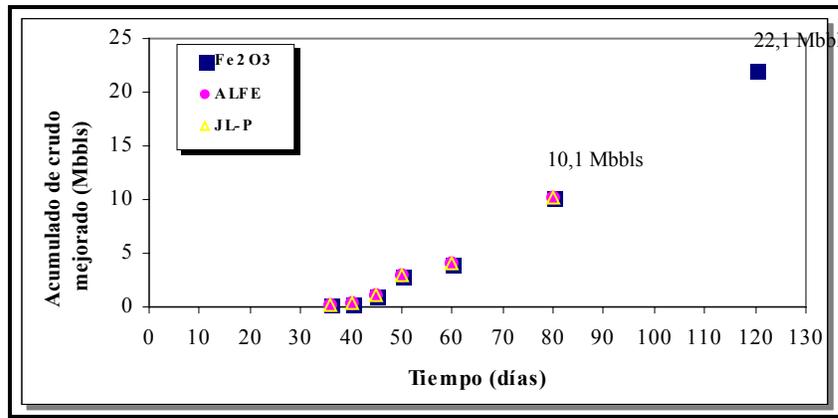


Figura N° 5.24: Acumulado de crudo mejorado (°API > 22) en función del tiempo al calentar con 500 kW y 2450 MHz, variando el material apuntalante para el calentamiento en Banda 10 bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Se puede ver que para el esquema constituido por el apuntalante Fe_2O_3 , la mayor producción de crudo mejorado corresponde a 22,1 Mbbls, en contraste con los apuntalantes ALFE y JL-P, que producen aproximadamente la mitad (10,1 Mbbls). Por todo lo anterior, se considera que el apuntalante Fe_2O_3 es el óptimo para el acoplamiento del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con el modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo para el modelo de calentamiento en Banda 10.

V.3.3 Análisis global del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo con donantes de hidrógeno.

Luego de haber realizado las simulaciones conceptuales de un pozo fracturado bajo las características del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento integrado a un modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo, es necesario un análisis que englobe todos los modelos de calentamiento estudiados, para obtener resultados más

generales. En esta sección se presenta un resumen de los resultados anteriores, y se obtiene un esquema óptimo de calentamiento para el modelo Yacimiento-Fractura-Calentamiento que está integrado por un apuntalante, frecuencia y modelo de calentamiento que son los más apropiados para su aplicación. Este esquema se estudió con detalle, haciendo especial énfasis en algunas de sus características generales como producción de crudo, tasa de producción, perfiles de presión y temperatura, etc.

A continuación se compararon los diferentes modelos de calentamiento para cada apuntalante estudiado bajo las mismas condiciones de potencia y frecuencia, para evaluar dichos modelos de acuerdo a su producción de crudo mejorado. Los resultados de la °API de crudo acumulado en tanque, en función del tiempo, para el modelo Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura rellena con los apuntalantes Fe₂O₃ y ALFE se presentan a continuación en la Figura N° 5.25-26. Allí se comparan los modelos de calentamiento Banda 0 y Banda 10 con el esquema Yacimiento-Calentamiento (sin fractura). Debido a que los resultados del apuntalante JL-P son muy similares a los del ALFE, no se presentan los resultados del análisis para este material.

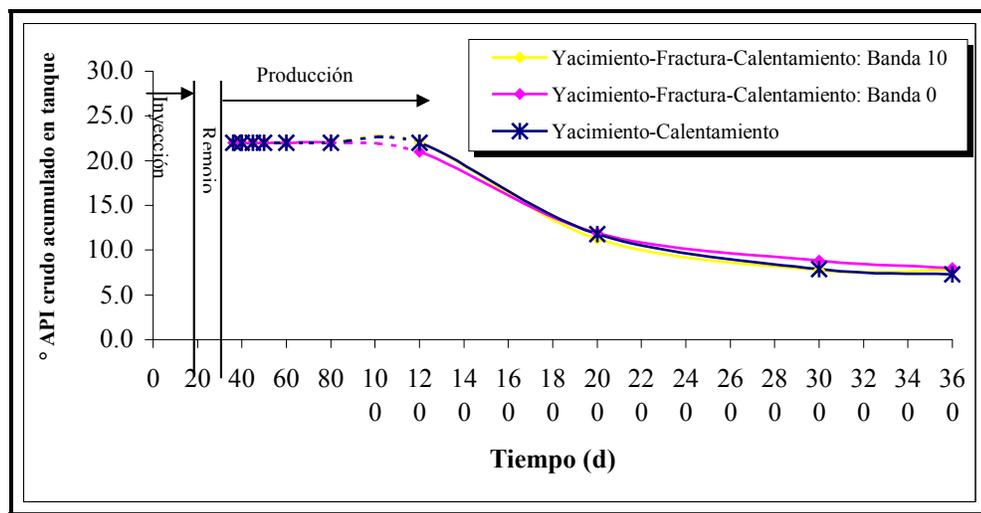


Figura N° 5.25: °API de crudo acumulado en tanque en función del tiempo para los esquemas y modelos de calentamiento acoplados al modelo de mejoramiento, apuntalante Fe₂O₃, calentando a 500 kW y 2450 MHz. Temperatura máxima de la fuente en 650 °F. La línea discontinua representa °API > 22.

En la Figura N° 5.25 se puede ver el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura rellena de apuntalante Fe_2O_3 , acoplado al modelo de mejoramiento, tiene la misma producción de crudo mejorado que el esquema Yacimiento-Calentamiento. Incluso, con el modelo de calentamiento en Banda 0, se puede observar que la producción de crudo mejorado se encuentra por debajo del esquema sin fractura. Por lo tanto, se puede concluir que aún cuando el apuntalante Fe_2O_3 presenta la mayor producción de crudo mejorado al compararlo con los otros materiales apuntalantes, para estas condiciones de calentamiento (500 kW, 2450 MHz y temperatura máxima de 650 °F) el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento no presenta ninguna ventaja con respecto al esquema Yacimiento-Calentamiento.

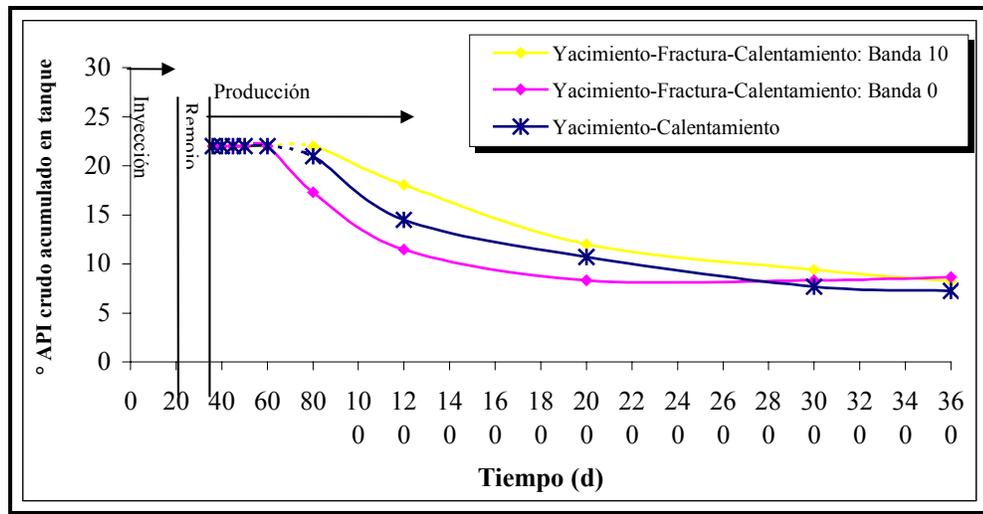


Figura N° 5.26: °API de crudo acumulado en tanque en función del tiempo para los esquemas y modelos de calentamiento acoplados al modelo de mejoramiento, apuntalante ALFE, calentando a 400 kW y 2450 MHz. Temperatura máxima de la fuente = 650 °F. La línea discontinua representa °API > 22.

En contraste con el caso del apuntalante Fe_2O_3 , para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura rellena de apuntalante ALFE, acoplado al modelo de mejoramiento, se observa un aumento considerable en la misma producción de crudo mejorado con respecto al esquema Yacimiento-Calentamiento

cuando se calienta con el modelo Banda 10. Sin embargo, para el modelo Banda 0 se observa que la producción de crudo mejorado se encuentra por debajo del esquema sin fractura, al igual que lo ocurrido en el caso del apuntalante Fe_2O_3 .

De todo lo anterior se puede concluir que el modelo de calentamiento en Banda 0 no es el más apropiado para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo. Sin embargo, el calentamiento en Banda 10 arroja valores de producción de crudo mejorado favorables, al compararlo con el esquema Yacimiento-Calentamiento. En el esquema de calentamiento en Banda 10 se observa que el efecto de las reacciones de mejoramiento disminuyen con el tiempo, hasta hacerse cero a los 300 días de simulación. De este tiempo, solo los primeros 80 días se observa producción de crudo mejorado con °API de 22.

Seguidamente se reportan los valores de producción de crudo mejorado en función del tiempo para cada esquema estudiado, relleno o no con apuntalante ALFE, cuando se calienta a 400 kW, 2450 MHz y con una temperatura máxima de calentamiento de 650 °F.

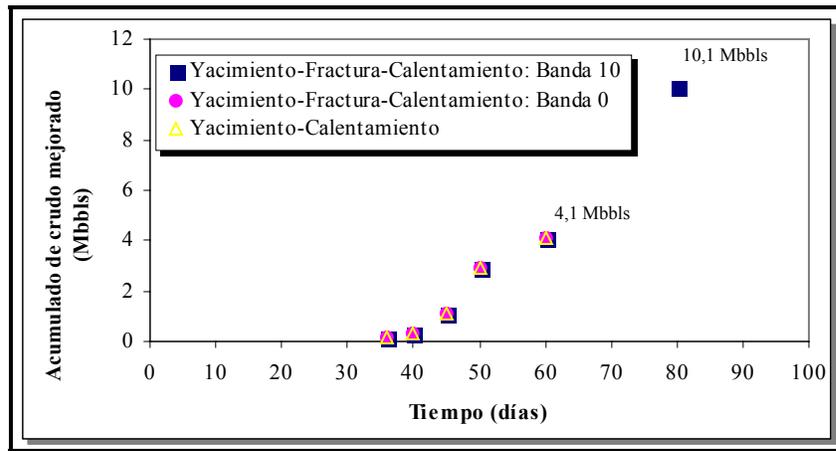


Figura N° 5.27: Acumulado de crudo mejorado (°API > 22) en función del tiempo para los esquemas estudiados, calentar a 400 kW, 2450 MHz y con una temperatura máxima de 650 °F.

Se puede ver que el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura rellena de apuntalante ALFE, bajo el modelo de calentamiento Banda 10, produce la mayor cantidad de crudo mejorado (10,1 Mbbls) en comparación con los otros esquemas estudiados. Por lo tanto, se puede decir que este esquema es el más óptimo para el acoplamiento al modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo con donantes de hidrógeno.

V.3.4 Estudio de los perfiles de flujo para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento bajo los modelos de calentamiento Banda 0 y Banda 10.

Para entender los resultados anteriores se realizó un cálculo del volumen de reacción del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para las condiciones de los modelos de calentamiento Banda 0 y Banda 10. Para llevar a cabo este análisis se siguió el procedimiento que se encuentra detallado en la sección de Metodología.

Los resultados de estos cálculos indican que la variable que determina el volumen de reacción es la temperatura. El perfil de concentración del donante de hidrógeno indica que éste penetra en las cercanías del pozo y en la fractura (ver Metodología), mientras que las altas temperaturas necesarias para la reacción de mejoramiento solamente se dan en las celdas contiguas al pozo. Por lo tanto ésta variable es la que gobierna el proceso. Los cálculos realizados indican que el volumen de reacción calculado para el modelo de calentamiento en Banda 0 es de 1678 pies³ mientras que el volumen de reacción para el modelo Banda 10 es de 4380 pies³. Se puede ver que el volumen de reacción del modelo Banda 10 es 2,6 veces mayor que el volumen del modelo Banda 0, por lo que resulta lógico que sea éste último el que arroje la mayor producción de crudo mejorado.

Seguidamente se graficaron los perfiles de temperatura, de saturación de crudo y de saturación de donante de hidrógeno en función del tiempo, en las celdas comprendidas por la fractura. Se tomaron valores de temperaturas ($T \geq 500$ °F), saturación de donante de hidrógeno ($S_d \geq 40\%$) y saturación de crudo ($S_o \geq 40\%$) para tiempos de 5, 10 y 20 días, correspondiente al tiempo que dura la inyección del donante de hidrógeno. Los resultados para el modelo Banda 0 se presentan en las

Figuras N° 5.28-30, los resultados para el modelo Banda 10 se presentan en las Figuras N° 5.31-33.

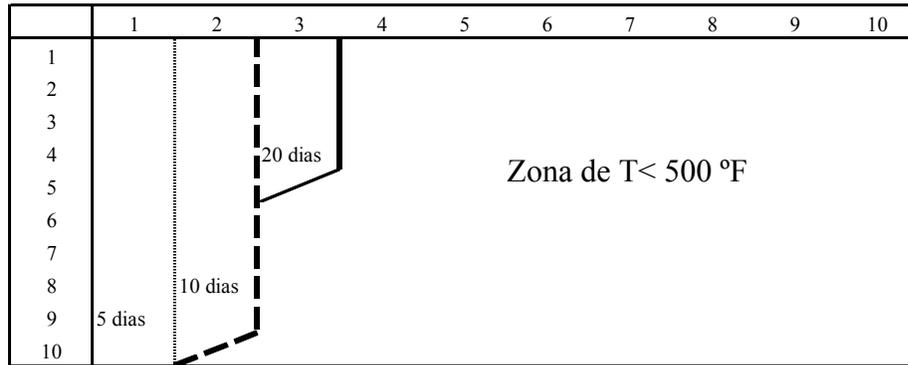


Figura N° 5.28: Perfil de Temperatura ($T \geq 500 \text{ }^\circ\text{F}$) en función del tiempo (5, 10 y 20 días de inyección) para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con el modelo Banda 0.

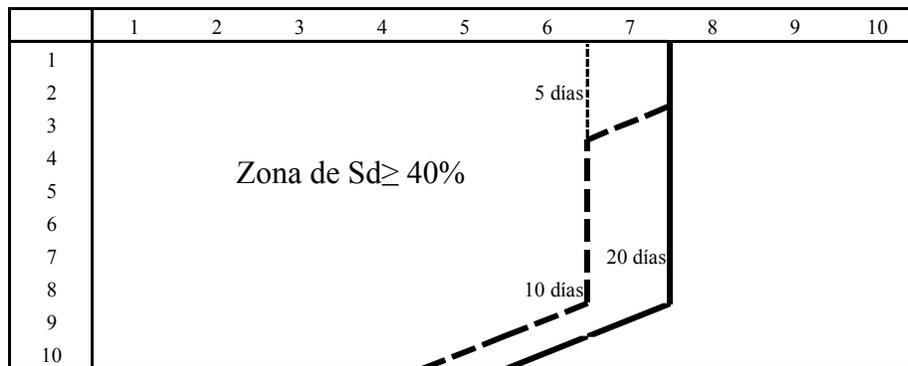


Figura N° 5.29: Perfil de Saturación de donante de hidrógeno ($S_d \geq 40\%$) en función del tiempo (5, 10 y 20 días de inyección) para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con el modelo Banda 0.

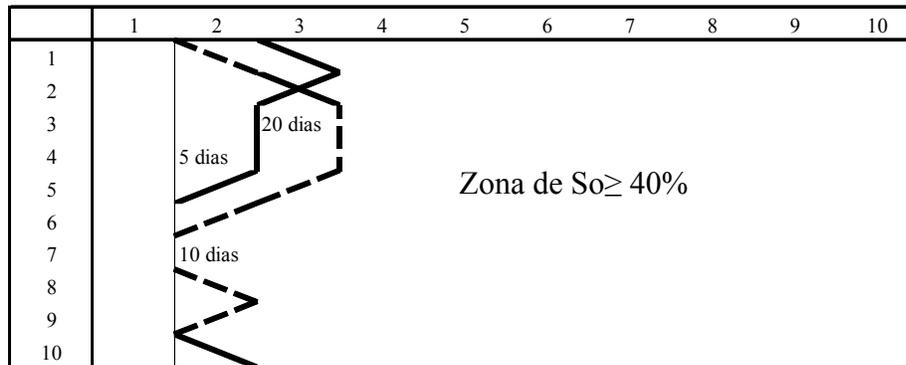


Figura N° 5.30: Perfil de Saturación de crudo ($S_o \geq 40\%$) en función del tiempo (5, 10 y 20 días de inyección) para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con el modelo Banda 0.

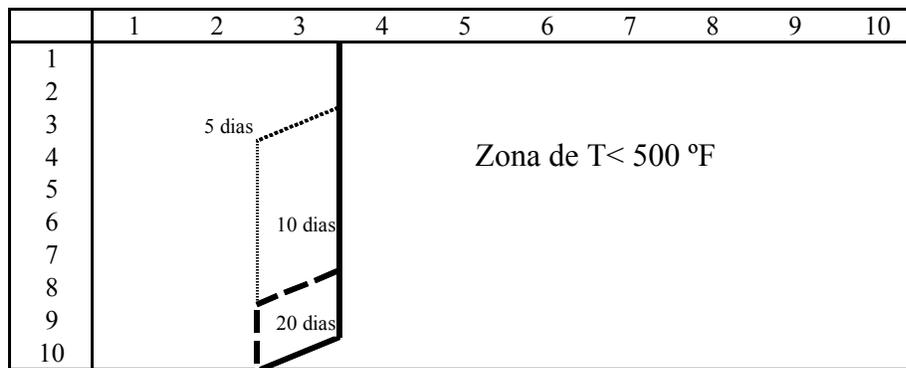


Figura N° 5.31: Perfil de Temperatura ($T \geq 500 \text{ }^\circ\text{F}$) en función del tiempo (5, 10 y 20 días de inyección) para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con el modelo Banda 10.

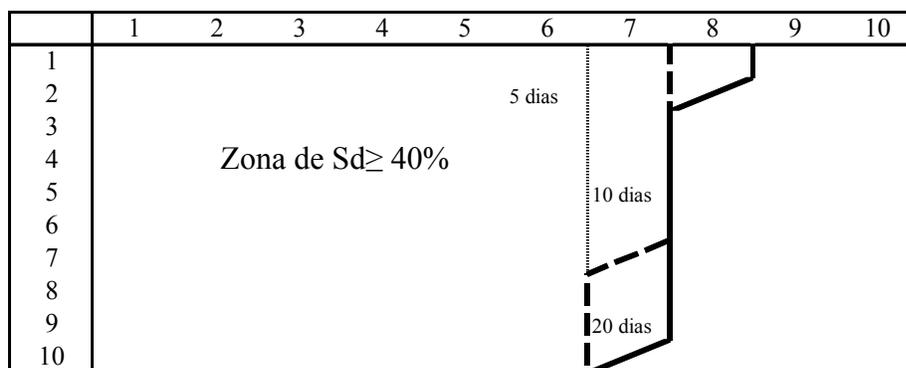


Figura N° 5.32: Perfil de Saturación de donante de hidrógeno ($S_d \geq 40\%$) en función del tiempo (5, 10 y 20 días de inyección) para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con el modelo Banda 10.

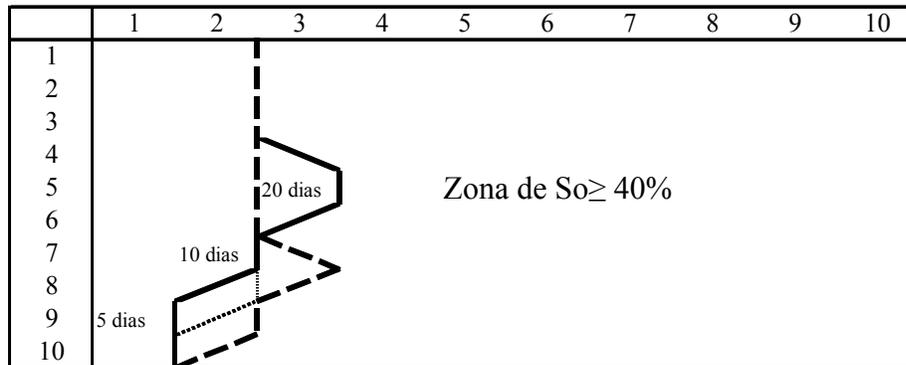


Figura N° 5.33: Perfil de Saturación de crudo ($S_o \geq 40\%$) en función del tiempo (5,10 y 20 días de inyección) para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con el modelo Banda 10.

Al comparar los perfiles de los dos modelos de calentamiento podemos observar que son muy parecidos, sin embargo el modelo Banda 10 presenta un perfil de temperaturas que se extiende desde la celda 3 en los primeros 5 días de calentamiento. El perfil de saturación de donante es similar para los dos modelos, aunque que puede ver la segregación gravitacional que produce la inyección de este fluido (en forma gaseosa), que produce altas concentraciones en las celdas de las capas superiores. El perfil de saturación de crudo se observa un poco menos desplazado hacia la derecha en el modelo Banda 0, ya que a los 5 días de inyección solo se ha desplazado a la celda 1, sin embargo con el tiempo se observa que los perfiles de ambos modelos son similares.

Como ya se ha visto en resultados anteriores, la temperatura es la variable que gobierna este proceso, ya que se puede ver que la mayor diferencia entre ambos modelos se encuentra en el perfil de temperatura. El modelo Banda 10 presenta altas temperaturas desde los primeros días de calentamiento que se extienden hacia el interior del yacimiento, y que permanecen hasta el final del proceso de inyección. En contraste, el modelo Banda 0 presenta altas temperaturas en las celdas adyacentes al pozo durante los primeros 5 días de inyección y, a medida que transcurre el tiempo, las altas temperaturas se extienden hasta ocupar las celdas 1-3, creando un perfil similar al del modelo Banda 10. Por lo tanto, es evidente que éste modelo tiene contacto con altas temperaturas durante mayor tiempo que el modelo anterior. La

distribución de fluidos y temperaturas observada en el modelo Banda 10 indica que estos tres elementos se encuentren juntos simultáneamente por más tiempo que en el modelo de calentamiento Banda 0, lo cual se traduce en una mayor producción de crudo mejorado.

Como un resultado interesante se observa que en ambos modelos de calentamiento el perfil de saturación de crudo se encuentra muy poco desplazado lejos del pozo, en comparación con los resultados reportados por Ovalles y col.^[11]. En dicho trabajo, se reportan resultados en los que el frente de crudo se encuentra desplazado hasta las celdas 4-5, lo cual ocurre debido al uso de la inyección de vapor como método de calentamiento. Por lo tanto, se puede ver mayor eficiencia en el modelo de mejoramiento al usar calentamiento dieléctrico para lograr las temperaturas necesarias para que se lleve a cabo la reacción.

CAPITULO VI

CONCLUSIONES

- En arenas de alta permeabilidad (≥ 1 Darcy) no se observan diferencias en la producción de crudo al hacer sensibilidades en la longitud o la geometría de una fractura.
- Es viable simplificar la geometría de una fractura para ser representada en un simulador comercial de yacimientos, pues se determinó que la diferencia en la producción es despreciable, tanto para un pozo fracturado y sin calentamiento ($<5\%$) como para un pozo fracturado sometido a calentamiento ($< 1\%$), ambos tomando una aproximación de áreas por exceso.
- Se encontró una geometría óptima de una fractura para su evaluación bajo diferentes condiciones de calentamiento dieléctrico, aplicado a dos yacimientos de crudos pesados y extra pesados. Dicha geometría se corresponde con una simplificación por exceso del modelo Radial, reportado ampliamente en la literatura.
- Se obtuvo un esquema óptimo de calentamiento, que se encuentra conformado por una potencia de calentamiento y una frecuencia óptima de radiación. Dichos parámetros fueron determinados para cada modelo de calentamiento, a fin de comparar entre ellos y llegar al esquema más apropiado para cada yacimiento estudiado. Se encontró que para el yacimiento Tía Juana las frecuencias óptimas de radiación se encuentran alrededor de los 163 MHz, mientras que para el yacimiento Cerro Negro se encuentran entre los 915 y los 2450 MHz.
- Se determinó que al concentrar la energía entregada al yacimiento en el área de la fractura, la producción de crudo es mayor que para los otros modelos de calentamiento, por lo tanto el modelo de calentamiento en Banda 0, con una fractura rellena de apuntalante Fe_2O_3 , resultó el esquema óptimo de calentamiento para los dos yacimientos estudiados. Sin embargo, la eficiencia

de dicho modelo de calentamiento está sujeto a la influencia de la permeabilidad de las arenas, como se evidenció en el Apéndice A.

- Se evidenció que el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento presenta un notable aumento (< 23%) y aceleración en la producción de crudo (< 21%) en los casos estudiados, al compararlo con la aplicación de una fractura o del calentamiento dieléctrico por separado.
- En general, los modelos conceptuales desarrollados en este trabajo permiten concluir que las técnicas de fracturamiento hidráulico y calentamiento dieléctrico, aplicadas conjuntamente como una herramienta para la recuperación mejorada de yacimientos de CP/XP, arrojan resultados favorables en cuanto al aumento y la aceleración de la producción, comparando con los casos de producción en los que ambas técnicas se aplican independientemente e incluso al compararlas con la producción natural de dichos yacimientos.
- Se evaluaron las técnicas de calentamiento dieléctrico y de inyección de vapor en el modelo de mejoramiento en subsuelo con donantes de hidrógeno y se compararon bajo una base de isoenergía (se entregó la misma cantidad de energía en ambos esquemas de calentamiento). Al aplicar calentamiento dieléctrico se obtuvo 31 veces la cantidad de crudo mejorado que se obtiene con inyección de vapor.
- Al evaluar diferentes modelos de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento acoplado al modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo con donantes de hidrógeno se determinó la potencia y frecuencia óptima de calentamiento, así como la temperatura máxima de la fuente, que permitió llegar a una comparación entre los esquemas de calentamiento estudiados.
- La mayor producción de crudo mejorado ($^{\circ}\text{API}$ de crudo acumulado en tanque ≥ 22) se obtuvo al acoplar el modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo con el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento al focalizar el calentamiento en una Banda 10 pies de ancho (fractura y arena adyacente),

con una fractura rellena de apuntalante ALFE, calentado a 400 kW y 2450 MHz, y con una temperatura máxima de calentamiento de 650 °F. Con este modelo, la producción de crudo mejorado resultó 2,5 veces mayor que la obtenida con el calentamiento focalizado únicamente en la fractura. El calentamiento focalizado en la fractura produce la misma cantidad de crudo mejorado que se obtiene al evaluar el esquema Yacimiento-Calentamiento.

- Se determinó que la razón por la cual el modelo Banda 10 es el modelo óptimo de calentamiento radica en el volumen de yacimiento en el cual se produce la reacción. Para el modelo Banda 10 el volumen de reacción es 2,6 mayor que el volumen del calentamiento focalizado en la fractura.
- Se comprobó que el parámetro más importante para la determinación del volumen de reacción es la temperatura, y a través de una evaluación de los perfiles de temperatura de los modelos se determinó que el modelo en Banda 10 tiene mayor cantidad de celdas con temperaturas superiores a los 500 °F que los otros, lo que trae como consecuencia una mayor producción de crudo mejorado.
- Se confirmó que con el empleo de calentamiento dieléctrico como fuente de calentamiento en el modelo de mejoramiento de crudos pesados en subsuelo se obtienen perfiles de saturación crudo más favorables para llevar a cabo el mejoramiento, pues no se observa el arrastre del frente de crudo característico de la inyección de vapor. De esta manera, se tiene que los tres elementos involucrados en la reacción de mejoramiento (temperatura, donante de hidrógeno y crudo) se encuentran juntos simultáneamente por más tiempo en el calentamiento dieléctrico que en la inyección de vapor.
- En general, el modelo conceptual Yacimiento-Fractura-Calentamiento desarrollado en este trabajo permite concluir que las técnicas de fracturamiento hidráulico y calentamiento dieléctrico, acopladas al modelo de mejoramiento de crudo en subsuelo con donantes de hidrógeno, arrojan resultados favorables en cuanto al aumento de la producción de crudo mejorado (en una relación de 2,5 veces más), al comparar con el caso de

calentamiento sin fractura (Yacimiento-Calentamiento) y con la técnica la inyección de vapor como fuente de calentamiento.

CAPITULO VII

RECOMENDACIONES

- Para determinar la factibilidad de emplear el calentamiento dieléctrico como una herramienta de recuperación mejorada, se recomienda realizar un estudio exhaustivo para determinar las condiciones óptimas de frecuencia y potencia de las arenas que se deseen estudiar.
- Se recomienda realizar el estudio del calentamiento dieléctrico en conjunto con otras técnicas para introducir materiales de mayor absorbencia electromagnética, como lo son el forzamiento, empaques de grava, etc., a fin de evaluar su viabilidad en yacimientos con arenas no consolidadas de alta permeabilidad.
- Hacer un estudio técnico-económico de los diferentes modelos de calentamiento dieléctrico estudiados, ya que la diferencia de producción entre ellos no es significativa, por lo que es necesario evaluar si el gasto de focalizar la energía en la fractura es rentable.
- Se evidenció una oportunidad de estudio en cuando a establecer reglas de mezclado para materiales con diferentes valores de D_p , por lo que se recomienda ampliar dichos estudios para evaluar el diseño de mezclas de materiales que logren un D_p determinado.
- Evaluar el proceso de calentamiento dieléctrico en pozos horizontales y comparar los resultados con los obtenidos al aplicar calentamiento dieléctrico en un pozo fracturado hidráulicamente.
- El calentamiento dieléctrico acoplado al modelo de mejoramiento de crudo con donantes de hidrógeno, debe ser evaluado con diferentes técnicas para introducir el material apuntalante en la formación, como forzamientos, empaques de grava, etc., con
- Acoplar el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento a modelos de mejoramiento en subsuelo que utilicen diferentes donantes de hidrógeno, de

manera de poder comparar la aplicabilidad del modelo ante diferentes esquemas de reacción.

CAPITULO VIII

REFERENCIAS

1. Prats, M., “*Procesos Térmicos de Extracción de Petróleo*”, Edición Técnica de Intevep, Los Teques (1987).
2. Prado, Magdalena., “*Inyección de Agua y Gas en Yacimientos Petrolíferos*” Ediciones Astro Data S.A., Maracaibo, Venezuela (2001).
3. Schumacher, M. M., “*Enhanced Recovery of Residual and Heavy Oils, Noyes Data Corporation*”, Segunda Edición, Park Ridge, New Jersey, USA (1980).
4. Soliman, M.Y., “*Approximate Solutions for Flow of Oil Heated Using Microwaves*”, Journal of Petroleum Science & Engineering, Halliburton Energy Services, Carrollton, USA (1997).
5. Ovalles, C., Lara, A., Urrecheaga, A., “Simulación numérica conceptual del calentamiento con radiación electromagnética (radiofrecuencia y microondas) de zonas productoras delgadas (< 30 pies) en yacimientos de CP/XP”, Informe Técnico de PDVSA-Intevep INT-8779, Los Teques (2001), y referencias allí citadas.
6. Fonseca, A., “Simulación numérica de procesos de recuperación mejorada de petróleo utilizando energía electromagnética”, Trabajo de Grado para la Especialización en Ingeniería de Procesos, U.C.V (2002).
7. Ovalles, C., Pérez, A., Alvarez, C., Salas, K., “Simulación numérica de inyección alternada de vapor en un pozo horizontal de Yacimiento LL-07”, Informe Técnico de PDVSA-Intevep INT-8013, Los Teques (2001).
8. Ramirez, R., “Estudio del efecto del Calentamiento por microondas en el comportamiento de producción de pozos”, Trabajo de Grado para la Especialización en Ingeniería Mecánica, U.S.B (2002).
9. Salazar, A., Fonseca, A., Ovalles, C., “Simulación numérica conceptual de los procesos de Recuperación Mejorada y Mejoramiento de CP/XP utilizando Calentamiento Dieléctrico”, Informe Técnico de PDVSA-Intevep INT-9360, Los Teques (2002).

10. Salazar, A., Marcano, G., Mendez, Z., Ovalles, C., “Actualización del estado del arte en el mejoramiento de crudos pesados y Extrapesados en subsuelo”, Informe Técnico de PDVSA-Intevep INT-7838, Los Teques (2000)
11. Ovalles, C., Martinis, J., Pérez, A., Rodríguez, H., Vallejos, C., “Modelaje numérico del proceso de mejoramiento de crudos pesados en subsuelo con donantes de hidrógeno”, Informe Técnico de PDVSA-Intevep INT-7184, Los Teques (2000).
12. Ovalles, C., Fonseca, A., Alvarado, V., Urbano, N., Franco, H., “Estado del arte y modelaje físico numérico del calentamiento con Radiación Electromagnética a Fondo de Pozo”, Informe Técnico de PDVSA-Intevep INT-8429, Los Teques (2001).
13. Da Matta, W., Cursino, D. F. S., “Calentamiento Electromagnético para recuperación mejorada de petróleo. Un caso práctico”, Informe Tecnológico, **18** (2), 67 (1997).
14. Medina, B., Israel, E., “Hidrodesulfuración de Moléculas modelo empleando Microondas como fuente de calentamiento”, Tesis de Grado para Ingeniería Química, U.S.B (1998).
15. Peterson, E., “Microwave Chemical Processing” Dow Chemical, Texas Operations EPRI. Informe Técnico (1993).
16. Willard, H., Merton, H., “Microwave Processing of Materials”, Materials Research Society. Symposium Proceedings (1995).
17. Ayappa, K. G., “Modelling Transport Processes during Microwave Heating: A Review”, Review in Chemical Engineering, Vol. 13 N° 2, Freund Publishing House Ltd., London (1997).
18. Ayappa, K., Ovalles, C., Franco, H., Urbano, N., Alvarado, V., “Report on Modeling of Microwave Heating”, (2000).
19. Ayappa, K. G., Davis, H. T., Craspiet, G., Davis, E. A., Gordon, J., “Microwave Heating: an evaluation of Power formulation”, Chemical Engineering Science, **40** (4) 1005-1016 (1991).

20. Albernethy, E., "Production Increase of Heavy Oils by Electromagnetic heating", *Journal of Canadian Petroleum*, **1**, 673-700 (1976).
21. Barberii, E. E., "El Pozo Ilustrado", CD-ROM-Primera edición, FONCIED , Caracas (1998).
22. Economides, M., Nolte, K., "Reservoir Stimulation", Tercera Edición, John Wiley & Sons LTD, New York (2000).
23. Mouris, J., Hutcheon, R. M., "Measurements of the complex dielectric constant of various crude/oil/sand mixtures and related minerals in UHP argon cover gas at 85 psig between room temperature and 350 °C in the frequency ranges 400 MHz to 2986 MHz and 54 MHz to 1015 MHz.", MPN-38-00, Microwave Properties North, Deep River, Canada, (2002).
24. Mouris, J., Hutcheon, R. M., "Measurements of the complex dielectric constant of various crude/oil/sand mixtures and related minerals in UHP argon cover gas at 85 psig between room temperature and 350 °C in the frequency ranges 400 MHz to 2986 MHz and 54 MHz to 1015 MHz.", MPN-49-01, Microwave Properties North, Deep River, Canada, (2002).
25. Mouris, J., Hutcheon, R. M., "Measurements of the complex dielectric constant of various crude/oil/sand mixtures and related minerals in UHP argon cover gas at 85 psig between room temperature and 350 °C in the frequency ranges 400 MHz to 2986 MHz and 54 MHz to 1015 MHz.", INTP-Prelim-13, Microwave Properties North, Deep River, Canada, (2002).
26. Mouris, J., Hutcheon, R. M., "Measurements of the complex dielectric constant of various crude/oil/sand mixtures and related minerals in UHP argon cover gas at 85 psig between room temperature and 350 °C in the frequency ranges 400 MHz to 2986 MHz and 54 MHz to 1015 MHz.", INTP-Prelim-14, Microwave Properties North, Deep River, Canada, (2002).
27. <http://www.cmgroup.com/software/stars.htm>, Enero, 2004.
28. Manuales del Usuario "STARS User's Guide 2001.10" y "STARS User's Guide 2002.10", Guías de ayuda del simulador en digital, Computer Modelling Group LTD, Canada (2001-2002)

29. Ovalles, C., Martinis, J., Perez, A., Cotte, E., Castellanos, L., Rodriguez, H., SPE 69561, presented in SPE Latin American and Caribbean Petroleum Eng. Conf., Buenos Aires (2001)
30. Ovalles, C., Vallejos, C., Vasquez, T., Martinis, J., Perez, A., Cotte, E., Castellanos, L., Rodriguez, H., SPE 69692, presented in SPE Int. Thermal Operations and Heavy Oil Symp., Porlamar, (2001)
31. Ovalles, C., Vallejos, C., Vasquez, T., Rojas, I., Ehrman, U., Benitez, J., Martinez, R., "Downhole Upgrading Of Extra-Heavy Crude Oil Using Hydrogen Donors And Methane Under Steam Injection Conditions", J. Pet. Sci. Tech. September 25, 2002.
32. Ovalles, C., Fonseca, A., Lara, A., Alvarado, A., Ucherreaga, K., Ranson, A., y Mendoza, H., "Opportunities of Downhole Dielectric Heating in Venezuela: Three Case Studies Involving Médium, Heavy and Extra-Heavy Crude Oil Reservoirs", SPE 78980, SPE/Petroleum Society of CIM/CHOA, Noviembre 2002.

APÉNDICES

APÉNDICE A

ANÁLISIS DEL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA- CALENTAMIENTO PARA LOS YACIMIENTOS TÍA JUANA Y CERRO NEGRO UTILIZANDO SUS PERMEABILIDADES REALES.

En esta sección se estudiaron diferentes esquemas de calentamiento dieléctrico a fondo de pozo, y se evaluó el impacto de la presencia de una fractura, como un mecanismo para introducir en el yacimiento un material apuntalante que mejore la absorción de radiación electromagnética en el medio. Se estudiaron dos modelos conceptuales de yacimientos de crudos pesados típicos de Venezuela: Tía Juana (15,5 °API y permeabilidad de 900 mD) y Cerro Negro (7,7 °API y permeabilidad de 12000 mD), los cuales fueron validados en los trabajos de Ramirez^[8], Ovalles^[5,7,32] y Fonseca^[6].

A.1 METODOLOGÍA.

Los procedimientos para los cálculos y las propiedades físicas, térmicas y dieléctricas de las arenas (correspondientes a los yacimientos Tía Juana y Cerro Negro, ver sección III.1) y de los crudos allí presentes (15,5 y 7,7 °API, respectivamente), así como la validación experimental de los modelos numéricos utilizados, se encuentran publicados en trabajos previos^[5-8,32]. Estos procedimientos fueron explicados en la sección III.7 y aplicados en el capítulo IV para la evaluación de los yacimientos con una permeabilidad que no se corresponde con el valor real de las arenas en estudio.

El calentamiento electromagnético se modeló utilizando el simulador comercial STARS[®] de CMG, Calgary, Canadá^[27-28], asignándole un valor constante de potencia a cada celda de la zona a calentar (ver secciones III.2 y III.3). Este valor de potencia se calculó a través de la ecuación reportada por Abernethy^[20] y estudiada por Soliman^[4]. Para ambos casos se utilizó una malla cartesiana de 24x24x3 con el pozo productor y la antena emisora ubicados en el extremo de la malla (ver sección III.1), y una fractura localizada en las celdas (24, j, k) rellena o no de un material

apuntalante tal y como se emplea en campo (ver sección III.4). Este arreglo equivale a simular una cuarta parte del yacimiento original, suponiendo una equivalencia geométrica. En cuanto a la fractura (ver sección III.4), se analizaron diversos parámetros de la misma tales como: longitud (desde 40 hasta 200 pies de largo), forma (horizontal ó radial) y naturaleza de los materiales apuntalantes (denominados como AlFe, Fe₂O₃ y JL-P, y con propiedades dieléctricas radicalmente diferentes). También se evaluaron potencias desde 0 hasta 200 kW y frecuencias desde 13,56 hasta 2450 MHz. La distribución de energía se alimentó al simulador bajo dos diferentes esquemas de calentamiento: 1) en bandas (que varían desde 0,083 hasta 20 pies), y 2) en forma radial, tal y como se explicó en la sección III.6.

A.2 RESULTADOS Y DISCUSIÓN:

De las simulaciones conceptuales de ambos yacimientos se observó que la temperatura aumenta con la potencia de la fuente, con el subsiguiente incremento en la producción de crudo. En cuando al perfil de temperatura, se observa que los valores disminuyen al aumentar la distancia de separación entre la antena emisora y las celdas a calentar, y también que incrementa a medida que transcurre el tiempo de calentamiento. Además, tal y como se esperaba, la temperatura en las celdas que componen la fractura (la cual contiene el material apuntalante que absorbe radiación) es más elevada que en el resto del yacimiento. Por otro lado, no se observaron diferencias notables en el perfil de calentamiento cuando se varía la forma de la fractura, aunque sí se registra un aumento apreciable en la producción con su longitud. En cuanto a la variación de los modelos de calentamiento, se observó que al concentrar la energía en una zona pequeña las temperaturas aumentan significativamente, mientras que, bajo las mismas condiciones de potencia y frecuencia, si se incrementa la zona a calentar, la temperatura disminuye proporcionalmente.

Los resultados de las simulaciones de los yacimientos Tía Juana y Cerro Negro se presentan en las Figuras A.1 y A.2.

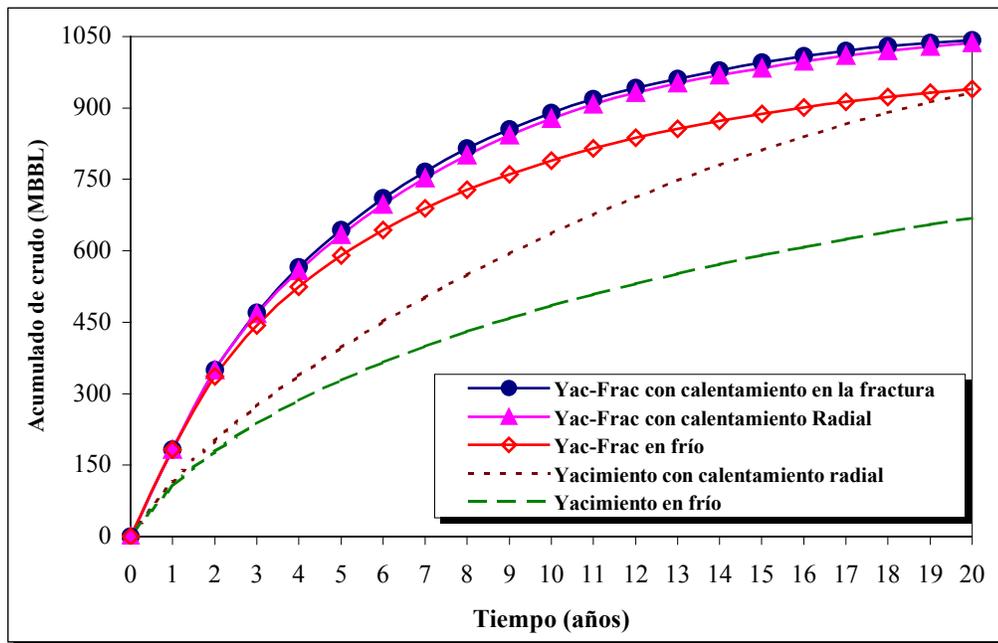


Figura A.1: Producción acumulada de crudo para el caso del Yacimiento Tía Juana (15,5 °API; 900 mD)

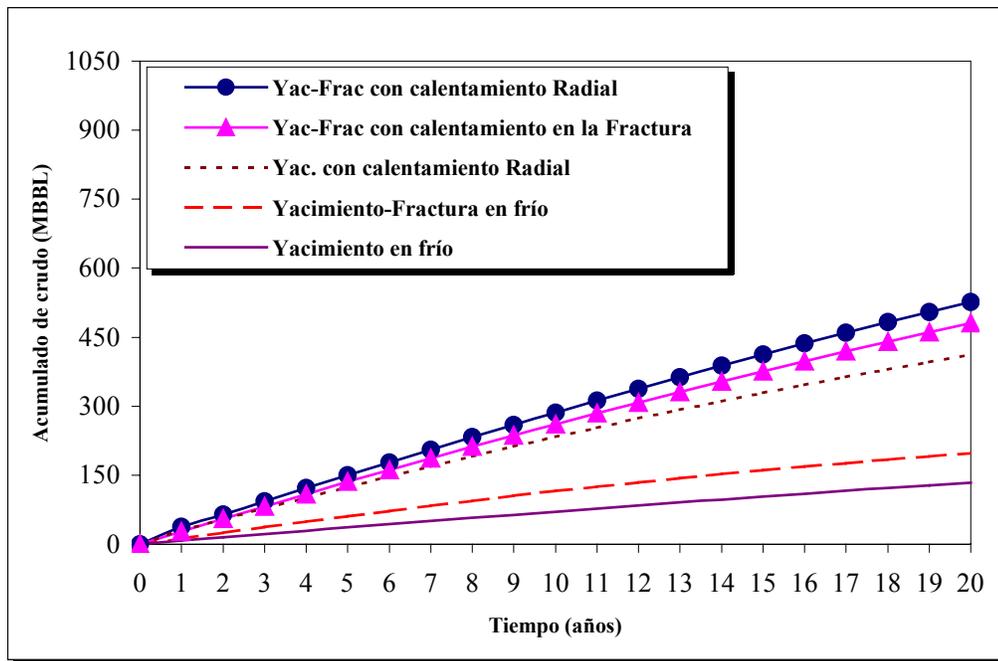


Figura A.2: Producción acumulada de crudo para el caso del Yacimiento Cerro Negro (7,7 °API; 12000 mD)

Se puede observar que, para ambos casos, el esquema de calentamiento con fractura presenta una aceleración y un incremento importante en la producción de crudo acumulada con respecto a la producción en frío (aproximadamente 160% para Tía Juana y 11% para Cerro Negro) y en ausencia de fractura (aproximadamente 300% para Tía Juana y 56% para Cerro Negro). Estos resultados se atribuyen a una reducción de la viscosidad con la temperatura lo cual impacta directamente en el factor de recobro.^[3-5]

En el caso del yacimiento Tía Juana (permeabilidad = 900 mD), el mayor volumen de crudo se obtuvo en el caso de calentamiento focalizado en la fractura mientras que para el Cerro Negro (permeabilidad 12000 mD) resultó ser la simulación con calentamiento radial. Se obtienen incrementos en los porcentajes de recobros con respecto a la producción en frío de 29,7 y 8,5%, respectivamente.

Se puede ver cómo en el caso Tía Juana la presencia de la fractura por sí sola tiene un impacto similar a del calentamiento del yacimiento completo (con recobros que rondan el 26%), mientras que en el caso Cerro Negro el calentamiento por sí sólo representa un incremento en la producción mucho mayor que el de la fractura (recobros de 6.6% y 3.2%, respectivamente). Estos resultados ponen en evidencia el rol que juega la permeabilidad de la arena en los casos de estudio (a bajas permeabilidades se aprecia mejor el efecto del calentamiento con fractura).

Con base a estos resultados se puede concluir que el calentamiento dieléctrico en presencia de una fractura rellena de un material que absorbe radiación es una técnica efectiva para incrementar la producción de crudo.

A.3 CONCLUSIONES

- Se observó que el perfil de temperatura aumenta con la potencia de la fuente, con el subsiguiente incremento en la producción de crudo, disminuye al aumentar la distancia de separación entre la antena emisora y las celdas a calentar, y se incrementa a medida que transcurre el tiempo de calentamiento.

- La temperatura en las celdas que componen la fractura (la cual contiene el material apuntalante que absorbe radiación) es más elevada que en el resto del yacimiento.
- Se obtiene una aceleración y un incremento importante en la producción de crudo comparando con el caso en frío (300% para Tía Juana y 56% para Cerro Negro) y en ausencia de fractura (160% y 11%, respectivamente), los cuales se atribuyen a una reducción de la viscosidad con la temperatura que impacta directamente en el factor de recobro.
- Se evidenció que a bajas permeabilidades la presencia de una fractura juega un papel importante.
- Se demostró que el calentamiento dieléctrico en presencia de una fractura rellena de un material que absorbe radiación es una técnica efectiva para incrementar la producción de crudo.

APÉNDICE B
ANÁLISIS DETALLADO DE LOS MODELOS DE CALENTAMIENTO
BANDA 1, BANDA 10, BANDA 20 Y RADIAL, BAJO EL ESQUEMA
YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO, PARA EL CASO TÍA
JUANA.

En esta sección se presentan de manera detallada los resultados de las sensibilidades hechas a los modelos de calentamiento en bandas de 1 a 20 pies de ancho, que en este estudio son llamados Banda 1, Banda 10 y Banda 20 y del modelo de calentamiento Radial.

B.1 ANÁLISIS DEL MODELO DE CALENTAMIENTO EN UNA BANDA DE 1 PIE DE ANCHO (BANDA 1) BAJO EL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO PARA EL CASO TÍA JUANA.

En esta sección se presentan los resultados de los análisis del modelo de calentamiento en una banda de 1 pie de ancho ó Banda 1. Esta zona de calentamiento incluye a la fractura y a línea de celdas en dirección \hat{i} que se encuentran adyacentes a la fractura; la suma de ambas regiones suman 1 pie de ancho. Debido a que se están calentando dos áreas con propiedades diferentes (arena del yacimiento y apuntalante de la fractura), los resultados de los estudios realizados a este esquema de calentamiento se presentan en detalle.

Se realizaron simulaciones conceptuales variando los valores de la potencia y de la frecuencia de radiación para cada uno de los tres apuntalantes estudiados para obtener los rangos óptimos de la frecuencia de radiación para cada material apuntalante en el rango de potencias estudiado. Se seleccionó la potencia óptima de calentamiento tomando como criterio que la temperatura máxima del yacimiento no debe exceder los 500 °F. Luego se determinó la frecuencia de radiación óptima para este valor de potencia y para cada uno de los apuntalantes estudiados. Estos últimos fueron comparados entre sí con la finalidad obtener la combinación de apuntalante, potencia y frecuencia más apropiada para el calentamiento en Banda 1.

Seguidamente, se realizaron sensibilidades en la geometría de la fractura, a fin de determinar la frecuencia óptima para cada uno de los largos de fractura estudiados. Igualmente se estudio la altura de la fractura para verificar su impacto como parámetro de diseño. Por último, se analizó el efecto de la tasa de producción diaria en la producción acumulada de crudo, así como también se evaluó el impacto de la conductividad térmica del apuntalante tanto en la temperatura del yacimiento como en la producción acumulada de crudo.

B.1.1 Análisis de la potencia óptima de calentamiento para el modelo de calentamiento Banda 1, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales del yacimiento Tía Juana bajo el modelo de calentamiento Banda 1, en las que se analizaron los rangos de potencia aplicables según el material apuntalante utilizado.

B.1.1.a Análisis del Apuntalante Fe_2O_3

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo con una fractura Cuadrada rellena de apuntalante Fe_2O_3 . Los valores de la producción acumulada de crudo en un tiempo de 20 años, para potencias desde 40 hasta 200 kW y frecuencias desde 13,56 hasta 2450 MHz son mostrados en la Figura N° B.1.

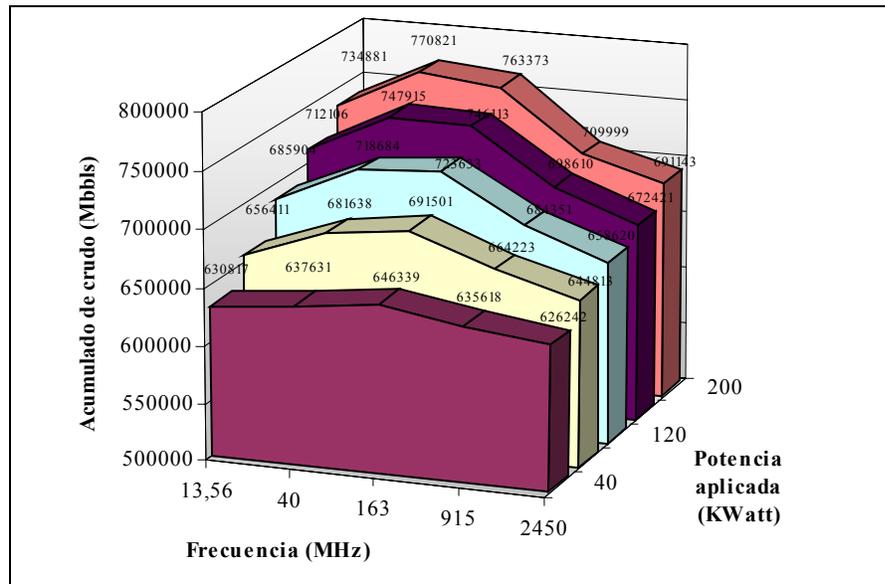


Figura N° B.1: Producción de crudo acumulada en 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, apuntalante Fe_2O_3 , calentando en Banda 1 para Tía Juana (100 mD).

Allí se observa que la producción acumulada de crudo aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento. Los mayores valores de producción para las frecuencias estudiadas se encuentran en el rango de 40 a 163 MHz lo cual sugiere que el valor óptimo de la frecuencia para éste apuntalante y esquema de calentamiento se encuentra en dicho rango.

Los resultados de la variación de la temperatura de la celda más caliente del yacimiento en función de la potencia y frecuencia aplicadas, a los 20 años de simulación se presentan en la Figuras N° B.2.

Se observa que la temperatura aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento y de la frecuencia de radiación. Se encontró que la temperatura sobrepasa los 500 °F cuando se calienta a una potencia de 200 kW a la frecuencia de 2450 MHz, por lo cual se tomó como rango de potencias aplicables para este apuntalante los valores desde 40 hasta 160 kW.

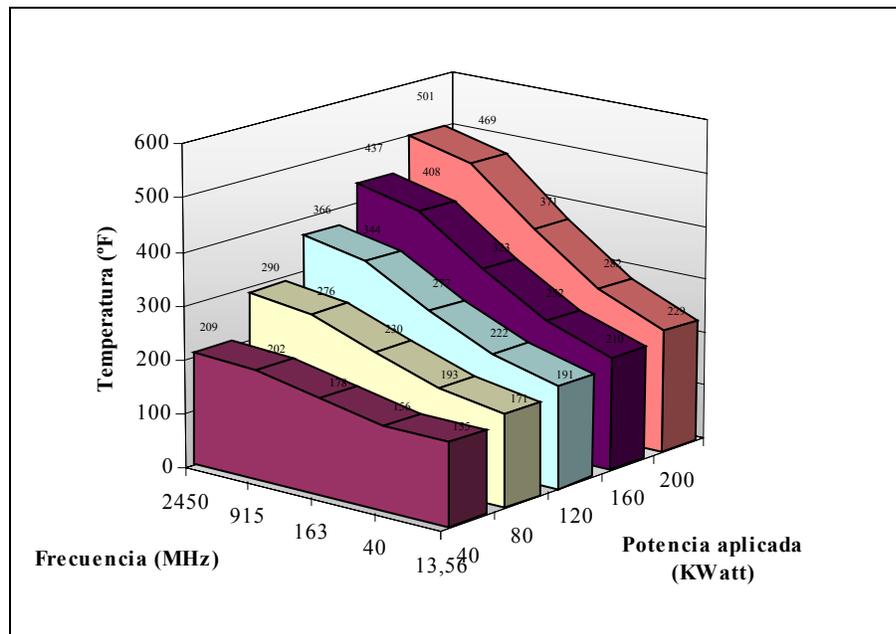


Figura N° B.2: Temperatura de la celda (24,23,3) a 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, apuntalante Fe₂O₃ y calentamiento en Banda 1 para el caso Tía Juana (100 mD).

B.1.1.b Análisis del Apuntalante ALFE

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo con una fractura Cuadrada rellena de apuntalante ALFE, usando los datos del yacimiento Tía Juana. En la Figura N° B.3 se encuentran los valores de la producción acumulada de crudo en un tiempo de 20 años, para valores de potencia desde 40 hasta 200 kW y para valores de frecuencia desde 13,56 hasta 2450 MHz.

Se observa que la producción aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento. También se puede ver que el mayor valor de producción se tiene para un rango de frecuencias entre 13,56 y 40 MHz para todos los valores de potencia estudiados, siendo 40 MHz el que presenta mayor valor de producción, por lo que se toma como frecuencia óptima para este apuntalante y esquema de calentamiento.

Los resultados de la variación de la temperatura de la celda más caliente del yacimiento en función de la potencia y frecuencia aplicadas, a los 20 años de simulación se presentan en la Figuras N° B.4.

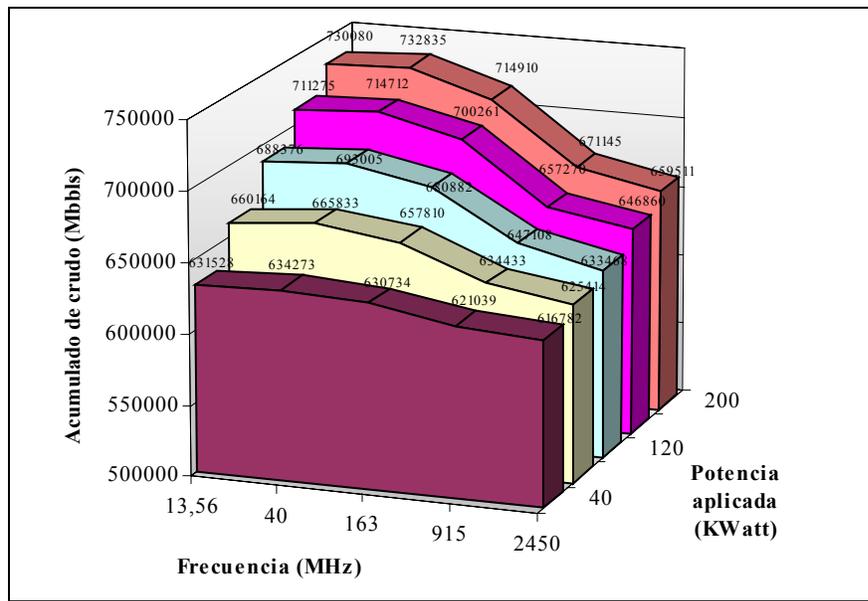


Figura N° B.3: Producción de crudo acumulada en 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento apuntalante ALFE y calentamiento en Banda 1 para el caso Tía Juana (100 mD).

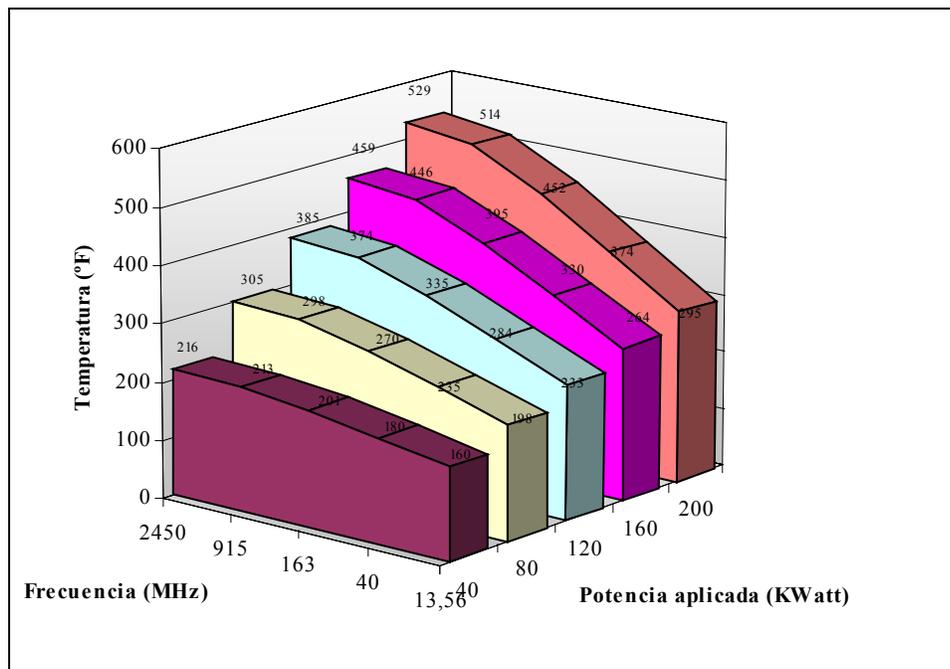


Figura N° B.4: Temperatura de la celda (24,23,3) a 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, con apuntalante ALFE y calentamiento en Banda 1 para el caso Tía Juana (100 mD).

Se observa que temperatura de la celda aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento. También se puede ver claramente que las mayores temperaturas se encuentran para 2450 MHz. Además, se observa que la temperatura

sobrepasa claramente los 500 °F para la potencia de calentamiento de 200 kW en las frecuencias 915 y 2450 MHz, por lo cual, para este esquema, se recomienda calentar bajo un rango de potencias menores a 160 MHz.

B.1.1.c Análisis del Apuntalante JL-P

En la Figura N° B.5 se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo con una fractura Cuadrada rellena de apuntalante JL-P. Allí se encuentran los valores de la producción acumulada de crudo en un tiempo de 20 años, para valores de potencia desde 40 hasta 200 kW y para valores de frecuencia desde 13,56 hasta 2450 MHz.

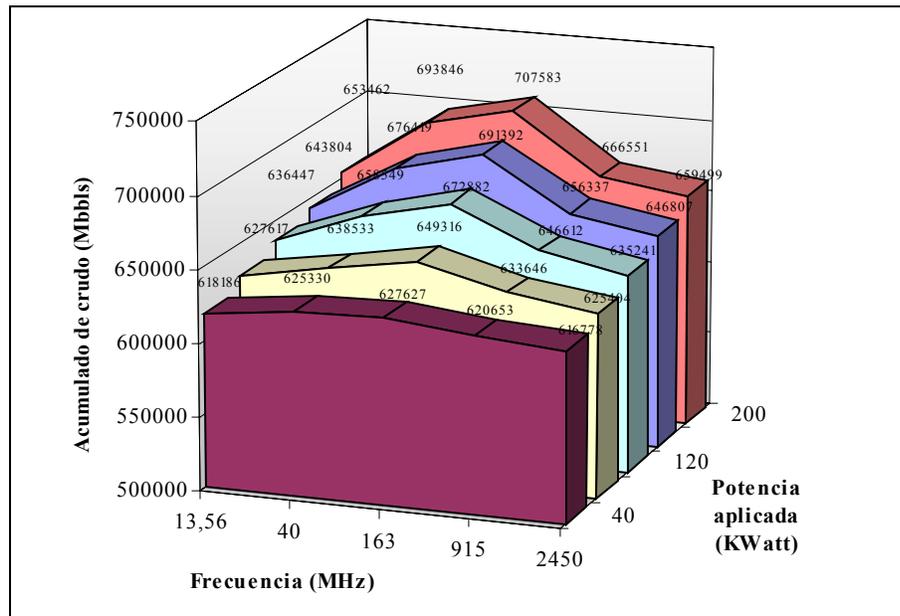


Figura N° B.5: Producción de crudo acumulada en 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, con apuntalante JL-P y calentamiento en Banda 1 para el caso Tía Juana (100 mD).

Se observa cómo la producción aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento, en contraste con el caso Banda 0 donde no se observaban diferencias notables al variar este parámetro. También se puede ver, un máximo en el valor de la producción en la frecuencia de 163 MHz, que se mantiene en todos los valores de potencia estudiados, por lo cual se fijó éste valor como la frecuencia óptima para éste apuntalante y esquema de calentamiento.

Los resultados de la variación de la temperatura de la celda más caliente del yacimiento en función de la potencia y frecuencia aplicadas, a los 20 años de simulación se presentan en la Figuras N° B.6.

Se observa que temperatura de la celda aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento y de la frecuencia de radiación. También se puede ver claramente un máximo en el valor de la temperatura, que corresponde a la frecuencia de 2450 MHz para todos los valores de potencia estudiados, lo cual difiere con

respecto al modelo de calentamiento en Banda 0. Sin embargo, se observa que la temperatura sobrepasa los 500 °F para la potencia de calentamiento de 200 kW en las frecuencias de 915 y 2450 MHz, por lo cual, para este esquema, se recomienda calentar bajo un rango de potencias menores a 160 MHz.

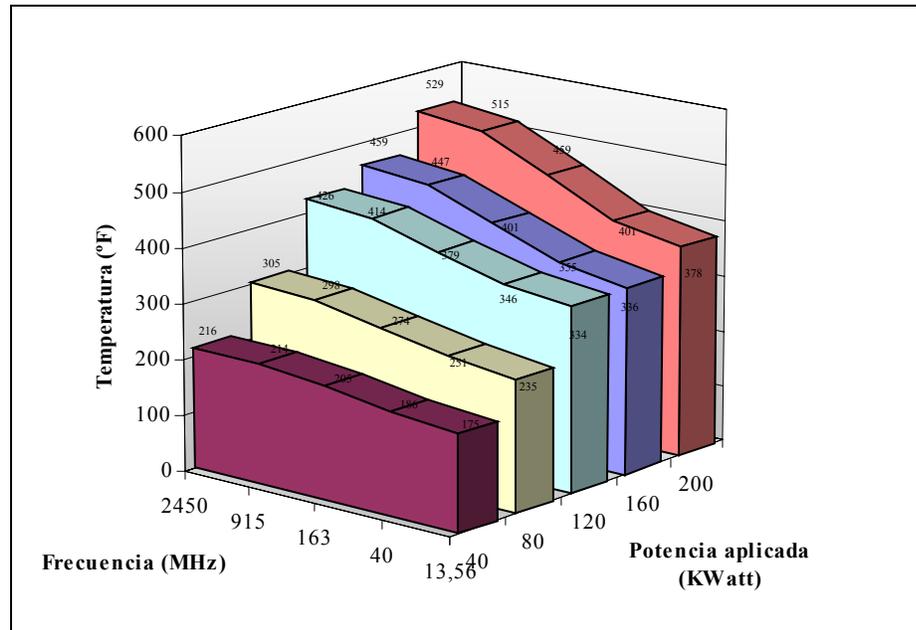


Figura N° B.6: Temperatura de la celda (24,23,3) a 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, con apuntalante JL-P y calentamiento en Banda 1 para el caso Tía Juana (100 mD).

Haciendo un análisis global de los resultados para el modelo de calentamiento Banda 1 en el caso Yacimiento-Fractura-Calentamiento se puede concluir el rango de potencias de calentamiento utilizables se encuentra por debajo de los 160 kW, pues para todas las combinaciones estudiadas la temperatura de la celda más caliente de la malla se encuentra siempre por debajo de 500 °F. Sin embargo, se establece el valor de 120 kW para realizar los posteriores estudios de este yacimiento para hacer consistencia con el modelo de calentamiento Banda 0, que fue estudiado en la sección anterior.

B.1.2 Análisis de la frecuencia óptima de radiación para el modelo de Calentamiento Banda 1 bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Para este análisis se estudió la producción acumulada de crudo en función de la frecuencia de radiación para cada uno de los apuntalantes, fijando como potencia de calentamiento el valor de 120 kW. Los resultados de estas simulaciones se presentan en la Figura N° B.7.

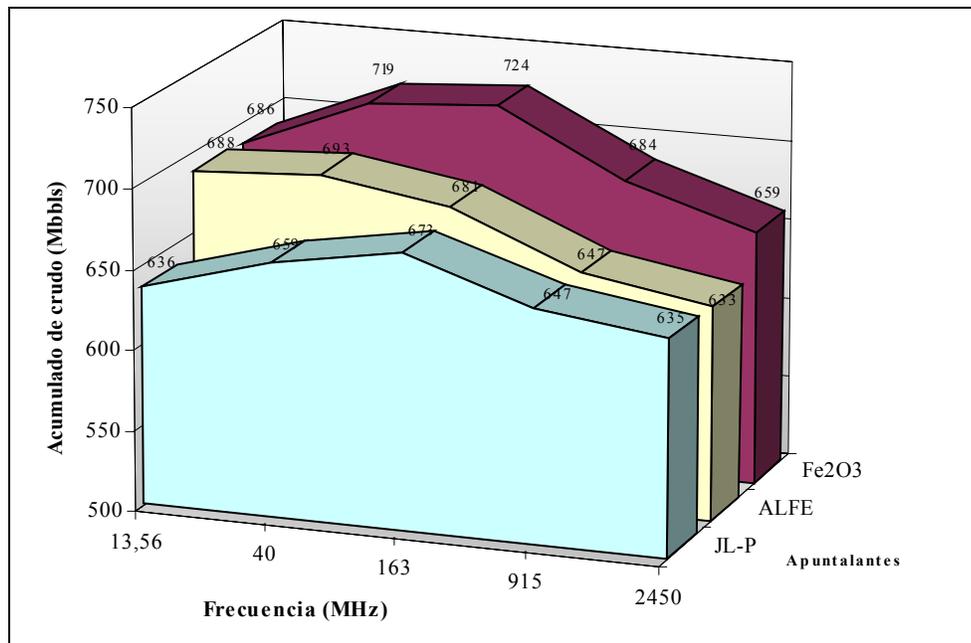


Figura N° B.7: Producción acumulada de crudo en 20 años variando la frecuencia y el material apuntalante para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con calentamiento en Banda 1 para el caso Tía Juana (100 mD).

Al comparar los resultados de las simulaciones para los diferentes apuntalantes calentados a 120 kW bajo el modelo de calentamiento Banda 1, se puede ver que el valor de frecuencia de radiación óptimo para el apuntalante ALFE está en los 40 MHz para ALFE y en 163 MHz para el JL-P. Se observa que el apuntalante Fe₂O₃ presenta una región de valores óptimos para la frecuencia que va desde 40 hasta 163 MHz, siendo este último quien presenta el mayor valor de producción acumulada. Para las simulaciones con el apuntalante Fe₂O₃ se obtienen los mayores valores de producción acumulada, por lo cual se tomará este apuntalante como parte del esquema óptimo para el modelo de calentamiento Banda 1. A continuación se hace un estudio detallado de la frecuencia óptima en esta región.

Para verificar la frecuencia óptima de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento bajo el modelo Banda 1, se evaluaron otras frecuencias consideradas como no comerciales con el apuntalante Fe₂O₃, que son tomados del estudio de Mouris y col. [27] Los valores de las frecuencias no comerciales que se tomaron para este análisis son: 54, 272, 381, 490, 599, 707, 814 MHz, pues estos se encuentran en la región de frecuencias que produce un mayor acumulado de producción para el apuntalante Fe₂O₃.

En la Figura N° B.8 se presentan los valores de la producción de crudo para las frecuencias comerciales y no comerciales en el rango comprendido entre 40 y 915 MHz, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con los datos del caso Tía Juana y calentamiento en Banda 1 para un fractura de 70 pies de largo rellena de apuntalante Fe₂O₃. En esta figura se aprecia que el valor de frecuencia correspondiente a la mayor producción de crudo es de 163 MHz, por lo que se tomará

éste valor como frecuencia óptima de los próximos análisis con el apuntalante Fe_2O_3 . Se puede ver que el valor de frecuencia óptima para el modelo Banda 1 no coincide con el valor del modelo Banda 0, lo cual ocurre debido a que se están calentando dos materiales con propiedades dieléctricas diferentes.

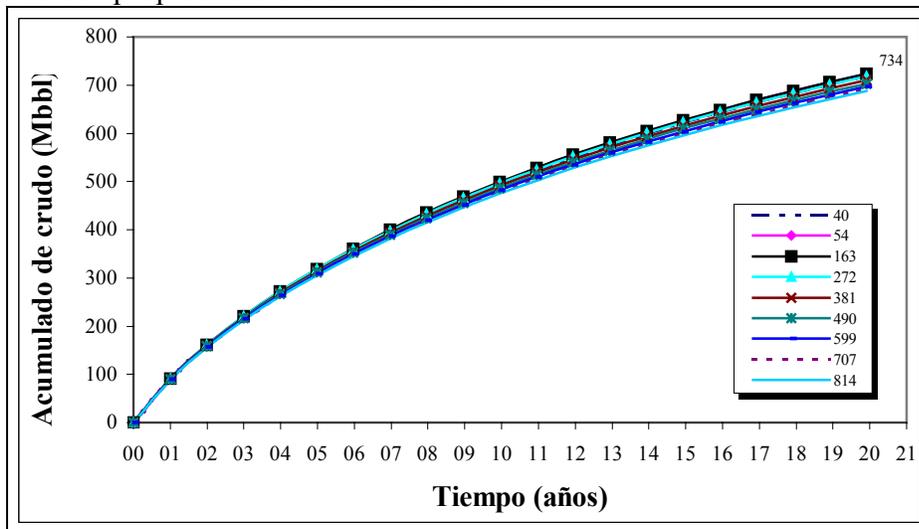


Figura N° B.8: Producción de crudo para los valores de frecuencias comerciales y no comerciales comprendidos entre 40 y 915 kW para el modelo Banda 1, calentando a 120 kw y con los datos del yacimiento Tía Juana (100 mD), para una fractura de 70 pies de largo rellena de apuntalante Fe_2O_3 .

Ya que los materiales calentados presentan valores de distancia de penetración (D_p) de magnitudes diferentes al ser radiados con la misma frecuencia, se calculó un valor de D_p promedio ponderado en función del área radiada de cada material. El resultado de estos cálculos se presentan a continuación en la Tabla N° B.1.

Tabla N° B.1: Valor del D_p de los materiales individuales y del área total calentada, al ser calentados bajo el modelo Banda 1 con una frecuencia de radiación de 163 MHz.

Material	Ancho del area calentada (pies)	% que ocupa del área total	D_p del material (m)
Arena Tía Juana	1	92.3%	11.38
Apuntalante Fe_2O_3	0.083	7.7%	27.36
Arena Tía Juana + Apuntalante	1.083	100.0%	12.60

Se puede observar que el valor de D_p de la arena total calentada es de 12,6 m. Debido a que la arena Tía Juana representa el 92,3% del área total calentada, resulta lógico observar que el D_p del área total sea un valor muy cercano al de la arena (11,38 m). Teniendo en cuenta esta última observación, se puede concluir que la frecuencia óptima para el modelo de Calentamiento Banda 1 se encuentra más relacionada a las propiedades de la arena que a las del material apuntalante. Esta observación se corrobora más adelante al estudiar los modelos de calentamiento Banda 10 y Banda 20, y muy especialmente el modelo Radial.

En la Figura N° B.9 se presenta la producción acumulada de crudo en función del tiempo para los materiales apuntalantes estudiados un calentamiento Banda 1 con

una potencia de 120 kW y las frecuencias óptimas de radiación según el material: 163 MHz para Fe_2O_3 , 40 MHz para ALFE y 163 MHz para JL-P.

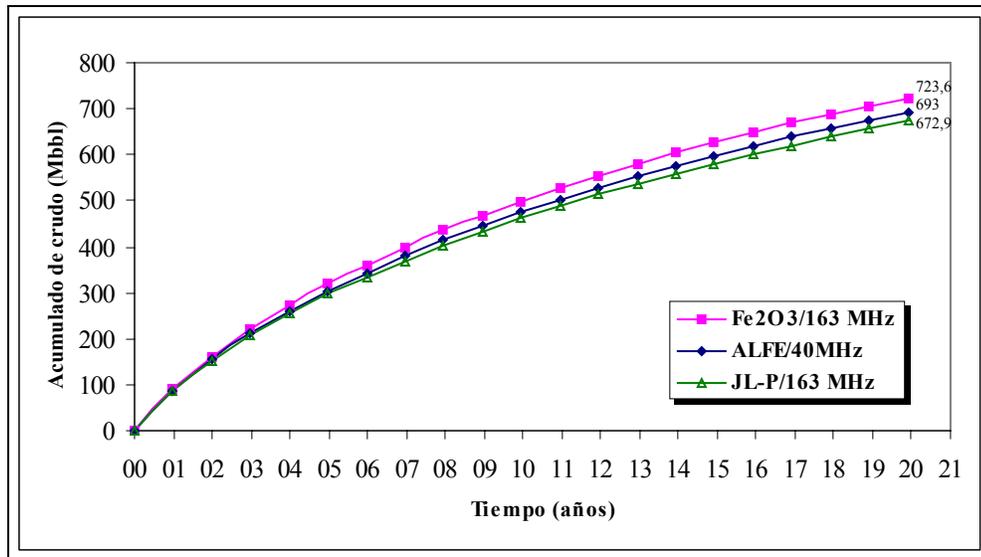


Figura N° B.9: Producción de crudo para los óptimos de frecuencia del modelo de calentamiento Banda 1, calentando a 120 kw y con los datos del yacimiento Tía Juana (100 mD), fractura de 70 pies rellena de los materiales apuntalantes estudiados.

De esta figura se puede ver claramente que el apuntalante Fe_2O_3 , con una frecuencia de 163 MHz, es el que produce una mayor cantidad de crudo, por lo tanto se considera que este escenario es el óptimo para este esquema de calentamiento. Se tomó este esquema como base para los análisis de variación en la tasa de producción.

B.1.3 Análisis de la Geometría de la Fractura para el caso de calentamiento *Banda 1*, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Tía Juana.

A continuación, en la Figura N° B.10, se presenta la producción acumulada de crudo en función del tiempo al variar el largo y la altura de la fractura bajo las especificaciones del esquema óptimo del modelo Banda 1. Se evaluaron fracturas de 40, 70 y 200 pies de largo y de altura constante y variable, tal y como se especificó en la sección de Metodología.

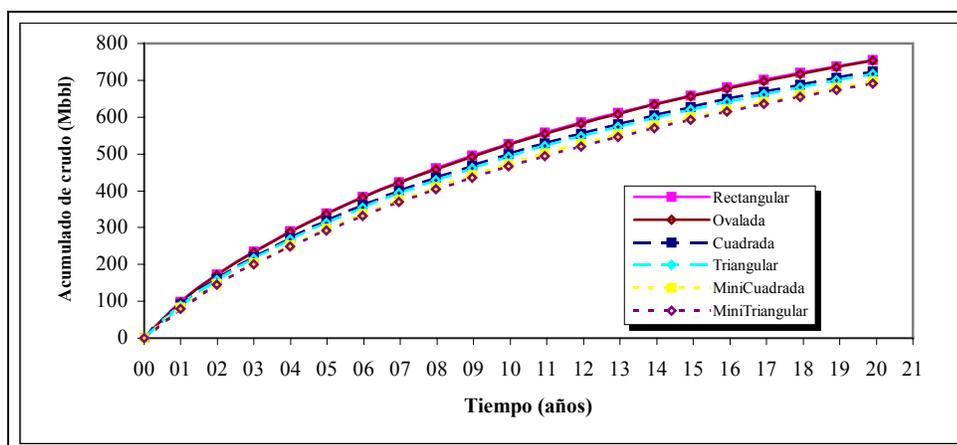


Figura N° B.10: Variación de la geometría de la fractura para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento bajo calentamiento en Banda 1. Caso óptimo del yacimiento Tía Juana (100 mD): Fe₂O₃ calentando a 120 kW y 163 MHz.

Se observa que a medida que aumenta el largo de la fractura, también aumenta la producción, y disminuye la diferencia entre fracturas de igual largo y diferente altura, por lo que se presenta un tendencia similar a la del modelo de calentamiento Banda 0.

Para cuantificar el incremento de la producción de crudo debido a la altura de la fractura se calculó su porcentaje de incremento con respecto al caso Yacimiento-Fractura para cada largo estudiado (40, 70 y 200 pies). Luego se calculó la diferencia entre los valores de altura constante y los de altura variable. Los resultados se presentan en la Tabla N° B.2.

Tabla N° B.2: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes alturas del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para Banda 1.

% Incremento: Esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento vs. Esquema Yacimiento-Fractura			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-var - h-cte)
40 pies	21.88%	22.69%	0.82%
70 pies	19.18%	19.53%	0.36%
200 pies	19.15%	19.16%	0.01%

Al igual que para el modelo Banda 0, se observa que el porcentaje de incremento es ligeramente mayor en las fracturas de altura variable; también se ve una disminución en el porcentaje de incremento con el aumento de la longitud de la fractura para todas las geometrías. La diferencia entre los porcentajes de incremento de las fracturas de altura constante menos altura variable indican que el diseño de la altura de la fractura no es significativa, puesto que dichos valores se encuentran por debajo del 1% en todas las longitudes. Al igual que en el modelo Banda 0, para el modelo de calentamiento Banda 1 se obtiene la mayor diferencia en la diferencia de

porcentaje de incremento para el caso de fracturas de 40 pies de largo, por lo que en los casos de longitudes menores, es importante evaluar la altura de la fractura para verificar su impacto.

A fin de verificar el impacto de la longitud de la fractura en la frecuencia de radiación se analizó la producción acumulada de crudo para longitudes de fractura diferentes a 70 pies al variar la frecuencia de radiación. Los resultados para fracturas de 40 y 200 pies de largo se presentan a continuación en la Figura N° B.11.a-b.

Se puede ver que, al igual que en el caso Banda 0, el valor de la frecuencia óptima de radiación se mantiene constante en el caso del apuntalante Fe_2O_3 , y coincide con el valor de 163 MHz, que es el valor óptimo que se reportó para las frecuencias comerciales.

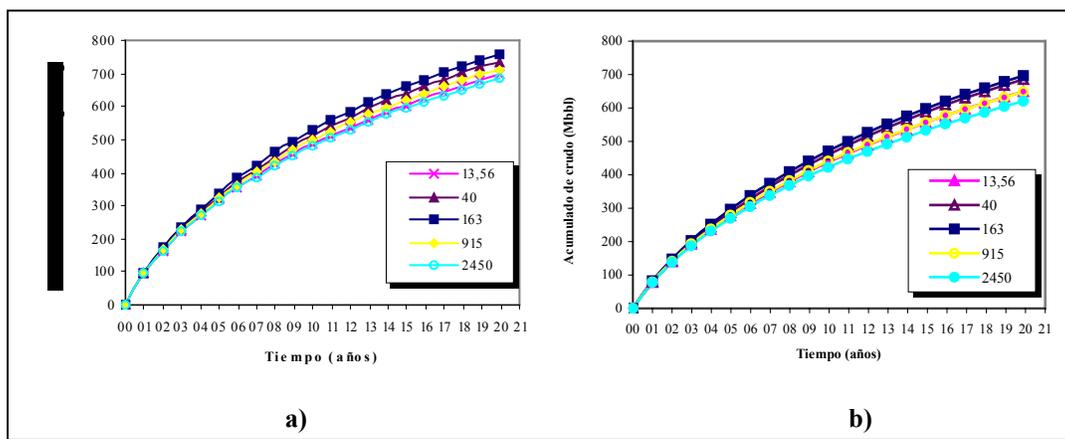


Figura N° B.11: Variación en el largo de la fractura para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento. Caso Tía Juana (100 mD), calentando a 120 kW bajo el modelo Banda 1, apuntalante Fe_2O_3 . Largos de: a) 40 pies y b) 200 pies

Este análisis se repitió para los apuntalantes ALFE y JL-P y los resultados de la frecuencia óptima en función de los diferentes materiales y longitudes de fractura estudiados bajo el modelo de calentamiento Banda 1 se presentan en la Tabla N° B.3.

Tabla N° B.3: Valores de la frecuencia óptima para cada longitud de fractura y material apuntalante, para el caso Tía Juana bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento y el modelo Banda 1.

Largo de la fractura (pies) / forma	Frecuencia óptima (MHz) para el apuntalante:		
	Fe_2O_3	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	163	40	163
70 / Cuadrada	163	40	163
200 / Rectangular	163	13,56	163

Analizando la tabla anterior se puede observar que la frecuencia óptima de calentamiento se mantiene con el largo en los apuntalantes Fe_2O_3 y JL-P. Sin embargo, para el apuntalante ALFE se observa que la frecuencia óptima para un largo de fractura de 200 pies varía de 40 a 13,56 MHz

B.2 ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE CALENTAMIENTO EN BANDAS DE 10 Y 20 PIES DE ANCHO (BANDA 10 Y BANDA 20) Y RADIAL, BAJO EL ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO PARA EL CASO TÍA JUANA.

En esta sección se presentan de manera sintetizada los resultados de las sensibilidades hechas a los modelos de calentamiento en bandas de 10 y de 20 pies de ancho, que en este estudio son llamados Banda 10 y Banda 20 y del modelo de calentamiento Radial. Los resultados de estos tres modelos son muy similares, por lo cual se presentan en conjunto. Los modelos de calentamiento Banda 10 y Banda 20 se consideran análogos al caso Banda 1 (que fue detallado anteriormente), con la diferencia en el tamaño del área calentada, pero siempre tomando en cuenta que se calienta arena y apuntalante. El modelo de calentamiento radial se considera análogo al caso de utilizar una malla radial en vez de una malla cartesiana, lo cual se estudia en los trabajos de Ovalles y col.^[5] y Fonseca^[6]. Por estas razones, solamente se presentarán los resultados finales de los análisis realizados a estos modelos de calentamiento.

Se realizaron simulaciones conceptuales variando los valores de la potencia y la frecuencia de radiación para cada uno de los tres apuntalantes estudiados, igual que en los modelos Banda 0 y Banda 1. De esta manera se obtienen los valores óptimos de frecuencia de radiación y se escoge una potencia de calentamiento y un material apuntalante apropiados para los análisis posteriores. También se realizaron sensibilidades en el largo y en la altura de la fractura, para verificar los valores de los óptimos de la frecuencia de calentamiento en función de dicho parámetro en función de la longitud, así como el impacto de la altura en el diseño de una fractura.

B.2.1 Análisis de la potencia óptima de calentamiento para los modelos Banda 10, Banda 20 y Radial, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Para obtener el rango óptimo de potencias se analizó la variación en la producción acumulada de crudo en un tiempo de 20 años y la variación en la temperatura de la celda (24,23,2) que, como se mencionó anteriormente, corresponde a la temperatura más alta del modelo de simulación. Se tomó como criterio para la selección del rango de potencia aplicable que ésta temperatura no debe exceder los 500 °F.

De los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo con una fractura rellena con los apuntalantes estudiados: Fe₂O₃, ALFE y JL-P, usando los datos del yacimiento Tía Juana, y calentado bajo los modelos Banda 10, Banda 20 y Radial, se pueden extraer los siguientes análisis:

- Para los tres apuntalantes y modelos de calentamiento estudiados se observó que al aumentar la potencia de calentamiento, tanto la producción de crudo como la temperatura de la celda (24,23,2) aumenta.
- Se observó que, al variar la potencia desde 40 hasta 200 kW, todos los apuntalantes presentaron un máximo de temperatura al calentar con una

frecuencia de 2450 MHz. Para el modelo Banda 10 se obtiene una temperatura superior a los 500 °F al calentar con 200 kW y 2450 MHz con el apuntalante JL-P, por lo que se establece un rango de potencias de trabajo que va desde 40 hasta 160 kW. En los modelos Banda 20 y Radial no se observan temperaturas superiores a los 500 °F en ninguno de los casos. Sin embargo, para guardar la consistencia con los modelos de calentamiento analizados anteriormente, se escogió una potencia de calentamiento de 120 kW para realizar los análisis posteriores.

B.2.2 Análisis de la frecuencia óptima de radiación para los modelos Banda 10, Banda 20 y Radial, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Para la determinación de la frecuencia óptima de radiación los tres modelos de calentamiento se analizó la variación en la producción acumulada de crudo en 20 años. A continuación, en las Figuras N° B.12-14 se presentan los resultados para los apuntalantes Fe₂O₃, ALFE y JL-P calentando a una potencia de 120 kW y variando la frecuencia de radiación entre los valores comerciales conocidos: 13,56, 40, 163, 915 y 2450 MHz para los modelos de calentamiento Banda 10, Banda 20 y Radial, respectivamente.

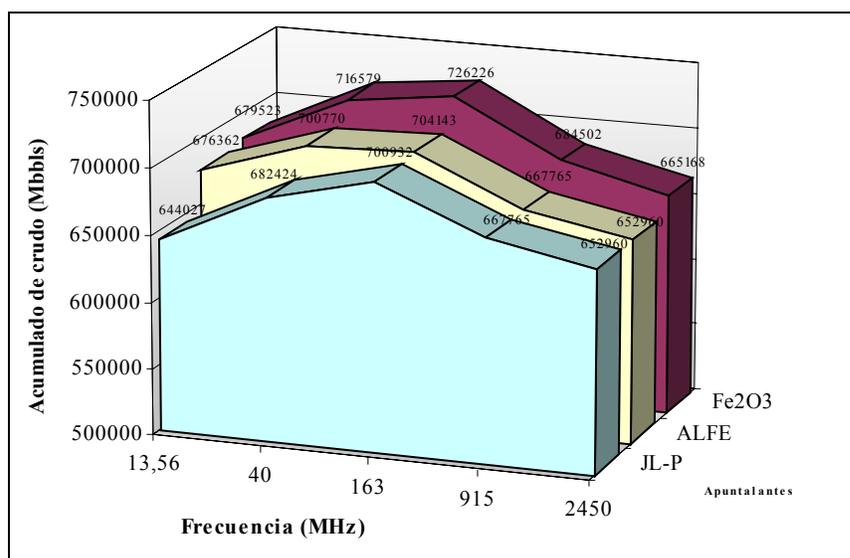


Figura N° B.12: Producción acumulada de crudo en 20 años variando la frecuencia y el material apuntalante para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con calentamiento en Banda 10 para el caso Tía Juana (100 mD).

Para los modelos Banda 10 y Banda 20 los mayores valores de acumulado de crudo se presentan en la frecuencia de 163 MHz para los tres apuntalantes estudiados, siendo el apuntalante Fe₂O₃ quien presenta los mayores valores de producción acumulada en todas las frecuencias estudiadas. Por lo tanto se tomó este apuntalante como parte del esquema óptimo en ambos modelos de calentamiento.

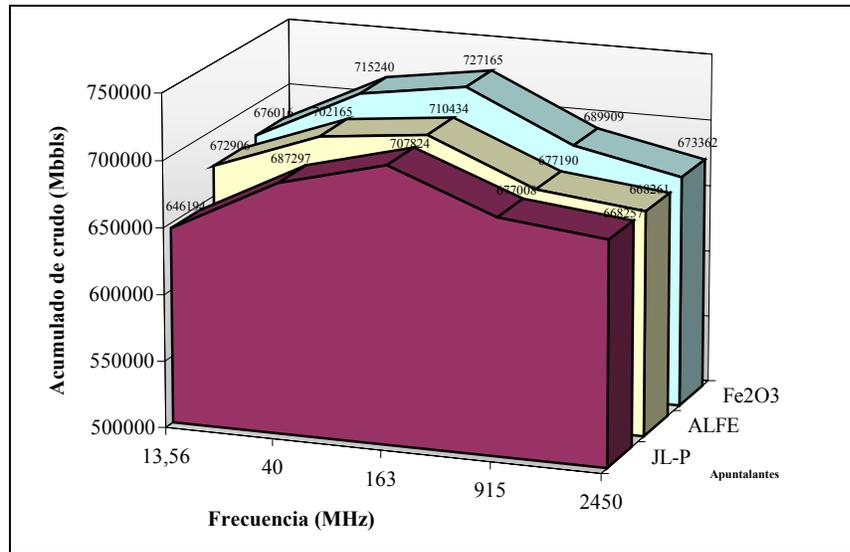


Figura N° B.13: Producción acumulada de crudo en 20 años variando la frecuencia y el material apuntalante para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con calentamiento en Banda 20 para el caso Tía Juana (100 mD).

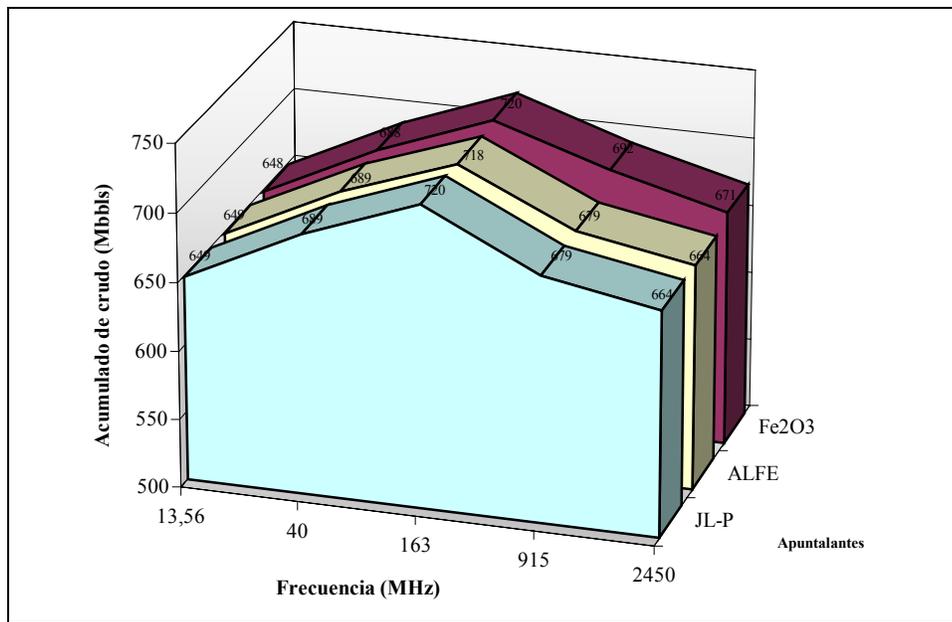


Figura N° B.14: Producción acumulada de crudo en 20 años variando la frecuencia y el material apuntalante para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con calentamiento Radial para el caso Tía Juana (100 mD).

Para el modelo de calentamiento Radial se observan los mayores valores de acumulado de crudo en la frecuencia de 163 MHz para los tres apuntalantes estudiados, observando que los apuntalantes Fe₂O₃ y JL-P tienen los mayores valores de producción acumulada, siendo el JL-P quien tiene el mayor valor por muy poca

diferencia. Por lo tanto se tomará este apuntalante como parte del esquema óptimo para el modelo de calentamiento Radial.

Se realizó un estudio detallado de la frecuencia óptima de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, para lo cual se evaluaron otras frecuencias no comerciales con los apuntalantes Fe_2O_3 para los modelos Banda 10 y Banda 20 y con JL-P para el modelo de calentamiento Radial. Los valores de las frecuencias no comerciales que se tomaron para este análisis son: 54, 272, 381, 490, 599, 707, 814 MHz. De igual manera se evaluaron frecuencias no comerciales para los otros apuntalantes de los modelos de calentamiento. Sin embargo, con excepción del apuntalante ALFE que presentó la mayor producción en 54 MHz para el modelo Banda 10, la frecuencia óptima se mantuvo constante en el valor de 163 MHz.

Ya que los materiales calentados presentan valores de distancia de penetración (Dp) de magnitudes diferentes al ser radiados a la misma frecuencia, se calculó un valor de Dp como un promedio ponderado en función del área radiada de cada material. El resultado de estos cálculos se presentan a continuación en la Tabla N° B.4 para los tres modelos de calentamiento estudiados.

Tabla N° B.4: Valor del Dp de los materiales individuales y del área total calentada para el yacimiento Tía Juana, al ser calentados bajo los óptimos de los modelos Banda 10, Banda 20 y Radial.

Modelo de Calentamiento Banda 10			
Material	Ancho del área calentada (pies)	% que ocupa del área total	Dp del material (m)
Arena Tía Juana	10.00	99.2%	11.38
Apuntalante Fe2O3	0.083	0.8%	27.36
Arena Tía Juana + Apuntalante	10.083	100.0%	11.51
Modelo de Calentamiento Banda 20			
Material	Ancho del área calentada (pies)	% que ocupa del área total	Dp del material (m)
Arena Tía Juana	20.00	99.6%	11.38
Apuntalante Fe2O3	0.083	0.4%	27.36
Arena Tía Juana + Apuntalante	20.083	100.0%	11.45
Modelo de Calentamiento Radial			
Material	Ancho del área calentada (pies)	% que ocupa del área total	Dp del material (m)
Arena Tía Juana	990.00	100.0%	11.38
Apuntalante JL-P	0.083	0.0%	0.0002
Arena Tía Juana + Apuntalante	990.083	100.0%	11.38

Se puede observar que el valor de Dp de la arena calentada se aproxima al valor de la Arena Tía Juana a medida que la zona radiada es mayor. Esto se debe a que el área calentada está compuesta por mas arena que apuntalante, por lo que predomina el valor de Dp de la primera. El caso límite viene representado por el modelo Radial, en el cual el valor de Dp es igual al de la arena, con lo cual se puede

tomar como despreciable la presencia del apuntalante para el calentamiento del yacimiento.

A continuación se analizó de la producción acumulada de crudo en función del tiempo para los apuntalantes estudiados, calentados con una potencia de 120 kW y con la frecuencia óptima de radiación según el material. Los resultados para los modelos de calentamiento Banda 10, Banda 20 y Radial se presentan en las figuras N° B.15-17

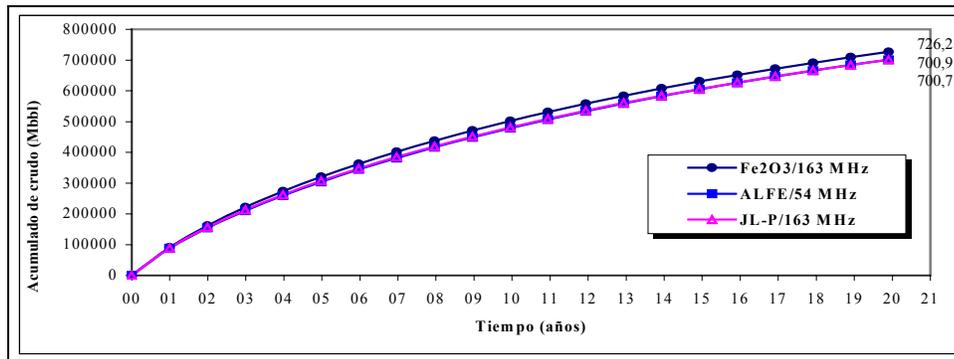


Figura N° B.15: Producción de crudo para los óptimos de frecuencia del modelo de calentamiento Banda 10, calentando a 120 kw y con los datos del yacimiento Tía Juana (100 mD), para una fractura de 70 pies rellena de los materiales apuntalantes estudiados.

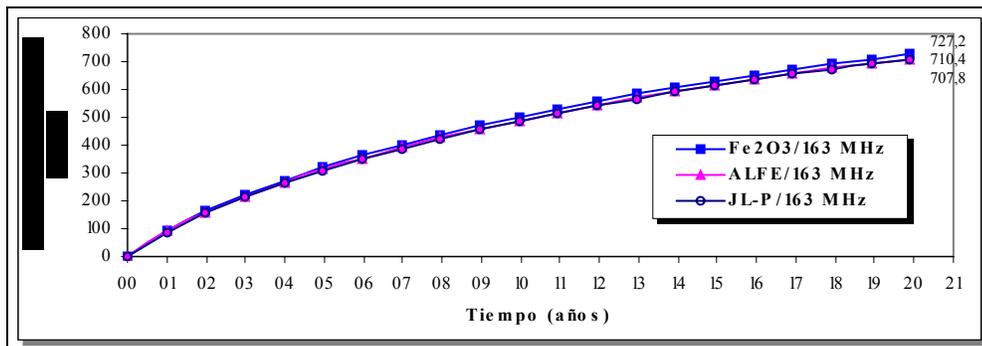


Figura N° B.16: Producción de crudo para los óptimos de frecuencia del modelo de calentamiento Banda 20, calentando a 120 kw y con los datos del yacimiento Tía Juana (100 mD), para una fractura de 70 pies rellena de los materiales apuntalantes estudiados.

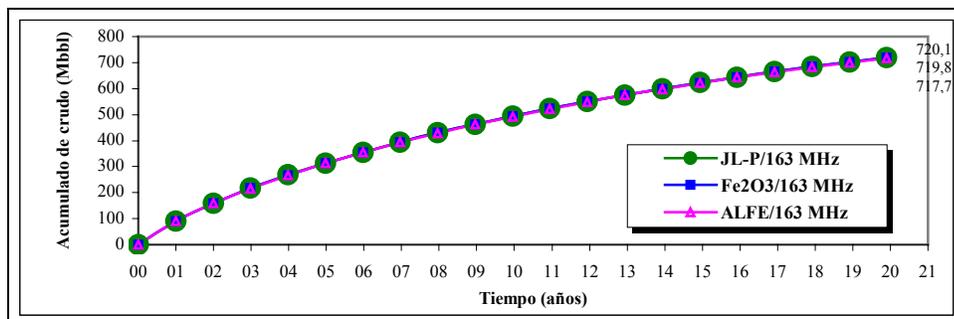


Figura N° B.17: Producción de crudo para los óptimos de frecuencia del modelo de calentamiento Radial, calentando a 120 kw y con los datos del yacimiento Tía Juana (100 mD), para una fractura de 70 pies rellena de los materiales apuntalantes estudiados.

De estas figuras se puede concluir que el apuntalante Fe_2O_3 , con una frecuencia de 163 MHz, es el que produce una mayor cantidad de crudo para los modelos Banda 10 y Banda 20, por lo tanto se considera este escenario como base para los análisis de variación en la tasa de producción. Para el modelo de calentamiento Radial, el apuntalante JL-P es quien aporta el mayor valor, por lo tanto se tomó este apuntalante como base del esquema óptimo para los siguientes análisis del modelo Radial.

B.2.3 Análisis de la Geometría de la Fractura para los modelos Banda 10, Banda 20 y Radial, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Se realizaron sensibilidades en la forma y la longitud de la fractura para los apuntalantes Fe_2O_3 y JL-P al calentar a 120 kW y 163 MHz bajo los modelos de calentamiento Banda 10, Banda 20 y Radial. Se evaluaron fracturas de 40, 70 y 200 pies de largo y de altura constante y variable, tal y como se especificó en la sección de Metodología. Los resultados indicaron que se presenta la misma tendencia que para los modelos de calentamiento Banda 0 y Banda 1: a medida que aumenta el largo de la fractura, también aumenta la producción, y disminuye la diferencia entre fracturas de igual largo y diferente altura.

Se calculó el porcentaje de incremento con respecto al caso Yacimiento-Fractura para cada largo de fractura estudiado (40, 70 y 200 pies). Luego se calculó la diferencia entre los valores de altura constante y los de altura variable. Los resultados para los tres modelos de calentamiento estudiados se presentan en la Tabla N° B.5

Tabla N° B.5: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes alturas para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para calentamiento en Banda 10, Banda 20 y Radial.

% Incremento: Esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento vs. Esquema Yacimiento-Fractura			
Modelo de calentamiento Banda 10			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-var - h-cte)
40 pies	21.64%	21.71%	0.07%
70 pies	19.40%	19.84%	0.44%
200 pies	19.26%	19.28%	0.02%
Modelo de calentamiento Banda 20			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-var - h-cte)
40 pies	21.93%	22.00%	0.07%
70 pies	19.52%	19.71%	0.19%
200 pies	19.36%	19.38%	0.02%
Modelo de calentamiento Radial			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-var - h-cte)
40 pies	21.13%	22.01%	0.87%
70 pies	18.34%	18.88%	0.54%
200 pies	17.39%	17.41%	0.02%

Al igual que para los modelos estudiados anteriormente, se observa que el porcentaje de incremento es ligeramente mayor en las fracturas de altura variable. También se ve una disminución en el porcentaje de incremento con el aumento de la longitud de la fractura para todas las geometrías. La diferencia entre los porcentajes de incremento de las fracturas de altura constante menos altura variable indican que el diseño de la altura de la fractura no es significativo, puesto que dichos valores se encuentran por debajo del 1% en todas las longitudes evaluadas y en todos los modelos de calentamiento. La mayor diferencia en el porcentaje de incremento se obtiene para los casos de fracturas de 40 pies de largo, por lo es importante evaluar el impacto de la altura para el diseño de fracturas con longitudes menores a este valor.

Se analizaron diferentes longitudes de fractura variando la frecuencia de radiación entre los valores comerciales, al calentar a 120 kW bajo los modelos de calentamiento Banda 10, Banda 20 y Radial. Los resultados de la frecuencia óptima en función de los diferentes materiales y longitudes de fractura estudiados se presentan a continuación en la Tabla N° B.6.

Se puede observar que la frecuencia óptima de calentamiento se mantiene con el largo en los apuntalantes Fe_2O_3 y JL-P. Sin embargo, para el apuntalante ALFE se observa que la frecuencia óptima varía para las fracturas de 70 y de 200 pies de largo, pues para ambos largos dicha frecuencia presenta un valor de 54 MHz en el modelo Banda 10, el cual aumenta a 163 MHz cuando se evalúan los modelos Banda 20 y Radial.

Tabla N° B.6: Frecuencia óptima para cada longitud de fractura y apuntalante, para el caso Tía Juana bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento y los modelos Banda 10, Banda 20 y Radial

Largo de la fractura (pies) / forma	Modelo de Calentamiento Banda 10		
	Fe_2O_3	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	163	163	163
70 / Cuadrada	163	54	163
200 / Rectangular	163	54	163
Largo de la fractura (pies) / forma	Modelo de Calentamiento Banda 20		
	Fe_2O_3	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	163	163	163
70 / Cuadrada	163	163	163
200 / Rectangular	163	54	163
Largo de la fractura (pies) / forma	Modelo de Calentamiento Radial		
	Fe_2O_3	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	163	163	163
70 / Cuadrada	163	163	163
200 / Rectangular	163	163	163

APÉNDICE C
ANÁLISIS DETALLADO DE LOS MODELOS DE CALENTAMIENTO
BANDA 0, BANDA 1, BANDA 10, BANDA 20 Y RADIAL, BAJO EL
ESQUEMA YACIMIENTO-FRACTURA-CALENTAMIENTO, PARA EL
CASO CERRO NEGRO

Seguidamente se presentan detalladamente los resultados de las simulaciones numéricas conceptuales de un pozo vertical que ha sido modelado con parámetros del yacimiento Cerro Negro. En dicho modelo, el pozo ha sido fracturado hidráulicamente y es calentado con energía electromagnética. Esta última técnica es evaluada como una herramienta para la recuperación mejorada de petróleo, y se aplica mediante diferentes esquemas que son analizados a continuación.

C.1 Simulación conceptual de un pozo bajo el esquema Yacimiento-Fractura sin calentamiento para el caso Cerro Negro.

Se analizó el esquema Yacimiento-Fractura sin la aplicación del calentamiento electromagnético, siguiendo el mismo procedimiento que se utilizó para el análisis del yacimiento Tía Juana. Esto permitió asegurar la convergencia del modelo de simulación y determinar el impacto de los parámetros más importantes de la técnica de fracturamiento hidráulico en la producción del pozo.

Para evaluar el impacto del largo y la altura de la fractura en el esquema Yacimiento-Fractura sin calentamiento se realizaron sensibilidades en el largo de la fractura, considerando valores de 40, 70 y 200 pies, y tomando la altura como constante y variable con la longitud de la misma. Estas características corresponden a simplificaciones de una fractura del tipo Radial, tal y como se explicó en la sección de Metodología. Los resultados se presentan a continuación en las Figuras N° C.1

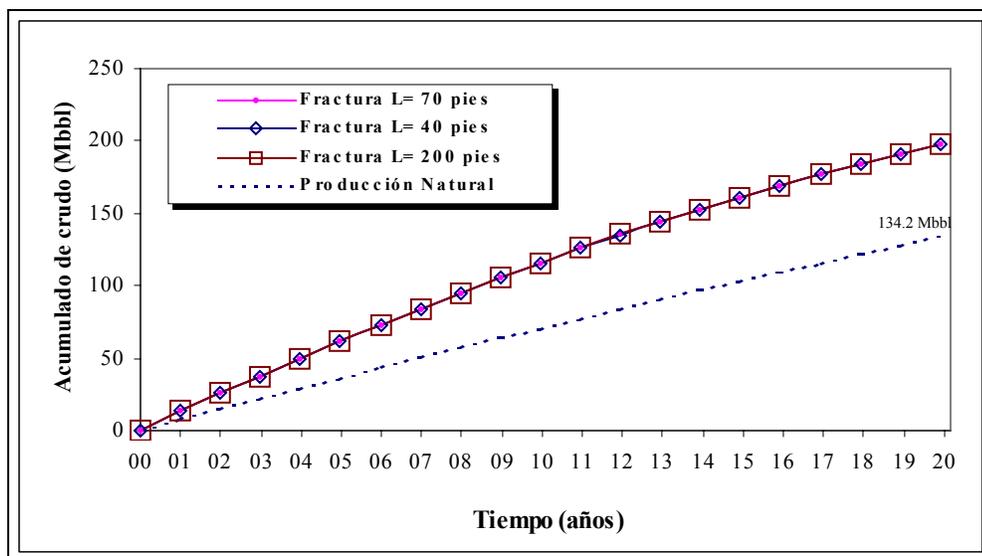


Figura N° C.1: Variación del largo de la fractura (L) en el esquema Yacimiento-Fractura para el caso Cerro Negro (permeabilidad de 12000 mD).

Al igual que ocurrió con el yacimiento Tía Juana, no se aprecian diferencias marcadas en la producción de crudo por efecto de la variación en el largo la fractura. Sin embargo, al comparar con el caso base de producción natural, se observa un aumento considerable de la producción al introducir la fractura. Por lo tanto se consideró hacer sensibilidades en la permeabilidad del yacimiento hasta observar cambios en la producción de crudo por efecto de la variación en el largo de la fractura.

Tomando en cuenta que la permeabilidad real del yacimiento (12000 mD) se realizaron sensibilidades en el rango de 12000 a 10 mD. Para ilustrar la tendencia de la producción en función de la permeabilidad, se analiza la producción acumulada de crudo para los largos de fractura estudiados, con permeabilidades de yacimiento de 1000 y 100 mD. Para poder comparar con el caso base de producción natural (seccion IV.2.1), se realizaron nuevamente simulaciones de éste último para los valores de permeabilidad estudiados. Los resultados se presentan en las Figuras N° C.2-3.

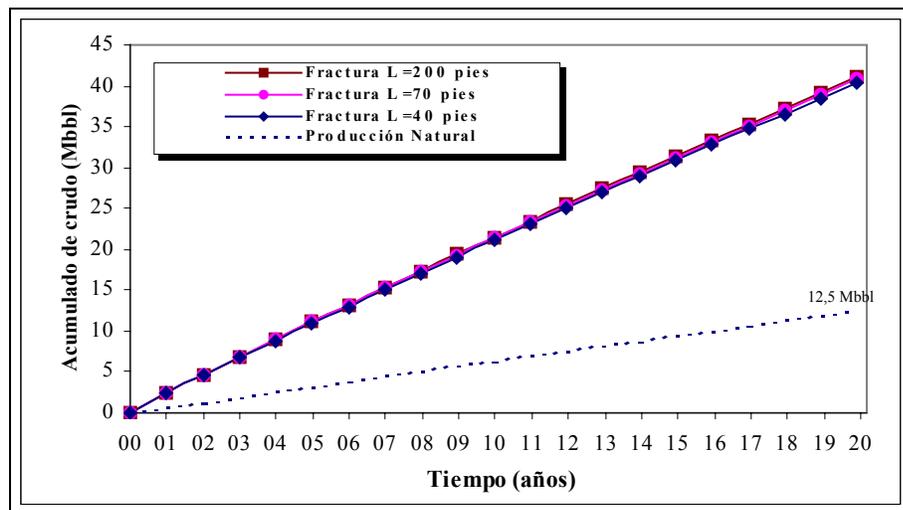


Figura N° C.2: Producción acumulada de crudo variando del largo de la fractura, en el esquema Yacimiento-Fractura para el caso Cerro Negro (1000 mD).

Se observa una disminución en la producción acumulada de crudo como función del largo de la fractura a medida que la permeabilidad del yacimiento disminuye, que también es apreciable en los casos “base”. Con una permeabilidad de la arena de 100 mD se observa claramente una mayor producción a medida que se aumenta la longitud de fractura.

Para cuantificar el incremento de la producción de crudo debido al largo de la fractura se calculó el porcentaje de incremento para fracturas de diferentes largos (200 vs. 70 vs. 40 pies), con respecto al caso base, para cada permeabilidad de yacimiento. También se calculó la diferencia de los porcentajes entre fracturas de diferentes largos. Los resultados se presentan en la Tabla N° C.1.

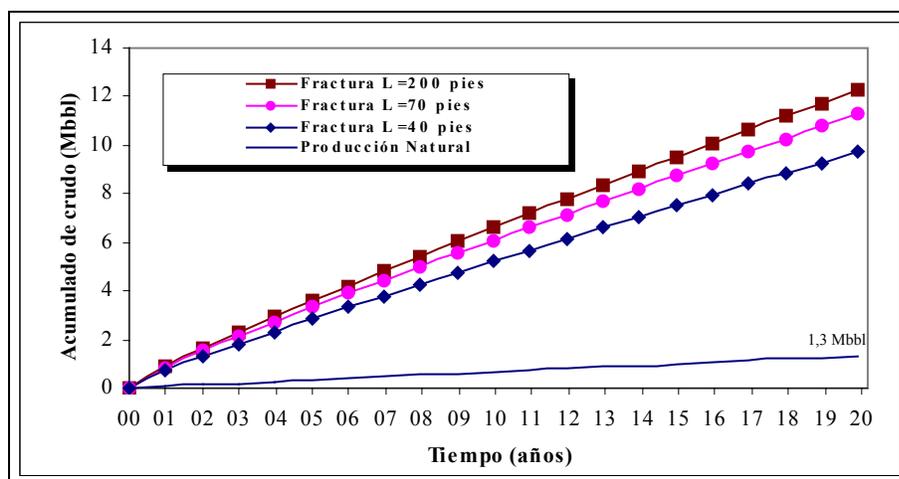


Figura N° C.3: Producción acumulada de crudo variando del largo de la fractura, en el esquema Yacimiento-Fractura para el caso Cerro Negro (100 mD).

Tabla N° C.1: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes longitudes y con respecto al caso de producción natural, para diferentes permeabilidades del yacimiento Cerro Negro.

Longitud de la fractura (L)	% Incremento: Esquema Yacimiento-Fractura vs. Producción Natural		
	Permeabilidad = 12000 mD	Permeabilidad = 1000 mD	Permeabilidad = 100 mD
40 pies	47,26%	222,24%	631,53%
70 pies	47,31%	226,40%	748,96%
200 pies	47,33%	227,83%	826,20%
Diferencia de % Incremento			
70 pies - 40 pies	0,05%	4,16%	117,43%
200 pies - 40 pies	0,07%	5,59%	194,67%
200 pies - 70 pies	0,02%	1,42%	77,24%

En todos los casos se observa un aumento en el porcentaje de incremento a medida que la permeabilidad del yacimiento disminuye. También se ve cómo dicho valor aumenta con el incremento en el largo de la fractura. Al igual que se observó para el yacimiento Tía Juana, la menor diferencia de porcentaje de incremento se encuentra para el valor correspondiente a 200-70 pies de largo, lo cual evidencia que, para fracturas muy largas, el impacto de la técnica de fracturamiento deja de ser notable.

Para una permeabilidad de la arena de 100 mD se observan los mayores valores de incremento por concepto de la fractura, por lo que se escogió disminuir la permeabilidad del yacimiento hasta dicho valor para el estudio de los esquemas Yacimiento-Fractura y Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

A continuación se presentan los resultados de la variación en la altura de la fractura en el esquema Yacimiento-Fractura. Al igual que en el yacimiento Tía Juana, se considera que la fractura crece verticalmente en la zona de interés hasta llegar a una barrera o tope^[22], que se encuentra por encima y por debajo de la misma, con lo

que la fractura tendrá una altura inicial total de 140 pies. Se estudiaron 2 casos de altura para cada uno de los largos de fractura (40, 70 y 200 pies): altura constante y altura variable. Por consiguiente, se tienen 6 tipos de geometrías en total, como se explica en la sección de Metodología. Lo que se desea analizar es el impacto de la diferencia entre éstas geometrías en la producción de crudo, para lo cual se realizaron simulaciones del esquema Yacimiento-Fractura haciendo sensibilidades en la altura de la fractura para los diferentes largos estudiados. Los resultados se presentan en la Figura N° C.4.

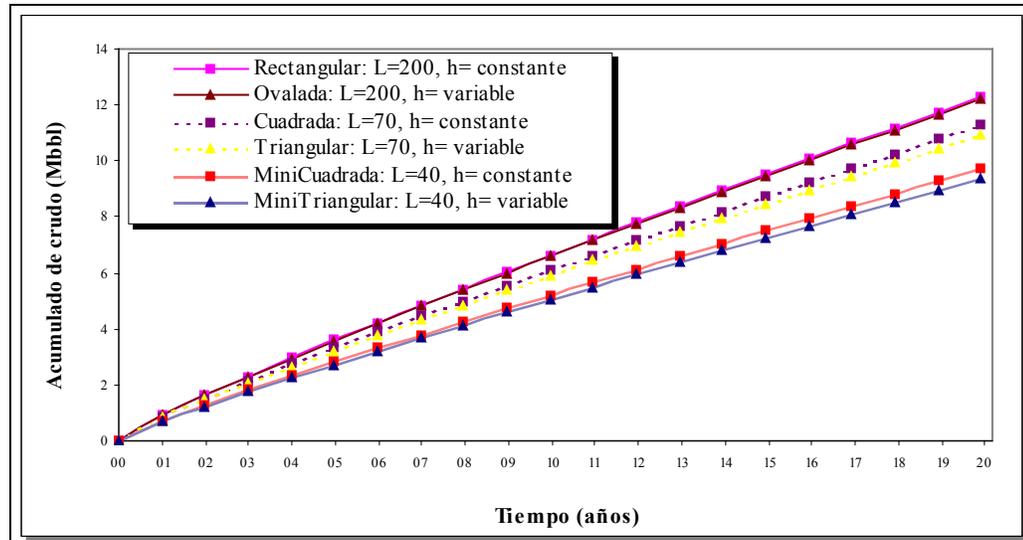


Figura N° C.4: Variación de la geometría de la fractura en el esquema Yacimiento-Fractura para el caso Cerro Negro con permeabilidad de 100 mD.

A medida que la fractura es más corta, se nota más la diferencia de la producción acumulada de crudo entre fracturas con altura constante y variable. Para todos los largos evaluados, las fracturas con altura constante presentan una mayor producción acumulada de crudo en comparación con las fracturas de altura variable, observándose la mayor diferencia en las fracturas de 40 pies de largo.

Para cuantificar éste incremento de la producción de crudo se calculó el porcentaje de incremento de las fracturas de altura constante y variable para los largos estudiados (200 vs. 70 vs. 40 pies), con respecto al caso base de producción natural. Luego se calculó la diferencia entre los valores de altura constante y los de altura variable. Los resultados se presentan en la Tabla N° C.2.

Al igual que en el análisis del largo, para las fracturas con altura variable, el porcentaje de incremento aumenta con el incremento en el largo de la fractura. Se observó que la diferencia en el acumulado de crudo de las fracturas de diferentes alturas disminuye a medida que aumenta el largo de la fractura, en donde el caso de fracturas de 40 pies de largo presenta el mayor valor, lo cual indica que en los casos en que la longitud de la fractura esté por debajo de este valor, valdría la pena considerar la altura de la fractura como un parámetro de importancia.

Tabla N° C.2: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes alturas para el esquema Yacimiento-Fractura, para el caso Cerro Negro

% Incremento: Esquema Yacimiento-Fractura vs. Producción Natural			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-var - h-cte)
40 pies	608.13%	631.53%	23.40%
70 pies	725.77%	748.96%	23.19%
200 pies	820.18%	826.20%	6.02%

Los resultados obtenidos se tiene que la geometría de la fractura esta dada por argumentos similares a los del caso Tía Juana: 1) al no observarse efecto en la producción acumulada por la variación de la fractura, se escogió modelar la fractura con una altura constante de 140 pies; 2) Por las consideraciones del modelo, se supone que la fractura crece en forma radial, por lo que se escoge una longitud de fractura de 70 pies. Finalmente, se escogió utilizar para este estudio una fractura de geometría radial, con una longitud de 70 pies y una altura constante de 140 pies. Esta geometría se corresponde con una fractura “Cuadrada”, en la cual el porcentaje de incremento en la producción con respecto al caso base es de 749%. El diseño de este tipo de fractura requiere una simplificación del modelo Radial ^[26] que fue explicado con detalle en el capítulo de Metodología.

C.2 Simulación conceptual de un pozo bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

En esta sección se presentan los resultados de la simulación conceptual de un pozo fracturado y calentado con energía electromagnética (RF o MW). Para ello se utilizaron los datos del yacimiento Cerro Negro así como las propiedades de los fluidos allí presentes.

Para el estudio de este yacimiento se van a utilizar los mismos modelos de calentamiento para la aplicación de energía electromagnética que fueron propuestos para el yacimiento Tía Juana y que son explicados con detalle en la sección de Metodología. De igual forma, se estudió el aporte de los materiales apuntalantes seleccionados anteriormente para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, con las características del yacimiento Cerro Negro: Fe₂O₃, ALFE y JL-P.

Se analizaron los rangos de potencia aplicables con la finalidad de seleccionar una potencia inicial de calentamiento apropiada. Se determinó la frecuencia óptima de radiación para cada uno de los apuntalantes seleccionados y para cada uno de los modelos de calentamiento propuestos. Luego se realiza la comparación entre los casos óptimos estudiados para establecer un escenario óptimo para cada modelo de calentamiento.

Posteriormente se analizó el efecto de la geometría de la fractura para verificar que se obtiene un comportamiento similar al del caso Yacimiento-Fractura. Con la finalidad de evaluar el impacto de la longitud de la fractura en la frecuencia de

radiación, se determinó la frecuencia óptima para cada uno de los largos de fractura estudiados y para modelos de calentamiento.

Por último, se analizó el efecto de la tasa de producción diaria en la producción acumulada de crudo, para los casos óptimos de cada modelo de calentamiento. Para el modelo Banda 0 se analizó también el impacto de la conductividad térmica del apuntalante en la temperatura del yacimiento y en la producción acumulada de crudo.

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales para la evaluación del esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento utilizando los datos del yacimiento Cerro Negro con una permeabilidad de 100 mD. Los resultados para la permeabilidad real del yacimiento fueron evaluados bajo condiciones especiales, por lo que son presentados en el Apéndice A.

C.2.1 Análisis del modelo de calentamiento focalizado en la fractura (Banda 0) bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Cerro Negro.

En esta sección se realizó la evaluación del modelo de calentamiento focalizado en la fractura, Banda 0. Para ello se realizaron simulaciones conceptuales variando los valores de la potencia y la frecuencia de radiación para cada uno de los tres apuntalantes estudiados. De esta manera se obtienen los rangos óptimos de la frecuencia de radiación para cada material apuntalante, en el rango de potencias estudiado.

La temperatura más alta del yacimiento se encuentra dentro de la fractura en la celda que sigue al pozo y se denota (24,23,2). Se seleccionó la potencia óptima tomando como criterio que la temperatura máxima del yacimiento no debe exceder los 500 °F. Luego se determinó la frecuencia de radiación óptima para este valor de potencia y para cada uno de los apuntalantes estudiados. Estos últimos fueron comparados entre sí con la finalidad obtener la combinación de apuntalante, potencia y frecuencia más apropiada para el calentamiento en Banda 0.

Por último, se realizaron sensibilidades en la geometría de la fractura, en los que verificar los valores de los óptimos de la frecuencia de calentamiento en función de dicho parámetro y se determinó la frecuencia óptima para cada uno de los largos de fractura estudiados.

C.2.1.1 Análisis de la potencia óptima de calentamiento para el modelo Banda 0 en el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales del caso Cerro Negro bajo el modelo de calentamiento Banda 0, en las que se analizaron los rangos de potencia aplicables según el material apuntalante utilizado.

C.2.1.1.a Análisis del Apuntalante Fe_2O_3

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo con una fractura Cuadrada rellena de apuntalante Fe_2O_3 . Los valores de la producción acumulada de crudo en un tiempo de 20 años, para potencias desde 10

hasta 50 kW y frecuencias desde 13,56 hasta 2450 MHz son mostrados en la Figura N° C.5.

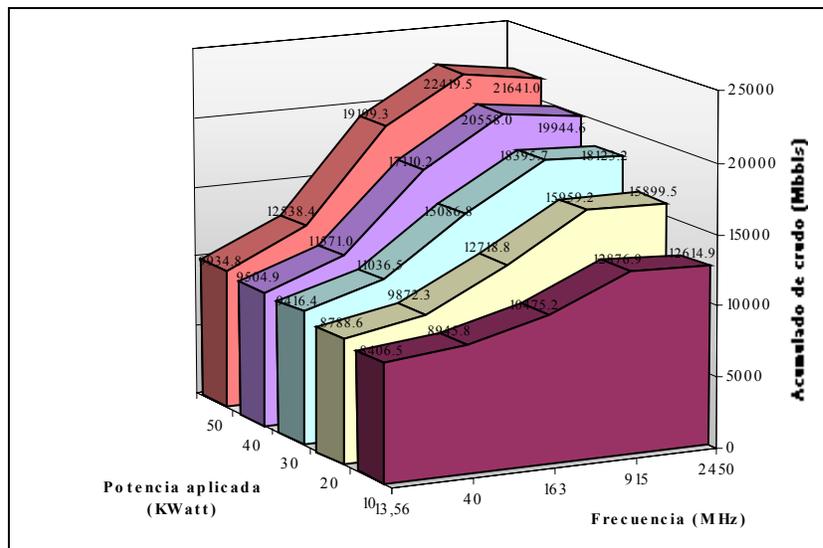


Figura N° C.5: Producción de crudo acumulada en 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentamiento en Banda 0 para el caso Cerro Negro (100 mD).

Se observa claramente que la producción acumulada de crudo aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento. Los mayores valores de producción para las frecuencias estudiadas se encuentran en 915 MHz para todas las potencias estudiadas.

Los resultados de la variación de la temperatura de la celda más caliente del yacimiento en función de la potencia y frecuencia aplicadas, a los 20 años de simulación se presentan en la Figuras N° C.6.

Allí se observa que la temperatura aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento y de la frecuencia de radiación. Para ninguna de las frecuencias y potencias estudiadas se excede la temperatura límite de 500 °F por lo tanto se puede calentar con todo el rango de potencias para este apuntalante.

C.2.1.1.b Análisis del Apuntalante ALFE

A continuación, en la Figura N° C.7, se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo con una fractura Cuadrada rellena de apuntalante ALFE. Allí se encuentran los valores de la producción acumulada de crudo en un tiempo de 20 años, para valores de potencia desde 10 hasta 50 kW y para valores de frecuencia desde 13,56 hasta 2450 MHz.

Se observa que la producción aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento. También se puede ver que el mayor valor de producción se tiene para la frecuencia de 40 MHz en todos los valores de potencia estudiados, por lo cual se puede fijar éste valor como la frecuencia óptima para éste apuntalante y esquema de calentamiento.

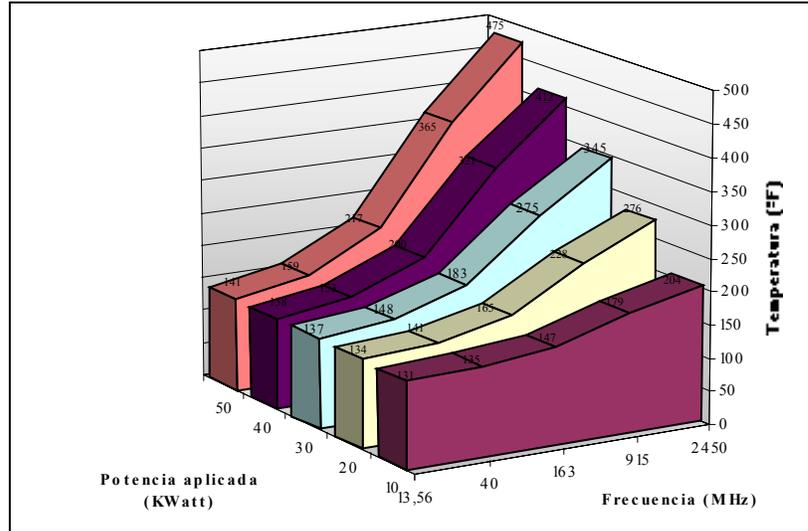


Figura N° C.6: Temperatura de la celda más caliente del yacimiento a 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante Fe₂O₃ y calentamiento en Banda 0 para el caso Cerro Negro (100 mD).

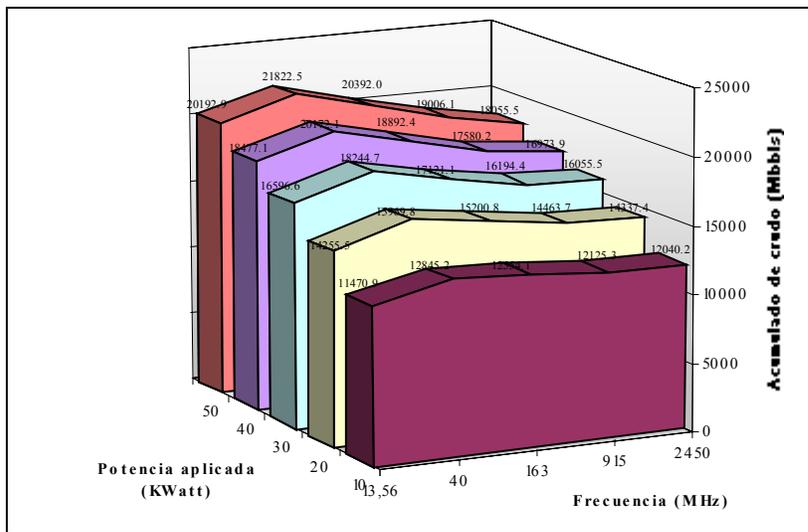


Figura N° C.7: Producción de crudo acumulada en 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante ALFE y calentamiento en Banda 0 para el caso Cerro Negro (100 mD).

Los resultados de la variación de la temperatura de la celda más caliente del yacimiento en función de la potencia y frecuencia aplicadas, a los 20 años de simulación se presentan en la Figuras N° C.8

Se observa que la temperatura de la celda aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento. También se puede ver claramente que las mayores temperaturas se encuentran para 2450 MHz. Sin embargo, se observa que la temperatura sobrepasa los 500 °F cuando se calienta a 40 y 50 kW con frecuencias

desde 163 hasta 2450 MHz y al calentar a 30 kW con frecuencias de 915 y 2450 MHz. Estos análisis indican que el rango de potencias permitido para este apuntalante se encuentra en las potencias menores e iguales a 20 kW.

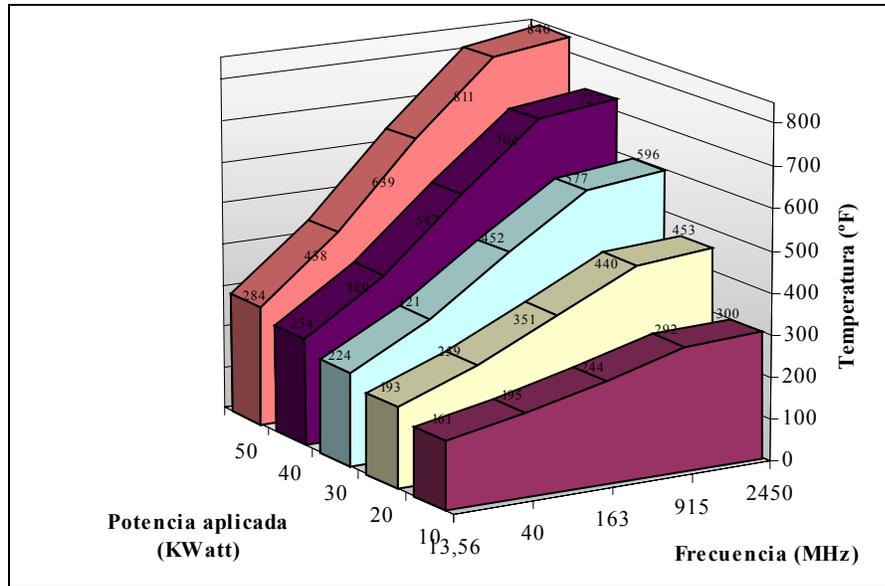


Figura N° C.8: Temperatura de la celda (24,23,3) a 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante ALFE y calentamiento en Banda 0 para el caso Cerro Negro (100 mD).

C.2.1.1.c Análisis del Apuntalante JL-P

A continuación, en la Figura N° C.9, se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo con una fractura Cuadrada rellena de apuntalante JL-P. Allí se encuentran los valores de la producción acumulada de crudo en un tiempo de 20 años, para valores de potencia desde 10 hasta 50 kW y para valores de frecuencia desde 13,56 hasta 2450 MHz.

Se produce un leve incremento en la producción acumulada de crudo al aumentar la potencia de calentamiento, así como también se observa que la producción permanece constante en todo el rango de frecuencia. Como ya se observó al estudiar el yacimiento Tía Juana, esto se debe a que el apuntalante JL-P es un material muy absorbente de la radiación, y su valor de profundidad de penetración es prácticamente 0. De hecho, el apuntalante JL-P absorbe toda la potencia aplicada en la primera celda de la malla (que es de 1 pie de ancho) para todas las frecuencias, por lo cual no se observan cambios en la producción por la variación de la misma. Además, como el calor está llegando a una sola celda del mallado, el área calentada resulta mínima. En este caso no se puede definir una frecuencia óptima para el calentamiento.

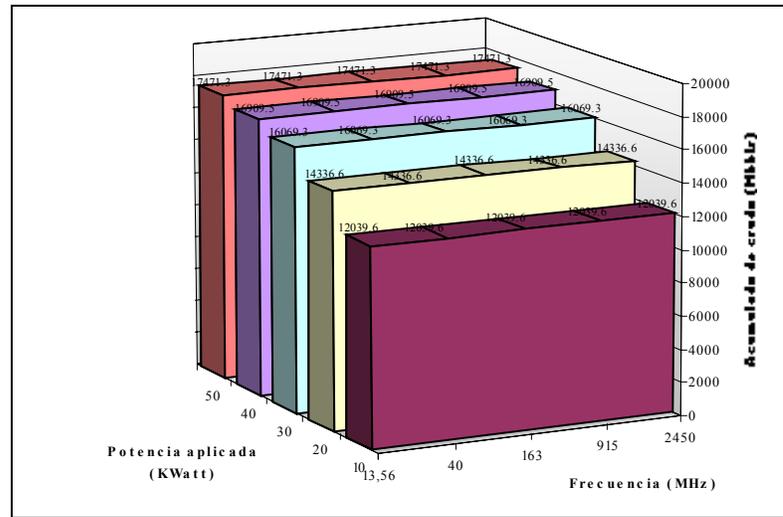


Figura N° C.9: Producción de crudo acumulada en 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con apuntalante JL-P y calentamiento en Banda 0 para el caso Cerro Negro (100 mD).

Los resultados de la variación de la temperatura de la celda más caliente del yacimiento en función de la potencia y frecuencia aplicadas, a los 20 años de simulación se presentan en la Figuras N° C.10.

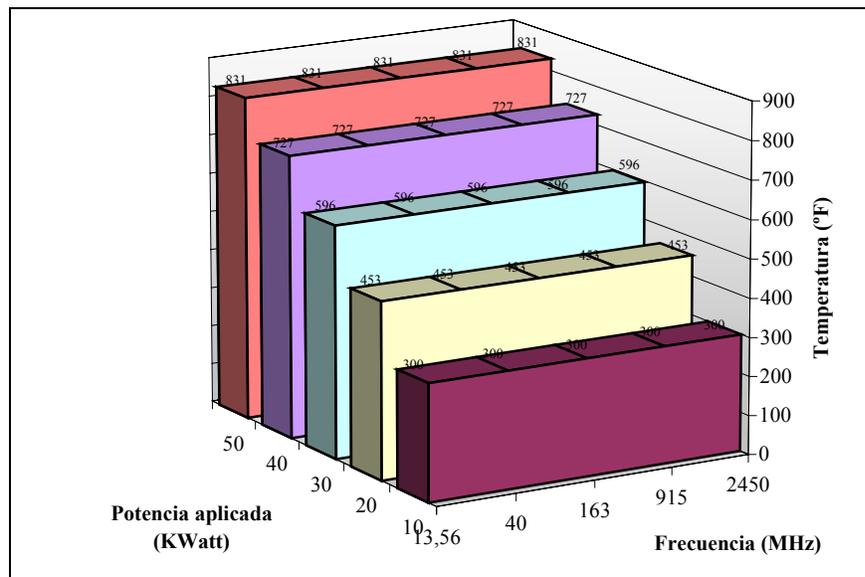


Figura N° C.10: Temperatura de la celda (24,23,3) a 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento apuntalante JL-P y calentamiento en Banda 0 para el caso Cerro Negro (100 mD).

Se observa que la temperatura de la celda aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento, pero no se observan cambios en cuanto a la variación de la frecuencia. Esto se debe, nuevamente, al hecho de que el material apuntalante es muy absorbente de la radiación, y absorbe toda la energía en la primera celda. Se observa

tomados del estudio de Mouris y col. [27]. Allí se utilizan dichas frecuencias para la medición de las constantes dieléctricas de los materiales estudiados (ver Tabla No 3.3 de la sección Metodología). Los valores de las frecuencias no comerciales que se usaron son: 1015, 1499 y 1977 MHz, pues estos se encuentran en la región de frecuencias que produce un mayor acumulado de producción para el apuntalante Fe_2O_3 .

A continuación se presentan en la Figura N° C.12, los valores de la producción de crudo para las frecuencias comerciales y no comerciales en el rango de 915 a 2450 MHz, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con calentamiento en Banda 0 para un fractura de 70 pies de largo rellena de apuntalante Fe_2O_3 .

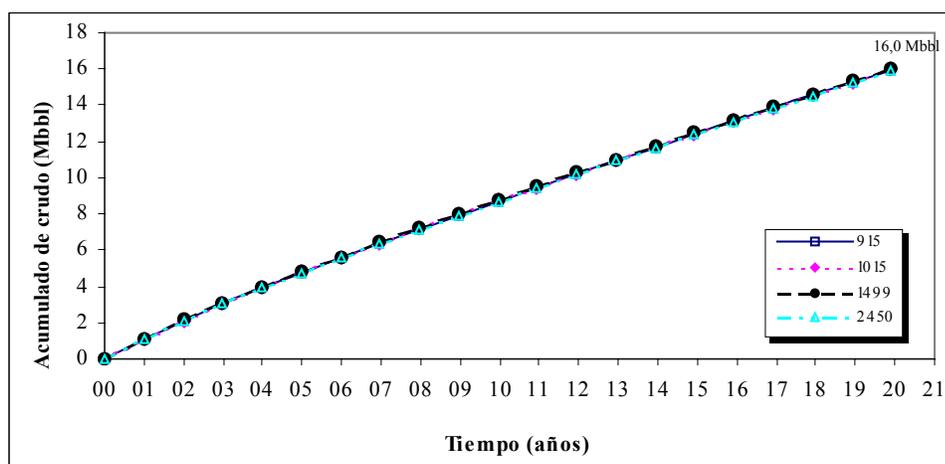


Figura N° C.12: Producción de crudo para los valores de frecuencias comerciales y no comerciales comprendidos entre 915 y 2450 MHz para el modelo Banda 0, calentando a 20 kW y con los datos del yacimiento Cerro Negro (100 mD), para una fractura de 70 pies de largo rellena de apuntalante Fe_2O_3 .

En la figura anterior se aprecia que los valores del acumulado de crudo en función del tiempo son prácticamente iguales para todas las frecuencias estudiadas. Sin embargo, el valor de frecuencia correspondiente a la mayor producción de crudo es de 1499 MHz, por lo que se tomará éste valor como frecuencia óptima de los próximos análisis con el apuntalante Fe_2O_3 .

A continuación, en la Figura N° C.13 se presenta la producción acumulada de crudo en función del tiempo para un pozo con una fractura de 70 pies de longitud, la cual está rellena de los materiales estudiados. Este pozo es sometido a un calentamiento Banda 0 con una potencia de 120 kW y las frecuencias óptimas de radiación según el material: 915 MHz para el apuntalante Fe_2O_3 , 40 MHz para el apuntalante ALFE y 163 MHz para el apuntalante JL-P. Este último material no presentó valores óptimos de frecuencia, por lo que se escogió 163 MHz como frecuencia de análisis en este caso.

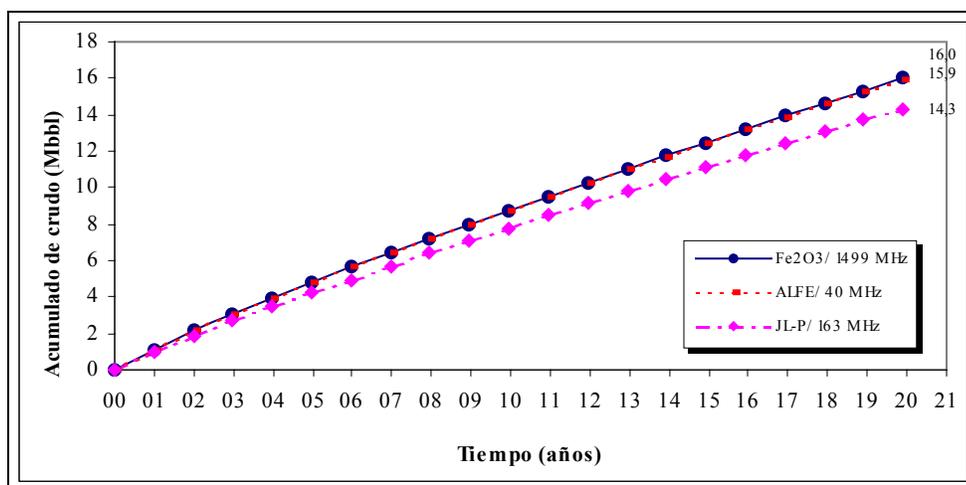


Figura N° C.13: Producción de crudo para los óptimos de frecuencia del modelo de calentamiento Banda 0, calentando a 20 kw y con los datos del yacimiento Cerro Negro (100 mD), para una fractura de 70 pies de largo rellena de los materiales apuntalantes estudiados.

De esta figura se puede ver que los apuntalantes Fe_2O_3 y ALFE son los que presentan el mayor acumulado de crudo. El Fe_2O_3 , con una frecuencia de 1499 MHz, es quien produce la mayor cantidad de crudo, por lo tanto se considera éste apuntalante como parte del escenario óptimo para éste esquema de calentamiento.

C.2.1.3 Análisis de la Geometría de la Fractura para el caso de calentamiento *Banda 0*, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Cerro Negro.

En la sección C.1 se analizó el impacto de la longitud y de la altura de la fractura en el esquema de Yacimiento-Fractura. En este punto se analizó el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para verificar que la variación en la geometría de la fractura siga la misma tendencia.

A continuación, en la Figura N° C.14, se presentan los resultados de la producción acumulada de crudo en función del tiempo al variar el largo y la altura de la fractura bajo las especificaciones del esquema óptimo del modelo Banda 0. Se evaluaron fracturas de 40, 70 y 200 pies de largo y de altura constante y variable, tal y como se especificó en la sección de Metodología.

Al igual que en caso Yacimiento-Fractura, a medida que aumenta el largo de la fractura se observa un incremento en la producción de crudo. En todos los largos estudiados se observa una diferencia entre las fracturas de altura constante y variable, que se vuelve notoria a medida que el largo de la fractura disminuye. Por lo tanto, es posible decir que la altura de una fractura se vuelve un parámetro despreciable para grandes longitudes, mientras que para fracturas cortas de poca área superficial la altura comienza a tener una connotación importante en el diseño de la fractura.

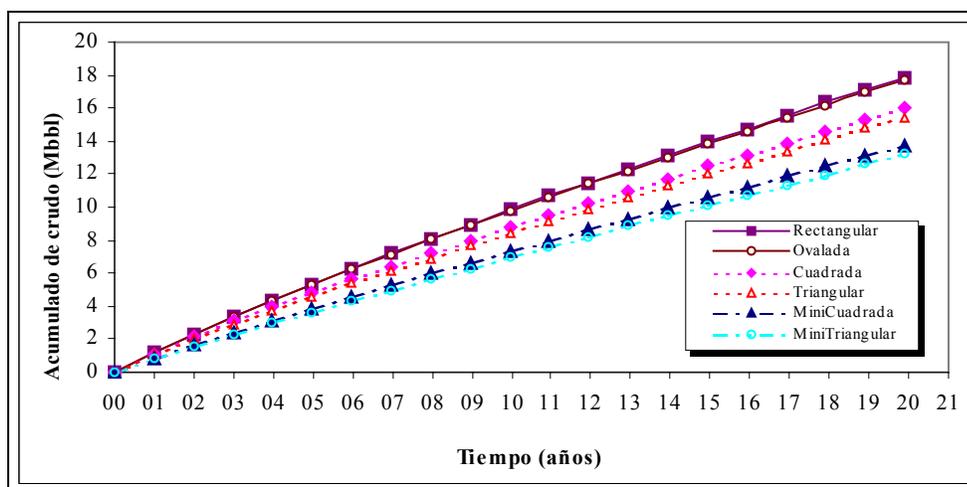


Figura N° C.14: Variación de la geometría de la fractura para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento bajo calentamiento en Banda 0. Caso óptimo del yacimiento Cerro Negro (100 mD): Fe₂O₃ calentando a 20 kW y 1499 MHz.

Para cuantificar el incremento de la producción de crudo debido a la altura de la fractura se calculó el porcentaje de incremento de las fracturas de altura constante y variable para los largos estudiados (40 vs. 70 vs. 200), con respecto al caso Yacimiento-Fractura sin calentamiento correspondiente para cada largo (Figura N° C.3). Luego se calculó la diferencia entre los valores de altura constante y los de altura variable. Los resultados se presentan en la Tabla N° C.3.

Tabla N° C.3: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes alturas para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con calentamiento Banda 0 para el yacimiento Cerro Negro.

% Incremento: Esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento vs. Yacimiento-Fractura			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-cte - h-var)
40 pies	42,02%	40,47%	1,55%
70 pies	42,19%	41,13%	1,06%
200 pies	45,43%	44,90%	0,53%

Se observa que el porcentaje de incremento es ligeramente mayor en las fracturas de altura constante, lo cual indica que estas geometrías son más sensibles al calentamiento dieléctrico que las geometrías de altura variable, en contraste con el caso de la arena Tía Juana. Al igual que en el caso Yacimiento-Fractura, se observa una disminución en el porcentaje de incremento con el aumento de la longitud de la fractura para todas las geometrías. La diferencia entre los porcentajes de incremento de las fracturas de altura constante menos altura variable indican que el diseño de la altura de la fractura no es significativo, puesto que dichos valores se encuentran por debajo del 2% en todos los casos de longitudes estudiados. La mayor diferencia se obtiene para el caso de fracturas de 40 pies de largo, por lo que en los casos de

longitudes menores, es importante evaluar la altura de la fractura para verificar su impacto.

Debido a que la cantidad de material apuntalante es diferente para cada longitud de fractura estudiada, se analizaron diferentes longitudes de fractura variando la frecuencia de radiación entre los valores comerciales, al calentar a 20 kW bajo el modelo Banda 0. Los resultados para fracturas de 40 y 200 pies de largo se presentan a continuación en la Figura N° C.15.a-b.

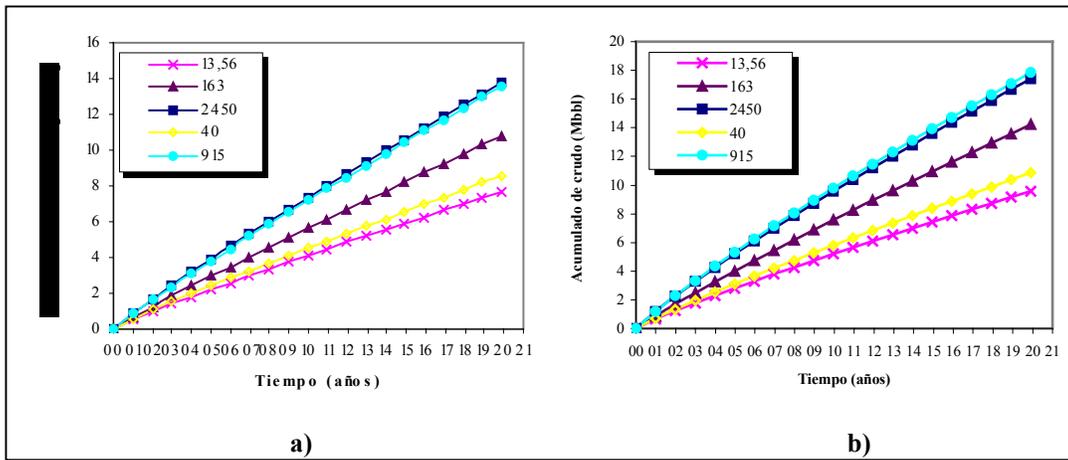


Figura N° C.15: Variación en el largo de la fractura para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento. Caso Cerro Negro (100 mD), calentando a 20 kW bajo el modelo Banda 0. Material apuntalante Fe₂O₃. Largos: a) 40 pies y b) 200 pies

Se puede ver que el valor de la frecuencia óptima de radiación varía de acuerdo a la longitud de la fractura. Para una longitud de fractura de 40 pies, la frecuencia óptima se encuentra en 2450 MHz, mientras que para 200 pies el mayor valor producción corresponde a los 915 MHz.

El análisis de la frecuencia óptima para cada longitud de fractura se repitió para los apuntalantes ALFE y JL-P. Los resultados se presentan a continuación en la Tabla N° C.4

Tabla N° C.4: Valores de la frecuencia óptima para cada longitud de fractura y material apuntalante, para el caso Cerro Negro bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento y el modelo Banda 0.

Largo de la fractura (pies) / forma	Frecuencia óptima (MHz) para el apuntalante:		
	Fe ₂ O ₃	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	2450	40	-
70 / Cuadrada	1499	40	-
200 / Rectangular	915	40	-

Analizando la tabla anterior se puede ver que la frecuencia óptima de calentamiento se mantiene constante en 40 MHz para el apuntalante ALFE, mientras que varía con la tendencia mencionada anteriormente para el apuntalante Fe₂O₃. En el caso de 70 pies de largo, se observa que aún cuando el valor óptimo de frecuencia es de 1499 MHz, el valor usado en campo corresponde a 915 MHz, pues este valor se

halla comprendido entre las frecuencias comerciales internacionales. En el caso del apuntalante JL-P no se observó que ninguna frecuencia resalte como óptima, lo cual también ha sido explicado anteriormente.

Se puede ver que existe una tendencia entre la longitud de la fractura y el Dp del apuntalante Fe_2O_3 , tal y como se muestra en la Figura N° C.16. Allí se puede observar que la dependencia de la longitud de la fractura con la profundidad de penetración (que es característico para cada material y frecuencia de radiación) es prácticamente lineal. Este resultado podría ser útil para hacer un diseño de fractura bajo ciertas especificaciones de calentamiento, o bien para obtener un estimado de cómo calentar una fractura existente.

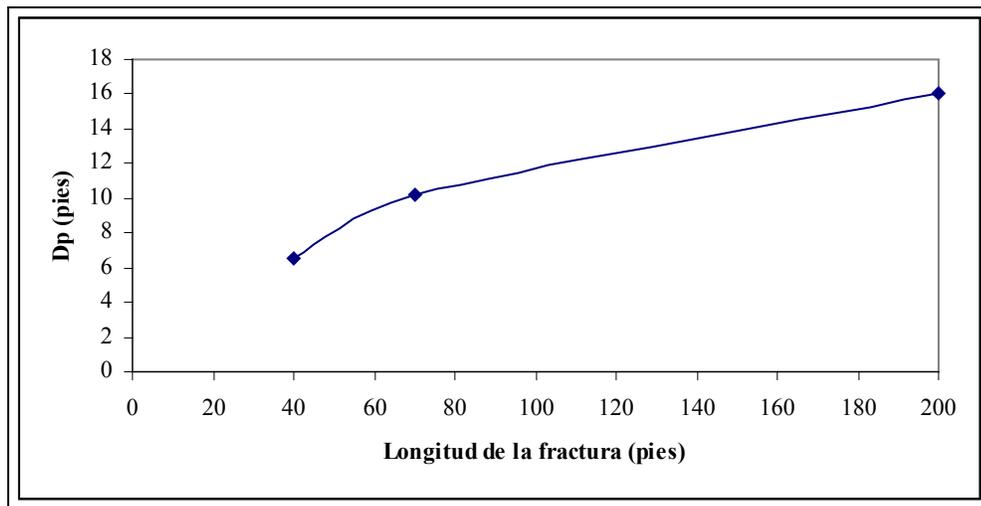


Figura N°C.16: Longitud de fractura vs. Dp para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento. Caso Cerro Negro (100 mD), calentando a 20 kW bajo el modelo Banda 0.

C.2.2 Análisis del modelo de calentamiento en una banda de 1 pie de ancho (Banda 1) bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Tía Juana.

En esta sección se presentan los resultados de los análisis del modelo de calentamiento en una banda de 1 pie de ancho ó Banda 1. Esta zona de calentamiento incluye a la fractura y a línea de celdas en dirección \hat{i} que se encuentran adyacentes a la fractura; ambas regiones suman 1 pie de ancho. Debido a que se están calentando dos áreas con propiedades diferentes (arena del yacimiento y apuntalante de la fractura), los resultados de los estudios realizados a este esquema de calentamiento se presentan en detalle.

Se realizaron simulaciones conceptuales variando los valores de la potencia y de la frecuencia de radiación para cada uno de los tres apuntalantes estudiados para obtener los rangos óptimos de la frecuencia de radiación para cada material apuntalante en el rango de potencias estudiado. Se seleccionó la potencia óptima de calentamiento tomando como criterio que la temperatura máxima del yacimiento no debe exceder los 500 °F. Luego se determinó la frecuencia de radiación óptima para este valor de potencia y para cada uno de los apuntalantes estudiados. Estos últimos

fueron comparados entre sí con la finalidad obtener la combinación de apuntalante, potencia y frecuencia más apropiada para el calentamiento en Banda 1. Por último, se realizaron sensibilidades en la geometría de la fractura, a fin de determinar la frecuencia óptima para cada uno de los largos de fractura estudiados y para verificar el impacto de la altura de la fractura para como parámetro de diseño.

C.2.2.1 Análisis de la potencia óptima de calentamiento para el modelo de calentamiento Banda 1, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales del yacimiento Cerro Negro bajo el modelo de calentamiento Banda 1, en las que se analizaron los rangos de potencia aplicables según el material apuntalante utilizado.

C.2.2.1.a Análisis del Apuntalante Fe_2O_3

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo con una fractura Cuadrada rellena de apuntalante Fe_2O_3 . Los valores de la producción acumulada de crudo en un tiempo de 20 años, para potencias desde 10 hasta 50 kW y frecuencias desde 13,56 hasta 2450 MHz son mostrados en la Figura N° C.17.

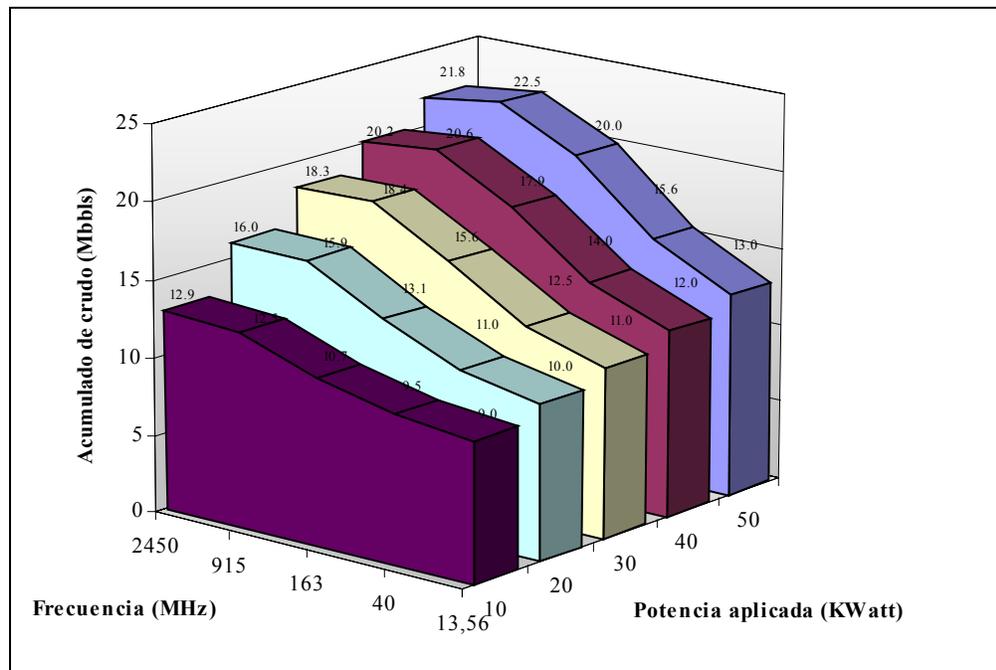


Figura N° C.17: Producción de crudo acumulada en 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentamiento en Banda 1 para el caso Cerro Negro (100 mD).

Se observa que la producción acumulada de crudo aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento. Los mayores valores de producción para las frecuencias estudiadas se encuentran en el rango de 915 a 2450 MHz lo cual sugiere que el valor óptimo de la frecuencia para éste apuntalante y esquema de

calentamiento se encuentra en dicho rango. Se presenta un máximo en la producción acumulada de crudo para la frecuencia de 915 MHz al calentar con todas las potencias estudiadas.

Los resultados de la variación de la temperatura de la celda más caliente del yacimiento en función de la potencia y frecuencia aplicadas, a los 20 años de simulación se presentan en la Figuras N° C.18.

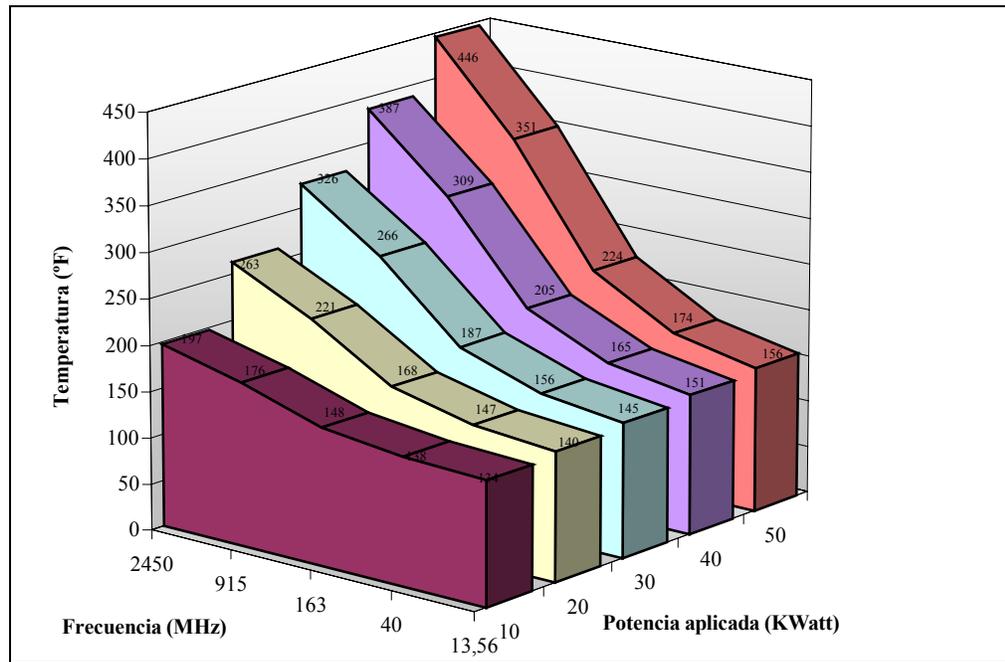


Figura N° C.18: Temperatura de la celda (24,23,3) a 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con una fractura cuadrada rellena de apuntalante Fe_2O_3 y calentamiento en Banda 1 para el caso Cerro Negro (100 mD).

Se observa que la temperatura aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento y de la frecuencia de radiación. No se observaron temperaturas superiores a 500 °F para ninguna combinación de frecuencia y potencia, por lo que todo el rango de potencias puede ser aplicable con el apuntalante Fe_2O_3 bajo el esquema de calentamiento Banda 1.

C.2.2.1.b Análisis del Apuntalante ALFE

A continuación se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo con una fractura Cuadrada rellena de apuntalante ALFE, usando los datos del yacimiento Cerro Negro. En la Figura N° C.19 se encuentran los valores de la producción acumulada de crudo en un tiempo de 20 años, para valores de potencia desde 10 hasta 50 kW y para valores de frecuencia desde 13,56 hasta 2450 MHz.

Se observa que la producción acumulada de crudo aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento. Los mayores valores de producción para las frecuencias estudiadas se encuentran en el rango de 163 a 2450 MHz lo cual sugiere que el valor óptimo de la frecuencia para éste apuntalante y esquema de

calentamiento se encuentra en dicho rango. La máxima producción acumulada se presenta en el valor de 915 MHz, para todo el rango de frecuencias estudiadas. Los resultados de la variación de la temperatura de la celda más caliente del yacimiento en función de la potencia y frecuencia aplicadas, a los 20 años de simulación, se presentan en la Figuras N° C.20

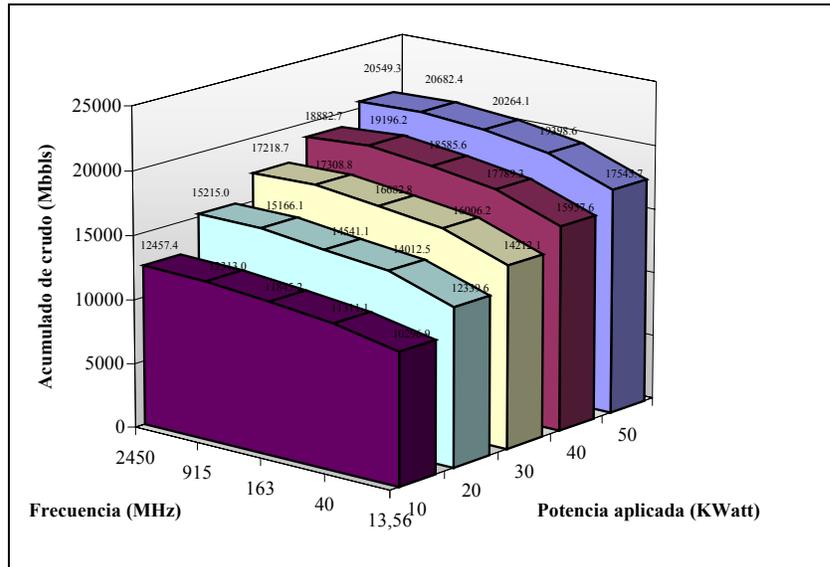


Figura N° C.19: Producción de crudo acumulada en 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con apuntalante ALFE y calentamiento Banda 1 para el caso Cerro Negro (100 mD).

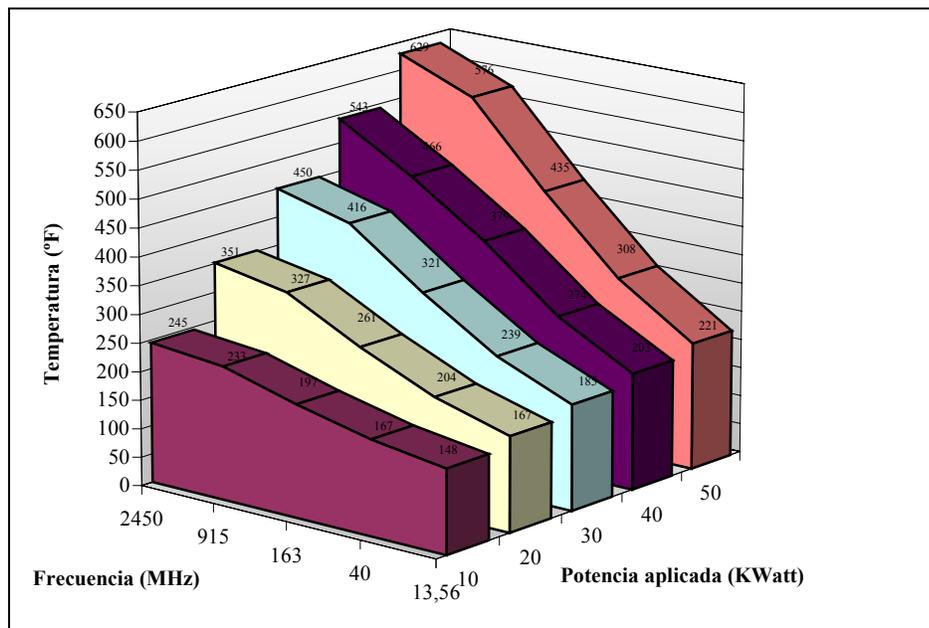


Figura N° C.20: Temperatura de la celda (24,23,3) a 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, con apuntalante ALFE y calentamiento Banda 1 para Cerro Negro (100 mD).

Se observa que la temperatura aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento y de la frecuencia de radiación. Se encontró que la temperatura sobrepasa los 500 °F cuando se calienta a una potencia de 50 kW a las frecuencias de 915 y 2450 MHz y también cuando se calienta a 40 kW y 2450 MHz. Por eso se tomó como rango de potencias aplicables para este apuntalante los valores desde 10 hasta 30 kW.

C.2.2.1.c Análisis del Apuntalante JL-P

En la Figura N° C.21 se presentan los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo con una fractura Cuadrada rellena de apuntalante JL-P. Allí se encuentran los valores de la producción acumulada de crudo en un tiempo de 20 años, para valores de potencia desde 10 hasta 50 kW y para valores de frecuencia desde 13,56 hasta 2450 MHz.

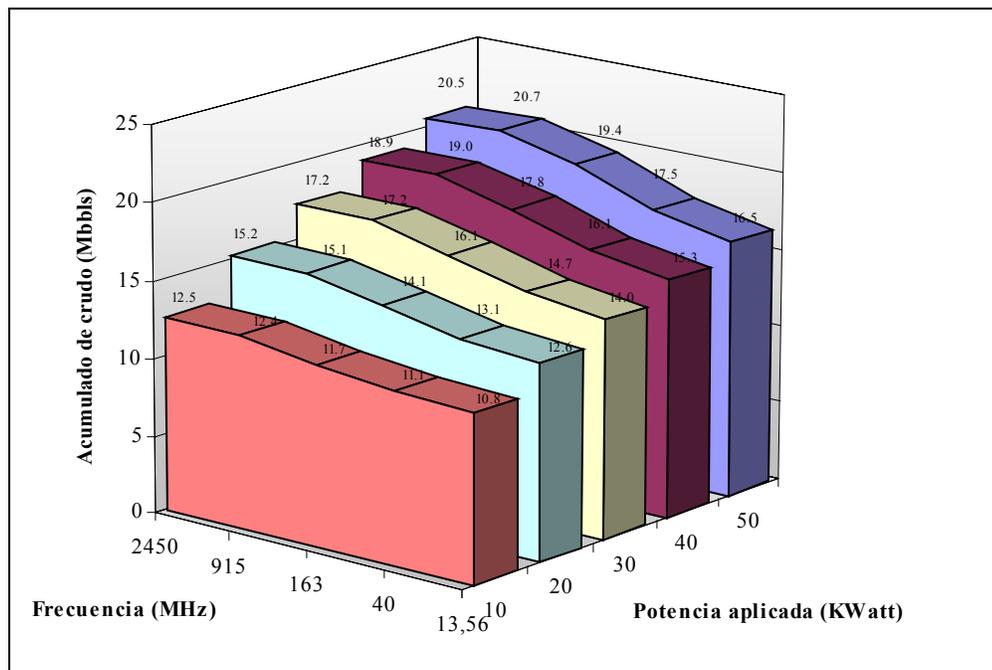


Figura N° C.21: Producción de crudo acumulada en 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con apuntalante JL-P y calentamiento en Banda 1 para el caso Cerro Negro (100 mD).

Se observa cómo la producción aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento, en contraste con el caso Banda 0 donde no se observaban diferencias notables al variar este parámetro. También se puede ver, un máximo en el valor de la producción en la frecuencia de 915 MHz, que se mantiene en todos los valores de potencia estudiados.

Los resultados de la variación de la temperatura de la celda más caliente del yacimiento en función de la potencia y frecuencia aplicadas, a los 20 años de simulación se presentan en la Figuras N° C.22.

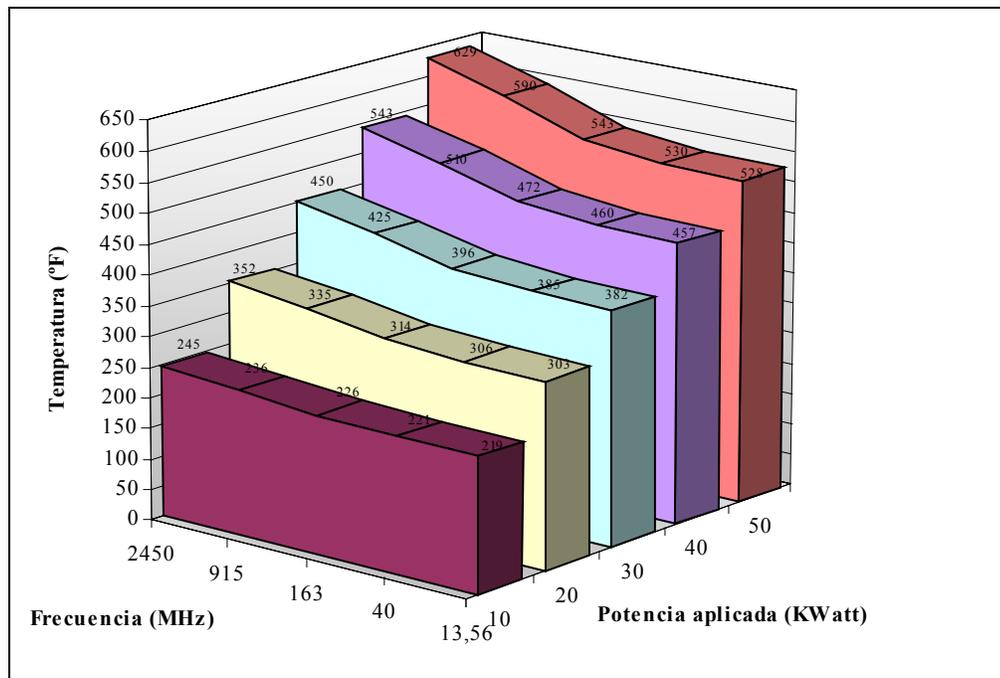


Figura N° C.22: Temperatura de la celda (24,23,3) a 20 años variando la potencia y la frecuencia, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con apuntalante JL-P y calentamiento en Banda 1 para el caso Cerro Negro (100 mD).

Se observa que temperatura de la celda aumenta con el incremento de la potencia de calentamiento y de la frecuencia de radiación. También se puede ver claramente un máximo en el valor de la temperatura, que corresponde a la frecuencia de 2450 MHz para todos los valores de potencia estudiados, lo cual difiere con respecto al modelo de calentamiento en Banda 0. Sin embargo, se observa que la temperatura sobrepasa los 500 °F para la potencia de calentamiento de 40 kW en las frecuencias de 915 y 2450 MHz, y para la potencia de 50 kW en todo el rango de frecuencias, por lo cual, para este esquema, se recomienda calentar bajo un rango de potencias menores a 40 MHz.

Haciendo un análisis global de los resultados para el modelo de calentamiento Banda 1 en el caso Yacimiento-Fractura-Calentamiento se puede concluir el rango de potencias de calentamiento utilizables se encuentra por debajo de los 40 kW, pues para todas las combinaciones estudiadas la temperatura de la celda más caliente de la malla se encuentra siempre por debajo de 500 °F. Sin embargo, se establece el valor de 20 kW para realizar los posteriores estudios de este yacimiento para hacer consistencia con el modelo de calentamiento Banda 0, que fue estudiado en la sección anterior.

C.2.2.2 Análisis de la frecuencia óptima de radiación para el modelo de Calentamiento Banda 1 bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Para este análisis se estudió la producción acumulada de crudo en función de la frecuencia de radiación para cada uno de los apuntalantes, fijando como potencia

de calentamiento el valor de 20 kW. Los resultados de estas simulaciones se presentan en la Figura N° C.23.

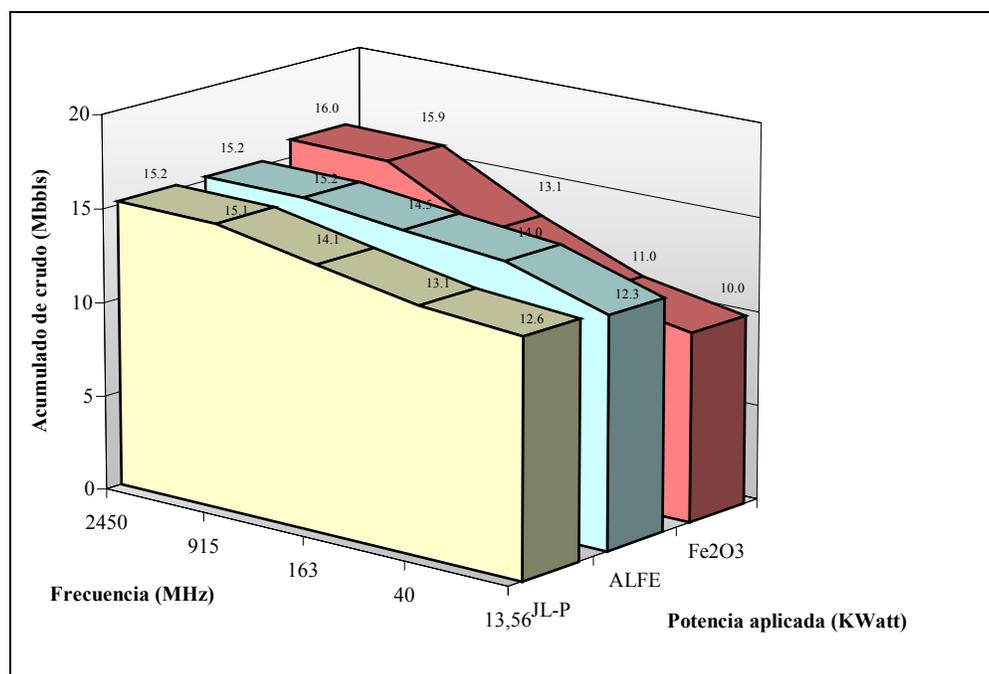


Figura N° C.23: Producción acumulada de crudo en 20 años variando la frecuencia y el material apuntalante para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con calentamiento en Banda 1 para el caso Cerro Negro (100 mD).

Al comparar los resultados de las simulaciones para los diferentes apuntalantes calentados a 20 kW bajo el modelo de calentamiento Banda 1, se puede ver que el valor de frecuencia de radiación óptimo para los apuntalantes ALFE y JL-P está en los 2450 MHz. Se observa que el apuntalante Fe₂O₃ presenta una región de valores óptimos para la frecuencia que va desde 915 hasta 2450 MHz, siendo este último quien presenta el mayor valor de producción acumulada. Para las simulaciones con el apuntalante Fe₂O₃ se obtienen los mayores valores de producción acumulada, por lo cual se tomará este apuntalante como parte del esquema óptimo para el modelo de calentamiento Banda 1. A continuación se hace un estudio detallado de la frecuencia óptima en esta región.

Para verificar la frecuencia óptima de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento bajo el modelo Banda 1, se evaluaron otras frecuencias consideradas como no comerciales con el apuntalante Fe₂O₃, que son tomados del estudio de Mouris y col.^[23-27] Los valores de las frecuencias no comerciales que se tomaron para este análisis son: 1015, 1499 y 1977 MHz, pues estos se encuentran en la región de frecuencias que produce un mayor acumulado de producción para el apuntalante Fe₂O₃.

En la Figura N° C.24 se presentan los valores de la producción de crudo para las frecuencias comerciales y no comerciales en el rango comprendido entre 915 y 2450 MHz, para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con los datos del

caso Cerro Negro y calentamiento en Banda 1 para un fractura de 70 pies de largo rellena de apuntalante Fe₂O₃.

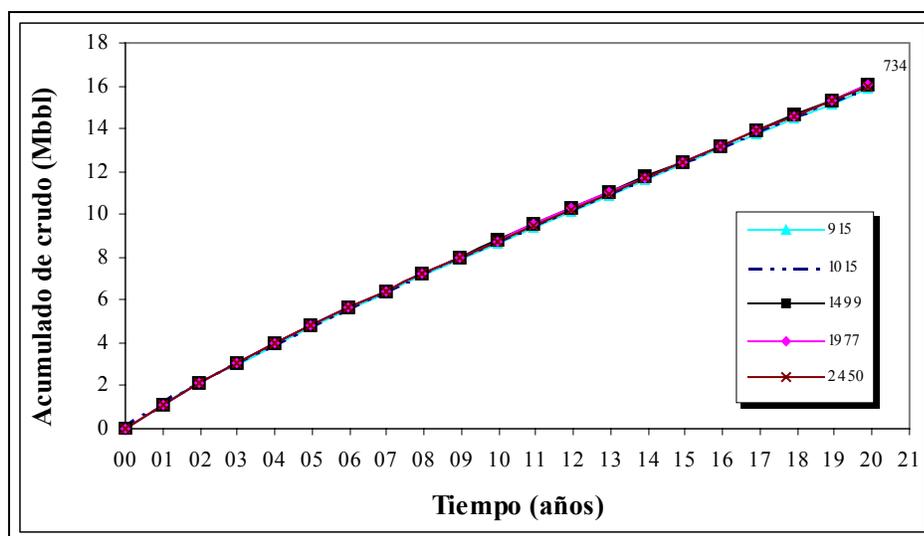


Figura N° C.24: Producción de crudo para los valores de frecuencias comerciales y no comerciales comprendidos entre 915 y 2450 MHz para el modelo Banda 1, calentando a 20 kw y con los datos del yacimiento Cerro Negro (100 mD), para una fractura de 70 pies de largo rellena de apuntalante Fe₂O₃.

En la figura anterior se aprecia que para la frecuencia de 1499 MHz se presenta un valor en la producción de crudo que es ligeramente superior al resto de las frecuencias, por lo que se tomará éste valor como frecuencia óptima de los próximos análisis con el apuntalante Fe₂O₃. Se puede ver que para la arena Cerro Negro el valor de frecuencia óptima para el modelo Banda 1 coincide con el valor del modelo Banda 0, ya que se están calentando dos materiales con propiedades dieléctricas similares.

Debido a que los materiales calentados presentan diferentes valores de distancia de penetración (Dp) al ser radiados con la misma frecuencia, se calculó un valor de Dp promedio ponderado en función del área radiada de cada material. El resultado de estos cálculos se presentan a continuación en la Tabla N° C.5.

Tabla N° C.5: Valor del Dp de los materiales individuales y del área total calentada, al ser calentados bajo el modelo Banda 1 con una frecuencia de radiación de 1499 MHz.

Material	Ancho del área calentada	% que ocupa del área total	Dp del material (m)
Arena Cerro Negro	1	92,3%	3,66
Apuntalante Fe ₂ O ₃	0,083	7,7%	5,07
Arena Cerro Negro + Apuntalante	1,083	100,0%	3,78

Se puede observar que el valor de Dp de la arena total calentada es de 3,78 m. Debido a que la arena Cerro Negro representa el 92,3% del área total calentada, resulta lógico observar que el Dp del área total sea un valor muy cercano al de la arena (3,66 m), sin embargo, es importante tomar en cuenta que en este caso los

valores de D_p de estos materiales tienen valores muy cercanos, por lo que el valor final del D_p promedio no se aleja de ninguno de los anteriores. Teniendo en cuenta esta última observación, se puede concluir que, aunque la frecuencia óptima para el modelo de Calentamiento Banda 1 se encuentra más relacionada a las propiedades de la arena que a las del material apuntalante, la variación con respecto al modelo Banda 1 no es considerable, pues los materiales tienen características de absorción electromagnética similares.

En la Figura N° C.25 se presenta la producción acumulada de crudo en función del tiempo para los materiales apuntalantes estudiados un calentamiento Banda 1 con una potencia de 120 kW y las frecuencias óptimas de radiación según el material: 163 MHz para Fe_2O_3 , 40 MHz para ALFE y 163 MHz para JL-P.

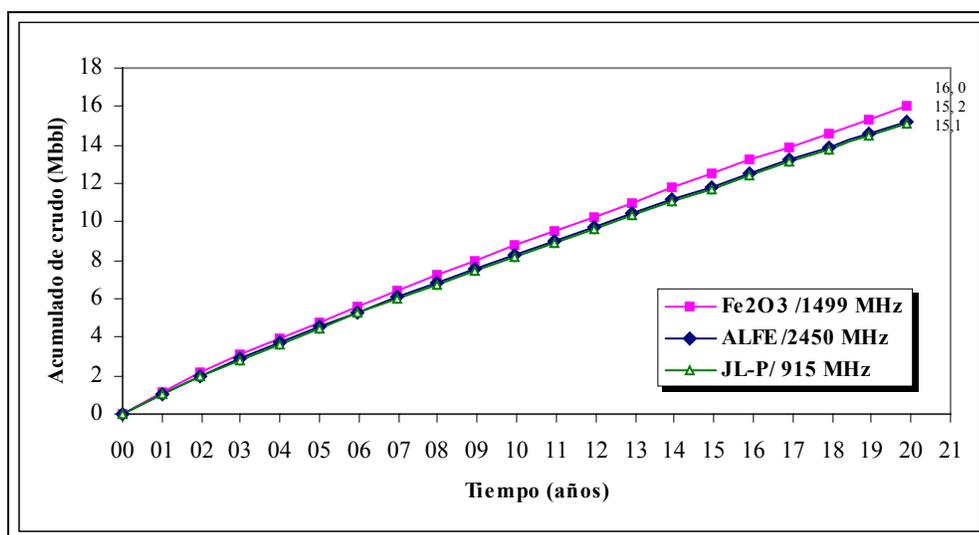


Figura N° C.25: Producción de crudo para los óptimos de frecuencia del modelo de calentamiento Banda 1, calentando a 20 kw y con los datos del yacimiento Cerro Negro (100 mD), para una fractura de 70 pies de largo rellena de los materiales apuntalantes estudiados.

De esta figura se puede ver claramente que el apuntalante Fe_2O_3 , con una frecuencia de 1499 MHz, es el que produce una mayor cantidad de crudo, por lo tanto se considera que este escenario es el óptimo para este esquema de calentamiento. Se tomó este esquema como base para los análisis de variación en la tasa de producción.

C.2.2.3 Análisis de la Geometría de la Fractura para el caso de calentamiento *Banda 1*, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Cerro Negro.

A continuación, en la Figura N° C.26, se presenta la producción acumulada de crudo en función del tiempo al variar el largo y la altura de la fractura bajo las especificaciones del esquema óptimo del modelo Banda 1. Se evaluaron fracturas de 40, 70 y 200 pies de largo y de altura constante y variable, tal y como se especificó en la sección de Metodología.

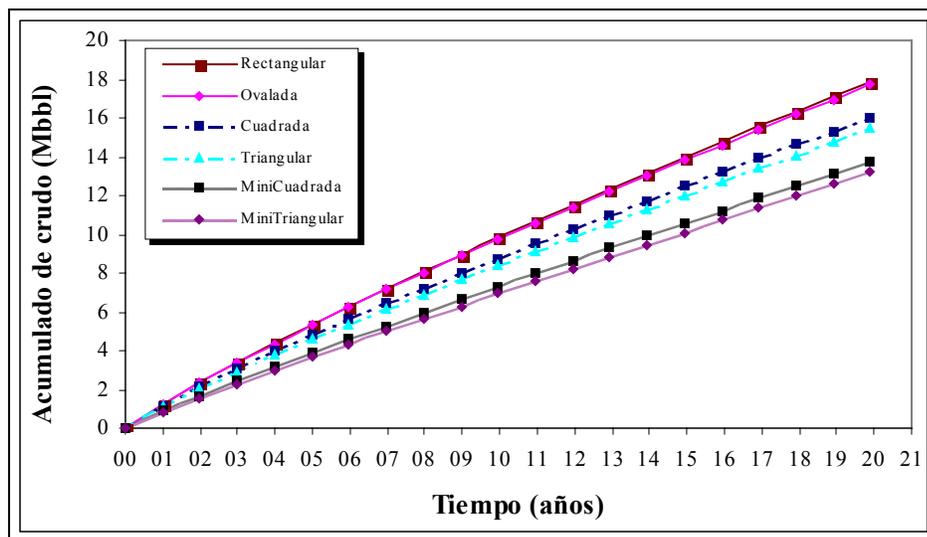


Figura N° C.26: Variación de la geometría de la fractura para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento bajo calentamiento en Banda 1. Caso óptimo del yacimiento Cerro Negro (100 mD): Fe₂O₃ calentando a 20 kW y 1499 MHz.

Se observa que a medida que aumenta el largo de la fractura, también aumenta la producción, y disminuye la diferencia entre fracturas de igual largo y diferente altura, por lo que se presenta un tendencia similar a la del modelo de calentamiento Banda 0.

Para cuantificar el incremento de la producción de crudo debido a la altura de la fractura se calculó su porcentaje de incremento con respecto al caso Yacimiento-Fractura para cada largo estudiado (40, 70 y 200 pies). Luego se calculó la diferencia entre los valores de altura constante y los de altura variable. Los resultados se presentan en la Tabla N° C.6.

Tabla N° C.6: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes alturas para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para Banda 1 en el caso Cerro Negro.

% Incremento: Esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento vs. Yacimiento-Fractura			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-cte - h-var)
40 pies	41.81%	40.34%	1.47%
70 pies	42.18%	40.97%	1.20%
200 pies	45.47%	44.96%	0.52%

Se observa que el porcentaje de incremento es ligeramente mayor en las fracturas de altura constante, y que aumenta con la longitud de la fractura. La diferencia entre los porcentajes de incremento de las fracturas de altura constante menos altura variable indican que el diseño de la altura de la fractura no es significativo, puesto que dichos valores se encuentran por debajo del 2% en todas las longitudes. Al igual que en el modelo Banda 0, para el modelo de calentamiento

Banda 1 se obtiene la mayor diferencia en la diferencia de porcentaje de incremento para el caso de fracturas de 40 pies de largo, por lo que en los casos de longitudes menores, es importante evaluar la altura de la fractura para verificar su impacto.

A fin de verificar el impacto de la longitud de la fractura en la frecuencia de radiación se analizó la producción acumulada de crudo para longitudes de fractura diferentes a 70 pies al variar la frecuencia de radiación. Los resultados para fracturas de 40 y 200 pies de largo se presentan a continuación en la Figura N° C.27.a-b.

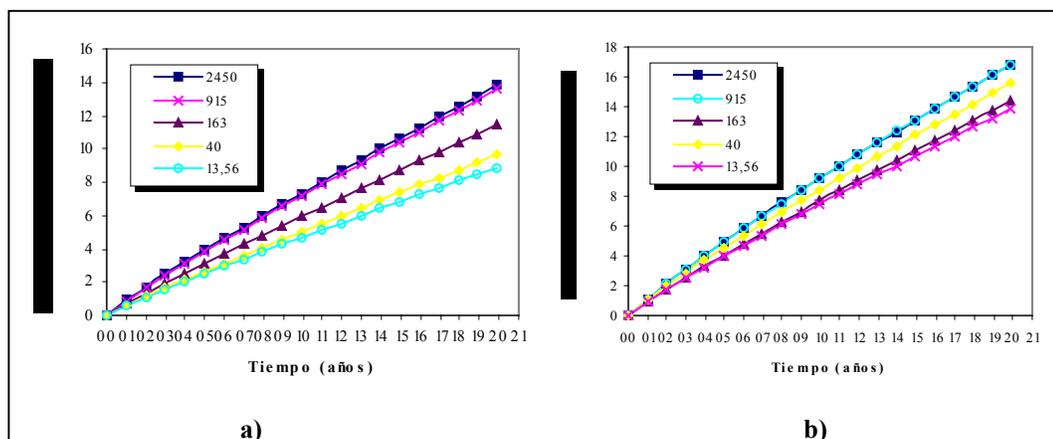


Figura N° C.27: Variación en el largo de la fractura para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento. Caso Cerro Negro (100 mD), calentando a 20 kW bajo el modelo Banda 1 con apuntalante Fe₂O₃. Largos: a) 40 pies y b) 200 pies

Se puede ver que el valor de la frecuencia máxima es de 2450 MHz para un largo de fractura de 40 pies, mientras que para un largo de 200 pies la frecuencia máxima se encuentra en el valor de 915 MHz. Tomando en cuenta lo anterior, resalta el hecho de que la frecuencia óptima de radiación varía de acuerdo a la longitud de la fractura, aunque se mantiene dentro del rango óptimo para el apuntalante Fe₂O₃ (915-2450 MHz). Este análisis se repitió para los apuntalantes ALFE y JL-P y los resultados de la frecuencia óptima en función de los diferentes materiales y longitudes de fractura estudiados bajo el modelo de calentamiento Banda 1 se presentan en la Tabla N° C.28.

Tabla N° C.28: Valores de la frecuencia óptima para cada longitud de fractura y material apuntalante, para el caso Cerro Negro bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento y el modelo Banda 1.

Largo de la fractura (pies) / forma	Frecuencia óptima (MHz) para el apuntalante:		
	Fe ₂ O ₃	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	2450	2450	2450
70 / Cuadrada	1499	915	915
200 / Rectangular	915	915	915

Analizando la tabla anterior se puede observar que la frecuencia óptima de calentamiento no es constante con el largo en ninguno de los materiales estudiados. Para una longitud de fractura de 40 pies, la frecuencia óptima es de 2450 MHz para todos los apuntalantes, mientras que para una longitud de 70 pies la frecuencia óptima

disminuye a 1499 MHz para el apuntalante Fe_2O_3 y a 915 MHz para ALFE y JL-P. De igual forma se observa que para un largo de 200 pies todos los apuntalantes presentaron un valor de frecuencia óptima de 915 MHz. Resalta el hecho de que este esquema de calentamiento, para el yacimiento Cerro Negro, resulta particularmente sensible a la longitud de la fractura. La longitud de la fractura presenta una dependencia con la profundidad de penetración óptima (que es característico para cada material y frecuencia de radiación) aparentemente lineal, tal y como se muestra en la Figura N° C.29. Allí se presenta el valor de D_p promedio del apuntalante Fe_2O_3 con respecto al largo de la fractura. Este resultado podría ser útil para hacer un diseño de fractura bajo ciertas especificaciones de calentamiento, o bien para obtener un estimado de cómo calentar una fractura existente.

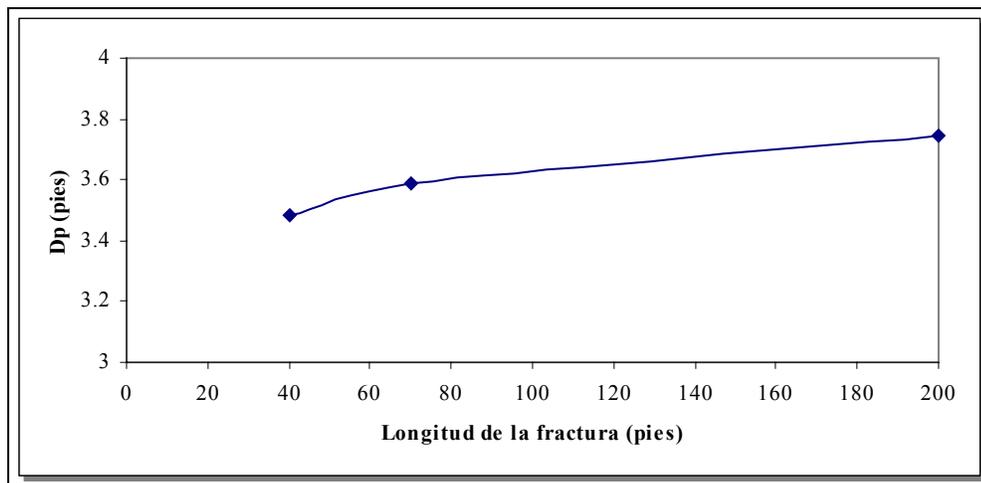


Figura N° C.29: Longitud de fractura vs. D_p para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento. Caso Cerro Negro (100 mD), calentando a 20 kW bajo el modelo Banda 1.

C.2.3 Análisis de los modelos de calentamiento en bandas de 10 y 20 pies de ancho (Banda 10 y Banda 20) y Radial, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento para el caso Cerro Negro.

En esta sección se presentan de manera sintetizada los resultados de las sensibilidades hechas a los modelos de calentamiento en bandas de 10 y de 20 pies de ancho, que en este estudio son llamados Banda 10 y Banda 20 y del modelo de calentamiento Radial. Los modelos de calentamiento Banda 10 y Banda 20 se consideran análogos al caso Banda 1 (que fue detallado anteriormente), con la diferencia en el tamaño del área calentada, pero siempre tomando en cuenta que se calienta arena y apuntalante. El modelo de calentamiento radial se considera análogo al caso de utilizar una malla radial en vez de una malla cartesiana en donde el apuntalante es prácticamente despreciable. El caso para un calentamiento radial en un yacimiento sin fracturar ha sido estudiado en los trabajos de Ovalles y col.^[5] y Fonseca^[6].

Se realizaron simulaciones conceptuales variando los valores de la potencia y la frecuencia de radiación para cada uno de los tres apuntalantes estudiados, igual que en los modelos Banda 0 y Banda 1. De esta manera se obtienen los valores óptimos

de frecuencia de radiación y se escoge una potencia de calentamiento y un material apuntalante apropiados para los análisis posteriores. Por último se realizaron sensibilidades en el largo y en la altura de la fractura, para verificar los valores de los óptimos de la frecuencia de calentamiento en función de dicho parámetro en función de la longitud, así como el impacto de la altura en el diseño de una fractura.

C.2.3.1 Análisis de la potencia óptima de calentamiento para los modelos Banda 10, Banda 20 y Radial, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Para obtener el rango óptimo de potencias se analizó la variación en la producción acumulada de crudo en un tiempo de 20 años y la variación en la temperatura de la celda (24,23,2) que, como se mencionó anteriormente, corresponde a la temperatura más alta del modelo de simulación. Se tomó como criterio para la selección del rango de potencia aplicable que ésta temperatura no debe exceder los 500 °F.

De los resultados de las simulaciones conceptuales de un pozo con una fractura rellena con los apuntalantes estudiados: Fe_2O_3 , ALFE y JL-P, usando los datos del yacimiento Cerro Negro, y calentado bajo los modelos Banda 10, Banda 20 y Radial, se pueden extraer los siguientes análisis:

- Para los tres apuntalantes y modelos de calentamiento estudiados se observó un incremento tanto en la producción de crudo como en la temperatura de la celda (24,23,2) al aumentar la potencia de calentamiento.
- Se observó que, al variar la potencia desde 10 hasta 50 kW, todos los apuntalantes presentaron un máximo de temperatura en la frecuencia de 2450 MHz. Para el modelo Banda 10 se obtiene una temperatura superior a los 500 °F al calentar a 50 kW y 2450 MHz con el apuntalante ALFE, y al calentar a 50 kW en todas las frecuencias con el apuntalante JL-P, por lo que se estableció un rango de potencias de trabajo desde 10 hasta 40 kW. En los modelos Banda 20 y Radial no se observan temperaturas superiores a los 500 °F en ninguno de los casos. Sin embargo, para guardar la consistencia con los modelos de calentamiento analizados anteriormente, se escogió una potencia de calentamiento de 20 kW para realizar los análisis posteriores.

C.2.3.2 Análisis de la frecuencia óptima de radiación para los modelos Banda 10, Banda 20 y Radial, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Para la determinación de la frecuencia óptima de radiación de los tres modelos de calentamiento se analizó la variación en la producción acumulada de crudo en un tiempo de 20 años. A continuación, en las Figuras N° 4.30-32 se presentan los resultados para los apuntalantes Fe_2O_3 , ALFE y JL-P calentando a una potencia de 20 kW y variando la frecuencia de radiación entre los valores comerciales conocidos: 13,56, 40, 163, 915 y 2450 MHz para los modelos de calentamiento Banda 10, Banda 20 y Radial, respectivamente.

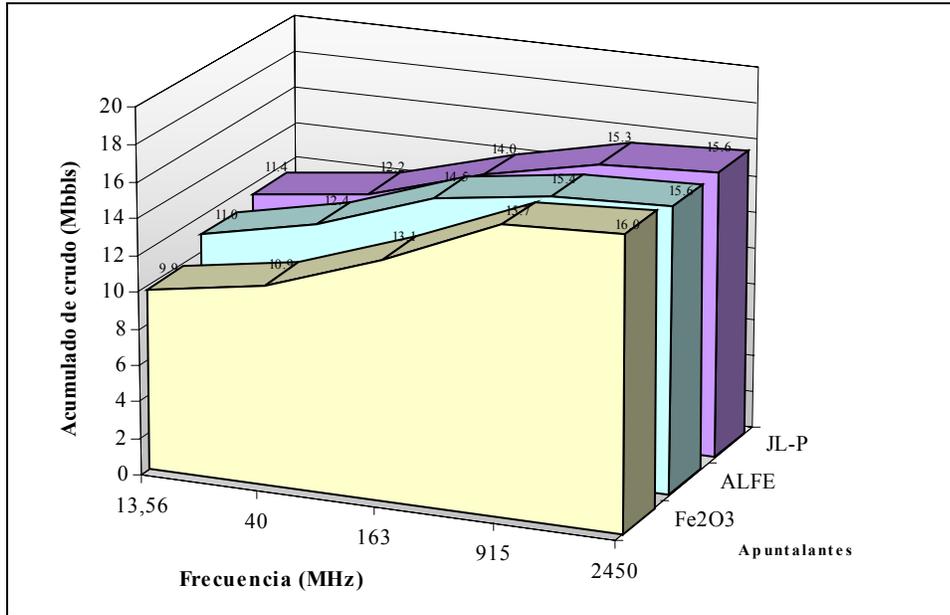


Figura N° 4.75: Producción acumulada de crudo en 20 años variando la frecuencia y el material apuntalante para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento en Banda 10 para el caso Cerro Negro (100 mD).

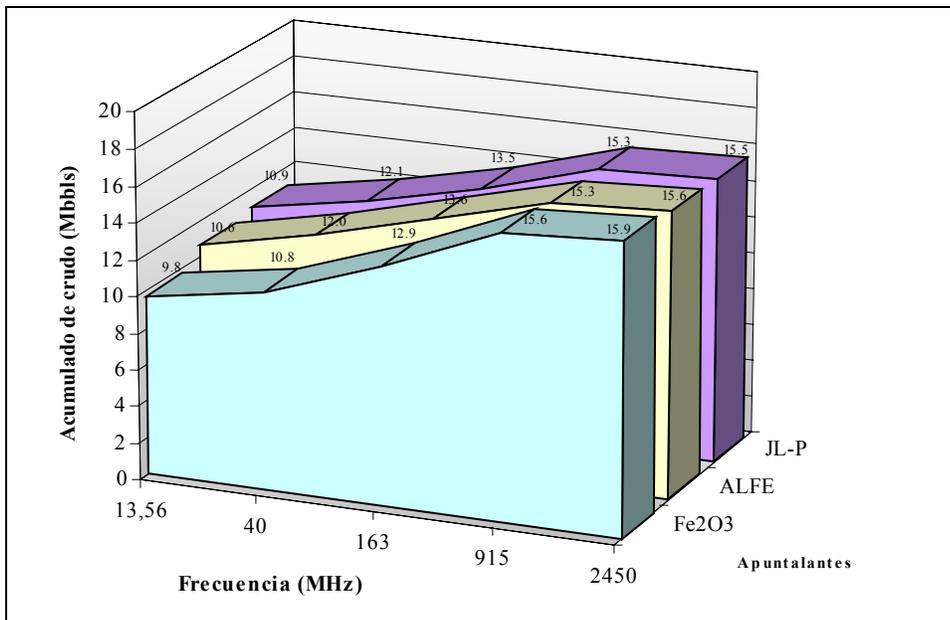


Figura N° C.31: Producción acumulada de crudo en 20 años variando la frecuencia y el material apuntalante para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento en Banda 20 para el caso Cerro Negro (100 mD).

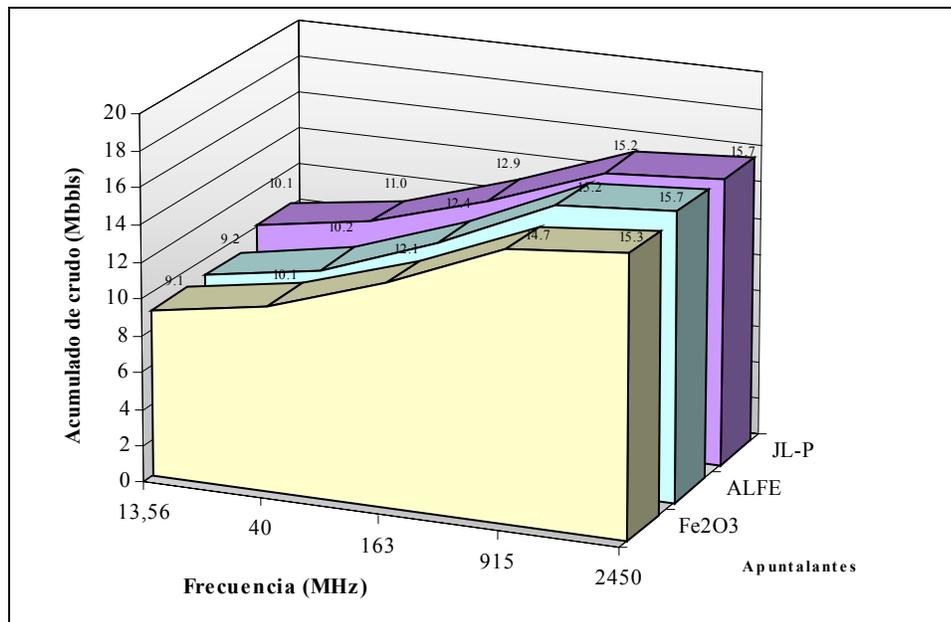


Figura N° C.32: Producción acumulada de crudo en 20 años variando la frecuencia y el material apuntalante para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento con calentamiento Radial para el caso Cerro Negro (100 mD).

Para los modelos Banda 10 y Banda 20 los mayores valores de acumulado de crudo se presentan en la frecuencia de 2450 MHz para los tres apuntalantes estudiados, siendo el apuntalante Fe₂O₃ quien presenta los mayores valores de producción acumulada en todas las frecuencias estudiadas. Por lo tanto se tomó este apuntalante como parte del esquema óptimo en ambos modelos de calentamiento.

De igual manera, para el modelo de calentamiento Radial se observan los mayores valores de acumulado de crudo en la frecuencia de 2450 MHz para los tres apuntalantes estudiados, observando que los apuntalantes ALFE y JL-P tienen los mayores valores de producción acumulada, siendo el JL-P quien tiene el mayor valor por muy poca diferencia. Por lo tanto se tomará este apuntalante como parte del esquema óptimo para el modelo de calentamiento Radial.

Se realizó un estudio detallado de la frecuencia óptima de calentamiento para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento, para lo cual se evaluaron otras frecuencias no comerciales entre los valores de 915 y 2450 MHz con los apuntalantes Fe₂O₃ para los modelos Banda 10 y Banda 20 y con JL-P para el modelo de calentamiento Radial. Los valores de las frecuencias no comerciales que se tomaron para este análisis son: 1015, 1499 y 1977 MHz. De igual manera se evaluaron frecuencias no comerciales para los otros apuntalantes de los modelos de calentamiento. Sin embargo, con excepción del apuntalante Fe₂O₃ que presentó la mayor producción en 1499 MHz para el modelo Banda 10, la frecuencia óptima se mantuvo constante en el valor de 2450 MHz.

Ya que los materiales calentados presentan valores de distancia de penetración (Dp) de magnitudes diferentes al ser radiados a la misma frecuencia, se calculó un valor de Dp como un promedio ponderado en función del área radiada de cada

material. El resultado de estos cálculos se presentan a continuación en la Tabla N° C.6 para los tres modelos de calentamiento estudiados.

Se puede observar que el valor de Dp de la arena calentada se aproxima al valor de la Arena Cerro Negro a medida que la zona radiada es mayor. Esto se debe a que el área calentada está compuesta por más arena que apuntalante, por lo que predomina el valor de Dp de la primera. El caso límite viene representado por el modelo Radial, en el cual el valor de Dp es igual al de la arena, con lo cual se puede tomar como despreciable la presencia del apuntalante para el calentamiento del yacimiento.

Tabla N° C.6: Valor del Dp de los materiales individuales y del área total calentada del yacimiento Cerro Negro, al ser calentados bajo los óptimos de los modelos Banda 10, Banda 20 y Radial.

Modelo de Calentamiento Banda 10			
Material	Ancho del área calentada (pies)	% que ocupa del área total	Dp del material (m)
Arena Cerro Negro	10.00	99.2%	5,07
Apuntalante Fe2O3	0.083	0.8%	3,66
Arena Cerro Negro + Apuntalante	10.083	100.0%	5,057
Modelo de Calentamiento Banda 20			
Material	Ancho del área calentada (pies)	% que ocupa del área total	Dp del material (m)
Arena Cerro Negro	20.00	99.6%	3,58
Apuntalante Fe2O3	0.083	0.4%	2,35
Arena Cerro Negro + Apuntalante	20.083	100.0%	3,575
Modelo de Calentamiento Radial			
Material	Ancho del área calentada (pies)	% que ocupa del área total	Dp del material (m)
Arena Cerro Negro	990.00	100.0%	3,58
Apuntalante JL-P	0.083	0.0%	0,0002
Arena Cerro Negro + Apuntalante	990.083	100.0%	3,580

A continuación se analizó de la producción acumulada de crudo en función del tiempo para los apuntalantes estudiados, calentados con una potencia de 20 kW y con la frecuencia óptima de radiación según el material. En las Figuras N° C.33-C.35 se presentan los resultados para los modelos de calentamiento Banda 10, Banda 20 y Radial, respectivamente.

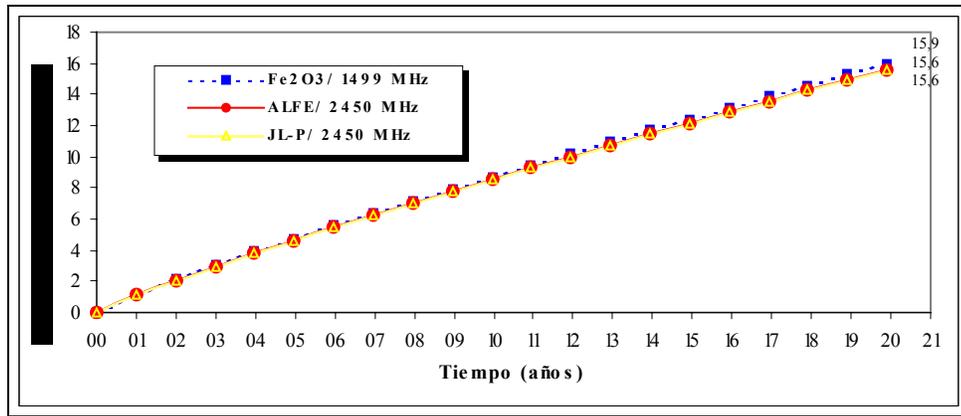


Figura N° C.33: Producción de crudo para los óptimos de frecuencia del modelo de calentamiento Banda 10, calentando a 20 kw y con los datos del yacimiento Cerro Negro (100 mD), para una fractura de 70 pies de largo rellena de los materiales apuntalantes estudiados.

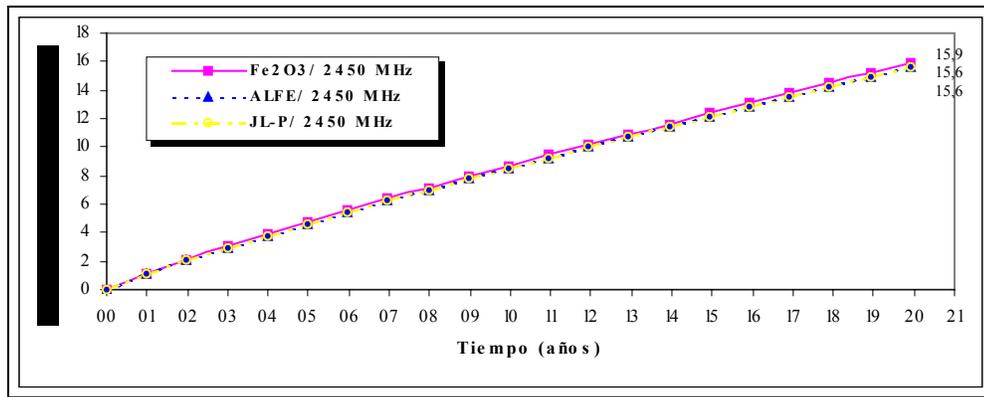


Figura N° C.34: Producción de crudo para los óptimos de frecuencia del modelo de calentamiento Banda 20, calentando a 20 kw y con los datos del yacimiento Cerro Negro (100 mD), para una fractura de 70 pies de largo rellena de los materiales apuntalantes estudiados.

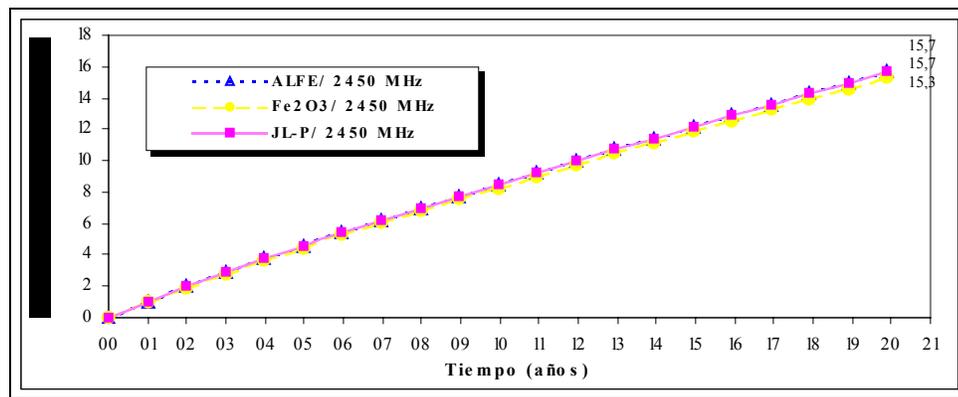


Figura N° C.35: Producción de crudo para los óptimos de frecuencia del modelo de calentamiento Radial, calentando a 20 kw y con los datos del yacimiento Cerro Negro (100 mD), para una fractura de 70 pies de largo rellena de los materiales apuntalantes estudiados.

De estas figuras se puede concluir que el apuntalante Fe₂O₃, con frecuencias de 1499 y 2450 MHz es quien produce una mayor cantidad de crudo para los modelos Banda 10 y Banda 20, respectivamente. Para el modelo de calentamiento Radial, el apuntalante JL-P con una frecuencia de 2450 MHz es quien aporta el mayor valor, por lo tanto se tomó este apuntalante como base del esquema óptimo.

C.2.3.3 Análisis de la Geometría de la Fractura para los modelos Banda 10, Banda 20 y Radial, bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento.

Se realizaron sensibilidades en la forma y la longitud de la fractura para los óptimos de los modelos de calentamiento Banda 10, Banda 20 y Radial. Se evaluaron fracturas de 40, 70 y 200 pies de largo y de altura constante y variable, tal y como se especificó en la sección de Metodología. Los resultados indicaron que se presenta la misma tendencia que para los modelos de calentamiento Banda 0 y Banda 1: a medida que aumenta el largo de la fractura, también aumenta la producción, y disminuye la diferencia entre fracturas de igual largo y diferente altura.

Se calculó el porcentaje de incremento con respecto al caso Yacimiento-Fractura para cada largo de fractura estudiado (40, 70 y 200 pies). Luego se calculó la diferencia entre los valores de altura constante y los de altura variable. Los resultados para los tres modelos de calentamiento estudiados se presentan en la Tabla N° C.7.

Tabla N° C.7: Diferencias entre los acumulados de crudo para fracturas de diferentes alturas para el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento del yacimiento Cerro Negro, bajo los modelos de calentamiento Banda 10, Banda 20 y Radial.

% Incremento: Esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento vs. Yacimiento-Fractura			
Modelo de Calentamiento Banda 10			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-cte - h-var)
40 pies	42.36%	41.15%	1.21%
70 pies	41.80%	40.66%	1.14%
200 pies	44.60%	44.10%	0.50%
Modelo de Calentamiento Banda 20			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-cte - h-var)
40 pies	42.17%	41.01%	1.16%
70 pies	41.09%	40.20%	0.89%
200 pies	44.06%	43.58%	0.48%
Modelo de Calentamiento Radial			
Longitud de la fractura (L)	Altura constante (h-cte)	Altura variable (h-var)	Diferencia de % Incremento (h-cte - h-var)
40 pies	44.60%	43.39%	1.21%
70 pies	40.16%	39.13%	1.03%
200 pies	42.72%	42.31%	0.41%

Al igual que para los modelos estudiados anteriormente, se observa que el porcentaje de incremento es ligeramente mayor en las fracturas de altura constante. También se ve una disminución en el porcentaje de incremento con el aumento de la longitud de la fractura para todas las geometrías. La diferencia entre los porcentajes de incremento de las fracturas de altura constante menos altura variable indican que el diseño de la altura de la fractura no es significativo, puesto que dichos valores se encuentran por debajo del 1% en todas las longitudes evaluadas y en todos los modelos de calentamiento. La mayor diferencia en el porcentaje de incremento se obtiene para los casos de fracturas de 40 pies de largo, por lo es importante evaluar el impacto de la altura para el diseño de fracturas con longitudes menores a este valor.

Seguidamente se analizaron diferentes longitudes de fractura variando la frecuencia de radiación entre los valores comerciales, al calentar a 20 kW bajo los modelos de calentamiento Banda 10, Banda 20 y Radial. Los resultados de la frecuencia óptima en función de los diferentes materiales y longitudes de fractura estudiados se presentan a continuación en la Tabla N° C.8.

En esta tabla se puede observar que la frecuencia óptima de calentamiento se mantiene entre los 915 y los 2450 MHz para todos los apuntalantes y longitudes de fractura estudiados, siendo 2450 MHz el valor que más se observa. Para el modelo Banda 20 el valor de 2450 MHz es constante para todos los casos, y en el modelo Radial se presentan frecuencias óptimas de 915 MHz para la mayor longitud de fractura y para todos los apuntalantes estudiados.

Tabla N° C.8: Frecuencia óptima para cada longitud de fractura y apuntalante, para el caso Cerro Negro bajo el esquema Yacimiento-Fractura-Calentamiento y los modelos Banda 10, Banda 20 y Radial

Frecuencia óptima (MHz) vs. Apuntalante			
Modelo de Calentamiento Banda 10			
Largo de la fractura (pies) / forma	Fe ₂ O ₃	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	2450	2450	2450
70 / Cuadrada	1499	2450	2450
200 / Rectangular	2450	915	2450
Modelo de Calentamiento Banda 20			
Largo de la fractura (pies) / forma	Fe ₂ O ₃	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	2450	2450	2450
70 / Cuadrada	2450	2450	2450
200 / Rectangular	2450	2450	2450
Modelo de Calentamiento Radial			
Largo de la fractura (pies) / forma	Fe ₂ O ₃	ALFE	JL-P
40 / MiniCuadrada	2450	2450	2450
70 / Cuadrada	2450	2450	2450
200 / Rectangular	915	915	915

ANEXOS

ANEXO 1

ARCHIVOS DE ENTRADA AL SIMULADOR STARS.

A continuación se presentan los archivos que contienen los datos de entrada al simulador STARS, tal y como se utilizaron para las simulaciones conceptuales de los yacimientos Tía Juana, Cerro Negro y Hamaca.

1. Archivo utilizado para la simulación conceptual del yacimiento Tía Juana en el STARS® (Versión 2002).

```

RESULTS SIMULATOR STARS
RESULTS SECTION INOUT

*TITLE1 'SIMULACION CONCEPTUAL DE UN POZO FRACTURADO Y CALENTADO'
*TITLE2 'CON MICROONDAS, CON LOS DATOS DEL YACIMIENTO TÍA JUANA'
*TITLE3 'FRACTURA CUADRADA, RELLENA DE APUNTALANTE FE2O3'
*TITLE4 'CALENTANDO BAJO EL MODELO BANDA 0 A 120 KW Y 163 MHZ'

*INUNIT *FIELD

*INTERRUPT *INTERACTIVE
*WRST *TIME
*WPRN *GRID *TIME
*WPRN *SECTOR *TIME
*WSRF *WELL 1
*WSRF *GRID *TIME
*WSRF *SECTOR *TIME
*WPRN *ITER *TIME
*OUTPRN *WELL *ALL
*OUTPRN *GRID *ALL
*OUTPRN *RES *ALL
*OUTPRN *ITER *NEWTON
*OUTSRF *WELL *COMPONENT *ALL *LAYER *ALL
*OUTSRF *GRID *PRES *SO *SW *SG *TEMP *OBHLOSS *CCHLOSS *FLUIDH

*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 24
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 48
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 72
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 96
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 120
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 144
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 168
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 192
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 216
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 240
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 264
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 288

```

*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 312
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 336
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 360
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 384
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 408
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 432
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 456
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 480
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 504
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 528
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 552
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 576
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 600
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 624
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 648
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 672
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 696
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 720
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 744
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 768
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 792
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 816
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 840
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 864
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 888
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 912
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 936
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 960
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 984
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1008
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1032
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1056
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1080
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1104
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1128
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1152
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1176
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1200
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1224
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1248
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1272
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1296
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1320
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1344
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1368
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1392
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1416
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1440
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1464
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1488
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1512
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1536
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1560
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1584

*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1608
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1632
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1656
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1680
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1704
*OUTSRF *SPECIAL BLKVAR TEMP 0 1728

*XDR *ON
*PRNTORIEN 2 0
*PRINT_REF *ON
*OUTSOLVR *OFF
*MAXERROR 20
*SR2PREC *DOUBLE

RESULTS XOFFSET 0.
RESULTS YOFFSET 0.
RESULTS ROTATION 0

GRID VARI 24 24 3
KDIR DOWN
DI IVAR
300. 2*150. 14*25. 3*10. 6. 3. 1. 0.083

DJ JVAR
300. 2*150. 14*25. 3*10. 6. 3. 1. 0.083

DK KVAR
50. 40. 50.

DEPTH TOP 1 1 1 1000.

**\$ RESULTS PROP NULL Units: Dimensionless
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 1 Maximum Value: 1
**\$ 0 = NULL block. 1 = Active block
NULL CON 1.

**\$ RESULTS PROP PINCHOUTARRAY Units: Dimensionless
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 1 Maximum Value: 1
**\$ 0 = PINCHED block. 1 = Active block
PINCHOUTARRAY CON 1.
RESULTS SECTION GRID
RESULTS PINCHOUT-VAL 0.0002 'ft'
RESULTS SECTION NETPAY
RESULTS SECTION NETGROSS
RESULTS SECTION POR

RESULTS SPEC 'Porosity'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL 0
RESULTS SPEC REGION 'All Layers (Whole Grid)'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 0
RESULTS SPEC LAYERNUMB 0
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 0.23

RESULTS SPEC STOP

**\$ RESULTS PROP POR Units: Dimensionless
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 0.23 Maximum Value: 0.46
POR IJK
1:24 1:24 1:3 0.23
24:24 16:24 1:3 0.46
RESULTS SECTION PERMS

RESULTS SPEC 'Permeability K'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL 0
RESULTS SPEC REGION 'All Layers (Whole Grid)'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 0
RESULTS SPEC LAYERNUMB 0
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 900
RESULTS SPEC STOP

RESULTS SPEC 'Permeability I'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL 0
RESULTS SPEC REGION 'All Layers (Whole Grid)'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 0
RESULTS SPEC LAYERNUMB 0
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 900
RESULTS SPEC STOP

RESULTS SPEC 'Permeability J'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL 0
RESULTS SPEC REGION 'All Layers (Whole Grid)'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 0
RESULTS SPEC LAYERNUMB 0
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 900
RESULTS SPEC STOP

**\$ RESULTS PROP PERMI Units: md
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 100 Maximum Value: 100000
PERMI IJK
1:24 1:24 1:3 900
24:24 16:24 1:3 100000

**\$ RESULTS PROP PERMJ Units: md
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 100 Maximum Value: 100000
PERMJ IJK
1:24 1:24 1:3 900
24:24 16:24 1:3 100000

**\$ RESULTS PROP PERMK Units: md
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 100 Maximum Value: 100000
PERMK IJK
1:24 1:24 1:3 900
24:24 16:24 1:3 100000
RESULTS SECTION TRANS

RESULTS SECTION FRACS
 RESULTS SECTION GRIDNONARRAYS
 RESULTS SECTION VOLMOD
 RESULTS SECTION VATYPE
 RESULTS SECTION SECTORLEASE
 **\$ SECTORARRAY 'Sector1' Definition.
 SECTORARRAY 'Sector1' IJK
 1:24 1:24 1:3 0
 24:24 16:24 1:3 1

RESULTS SECTION THTYPE
 END-GRID

ROCKTYPE 1
 CPOR 3.2E-06
 ROCKCP 16.7 0.0189
 THCONR 106.6
 THCONW 9.14
 THCONO 0.13
 THCONG 0.48
 *THCONMIX *TEMPER
 HLOSST 145.
 HLOSSTDIF 0.01
 HLOSSPROP +K 35. 24.
 -K 35. 24.

ROCKTYPE 2
 CPOR 3.2E-06
 ROCKCP 16.7 0.0189
 THCONR 231.328
 THCONW 9.14
 THCONO 0.13
 THCONG 0.48
 *THCONMIX *TEMPER
 HLOSST 145.
 HLOSSTDIF 0.01
 HLOSSPROP +K 35. 24.
 -K 35. 24.

**\$ RESULTS PROP THTYPE Units: Dimensionless
 **\$ RESULTS PROP Minimum Value: 1 Maximum Value: 2
 THTYPE IJK
 1:24 1:24 1:3 1
 24:24 16:24 1:3 2

RESULTS SECTION GRIDOTHER
 RESULTS SECTION MODEL
 *MODEL 3 3 3 1
 *COMPNAME 'AGUA' 'CRUDO' 'GASSOL'
 *KV1 0.E+00 1.000000E+06 7.9114E+04
 *KV2 0.E+00 5.04E-01 0.E+00
 *KV3 0.E+00 -1.4019E+03 0.E+00
 *KV4 0.E+00 -1.4539E+04 -1.58371E+03
 *KV5 0.E+00 -4.60E+02 -4.4678E+02

```

*CMM      0 465 20
*PCRIT    0.0E+0 1.242E+3 6.89E+2
*TCRIT    0.0E+0 1.56E+2 -8.17E+1
*CPG1     0.0E+0 6.04E+1 5.55E+0
*CPG2     0.0E+0 3.67E-1 0.0E+0
*CPG3     0.0E+0 -8.21E-5 0.0E+0
*CPG4     0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0
*HVR      0 3479.999999999999 525.6500000000001
*EV       0 0.38 0.38
*PRSR     1350
*TEMR     145
*PSURF    1.47E+1
*TSURF    6.0E+1

```

```

*MOLDEN   0.0E+0 1.29E-1 1.05E+0
*CP       0.0E+0 3.77E-6 4.16E-3
*CT1      0.0E+0 3.17E-4 3.73E-4
*CT2      0.0E+0 2.32E-7 0.0E+0

```

*VISCTABLE

100	0	311.46	0.016
200	0	16.06	0.015
300	0	1.81	0.014
400	0	0.34	0.013
500	0	0.09	0.012

RESULTS SECTION MODELARRAYS
RESULTS SECTION ROCKFLUID

*ROCKFLUID

*RPT 1

*SWT

** SW KRW KROW PCOG

0.380000	0.000000	1.000000	0.000000
0.400000	0.013000	0.582000	0.000000
0.500000	0.031000	0.309000	0.000000
0.600000	0.074000	0.117000	0.000000
0.700000	0.091000	0.040000	0.000000
0.733000	0.110000	0.009000	0.000000
0.750000	0.115000	0.000000	0.000000

*SLT

** SL KRG KROG PCOG

0.600000	0.250000	0.000000	0.000000
0.650000	0.190000	0.080000	0.000000
0.700000	0.142000	0.090000	0.000000
0.750000	0.105000	0.099000	0.000000
0.800000	0.076000	0.111000	0.000000
0.850000	0.053000	0.175000	0.000000
0.900000	0.034000	0.311000	0.000000
0.950000	0.017000	0.562000	0.000000

1.000000 0.000000 1.000000 0.000000

*KRTEMTAB *SORW *SWR *SORG *KROCW *KRWRO

** Temp	Sorw	Swr	Sorg	Krocw	Krwro
150.	0.25	0.38	0.315	1.	0.06
300.	0.155	0.51	0.25	0.65	0.1
450.	0.065	0.66	0.14	0.4	0.16
600.	0.005	0.79	0.04	0.24	0.25

*RPT 2

*SWT

0.000000 0.000000 1.000000 0.000000
1.000000 1.000000 0.000000 0.000000

*SLT

0.000000 1.000000 0.000000 0.000000
1.000000 0.000000 1.000000 0.000000

*MODBUILDER

*TYPE:1_KRWRO_KROCW_KRGRO_KROCG_SWCON_SGCON_SWCR_SGCR_SORW_SORG
_SOIRW_SOIRG_NW_NOW_NG_NOG *1_____ **\$ ModelBuilder passed through
this Keyword

*MODBUILDER

*TYPE:1_SET:1_KRWRO_KROCW_KRGRO_KROCG_SWCON_SGCON_SWCR_SGCR_SORW
_SORG_SOIRW_SOIRG_NW_NOW_NG_NOG *1_1_____ **\$ ModelBuilder passed
through this Keyword

*MODBUILDER

*TYPE:2_KRWRO_KROCW_KRGRO_KROCG_SWCON_SGCON_SWCR_SGCR_SORW_SORG
_SOIRW_SOIRG_NW_NOW_NG_NOG *2_____ **\$ ModelBuilder passed through
this Keyword

RESULTS SECTION ROCKARRAYS

**\$ RESULTS PROP KRTYPE Units: Dimensionless

**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 1 Maximum Value: 2

KRTYPE IJK

1:24 1:24 1:3 1

24:24 16:24 1:3 2

RESULTS SECTION INIT

*INITIAL

*VERTICAL *OFF

RESULTS SECTION INITARRAYS

**\$ RESULTS PROP SW Units: Dimensionless

**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 0.375 Maximum Value: 0.375

SW CON 0.375

**\$ RESULTS PROP PRES Units: psi

**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 1300 Maximum Value: 1300

PRES CON 1300.

**\$ RESULTS PROP TEMP Units: F

**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 145 Maximum Value: 145

TEMP CON 145.

**\$ RESULTS PROP MFRAC_OIL 'CRUDO' Units: Dimensionless
 **\$ RESULTS PROP Minimum Value: 0.74 Maximum Value: 0.74
 MFRAC_OIL 'CRUDO' CON 0.74

**\$ RESULTS PROP MFRAC_OIL 'GASSOL' Units: Dimensionless
 **\$ RESULTS PROP Minimum Value: 0.26 Maximum Value: 0.26
 MFRAC_OIL 'GASSOL' CON 0.26

**\$ RESULTS PROP MFRAC_WAT 'AGUA' Units: Dimensionless
 **\$ RESULTS PROP Minimum Value: 1 Maximum Value: 1
 MFRAC_WAT 'AGUA' CON 1.

RESULTS SECTION NUMERICAL

*NUMERICAL
 *DTMAX 30.
 *NORTH 8
 *SDEGREE 1
 *AIM *STAB *BACK 20
 *NORM *PRESS 60.
 *SATUR 0.1
 *Y 0.15
 *X 0.15
 *W 0.15
 *MATBALTOL 1

RESULTS SECTION NUMARRAYS
 RESULTS SECTION GBKEYWORDS
 RUN

DATE 2000 01 01.
 DTWELL 0.0001

WELL 1 'PRODUCTOR1' FRAC 1
 PRODUCER 'PRODUCTOR1'
 OPERATE MAX STO 500. CONT
 OPERATE MIN BHP 400. CONT
 GEOMETRY K 0.01 0.249 1. 0.
 PERF GEO 'PRODUCTOR1'
 24 24 2 1.
 SHUTIN 'PRODUCTOR1'

DATE 2000 01 02.
 OPEN 'PRODUCTOR1'
 **\$ RESULTS PROP HEATR Units: Btu/day
 **\$ RESULTS PROP Minimum Value: 0.13 Maximum Value: 138458

** Calentando a $P_o = 120$ KW y $f = 163$ MHz
 HEATR IJK
 ** Potencia absorbida por la fractura (Apuntalante Fe2O3)
 24:24 23:23 2:2 14047.13
 24:24 22:22 2:2 55382.14
 24:24 21:21 2:2 106989.22

24:24 20:20 2:2	167661.42
24:24 19:19 2:2	155203.78
24:24 18:18 2:2	143671.78
24:24 17:17 2:2	314194.54
24:24 16:16 2:2	543473.91
24:24 15:15 2:2	346054.19
24:24 14:14 2:2	217600.58
24:24 13:13 2:2	136828.32
24:24 12:12 2:2	86038.33
24:24 11:11 2:2	54101.33
24:24 10:10 2:2	34019.18
24:24 9:9 2:2	21391.43
24:24 8:8 2:2	13451.04
24:24 7:7 2:2	8458.08
24:24 6:6 2:2	5318.48
24:24 5:5 2:2	3344.29
24:24 4:4 2:2	2102.90
24:24 3:3 2:2	3342.12
24:24 2:2 2:2	206.59
24:24 1:1 2:2	13.56

DATE 2001 01 01.

DATE 2002 01 01.

DATE 2003 01 01.

DATE 2004 01 01.

DATE 2005 01 01.

DATE 2006 01 01.

DATE 2007 01 01.

DATE 2008 01 01.

DATE 2009 01 01.

DATE 2010 01 01.

DATE 2011 01 01.

DATE 2012 01 01.

DATE 2013 01 01.

DATE 2014 01 01.

DATE 2015 01 01.

DATE 2016 01 01.

DATE 2017 01 01.

DATE 2018 01 01.

DATE 2019 01 01.

DATE 2020 01 01.

STOP

***** TERMINATE SIMULATION

RESULTS SECTION WELLDATA

RESULTS SECTION PERFS

2. Archivo utilizado para la simulación conceptual del yacimiento Cerro Negro en el STARS® (Versión 2001).

RESULTS SIMULATOR STARS

RESULTS SECTION INOUT

*TITLE1 'SIMULACION CONCEPTUAL DE UN POZO FRACTURADO Y CALENTADO'

*TITLE2 'CON MICROONDAS, CON LOS DATOS DEL YACIMIENTO CERRO NEGRO'

*TITLE3 'FRACTURA CUADRADA, RELLENA DE APUNTALANTE FE2O3'

*TITLE4 'CALENTANDO BAJO EL MODELO BANDA 0 A 20 KW Y 163 MHZ'

*INUNIT *FIELD

*INTERRUPT *INTERACTIVE

*WRST *TIME

*WPRN *GRID *TIME

*WPRN *SECTOR *TIME

*WSRF *WELL 1

*WSRF *GRID *TIME

*WSRF *SECTOR *TIME

*WPRN *ITER *TIME

*OUTPRN *WELL *ALL

*OUTPRN *GRID *ALL

*OUTPRN *RES *ALL

*OUTPRN *ITER *NEWTON

*OUTSRF *WELL *COMPONENT *ALL *LAYER *ALL

*OUTSRF *GRID *PRES *SO *SW *SG *TEMP *OBHLOSS *CCHLOSS *FLUIDH

*XDR *ON

*PRNTORIEN 2 0

*PRINT_REF *ON

*OUTSOLVR *OFF

*MAXERROR 20

*SR2PREC *DOUBLE

RESULTS XOFFSET 0.
RESULTS YOFFSET 0.
RESULTS ROTATION 0

GRID VARI 24 24 3
KDIR DOWN
DI IVAR
300. 2*150. 14*25. 3*10. 6. 3. 1. 0.083

DJ JVAR
300. 2*150. 14*25. 3*10. 6. 3. 1. 0.083

DK KVAR
50. 40. 50.

DEPTH TOP 1 1 1 1000.

**\$ RESULTS PROP NULL Units: Dimensionless
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 1 Maximum Value: 1
**\$ 0 = NULL block, 1 = Active block
NULL CON 1.

**\$ RESULTS PROP PINCHOUTARRAY Units: Dimensionless
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 1 Maximum Value: 1
**\$ 0 = PINCHED block, 1 = Active block
PINCHOUTARRAY CON 1.
RESULTS SECTION GRID
RESULTS PINCHOUT-VAL 0.0002 'ft'
RESULTS SECTION NETPAY
RESULTS SECTION NETGROSS
RESULTS SECTION POR

RESULTS SPEC 'Porosity'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL 0
RESULTS SPEC REGION 'All Layers (Whole Grid)'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 0
RESULTS SPEC LAYERNUMB 0
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 0.23
RESULTS SPEC STOP

**\$ RESULTS PROP POR Units: Dimensionless
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 0.32 Maximum Value: 0.46
POR IJK
1:24 1:24 1:3 0.32
24:24 16:24 1:3 0.46
RESULTS SECTION PERMS

RESULTS SPEC 'Permeability K'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL 0
RESULTS SPEC REGION 'All Layers (Whole Grid)'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 0
RESULTS SPEC LAYERNUMB 0
RESULTS SPEC PORTYPE 1

RESULTS SPEC CON 900
RESULTS SPEC STOP

RESULTS SPEC 'Permeability I'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL 0
RESULTS SPEC REGION 'All Layers (Whole Grid)'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 0
RESULTS SPEC LAYERNUMB 0
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 900
RESULTS SPEC STOP

RESULTS SPEC 'Permeability J'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL 0
RESULTS SPEC REGION 'All Layers (Whole Grid)'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 0
RESULTS SPEC LAYERNUMB 0
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 900
RESULTS SPEC STOP

**\$ RESULTS PROP PERMI Units: md
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 100 Maximum Value: 100000
PERMI IJK
1:24 1:24 1:3 100
24:24 16:24 1:3 100000

**\$ RESULTS PROP PERMJ Units: md
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 100 Maximum Value: 100000
PERMJ IJK
1:24 1:24 1:3 100
24:24 16:24 1:3 100000

**\$ RESULTS PROP PERMK Units: md
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 100 Maximum Value: 100000
PERMK IJK
1:24 1:24 1:3 100
24:24 16:24 1:3 100000

RESULTS SECTION TRANS
RESULTS SECTION FRACS
RESULTS SECTION GRIDNONARRAYS
RESULTS SECTION VOLMOD
RESULTS SECTION VATYPE
RESULTS SECTION SECTORLEASE
**\$ SECTORARRAY 'Sector1' Definition.
SECTORARRAY 'Sector1' IJK
1:24 1:24 1:3 0
24:24 16:24 1:3 1

RESULTS SECTION THTYPE
END-GRID

ROCKTYPE 1
PRPOR 1300.

CPOR 9.E-05
 THCONR 106.6
 THCONW 8.6
 THCONO 1.8
 THCONG 0.025
 HLOSSTDIFF 0.01
 HLOSSPROP +K 30. 30.
 -K 30. 30.

ROCKTYPE 2
 PRPOR 1300.
 CPOR 9.E-05
 THCONR 231.328
 THCONW 8.6
 THCONO 1.8
 THCONG 0.025
 HLOSSTDIFF 0.01
 HLOSSPROP +K 30. 30.
 -K 30. 30.

**\$ RESULTS PROP THTYPE Units: Dimensionless
 **\$ RESULTS PROP Minimum Value: 1 Maximum Value: 2
 THTYPE IJK
 1:24 1:24 1:3 1
 24:24 16:24 1:3 2

RESULTS SECTION GRIDOTHER
 RESULTS SECTION MODEL
 *MODEL 3 3 3 1
 *COMPNAME 'WATER' 'GAS_OIL' 'HEVY_OIL'
 *KV1 0.E+00 7.911000E+06 3.97800E+05
 *KV4 0.E+00 -1.584E+03 -1.2100E+04
 *KV5 0.E+00 -4.468E+02 -1.72E+02
 *CMM 0 21.72 514.2
 *PCRIT 0.0E+0 7.408E+2 1.291E+2
 *TCRIT 0.0E+0 -7.36E+1 1.356E+3
 *CPG1 0.0E+0 4.394E+0 7.615E+1
 *CPG2 0.0E+0 9.041E-3 3.906E-1
 *CPL1 0.0E+0 0.0E+0 1.832E+2
 *CPL2 0.0E+0 0.0E+0 2.571E-1
 *PRSR 14.7
 *TEMR 60
 *PSURF 1.47E+1
 *TSURF 7.7E+1

*MOLDEN 0.0E+0 5.55E-1 1.235E-1
 *CP 0.0E+0 3.14E-3 3.19E-6
 *CT1 0.0E+0 2.86E-4 2.86E-4
 *CT2 0.0E+0 0.0E+0 1.06E-7

*VISCTABLE
 41 4.09656 38557.7 1256370
 59 1.46185 6248.42 203599.7
 77 0.934907 1650.352 53775.4

95	0.709074	577.314	18811.32
113	0.583612	242.459	7900.33
122	0.5397	165.284	5385.65
140	0.461485	83.0596	2706.43
185	0.3333524	20.61444	671.705
230	0.253672	6.9405	226.151
275	0.202127	2.840317	92.5494
320	0.1651215	1.331314	43.3798
365	0.1386388	0.68955	22.46844
410	0.117944	0.385577	12.5637
455	0.1028452	0.2290727	7.46415
500	0.0902383	0.1429487	4.65787
545	0.0803763	0.0929069	3.027295
590	0.0739363	0.0624842	2.035997
635	0.0678681	0.0432675	1.409836
680	0.0627799	0.03072456	1.001135

*VSMIXCOMP 'GAS_OIL'
 *VSMIXENDP 0.01 0.3
 *VSMIXFUNC 0.01 0.02422755 0.0404554 0.0567363 0.077768 0.099993 0.122218 0.1581854
 0.1954327 0.249193 0.3

RESULTS SECTION MODELARRAYS
 RESULTS SECTION ROCKFLUID

*ROCKFLUID
 *RPT 1 *WATWET *STONE2
 *SWT
 ** SW KRW KROW PCOG
 0.120000 0.000000 1.000000 3.3036262
 0.126000 0.000000 1.000000 2.9884012
 0.144000 0.000946 0.870964 2.4065156
 0.152000 0.001183 0.841395 2.0322587
 0.161000 0.001629 0.792501 1.8056372
 0.171000 0.002084 0.739605 1.5952919
 0.183000 0.002518 0.680769 1.3877095
 0.230000 0.004083 0.472063 0.8674519
 0.261000 0.005224 0.355631 0.668925
 0.300000 0.006776 0.240000 0.502418
 0.328000 0.007907 0.178000 0.4182294
 0.346000 0.008690 0.143000 0.374735
 0.361000 0.009419 0.117000 0.343431
 0.374000 0.010000 0.097600 0.319346
 0.385000 0.010617 0.082600 0.300875
 0.394000 0.011117 0.071100 0.286919
 0.402000 0.011668 0.062300 0.275306
 0.410000 0.012218 0.053900 0.264378
 0.416000 0.012503 0.047700 0.256599
 0.426000 0.013122 0.038300 0.2443729
 0.434000 0.013583 0.031600 0.2352031
 0.441000 0.014060 0.025600 0.227595
 0.456000 0.015276 0.016600 0.2124741
 0.466000 0.016032 0.010600 0.203208
 0.473000 0.016788 0.006800 0.197075
 0.478000 0.017418 0.004800 0.192861

0.483000	0.017824	0.002800	0.188780
0.486000	0.018030	0.001400	0.1863929
0.489000	0.018450	0.000700	0.184050
0.494000	0.018852	0.000000	0.1802359
1.000000	1.000000	0.000000	0.000000

*SLT

** SL	KRG	KROG	PCOG
0.150000	1.000000	0.000000	0.000000
0.160000	1.000000	0.000000	0.000000
0.170000	1.000000	0.000000	0.000000
0.180000	0.855700	0.000000	0.000000
0.190000	0.732200	0.000000	0.000000
0.200000	0.626500	0.000000	0.000000
0.210000	0.536100	0.000000	0.000000
0.220000	0.458700	0.000000	0.000000
0.230000	0.392500	0.000000	0.000000
0.240000	0.335900	0.000000	0.000000
0.250000	0.287400	0.000000	0.000000
0.260000	0.245900	0.000000	0.000000
0.270000	0.201400	0.000000	0.000000
0.280000	0.180100	0.000000	0.000000
0.290000	0.154100	0.000000	0.000000
0.300000	0.131800	0.000000	0.000000
0.310000	0.112800	0.000000	0.000000
0.320000	0.096530	0.000000	0.000000
0.330000	0.082600	0.005283	0.000000
0.340000	0.070670	0.010570	0.000000
0.350000	0.060470	0.015850	0.000000
0.360000	0.051750	0.021130	0.000000
0.370000	0.044280	0.026420	0.000000
0.380000	0.037890	0.031700	0.000000
0.390000	0.032420	0.036980	0.000000
0.400000	0.027740	0.042260	0.000000
0.410000	0.023740	0.047550	0.000000
0.420000	0.020310	0.052830	0.000000
0.430000	0.017380	0.058110	0.000000
0.440000	0.014870	0.063400	0.000000
0.450000	0.012730	0.068680	0.000000
0.460000	0.010890	0.073960	0.000000
0.470000	0.009317	0.079250	0.000000
0.480000	0.007973	0.084530	0.000000
0.490000	0.006822	0.089810	0.000000
0.500000	0.005837	0.095090	0.000000
0.510000	0.004995	0.100400	0.000000
0.520000	0.004274	0.105700	0.000000
0.530000	0.003657	0.110900	0.000000
0.540000	0.003129	0.116200	0.000000
0.550000	0.002678	0.121500	0.000000
0.560000	0.002291	0.126800	0.000000
0.570000	0.001961	0.132100	0.000000
0.580000	0.001678	0.137400	0.000000
0.590000	0.001436	0.142600	0.000000
0.600000	0.001228	0.147900	0.000000

0.610000	0.001051	0.153200	0.000000
0.620000	0.000899	0.158500	0.000000
0.630000	0.000770	0.163800	0.000000
0.640000	0.000659	0.169100	0.000000
0.650000	0.000564	0.174600	0.000000
0.660000	0.000482	0.179600	0.000000
0.670000	0.000413	0.184900	0.000000
0.680000	0.000353	0.190200	0.000000
0.690000	0.000302	0.195500	0.000000
0.700000	0.000259	0.200800	0.000000
0.710000	0.000221	0.206000	0.000000
0.720000	0.000189	0.211300	0.000000
0.730000	0.000162	0.216600	0.000000
0.740000	0.000139	0.221900	0.000000
0.750000	0.000119	0.227200	0.000000
0.760000	0.000102	0.232500	0.000000
0.770000	0.000087	0.237700	0.000000
0.780000	0.000074	0.243000	0.000000
0.790000	0.000064	0.248300	0.000000
0.800000	0.000054	0.253600	0.000000
0.810000	0.000047	0.258900	0.000000
0.820000	0.000040	0.264200	0.000000
0.830000	0.000034	0.269400	0.000000
0.840000	0.000029	0.274700	0.000000
0.850000	0.000025	0.280000	0.000000
0.860000	0.000021	0.315000	0.000000
0.870000	0.000018	0.340000	0.000000
0.880000	0.000016	0.370000	0.000000
0.890000	0.000013	0.410000	0.000000
0.898000	0.000011	0.440000	0.000000
0.900000	0.000010	0.450000	0.000000
0.910000	0.000008	0.480000	0.000000
0.920000	0.000007	0.520000	0.000000
0.930000	0.000006	0.560000	0.000000
0.940000	0.000005	0.610000	0.000000
0.950000	0.000005	0.660000	0.000000
0.960000	0.000005	0.720000	0.000000
0.970000	0.000005	0.790000	0.000000
0.980000	0.000005	0.850000	0.000000
0.990000	0.000005	0.930000	0.000000
1.000000	0.000000	1.000000	0.000000

*KRTEMTAB *SWR *SORW *SORG

** Temp	Swr	Sorw	Sorg
129.	0.126	0.511	0.67
179.	0.184	0.505	0.547
229.	0.23	0.474	0.511
279.	0.277	0.443	0.474

*RPT 2

*SWT

0.000000	0.000000	1.000000	0.000000
1.000000	1.000000	0.000000	0.000000

```

*SLT
0.000000 1.000000 0.000000 0.000000
1.000000 0.000000 1.000000 0.000000

*MODBUILDER
*TYPE:1_KRWRO_KROCW_KRGRO_KROCG_SWCON_SGCON_SWCR_SGCR_SORW_SORG
_SOIRW_SOIRG_NW_NOW_NG_NOG *1_____ **$ ModelBuilder passed through
this Keyword

*MODBUILDER
*TYPE:1_SET:1_KRWRO_KROCW_KRGRO_KROCG_SWCON_SGCON_SWCR_SGCR_SORW
_SORG_SOIRW_SOIRG_NW_NOW_NG_NOG *1_1_____ **$ ModelBuilder passed
through this Keyword

*MODBUILDER
*TYPE:2_KRWRO_KROCW_KRGRO_KROCG_SWCON_SGCON_SWCR_SGCR_SORW_SORG
_SOIRW_SOIRG_NW_NOW_NG_NOG *2_____ **$ ModelBuilder passed through
this Keyword

RESULTS SECTION ROCKARRAYS

**$ RESULTS PROP KRTYPE Units: Dimensionless
**$ RESULTS PROP Minimum Value: 1 Maximum Value: 2
KRTYPE IJK
      1:24 1:24 1:3 1
      24:24 16:24 1:3 2
RESULTS SECTION INIT
*INITIAL
*VERTICAL *OFF
**$ Data for PVT Region 0
**$ -----

RESULTS SECTION INITARRAYS

**$ RESULTS PROP PRES Units: psi
**$ RESULTS PROP Minimum Value: 1000 Maximum Value: 1000
PRES CON 1000.

**$ RESULTS PROP TEMP Units: F
**$ RESULTS PROP Minimum Value: 129 Maximum Value: 129
TEMP CON 129.

**$ RESULTS PROP MFRAC_GAS 'GAS_OIL' Units: Dimensionless
**$ RESULTS PROP Minimum Value: 0.2879 Maximum Value: 0.2879
MFRAC_OIL 'GAS_OIL' CON 0.2879

**$ RESULTS PROP MFRAC_OIL 'HEVY_OIL' Units: Dimensionless
**$ RESULTS PROP Minimum Value: 0.7121 Maximum Value: 0.7121
MFRAC_OIL 'HEVY_OIL' CON 0.7121

RESULTS SECTION NUMERICAL
*NUMERICAL
*DTMAX 30.
*NORTH 8

```

*SDEGREE 1
*AIM *STAB *BACK 20
*NORM *PRESS 60.
*SATUR 0.1
*Y 0.15
*X 0.15
*W 0.15
*MATBALTOL 1
*MAXPRES 1.450377E+05

RESULTS SECTION NUMARRAYS
RESULTS SECTION GBKEYWORDS
RUN

DATE 2000 01 01.
DTWELL 0.01
WELL 1 'PRODUCTOR1' FRAC 1
PRODUCER 'PRODUCTOR1'
OPERATE MAX STO 500. CONT
OPERATE MIN BHP 400. CONT
GEOMETRY K 0.01 0.249 1. 0.
PERF GEO 'PRODUCTOR1'
24 24 2 1.
SHUTIN 'PRODUCTOR1'

TIME 1

DTWELL 0.0001
OPEN 'PRODUCTOR1'
** Calentando a $P_o = 20$ KW y $f = 163$ MHz
HEATR IJK
** Potencia absorbida por la fractura (Apuntalante Fe2O3)

24:24 23:23 2:2	2341
24:24 22:22 2:2	9230
24:24 21:21 2:2	17832
24:24 20:20 2:2	27944
24:24 19:19 2:2	25867
24:24 18:18 2:2	23945
24:24 17:17 2:2	52366
24:24 16:16 2:2	43174
24:24 15:15 2:2	35595
24:24 14:14 2:2	29347
24:24 13:13 2:2	24196
24:24 12:12 2:2	19949
24:24 11:11 2:2	18169
24:24 10:10 2:2	14778
24:24 9:9 2:2	11887
24:24 8:8 2:2	9561
24:24 7:7 2:2	7690
24:24 6:6 2:2	6185
24:24 5:5 2:2	4975
24:24 4:4 2:2	4002
24:24 3:3 2:2	11996
24:24 2:2 2:2	3248

24:24 1:1 2:2 1118

DATE 2001 01 01.

DATE 2002 01 01.

DATE 2003 01 01.

DATE 2004 01 01.

DATE 2005 01 01.

DATE 2006 01 01.

DATE 2007 01 01.

DATE 2008 01 01.

DATE 2009 01 01.

DATE 2010 01 01.

DATE 2011 01 01.

DATE 2012 01 01.

DATE 2013 01 01.

DATE 2014 01 01.

DATE 2015 01 01.

DATE 2016 01 01.

DATE 2017 01 01.

DATE 2018 01 01.

DATE 2019 01 01.

DATE 2020 01 01.

STOP

***** TERMINATE SIMULATION *****

RESULTS SECTION WELLDATA

RESULTS SECTION PERFS

3. Archivo utilizado para la simulación conceptual del yacimiento Hamaca en el STARS® (Versión 2002).

RESULTS SIMULATOR STARS
RESULTS SECTION INOUT

*TITLE1 'SIMULACION CONCEPTUAL DE UN POZO FRACTURADO + MICROONDAS'
*TITLE2 'DATOS DEL YACIMIENTO HAMACA, ACOPLADO AL MODELO DE '
*TITLE3 'MEJORAMIENTO EN SUBSUELO CON DONANTES DE HIDROGENO'
*TITLE4 'APUNTALANTE ALFE, BANDA 0, 300 KW , 2450 MHZ, SETPOINT 650 °F '

*INUNIT *FIELD
*OUTUNIT *FIELD

RESULTS SIMULATOR STARS
RESULTS SECTION INOUT

*TITLE1 'SIMULACION AREA PILOTO DE HAMACA'
*TITLE2 'MEJORAMIENTO CON DONANTES'
*INUNIT *FIELD
*OUTUNIT *FIELD
*WRST *TIME
*OUTPRN *WELL *ALL
*OUTPRN *GRID *PRES *TEMP *X *Y *SO *SW *SG *MOLDENO
*OUTSRF *GRID *PRES *TEMP *X *Y *SO *SW *SG *MOLDENO

GRID RADIAL 10 5 10 RW 2.82152231E-1
KDIR DOWN
DI IVAR
2. 4. 8. 16. 32. 64. 128. 2*201. 402.
DJ JVAR
85. 4. 2. 4. 85.
DK CON 9.4387

RESULTS SECTION GRID
RESULTS SECTION NETPAY
RESULTS SECTION NETGROSS
RESULTS SECTION POR

**\$ RESULTS PROP POR Units: Dimensionless
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 0.325 Maximum Value: 0.325
POR IJK

1:10 1:5 1:10 0.325
1:1 1:1 1:10 0.46
1:5 3:3 1:10 0.46

RESULTS SECTION PERMS
**\$ RESULTS PROP PERMI Units: md
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 12000 Maximum Value: 12000

PERMI IJK
1:10 1:5 1:10 12000
1:1 1:1 1:10 100000
1:5 3:3 1:10 100000

```

**$ RESULTS PROP PERMJ Units: md
**$ RESULTS PROP Minimum Value: 12000 Maximum Value: 12000
PERMJ EQUALSI
**$ RESULTS PROP PERMK Units: md
**$ RESULTS PROP Minimum Value: 12000 Maximum Value: 12000
PERMK EQUALSI
RESULTS SECTION TRANS
RESULTS SECTION FRACS
RESULTS SECTION GRIDNONARRAYS
RESULTS SECTION VOLMOD
RESULTS SECTION VATYPE
RESULTS SECTION SECTORLEASE
RESULTS SECTION THTYPE
END-GRID

ROCKTYPE 1
  CPOR 0.000116
  ROCKCP 30.
  THCONR 106.
  THCONW 8.6
  THCONO 1.8
  THCONG 0.025
  HLOSSTDIF 0.01
  HLOSSPROP +K 30. 30.
  -K 30. 30.

ROCKTYPE 2
  CPOR 0.000116
  ROCKCP 30.
  THCONR 231.328
  THCONW 8.6
  THCONO 1.8
  THCONG 0.025
  HLOSSTDIF 0.01
  HLOSSPROP +K 30. 30.
  -K 30. 30.

THTYPE IJK
  1:10 1:5 1:10 1
  1:1 1:1 1:10 2
  1:5 3:3 1:10 2

RESULTS SECTION GRIDOTHER
RESULTS SECTION MODEL
*MODEL 8 8 8 1
** Las propiedades de los pseudocomponentes estan en la carpeta de
** caracterizacion del crudo Hamaca y los calculos en la del proyecto 5150
**
*COMPNAME 'water' 'Asf.' 'Pes.' 'Med.' 'Liv.' 'Tet.' 'Naf.' 'Gas-sol'
*KV1 0.E+00 0.E+00 3.03000E+05 1.79000E+05 5.51000E+05 2.12000E+05 1.5600E+04
1.31000E+05
*KV4 0.E+00 0.E+00 -9.9188E+03 -6.6464E+03 -4.4149E+03 -4.0095E+03 -4.165E+03 -
3.37047E+03
*KV5 0.E+00 0.E+00 -2.054E+02 -2.677E+02 -2.732E+02 -3.3804E+02 -2.128E+02 -4.1438E+02

```

```

*CMM      0 2676 562 246 114 132 128 18.1157
*PCRIT    0.0E+0 6.092E+1 1.428E+2 4.306E+2 2.272E+3 5.38E+2 4.58E+2 6.9267E+2
*TCRIT    0.0E+0 2.2532E+3 1.3208E+3 9.221E+2 4.399E+2 8.345E+2 8.875E+2 -1.0135E+2
*CPG1     0.0E+0 3.1E-1 3.1E-1 3.2E-1 3.5E-1 3.1E-1 3.1E-1 5.072E+0
*CPG2     0.0E+0 4.62E-4 4.69E-4 4.84E-4 5.18E-4 4.69E-4 4.62E-4 0.0E+0
*CPG3     0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0
*CPG4     0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0 0.0E+0
*CPL1     0.0E+0 3.84E-1 3.74E-1 3.83E-1 4.8E-1 3.3E-1 3.3E-1 5.072E+0
*CPL2     0.0E+0 4.46E-4 5.2E-4 5.3E-4 6.3E-4 4.6E-4 4.6E-4 0.0E+0
*HVR      0 7447.000000000001 7447.000000000001 3723.999999999999 1470 2099 1430
535.0000000000001
*EV       0.38 0.38 0.38 0.38 0.38 0.38 0.38
*PRSR     14.7
*TEMR     60
*PSURF    1.47E+1
*TSURF    6.0E+1

```

```

*MOLDEN   0.0E+0 4.158E-2 1.08E-1 2.24E-1 3.64E-1 4.59E-1 4.97E-1 6.814E-1
*CP        0.0E+0 1.8E-6 1.8E-6 1.8E-6 1.8E-6 1.8E-6 1.8E-6 3.09E-4
*CT1      0.0E+0 2.0E-4 2.0E-4 3.0E-4 8.0E-4 5.0E-4 2.0E-4 3.78E-4
*CT2      0.0E+0 2.0E-7 2.0E-7 3.0E-7 8.0E-7 7.0E-7 2.0E-7 0.0E+0

```

*VISCTABLE

** 'water' 'Asf.' 'Pes.' 'Med.' 'Liv.' 'Tet.' 'Naf.' 'Gas-sol'

**

104	0	2.3E+35	332000000	5.8	0.5	0.9	0.9	13.5
	**CAPACIDAD							
140	0	1.09E+35	1370000	4.2	0.4	0.8	0.86	11.7
176	0	7.9E+34	80200	2.4	0.3	0.6	0.7	10.13
212	0	5.92E+34	791.6	1.45	0.25	0.5	0.53	8.77
312	0	22000000000	12.9	0.48	0.01	0.26	0.28	5.88
412	0	228000000	2.5	0.24	0.01	0.01	0.01	3.94
662	0	220000000	1.3	0.18	0.01	0.01	0.01	1.77

*VSMIXCOMP 'Pes.'

*VSMIXENDP 0.35 0.49

*VSMIXFUNC 0.31 0.33 0.35 0.37 0.39 0.41 0.43 0.45 0.47 0.49 0.51

** Reaction 1: 1 Asf. + 1 Tet. ---> 4.769 Pes. + 1 Naf.

*STOREAC 0 1 0 0 0 1 0 0

*STOPROD 0 0 4.769 0 0 0 1 0

*FREQFAC 6.269E+15

*EACT 62740

** Reaction 2: 1 Pes. + 1 Tet. ---> 2.301 Med. + 1 Naf.

*STOREAC 0 0 1 0 0 1 0 0

*STOPROD 0 0 0 2.301 0 0 1 0

*FREQFAC 7.565E+16

*EACT 71229.99999999999

** Reaction 3: 1 Med. + 1 Tet. ---> 2.193 Liv. + 1 Naf.

*STOREAC 0 0 0 1 0 1 0 0

*STOPROD 0 0 0 0 2.193 0 1 0

*FREQFAC 6.267E+16
 *EACT 65499.9999999999

** Reaction 4: 2.15 Liv. ---> 1 Med.
 *STOREAC 0 0 0 0 2.15 0 0 0
 *STOPROD 0 0 0 1 0 0 0 0
 *FREQFAC 785300000000000
 *EACT 74770.0000000001

** Reaction 5: 2.285 Med. ---> 1 Pes.
 *STOREAC 0 0 0 2.285 0 0 0 0
 *STOPROD 0 0 1 0 0 0 0 0
 *FREQFAC 7.218E+17
 *EACT 133900

** Reaction 6: 4.762 Pes. ---> 1 Asf.
 *STOREAC 0 0 4.762 0 0 0 0 0
 *STOPROD 0 1 0 0 0 0 0 0
 *FREQFAC 153700000000000
 *EACT 81350.0000000002

RESULTS SECTION MODELARRAYS

RESULTS SECTION ROCKFLUID

** -----Cond. referencia Hector-----

**PRSR 14.7
 **TEMR 137.0
 **TSURF 60.0
 **PSURF 14.7

**

**

** ===== ROCK-FLUID PROPERTIES =====

*ROCKFLUID

*RPT 1

*SWT **
 ** SW KRW KROW

** ---- -
 0.130000 0.000000 0.948000 0.000000
 0.145000 0.002000 0.900000 0.000000
 0.210000 0.008100 0.660000 0.000000
 0.310000 0.030000 0.416300 0.000000
 0.410000 0.090000 0.225300 0.000000
 0.510000 0.160000 0.040000 0.000000
 0.610000 0.240000 0.000000 0.000000
 0.710000 0.330000 0.000000 0.000000
 0.810000 0.430100 0.000000 0.000000
 0.910000 0.540000 0.000000 0.000000
 1.000000 0.640000 0.000000 0.000000

*SLT **

** SL KRG KROG PCOG
 ** ---- -
 0.245000 0.250000 0.000000 0.000000
 0.315600 0.154000 0.011100 0.000000

0.401100 0.088700 0.044400 0.000000
 0.486700 0.046800 0.100000 0.000000
 0.572200 0.021800 0.177800 0.000000
 0.657800 0.008500 0.277800 0.000000
 0.743300 0.002500 0.400000 0.000000
 0.828900 0.000400 0.544400 0.000000
 0.900000 0.000032364 0.681413 0.000000
 0.950000 0.0000064 0.786912 0.000000
 0.980000 0.000000 0.853854 0.000000
 1.000000 0.000000 0.948000 0.000000

**-----

**Dependencia de las permeabilidades relativas con la temperatura

*KRTEMTAB *SORW *SWR *SORG *SGR

** Temp Sorw Swr Sorg Sgr

77. 0.39 0.14 0.025 0.02

572. 0.1 0.43 0 0.02

RESULTS SECTION ROCKARRAYS

RESULTS SECTION INIT

**-----

** ===== INITIAL CONDITIONS =====

*INITIAL

RESULTS SECTION INTARRAYS

**\$ RESULTS PROP SW Units: Dimensionless

**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 0.13 Maximum Value: 0.13
 SW CON 0.13

**\$ RESULTS PROP PRES Units: psi

**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 1160 Maximum Value: 1160
 PRES CON 1160.

**\$ RESULTS PROP SO Units: Dimensionless

**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 0.87 Maximum Value: 0.87
 SO CON 0.87

**\$ RESULTS PROP TEMP Units: F

**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 137 Maximum Value: 137
 TEMP CON 137.

**\$ RESULTS PROP MFRAC_OIL 'Asf.' Units: Dimensionless

**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 0.0181 Maximum Value: 0.0181
 MFRAC_OIL 'Asf.' CON 0.0181

**\$ RESULTS PROP MFRAC_OIL 'Pes.' Units: Dimensionless

**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 0.3348 Maximum Value: 0.3348
 MFRAC_OIL 'Pes.' CON 0.3348

**\$ RESULTS PROP MFRAC_OIL 'Med.' Units: Dimensionless

**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 0.253 Maximum Value: 0.253
 MFRAC_OIL 'Med.' CON 0.253

**\$ RESULTS PROP MFRAC_OIL 'Liv.' Units: Dimensionless

**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 0.105 Maximum Value: 0.105
MFRAC_OIL 'Liv.' CON 0.105

**\$ RESULTS PROP MFRAC_OIL 'Tet.' Units: Dimensionless
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 0 Maximum Value: 0
MFRAC_OIL 'Tet.' CON 0

**\$ RESULTS PROP MFRAC_OIL 'Naf.' Units: Dimensionless
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 0 Maximum Value: 0
MFRAC_OIL 'Naf.' CON 0

**\$ RESULTS PROP MFRAC_OIL 'Gas-sol' Units: Dimensionless
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 0.289 Maximum Value: 0.289
MFRAC_OIL 'Gas-sol' CON 0.289

**\$ RESULTS PROP MFRAC_WAT 'water' Units: Dimensionless
**\$ RESULTS PROP Minimum Value: 1 Maximum Value: 1
MFRAC_WAT 'water' CON 0.
RESULTS SECTION NUMERICAL

** ===== NUMERICAL CONTROL =====

*NUMERICAL
** HERE MATCH THE PREVIOUS DATA.
*MAXSTEPS 900000
*DTMAX 0.001
*NEWTONCYC 30
*NORTH 10
*SDEGREE 1
*ITERMAX 100
*NORM *PRESS 120.
 *TEMP 150.
 *Y 0.5
 *X 0.5
 *W 0.5
*CONVERGE *PRESS 14.5 ** ajustado por grace
 *SATUR 0.1
 *TEMP 18. **ajustado por grace
 *Y 0.15

 *X 0.15
 *W 0.15
*MATBALTOL 1
*UNRELAX 1

RESULTS SECTION NUMARRAYS
RESULTS SECTION GBKEYWORDS
RUN

** ===== RECURRENT DATA =====

DATE 1985 01 01.
DTWELL 0.01

WELL 1 'INY-WAT'
INJECTOR UNWEIGHT 'INY-WAT'

TINJW 590.
 QUAL 0.75
 ** 'water' 'Asf.' 'Pes.' 'Med.' 'Liv.' 'Tet.' 'Naf.' 'Gas-sol'
 ** -----
 INCOMP WATER 1.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0
 OPERATE MAX STW 250. CONT
 OPERATE MAX BHP 3000. CONT ** ajustado por grace
 GEOMETRY K 0.2 1. 1. 0.
 PERF WI 'INY-WAT'
 ** I J K W I
 1 1 1 1.
 1 1 2 1.
 1 1 3 1.
 1 1 4 1.
 1 1 5 1.
 1 1 6 1.
 1 1 7 1.
 1 1 8 1.
 1 1 9 1.
 1 1 10 1.
 ** -----
 WELL 2 'PRODUCTOR'
 PRODUCER 'PRODUCTOR'
 OPERATE MAX STL 0.5E-06 CONT REPEAT
 OPERATE MIN BHP 40. CONT

 GEOMETRY K 0.2 1. 1. 0.
 PERF GEO 'PRODUCTOR'
 ** I J K W I
 1 1 1 1.
 1 1 2 1.
 1 1 3 1.
 1 1 4 1.
 1 1 5 1.
 1 1 6 1.
 1 1 7 1.
 1 1 8 1.
 1 1 9 1.
 1 1 10 1.
 ** -----
 SHUTIN 'PRODUCTOR'

 WELL 3 'INY-TET'
 INJECTOR UNWEIGHT 'INY-TET'
 TINJW 590.
 ** 'water' 'Asf.' 'Pes.' 'Med.' 'Liv.' 'Tet.' 'Naf.' 'Gas-sol'
 ** -----
 INCOMP OIL 0.0 0.0 0.0 0.0 0.0 1.0 0.0 0.0
 OPERATE MAX STO 250. CONT
 OPERATE MAX BHP 1750. CONT ** ajustado por grace
 GEOMETRY K 0.2 1. 1. 0.
 PERF WI 'INY-TET'
 ** I J K W I
 1 1 1 1.

1 1 2 1.
1 1 3 1.
1 1 4 1.
1 1 5 1.
1 1 6 1.
1 1 7 1.
1 1 8 1.
1 1 9 1.
1 1 10 1.

** calentando a $P_o = 300$ KW y $f = 2450$ MHz Set point en 650

** Potencia absorbida por la fractura (Apuntalante ALFE)

*UHTR *IJK

1:1 1:1 1:10	1657
2:2 3:3 1:10	25599703
3:3 3:3 1:10	10062
4:4 3:3 1:10	1509
5:5 3:3 1:10	420
6:6 3:3 1:10	39
7:7 3:3 1:10	1
8:8 3:3 1:10	0
9:9 3:3 1:10	0
10:10 3:3 1:10	0

*TMPSET *IJK

1:1 1:1 1:10	576
2:2 3:3 1:10	650
3:3 3:3 1:10	616
4:4 3:3 1:10	436
5:5 3:3 1:10	296
6:6 3:3 1:10	145
7:7 3:3 1:10	137
8:8 3:3 1:10	137
9:9 3:3 1:10	137
10:10 3:3 1:10	137

TIME 0.1

*DTMAX 0.1

TIME 0.2

TIME 0.5

TIME 0.6

TIME 0.7

TIME 0.8

TIME 1

TIME 1.5

TIME 2

TIME 2.5

TIME 2.7

TIME 2.8

TIME 2.9

TIME 3
ALTER
'INY-TET' 'INY-WAT'
750.

TIME 3.3

TIME 3.4

TIME 4

TIME 4.7

TIME 5

TIME 6

TIME 6.8

TIME 7

TIME 7.7

TIME 8

TIME 9

TIME 9.7

TIME 10

TIME 11

TIME 12

TIME 14

TIME 15

TIME 18

TIME 18.1

TIME 20
SHUTIN 'INY-TET' 'INY-WAT'

*DTWELL 0.001

TIME 20.5

TIME 21

TIME 22

TIME 23

TIME 24

TIME 26

TIME 27

TIME 28

TIME 29

TIME 30

OPEN 'PRODUCTOR'

TIME 30.1

TIME 30.5

ALTER

'PRODUCTOR'

0.5

*DTWELL 0.1

TIME 31

TIME 32

TIME 33

ALTER

'PRODUCTOR'

50.

TIME 34

TIME 34.35

*DTMAX 0.1

TIME 34.5

*DTMAX 1.

TIME 35

TIME 36

TIME 38

TIME 40
ALTER
'PRODUCTOR'
150.

TIME 41

TIME 42

TIME 43
*DTWELL 0.1

TIME 44
*DTWELL 1.

TIME 55
ALTER
'PRODUCTOR'
300.

TIME 56

TIME 57

TIME 60
*DTMAX 0.1
*DTWELL 0.1

TIME 65
*DTMAX 1.

TIME 70

TIME 80

TIME 120

TIME 160

TIME 200

TIME 250

TIME 300

TIME 360

STOP

***** TERMINATE SIMULATION *****
RESULTS SECTION WELLDATA
RESULTS SECTION PERFS

ANEXO 2**VALORES DE ϵ' Y ϵ'' PARA LOS MATERIALES ESTUDIADOS**

A continuación se presentan los valores de las constantes dieléctricas de los materiales utilizados para obtener los perfiles de absorción del calentamiento electromagnético en los yacimientos conceptuales estudiados. Dichos valores son tomados de los informes de Mouris y col.^[23-26], y se encuentran reportados por Fonseca^[6] y Salazar^[10].

Legenda para los datos de los gráficos

<u>#</u>	<u>Frecuencia (MHz)</u>	<u>Símbolo</u>	<u>Tipo de Línea</u>
1	397	diamante rojo	continua
2	912	cuadrado azul	continua
3	1429	cruz negra	continua
4	1948	círculo azul	punteada
5	2466	equis roja	punteada
6	2986	diamante negro	punteada

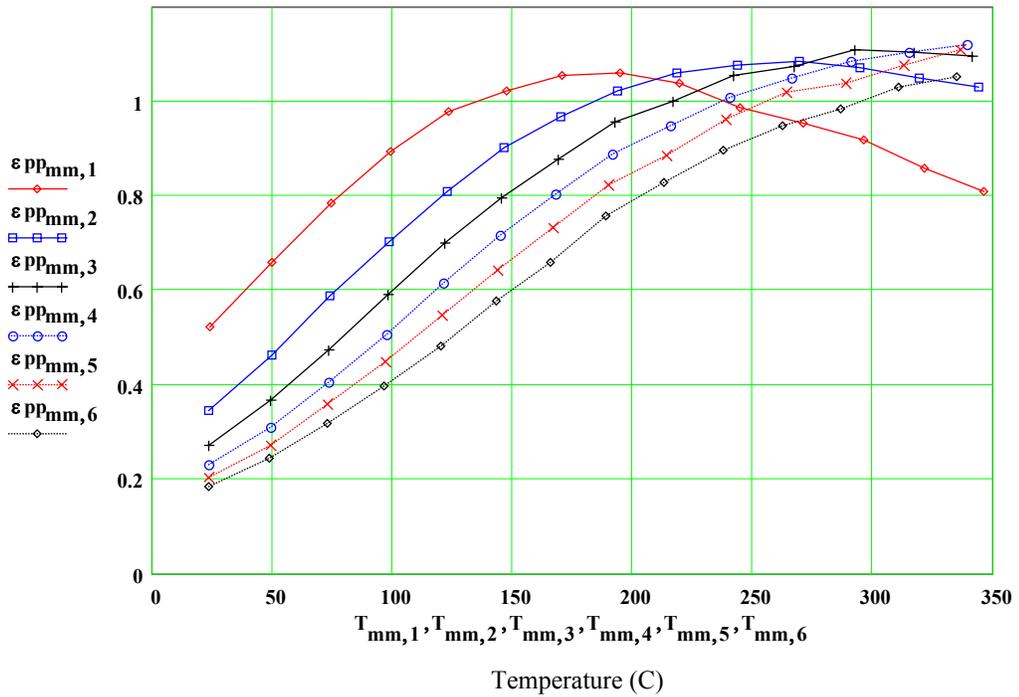
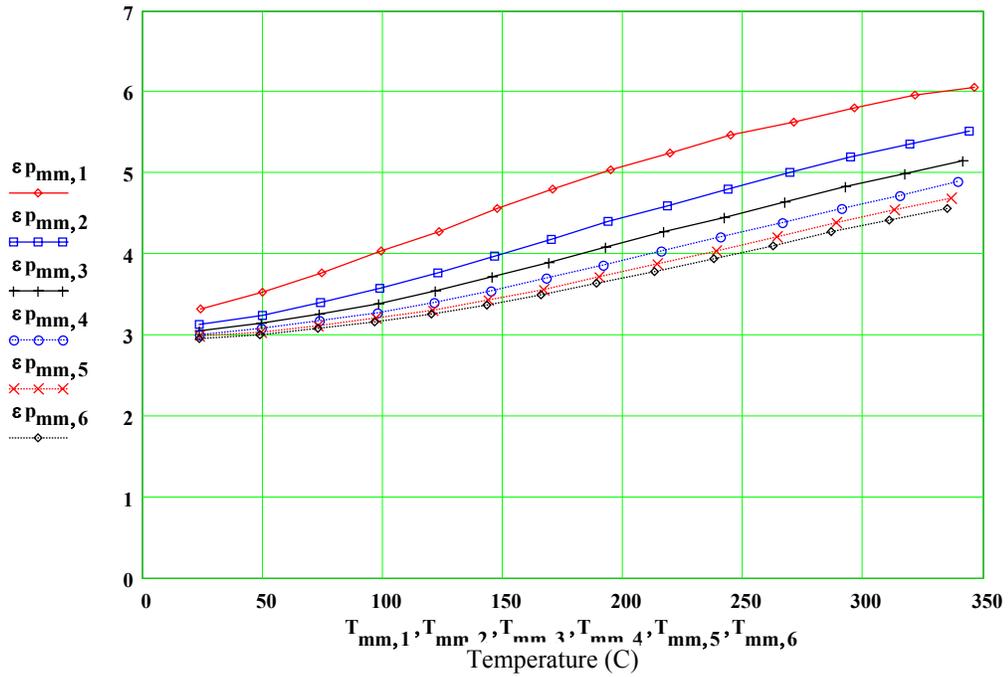
1. Apuntalante JL-P

Test = 2002090201

INTP0238.mcd

AnDat = 20020903

JL-P catalyst (brown spheres), Room Temp. to 350C under 85 psi argon, for Cesar Ovalles, INTEVEP
 Initial density = $\text{samdns}_{\text{NCaI} + 1} = 1.47 \text{ gm/cc}$, Final density(25C) = $\text{dnsfinal} = 1.47 \text{ gm/cc}$



2. Apuntalante ALFE

Test = 2002090801

INTP0239.mcd

AnDat = 20020909

ALPE catalyst (grey spheres), Room Temp. to 350C under 85 psi argon, for Cesar Ovalles, INTEVEP

Initial density = $\text{samdns}_{\text{NCal} + 1} = 1.26 \text{ gm/cc}$, Final density(25C) = $\text{dnsfinal} = 1.26 \text{ gm/cc}$

