

**DISEÑO DE UN MODELO FISICO DE DESPLAZAMIENTO
RADIAL PARA SIMULAR PROCESOS DE RECOBRO
MEJORADO**

JUAN DAVID LESMES GÓMEZ

FERNANDO WILSON LONDOÑO GALVIS

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2006**

**DISEÑO DE UN MODELO FÍSICO DE DESPLAZAMIENTO
RADIAL PARA SIMULAR PROCESOS DE RECOBRO
MEJORADO**

JUAN DAVID LESMES GÓMEZ

FERNANDO WILSON LONDOÑO GALVIS

**Trabajo de grado presentado para optar a los títulos de
Ingeniero Mecánico
Ingeniero de Petróleos**

Directores

**SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO
Ingeniero de petróleos, M.Sc.**

**RÓMULO NIÑO DELGADO
Ingeniero Mecánico.**

Codirector

**JUAN EDUARDO RIVERA DE LA OSSA
Ingeniero de Petróleos.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA
2006**

AGRADECIMIENTOS

Los autores del proyecto expresan sus agradecimientos a:

Al Ingeniero Samuel Fernando Muñoz Navarro, por depositar su confianza en nosotros y por apoyarnos durante el desarrollo del proyecto.

Al Ingeniero Rómulo Niño Delgado, quién nos brindó su dirección, colaboración y respaldo en el desarrollo del proyecto.

A los Ingenieros del Grupo de Recobro Mejorado UIS-ICP, Juan Eduardo Rivera de la Ossa, Claudia Patricia Soto, Héctor Hugo Pérez, Aníbal Ordóñez, Roy Eliécer Sandoval y Diana Patricia por brindarnos soporte técnico, dirección y colaboración durante el proyecto.

Al Ingeniero Carlos Naranjo Suárez, Laboratorio de Inyección de Vapor ICP, por aportarnos su experiencia en el tema de escalamiento.

Al Ingeniero Cesar Duarte, Laboratorio de Recobro Mejorado ICP, por su orientación y consejos en el manejo de equipos de laboratorio.

A los Ingenieros Ana Milena Montañez y David Araque, por brindarnos su experiencia como tesisistas del Modelo Scala.

Al Ingeniero Jorge Alberto Rojas, Laboratorio de Especiales ICP, por su orientación, sus consejos y por dedicarnos un tiempo siempre que lo necesitamos para consulta.

A los Ingenieros Aristóbulo Bejarano y William Navarro, por su colaboración en el proyecto.

Al ingeniero Omar Armando Gélvez, docente de la escuela de Ingeniería Mecánica, por su paciencia y colaboración, al iniciar el proyecto.

Al ingeniero Ariel Vega, por su colaboración en el proyecto

Al ingeniero Leonidas Vásquez, por su orientación en el desarrollo del proyecto

A nuestros compañeros ñoños del Grupo de Investigación en Recobro Mejorado, por acogernos y hacernos sentir a gusto en el grupo. Muy especialmente a la ñoña Adriana Yaneth Rojas Suárez.

Un especial agradecimiento al Doctor Farouq Alí, autoridad mundial en el área del recobro mejorado, por brindarnos sus consejos y experiencias para el buen desarrollo de este proyecto.

A nuestras familias, que se esmeraron por nuestro bienestar durante todo el proyecto, para poder dedicarnos casi en exclusiva a éste.

A nuestros amigos y compañeros.

DEDICATORIA

Primero a Dios.

A mis padres Leonor y Rubén Darío, por formarme como persona y apoyarme siempre en los proyectos que emprendo, por inculcarnos a mi y a mis hermanos los valores y los deseos de superación, y a pesar de todas las adversidades poder formar a tres buenos Ingenieros.

A mis hermanos Javier Augusto y Maria Edelmira, por estar siempre a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos.

A mi familia y amigos, por su compañía y estimación.

JUAN DAVID

DEDICATORIA

A Dios por concederme la vida y por otras tantas cosas que me ha dado.

Con mi más profundo amor dedico este trabajo a mi mami Elena por brindarme su amor, cariño y apoyo incondicional. A mi papa Nestor, a mis hermanos Linyapaoly y Alexander con quienes puedo contar siempre para discutir, pelear y molestar. A mi nonita Ana Briceida (Q.E.P.D.).

A la ñoña ***mais grande du mundo*** Adriana Yaneth R., por ser la mejor amiga y compañera, con la cual cuento. A Cesar Pineda por ser un buen amigo.

A los MORGAN ÑOÑOS, con quienes compartí tantas experiencias, especialmente a Adriana G. H., por esas lecciones que te pedí, gracias. A todos los amigos que conocí durante mi vida en la universidad.

FERNANDO WILSON

TABLA DE CONTENIDO

	INTRODUCCIÓN	1
1.	MODELOS ESCALADOS Y RECIPIENTES A PRESION	4
1.1	MODELOS ESCALADOS	4
1.2	RESEÑA HISTÓRICA	5
1.3	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	7
1.3.1	Principio de similitud	8
1.3.2	Similitud Geométrica	9
1.3.3	Similitud Cinemática	9
1.3.4	Similitud Dinámica	9
1.3.5	Similitud Térmica	10
1.3.6	Similitud Química	10
1.4	METODOLOGÍA DE DISEÑO EN MODELOS ESCALADOS	10
1.4.1	Definición de las ecuaciones diferenciales que describen el proceso	11
1.4.2	Derivación de los criterios adimensionales mediante el análisis dimensional e inspeccional	12
1.4.2.1	Análisis dimensional	12
1.4.2.2	Análisis inspeccional	13
1.4.3	Selección de los criterios a escalar	14
1.4.4	Relajación de los parámetros de escalamiento	16
1.4.4.1	Estructura del medio poroso	16
1.4.4.2	Fuerzas Inerciales	16
1.4.4.3	Fuerzas Capilares	16
1.4.4.4	Geometría del Sistema	17

1.4.4.5	Efectos de Frontera	17
1.5	RECIPIENTES A PRESIÓN: USOS Y CARACTERÍSTICAS DE CILINDROS PRESURIZADOS	17
1.6	POTENCIALES MODOS DE FALLA	18
1.7	MATERIALES PARA RECIPIENTES A PRESIÓN	20
1.8	PRINCIPIO DE LA TEORÍA DE LA ELASTICIDAD	21
1.9	FORMULACIÓN MATEMÁTICA	22
1.9.1	Teorías de falla	23
1.10	EQUIPOS DE MODELOS ESCALADOS SIMILARES ENCONTRADOS EN LA LITERATURA	25
1.10.1	Artículo 1	25
1.10.2	Artículo 2	27
1.10.3	Artículo 3	27
1.10.4	Artículo 4	29
1.10.5	Artículo 5	30
1.10.6	Artículo 6	32
1.10.7	Artículo 7	33
1.10.8	Artículo 8	34
2	SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE DISEÑO	36
2.1	FILOSOFÍA DEL DISEÑO	36
2.2	FUNCIÓN Y FORMA; ESTÉTICA Y ERGONOMÍA	36
2.3	CLAVES DEL DISEÑO	37
2.4	ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO	37
2.4.1	Requerimientos iniciales	38
2.4.2	Fluido de inyección	41
2.4.3	Modelos de inyección	42
2.4.4	Presiones de trabajo	42
2.4.5	Geometría del patrón.	43
2.4.6	Selección de la geometría para el recipiente a presión	46

3	DISEÑO DE MODELOS FISICOS PARA INYECCION DE VAPOR	54
3.1	MODELOS FISICOS DE PROCESOS ESCALADOS CON VAPOR	54
3.2	DISEÑO DE UN MODELO ESCALADO	56
3.2.1	Análisis inspeccional	56
3.2.1.1	Ecuaciones gobernantes	57
3.2.1.2	Condiciones iniciales y límites	62
3.2.1.3	Relaciones constitutivas y restrictivas	64
3.2.1.4	Forma adimensional de las ecuaciones diferenciales parciales	64
3.2.1.5	Grupos escalados a través del Análisis Inspeccional	65
3.2.2	Análisis dimensional	65
3.3	DISEÑO DE MODELOS FISICOS ESCALADOS	71
3.3.1	Selección del prototipo	71
3.3.2	Selección de las condiciones de operación	72
3.3.3	Selección de un enfoque de escalamiento	73
3.4	DISEÑO DEL MODEÑO ESCALADO	75
3.4.1	Determinación del factor de escala	75
3.4.2	Geometría del modelo	77
3.4.3	Selección de las propiedades del los fluidos	79
3.4.4	Condiciones de presión	80
3.4.5	Permeabilidad	81
3.4.6	Tasa de inyección	82
3.4.7	El tiempo	84
3.4.8	Diseño de los pozos	85
4	CÁLCULOS DE DISEÑO Y SELECCIÓN	88
4.1	SELECCIÓN DEL MATERIAL DEL PORTANÚCLEOS	88
4.2	CÁLCULOS PRELIMINARES	90

4.3	ANÁLISIS CAE	94
4.4	DISEÑO DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DEL EQUIPO	100
4.5	CARGAS EN LOS PERNOS	101
4.6	CÁLCULO NECESARIO PARA EL APRIETE DE LOS PERNOS	106
4.7	DISEÑO DEL SELLO	106
4.8	CÁLCULO DE LAS VARILLAS GUÍA	109
4.9	PERFIL SOSTEN DE VARILLAS EN LA PARTE SUPERIOR	112
4.10	ANÁLISIS DE LA PLACA SOSTEN DEL GATO HIDRÁULICO	117
4.11	CÁLCULO DE LOS PERFILES (SOPORTES)	121
4.11.1	Características y denominación del perfil	121
4.11.2	Perfil actuando como viga (a FLEXIÓN):	122
4.11.3	Perfil actuando como columna	125
4.12	CÁLCULO DEL MECANISMO SINFIN- CORONA	127
4.12.1	Análisis de tensiones en los engranajes	134
4.13	CÁLCULO DEL EJE	135
4.13.1	Para la lengüeta en el engranaje	144
4.13.2	Selección de los rodamientos	146
4.13.3	Selección anillo de seguridad	150
4.14	BOMBA DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO SELECCIONADA	151
4.15	GATO HIDRÁULICO SELECCIONADO	152
5	SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO Y MODELO	153
5.1	PROTOTIPO DE CAMPO Y MODELO DE LABORATORIO	153
5.2	PROTOTIPO DE CAMPO	155
5.2.1	Enmallado del prototipo de campo	155

5.2.2	Propiedades de la roca	157
5.2.3	Propiedades del crudo	157
5.2.4	Permeabilidades relativas	158
5.2.5	Condiciones iniciales	158
5.2.6	Condiciones de operación	158
5.3	MODELOS DE LABORATORIO	160
5.3.1	Modelo de laboratorio 1	163
5.3.1.1	Enmallado del modelo de laboratorio 1	163
5.3.1.2	Propiedades de la roca	165
5.3.1.3	Propiedades del crudo	166
5.3.1.4	Permeabilidades relativas	166
5.3.1.5	Condiciones iniciales	167
5.3.1.6	Condiciones de operación	168
5.3.2	Modelo de laboratorio 2	168
5.3.2.1	Enmallado del modelo de laboratorio 2.	168
5.3.2.2	Propiedades de la roca	170
5.3.2.3	Propiedades del crudo	171
5.3.2.4	Permeabilidades relativas	171
5.3.2.5	Condiciones iniciales.	171
5.3.2.6	Condiciones de operación	171
5.4	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.	172
5.4.1	Producción acumulativa de aceite	172
5.4.2	Tasa de producción de aceite	174
5.4.3	Relación acumulativa de aceite vapor	175
5.4.4	Agua acumulada	176
5.4.5	Factor de recobro	178
5.5	ANÁLISIS DE SENSIBILIDADES.	179
5.5.1	Parámetros operacionales	179
5.5.1.1	Caudal de inyección	180

5.5.1.2	Presión de inyección	182
5.5.1.3	Temperatura de inyección.	183
5.5.1.4	Calidad del vapor	183
5.5.1.5	Presión de producción	185
5.5.2	Parámetros de yacimiento	186
5.5.2.1	Permeabilidad	187
5.5.2.2	Porosidad	189
6	CONCLUSIONES	192
7	RECOMENDACIONES	196
8	BIBLIOGRAFÍA	203

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	Definición de modelo escalado	4
FIGURA 2	Similitud Geométrica.	8
FIGURA 3	Similitud Cinemática	9
FIGURA 4	Similitud dinámica.	10
FIGURA 5	Metodología de diseño de modelos escalados.	11
FIGURA 6	Métodos de escalamiento.	14
FIGURA 7	Cilindro de pared gruesa caso general	23
FIGURA 8	Dibujo esquemático del modelo de flujo.	26
FIGURA 9	Diagrama esquemático del equipo de pruebas.	28
FIGURA 10	Esquema del equipo de inyección y producción..	30
FIGURA 11	Dos secciones transversales del recipiente a presión rectangular	31
FIGURA 12	Esquema general del modelo	33
FIGURA 13	Configuración del sistema de desplazamiento del equipo.	35
FIGURA 14	Sistema de confinamiento.	38
FIGURA 15	Porta núcleos.	39
FIGURA 16	Vista frontal del sistema de confinamiento.	40
FIGURA 17	Dimensiones del medio poroso.	40
FIGURA 18	Modelos de Inyección.	42
FIGURA 19	Patrón Completo de cinco puntos invertido.	43
FIGURA 20	Patrón de 1/8 de cinco puntos.	44
FIGURA 21	Patrón de ¼ de cinco puntos.	45
FIGURA 22	Patrón de ¼ incluyendo el pozo central.	46

FIGURA 23	Propuesta número 1.	47
FIGURA 24	Geometría de la arena en el recipiente cilíndrico.	49
FIGURA 25	Propuesta número 2.	49
FIGURA 26	Geometría de la arena en el recipiente rectangular.	50
FIGURA 27	Propuesta número 3	51
FIGURA 28	Sistema de confinamiento con la caja metálica.	52
FIGURA 29	Dimensiones del modelo	76
FIGURA 30	Geometría del modelo	77
FIGURA 31	Dimensiones del modelo	79
FIGURA 32	Caída de presión en el modelo.	81
FIGURA 33	Permeabilidad en el modelo.	82
FIGURA 34	Tasa de inyección en el modelo.	84
FIGURA 35	Tiempo en el modelo.	85
FIGURA 36	Círculo inscrito, aproximación a recipiente cilíndrico.	91
FIGURA 37	Factor de seguridad en la base del porta núcleos espesor 20 mm	92
FIGURA 38	Configuración del equipo (diseño optimizado).	93
FIGURA 39	Vistas de la tapa del equipo (diseño optimizado)	93
FIGURA 40	Presión aplicada a la base.	94
FIGURA 41	Temperatura aplicada a la base.	95
FIGURA 42	Factor de seguridad en la tapa.	96
FIGURA 43	Deformaciones en la tapa.	97
FIGURA 44	Factor de seguridad en la base.	98
FIGURA 45	Deformaciones en la base.	98
FIGURA 46	Espesor de la tapa del porta núcleos.	99
FIGURA 47	Vista general del equipo de desplazamiento.	100
FIGURA 48	Dimensiones del porta núcleos y el sello (milímetros)	101
FIGURA 49	Sección del equipo en donde se aprecian las varillas guía.	110

FIGURA 50	Perfil soporte varillas guía (actuando como viga) y sus cargas.	112
FIGURA 51	Diagramas de cortante y momento para la viga	116
FIGURA 52	Placa soporte del gato hidráulico con la carga	117
FIGURA 53	Placa soporte y área de distribución de la carga	118
FIGURA 54	Esfuerzo equivalente de la placa luego de la simulación	120
FIGURA 55	Deformación total de la placa luego de la simulación.	120
FIGURA 56	Sección del perfil.	121
FIGURA 57	Perfil (actuando como viga) y su correspondiente carga.	123
FIGURA 58	Diagramas de cortante y momento para el perfil actuando como viga	124
FIGURA 59	Perfil actuando como columna y su correspondiente carga	126
FIGURA 60	Mecanismo Sinfín Corona.	127
FIGURA 61	Distancia de palanca del centroide al eje (mm).	128
FIGURA 62	Eje con rodamiento y mecanismo sinfín corona.	136
FIGURA 63	Cargas en el eje	137
FIGURA 64	Diagramas de Carga para X-Y.	138
FIGURA 65	Diagramas de Carga para X-Z.	139
FIGURA 66	Diagrama de Carga AXIAL.	140
FIGURA 67	Diagrama de Torque	140
FIGURA 68	Sistema Eje-Cubo del engranaje junto con su respectiva lengüeta	144
FIGURA 69	Dimensiones de la lengüeta	146
FIGURA 70	Datos del anillo de seguridad.	150
FIGURA 71	Bomba de desplazamiento positivo y sus datos.	151

FIGURA 72	Gato hidráulico.	152
FIGURA 73	Datos del gato hidráulico.	152
FIGURA 74	Esquema del grid para el prototipo de campo a simular.	155
FIGURA 75	Vista areal del prototipo de campo, coordenadas (x,y).	156
FIGURA 76	Comportamiento de la viscosidad del crudo con el incremento de la temperatura.	158
FIGURA 77	Curvas de permeabilidades relativas agua/aceite.	159
FIGURA 78	Curvas de permeabilidades relativas liquido/gas.	159
FIGURA 79	Esquema del grid para el modelo de laboratorio 1 a simular.	164
FIGURA 80	Vista areal del modelo de laboratorio 1, coordenadas (x,y).	165
FIGURA 81	Curvas de permeabilidades relativas agua/aceite	166
FIGURA 82	Curvas de permeabilidades relativas liquido/gas	167
FIGURA 83	Esquema del grid para el modelo de laboratorio 2, a simular	169
FIGURA 84	Vista areal del modelo de laboratorio 2, coordenadas (x,y).	170
FIGURA 85	Producción acumulativa de aceite contra el tiempo de inyección.	173
FIGURA 86	Tasa de producción de aceite contra el tiempo.	175
FIGURA 87	Relación acumulativa de aceite vapor contra el tiempo de inyección	176
FIGURA 88	Agua acumulada contra el tiempo de tiempo	177
FIGURA 89	Factor de recobro vs tiempo	178
FIGURA 90	Efecto de la tasa sobre el factor de recobro vs tiempo	180
FIGURA 91	Efecto de la tasa de inyección en la relación aceite vapor.	181
FIGURA 92	Efecto de la tasa de inyección en el factor de recobro	182

	de aceite.	
FIGURA 93	Efecto de la temperatura en la relación aceite vapor	183
FIGURA 94	Efecto de la tasa de inyección en la relación aceite vapor.	184
FIGURA 95	Efecto de la calidad del vapor en el factor de recobro de aceite	185
FIGURA 96	Efecto de la presión de producción en el factor de recobro de aceite	186
FIGURA 97	Efecto de la variación de la permeabilidad en el factor de recobro	188
FIGURA 98	Efecto de la variación de la permeabilidad en el agua acumulada	188
FIGURA 99	Efecto de la variación de la porosidad en el aceite acumulado	189
FIGURA 100	Efecto de la variación de la porosidad en la relación aceite vapor	190
FIGURA 101	Efecto de la variación de la porosidad en el factor de recobro.	191

LISTA DE TABLAS

TABLA 1.	Relaciones constitutivas y restrictivas para un proceso de desplazamiento con vapor	64
TABLA 2.	Variables que controlan el desplazamiento de aceite por inyección de vapor.	67
TABLA 3.	Comparación entre los grupos escalados por Análisis inspeccional y Análisis Dimensional para un desplazamiento de aceite por vapor.	68
TABLA 4.	Propiedades promedio del prototipo	72
TABLA 5.	Enfoques de escalamiento	73
TABLA 6.	Aceros inoxidables comúnmente usados en la industria.	89
TABLA 7.	Propiedades del acero AISI 316	90
TABLA 8.	Cálculo de los espesores como aproximación a recipiente cilíndrico	91
TABLA 9.	Factores de seguridad.	95
TABLA 10.	Deformaciones	96
TABLA 11.	Resultados obtenidos luego de la simulación en unidades métricas.	99
TABLA 12.	Resultados obtenidos luego de la simulación en unidades inglesas.	99
TABLA 13.	Esfuerzo a diferentes temperaturas para material SA-540 Grado B24 Clase 3.	104
TABLA 14.	Propiedades de roscas.	105
TABLA 15.	Resultados obtenidos para la altura del perfil.	115
TABLA 16.	Dimensiones y datos importantes del perfil seleccionado.	121

TABLA 17.	Propiedades de área de la sección transversal del perfil.	121
TABLA 18.	Dimensiones de anillo de seguridad.	150
TABLA 19.	Datos bomba de desplazamiento.	151
TABLA 20.	Descripción del enmallado del prototipo de campo.	156
TABLA 21.	Propiedades de la roca del prototipo de campo.	157
TABLA 22.	Propiedades del crudo presente en el prototipo de campo.	157
TABLA 23.	Datos de las condiciones iniciales del prototipo en el momento de comenzar el proceso de inyección de vapor.	160
TABLA 24.	Condiciones operativas de los pozos presentes en el prototipo.	160
TABLA 25.	Descripción del enmallado del modelo de laboratorio 1.	164
TABLA 26.	Propiedades de la roca del modelo de laboratorio 1.	165
TABLA 27.	Datos de las condiciones iniciales del modelo de laboratorio en el momento de comenzar el proceso de inyección continua de vapor.	167
TABLA 28.	Condiciones operativas de los pozos presentes en el modelo de laboratorio 1.	168
TABLA 29.	Descripción del enmallado del prototipo de campo.	169
TABLA 30.	Propiedades de la roca del modelo de laboratorio.	171
TABLA 31.	Condiciones operativas de los pozos presentes en el modelo de laboratorio.	172
TABLA 32.	Variación de los parámetros operacionales.	179
TABLA 33.	Comparación de la presiones del prototipo y del modelo.	186
TABLA 34.	Variación de los parámetros de yacimiento.	187
TABLA 35.	Efecto de la variación de la porosidad en el volumen.	191
TABLA 36.	Elementos recomendados para la automatización.	196

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A	CÁLCULO DE LAS RESISTENCIAS DEL CALENTADOR.	197
ANEXO B	CÁLCULO DEL ESPESOR DEL AISLANTE	200
ANEXO C	COSTOS DEL EQUIPO DE DESPLAZAMIENTO	204
ANEXO D	GUIA DE SIMULACIÓN PROCESOS DE INYECCION DE VAPOR	206
ANEXO E	ARCHIVO DE DATOS ENTRADA	253
ANEXO F	PLANOS DEL EQUIPO DISEÑADO	260

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE UN MODELO FÍSICO DE DESPLAZAMIENTO RADIAL PARA SIMULAR PROCESOS DE RECOBRO MEJORADO¹.

AUTORES: JUAN DAVID LESMES GOMEZ²

FERNANDO WILSON LONDOÑO GALVIS³

PALABRAS CLAVES: Escalamiento, Modelos físicos, Diseño, Inyección de vapor, EOR, Simulación Mecánica y de Yacimientos, Equipo para Pruebas de Desplazamiento.

DESCRIPCIÓN

El uso de modelos físicos escalados de laboratorio en la industria petrolera permite predecir el comportamiento de procesos de inyección de agua, vapor, dióxido de carbono y otros métodos de recobro, unidos a otras herramientas de análisis como los simuladores numéricos y analíticos, reducen en forma considerable la incertidumbre en el momento de tomar decisiones, para seleccionar el método de recobro apropiado y la forma adecuada de ejecutarlo.

En este proyecto de grado se diseñó un modelo físico de desplazamiento, aplicando las técnicas de escalamiento de procesos de inyección de vapor. Se diseñó el equipo junto con el porta núcleos utilizando herramientas CAD – CAE; el equipo está diseñado para operar con vapor húmedo a condiciones de presión de hasta 1200 psi (8273.708 KPa) y temperatura máxima de 560 °F (566.48 K). El proyecto incluye los planos del equipo diseñado, el manual de procedimientos para la realización de las pruebas de desplazamiento, junto con la descripción de los costos considerados para llevar a cabo la construcción del equipo. Contiene los resultados de la simulación numérica del modelo de laboratorio y del prototipo de campo, realizada mediante el uso de un software térmico comercial, con el fin de comparar sus comportamientos frente a un proceso de inyección de vapor; a partir de los resultados alcanzados con la simulación numérica, se encontraron parámetros importantes a tener en cuenta a la hora de realizar la simulación de un modelo de laboratorio, elaborándose una guía de simulación para procesos de inyección de vapor en modelos de laboratorio.

Mediante el uso del modelo físico diseñado se contribuirá en la planeación, implementación y operación de proyectos de campo. Este modelo se usará para determinar parámetros críticos como: tasas de inyección y predicción del comportamiento para una inyección de vapor.

¹ TRABAJO DE GRADO

² FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS, ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

³ FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS, ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS

DIRECTORES: Ing. SAMUEL FERNANDO MUÑOZ NAVARRO M.Sc, Ing. RÓMULO NIÑO DELGADO, Ing. JUAN EDUARDO RIVERA.

SUMMARY

TITLE: DESIGN OF A PHYSICAL MODEL OF RADIAL MOVEMENT FOR SIMULATING PROCESSES OF RECOVERY ENHANCED¹

AUTHORS: JUAN DAVID LESMES GOMEZ²
FERNANDO WILSON LONDOÑO GALVIS³

KEY WORDS: Scaling, Physical Models, Design, Steam Injection, EOR, Mechanical and Reservoirs Simulation, Equipment For Proofs Of Movement.

DESCRIPTION

Using physical models scaled of laboratory in the oil industry let to predict the behaviour of processes of water, steam and carbon dioxide injection and other methods of recovery, with other tools of analysis like numerical and analytical simulators, reduce in a significant way the uncertainty in the moment of making decisions, to select the appropriate method of recover and the suitable form to carry it out.

In this graduation project it was designed a physical model of movement, applying the techniques of scaling of processes of steam injection. It was designed the equipment with the core holder using tools CAD – CAE; the equipment is designed to operate with damp steam in pressure conditions up to 1200 psi (8273.708 KPa) and maximum temperature of 560°F (566.48 K). The project includes the plans of equipment designed, the procedures manual to carry out the proofs of movement, with the description of the costs considered to realize the construction of the equipment. It contents the results of the numerical simulation of the laboratory model and of the prototype of field, carried out by means of using commercial thermal software, with the purpose of comparing their behaviours in front of a process of steam injection; from the results reached with numerical simulation, it was found important parameters to take into account when a laboratory model is made, elaborating a guide of simulation for processes of steam injection in laboratory models.

By means of the use of the physical model designed, it will contribute in the planning, implementation and operation of projects of field. This model will be used to determine critical parameters like: injection rates and prediction of the behaviour for a steam injection.

¹ Graduation Project

² Faculty Of Physical-Mechanical Engineering, School Of Mechanical Engineering.

³ Faculty Of Physical-Chemical Engineering, School Of Petroleum Engineering.

Directors: Eng. Samuel Fernando Muñoz Navarro M.Sc, Eng. Rómulo Niño Delgado, Eng. Juan Eduardo Rivera

INTRODUCCION

El petróleo es una importante fuente de energía, este recurso no renovable aporta un gran porcentaje del total de la energía que se consume en el mundo. Debido a que no se han encontrado grandes yacimientos, el constante aumento del precio del crudo y a que volúmenes importantes de hidrocarburo, se han dejado de explotar a causa de la dificultad para su extracción por su alta viscosidad o por no ser económicamente rentable su producción mediante métodos convencionales, es necesario buscar recuperar la mayor cantidad de petróleo por medio de procesos de recobro mejorado. Implementar tales procesos a escala de campo, una evaluación previa de su viabilidad técnico-económica, puede incurrir en costos altos innecesarios. Por esta razón, es importante contar herramientas que permitan estudiar su posible aplicabilidad, tal como la simulación numérica, modelos analíticos y modelos físicos escalados.

Los modelos físicos escalados se han utilizado en diversos problemas de ingeniería desde hace tiempo. Específicamente, en el área de ingeniería de petróleos se han usado para simular el comportamiento de procesos de recobro mejorado, convirtiéndose en una poderosa herramienta de investigación, para estudiar determinados fenómenos que ocurren en el yacimiento de una manera cualitativa y cuantitativa a nivel de laboratorio. A partir de los resultados obtenidos de los modelos físicos será posible conseguir; un mayor entendimiento de los mecanismos que se presentan en estos procesos, establecer correlaciones de desplazamiento tal es el caso del método CGM (Craig-Geffen-Morse), información útil para predecir y evaluar el comportamiento de un proceso de recobro mejorado y se puede establecer la validez y precisión de los modelos matemáticos empleados.

En el país no existe un equipo con tales características, por ello se planteó la necesidad de diseñar un modelo físico de desplazamiento, el cual contribuirá en la investigación, planeación, implementación y operación de proyectos de inyección de vapor en el territorio nacional.

Con el presente trabajo de grado, se diseñó un modelo físico de desplazamiento, aplicando las técnicas de escalamiento para procesos de inyección de vapor, junto con herramientas de diseño e ingeniería asistida por computador. El equipo está diseñado para operar con vapor húmedo a condiciones de presión de hasta 1200 psi (8.27 MPa) y temperatura máxima de 560 °F (293.3 °C). El proyecto incluye los planos del equipo diseñado, el manual de procedimientos para la realización de las pruebas de desplazamiento, junto con la descripción de los costos considerados para llevar a cabo la construcción del equipo. Contiene los resultados de la simulación numérica del modelo de laboratorio y del prototipo de campo, realizada mediante el uso de un software térmico comercial, con el fin de comparar sus comportamientos frente a un proceso de inyección de vapor. A partir de los resultados alcanzados con la simulación numérica, se encontraron parámetros importantes (parámetros numéricos para solucionar el sistema de ecuaciones) a tener en cuenta a la hora de realizar la simulación de un modelo de laboratorio, elaborándose una guía de simulación para procesos de inyección de vapor en modelos de laboratorio.

Mediante la utilización del equipo diseñado, será posible simular físicamente diferentes escenarios en un proceso de inyección de vapor a nivel de laboratorio. Además, con la aplicación de la técnica de escalamiento a los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en él, y junto con otras herramientas como la simulación numérica y los modelos analíticos será posible comparar, analizar e interpretar el comportamiento del modelo de laboratorio y del prototipo de campo, logrando de esta manera una mayor seguridad a la hora de decidir si la

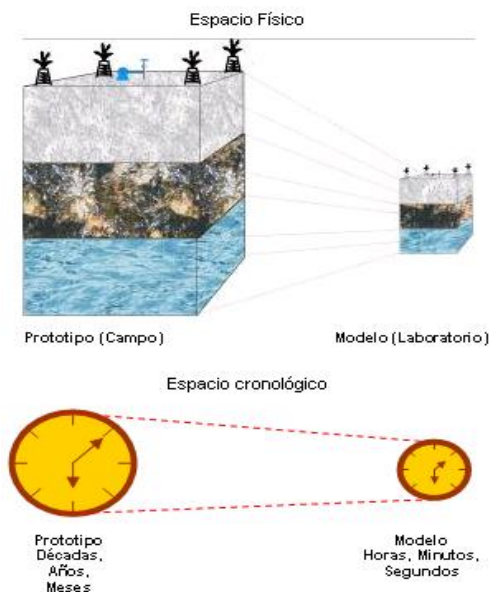
implementación de un proyecto determinado es aplicable, lo cual permitirá elegir la forma adecuada para ejecutarlo.

1. MODELOS ESCALADOS Y RECIPIENTES A PRESION

1.1 MODELOS ESCALADOS

En muchas de las ramas de la ingeniería, la mayoría de los problemas se solucionan con frecuencia por medio de una comparación del comportamiento de dos sistemas similares, aunque de diferente tamaño. Esta se realiza por medio de un prototipo y de un modelo a escala. Un modelo a escala es la reproducción simplificada de fenómenos y dispositivos que ocupan un gran espacio físico y temporal³, como se muestra en la figura 1.

Figura 1. Definición de modelo escalado



Fuente: ARAQUE, D.; MONTAÑEZ, A.: "Habilitación del equipo modelo de cinco puntos SCALA", 2005.

Para poder representar el comportamiento de un prototipo, en primera instancia el modelo deberá ser geoméricamente similar. Además, las relaciones de todas las fuerzas que actúan en el modelo deberán ser iguales a la relación de todas las fuerzas (capilares, viscosas, etc.) que actúan en el prototipo. Para construir un modelo es necesario conocer las fuerzas que afectan el comportamiento del prototipo, aunque las relaciones matemáticas que describen esas fuerzas no necesitan conocerse en detalle¹⁴. Construir un modelo de tal forma que escale cada uno de los parámetros presentes dentro de un proceso determinado es complicado. Por esta razón, es conveniente relajar o despreciar uno o más de los parámetros en consideración, esto se realiza cuando se justifica que estos no se tomen en cuenta en el escalamiento.

Los modelos tienen la ventaja de representar los fenómenos físicos que ocurren en un proceso en particular y, junto con herramientas de análisis como los simuladores numéricos y analíticos, reducen en forma considerable la incertidumbre en la toma de decisiones, logrando con esto pronósticos más acertados en los procesos de recobro.

1.2 RESEÑA HISTÓRICA

El primer estudio que se publicó sobre modelos isotérmicos escalados, fue realizado por Leverett³⁰ y otros en 1942, en el cual se presentó la teoría de flujo radial y lineal en el yacimiento y describieron la construcción y operación de modelos para estudiar los procesos experimentales junto con su teoría.

Rapoport³⁸ y Leas en 1953, estudiaron inyecciones lineales con mayor detalle y presentaron leyes de escalamiento. Extendieron la teoría original de Buckley-Leverett para incluir los efectos de la presión capilar. Posteriormente Rapoport³⁹ en 1955, formuló matemáticamente las leyes de escalamiento introduciendo la

técnica de análisis inspeccional en las ecuaciones que gobiernan el flujo bifásico, donde relaciona dinámicamente sistemas de flujo similares en medios porosos, cada uno envolviendo dos fluidos inmiscibles e incompresibles. Croes y Schwarz¹⁰ en 1955, presentaron un detallado estudio de los principales grupos adimensionales que gobiernan la inyección de agua y analizaron la influencia de la relación de viscosidades aceite/agua sobre la eficiencia del recobro.

Geerstma¹⁷ y otros en 1956, utilizaron las técnicas de análisis inspeccional y dimensional para extender las leyes del escalamiento, al incluir los efectos térmicos y presentaron las leyes de escalamiento que gobiernan la inyección de agua caliente. Dietz¹¹ y Baker⁴ en 1967, condujeron estudios escalados con inyección de agua caliente. Baker ajusto sus experimentos escalados con varias soluciones analíticas simplificadas.

Los modelos físicos para procesos de inyección de vapor requieren criterios de escalamiento más complicados, comparados con aquellos requeridos para la inyección de agua. Se han desarrollado dos clases generales de modelos escalados para inyección de vapor: los que operan a altas y bajas presiones.

Los modelos a alta presión usan el criterio desarrollado por Pujol y Boberg³⁵ en 1972, mediante su trabajo demostraron la dificultad de escalar simultáneamente las fuerzas viscosas, gravitacionales y capilares en un proceso de inyección de vapor. Junto con estudios numéricos, demostraron que las fuerzas capilares pueden despreciarse para los aceites muy viscosos. Hygen y Lowry²³ en 1983, usaron el criterio de Pujol y Boberg para construir un modelo de alta presión. Sin embargo, este tipo de sistemas tiene la desventaja de requerir altas temperaturas y altas presiones, esto implica construir un equipo muy grande, pesado y poco versátil. El criterio más ampliamente usado para modelos a baja presión es aquel presentado por Stegemeier⁴² y otros en 1980. Al operar a bajas presiones, es conveniente usar materiales no metálicos para construir el modelo. En 1988

Kimber, Puttagunta y Farouq Ali²⁷, presentaron varios métodos de escalamiento para aplicarlos en procesos de inyección de vapor; además examinaron sus fortalezas y debilidades. Luego en 1989 Kimber y Farouq Ali¹⁵, derivaron y probaron tres criterios de escalamiento para modelos de inyección de vapor a alta presión mediante una serie de experimentos.

En 1992 Remolina y Tibocho⁴⁰ desarrollaron el proyecto “Determinación de los parámetros de escalamiento para modelar físicamente yacimientos de aceite en procesos de recuperación mejorada usando dióxido de carbono o vapor”, utilizando una perspectiva similar a la empleada por Rojas y Kimber en sus respectivas disertaciones de doctorado.

En 1993 el Instituto Colombiano del Petróleo inició el proyecto “Desarrollo de un modelo escalado para inyección de vapor”¹², el cual involucró un análisis de la formulación matemática básica para el desarrollo de un modelo escalado para inyección de vapor; además se realizó un diseño preliminar del modelo físico, junto con un análisis de costos para la construcción de dicho equipo.

1.3 FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

1.3.1 Principio de similitud. Los modelos escalados se diseñan sobre la base del principio de similitud, establecido por Johnstone y Thring en 1957. Este principio dice: *“la configuración espacial y temporal de un sistema físico, está determinada por las relaciones de magnitud dentro del sistema, y no depende del tamaño o naturaleza de las unidades que se emplean para medir estas magnitudes”*.

Dos sistemas son similares si sus propiedades físicas más relevantes están en una relación constante, independiente del tipo de unidades. Para predecir un

comportamiento lo mas real posible, el prototipo y el modelo deberán ser similares en el sentido geométrico, mecánico (cinemática, dinámico), térmico y químico.

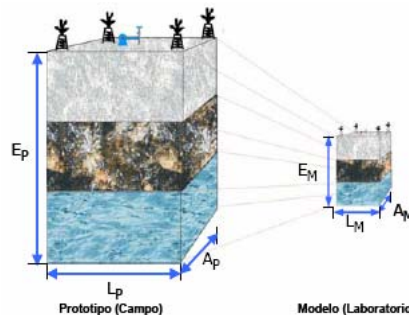
1.3.2 Similitud Geométrica. Esta similitud establece que el modelo y el prototipo son similares con respecto a las dimensiones espaciales¹⁴. Esta condición se logra si la relación de todas las dimensiones lineales correspondientes, tales como longitud, ancho, espesor, etc., es la misma⁴⁸. Dicha relación se conoce como Factor de Escalamiento “a”, y se define en la ecuación 1. En la figura 2 se ilustra la similaridad geométrica.

$$\frac{H_P}{H_M} = \frac{L_P}{L_M} = \frac{W_P}{W_M} = \text{Relación de escala} \quad (1)$$

Donde,

H_P = Espesor del prototipo. H_M = Espesor del modelo.
 L_P = Longitud del prototipo. L_M = Longitud del modelo.
 W_P = Ancho del prototipo. W_M = Ancho del modelo.

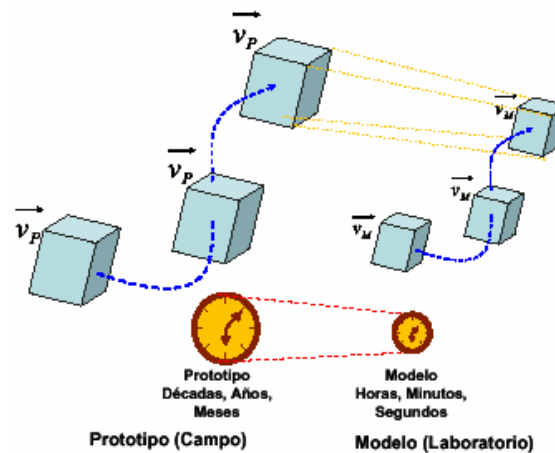
Figura 2. Similitud Geométrica



Fuente: ARAQUE, D.; MONTAÑEZ, A.: “Habilitación del equipo modelo de cinco puntos SCALA”, Tesis de grado 2005.

1.3.3 Similitud Cinemática. Esta condición se cumple cuando las partículas que se mueven, describen trayectorias geoméricamente similares en intervalos de tiempo correspondientes, tanto en el modelo como en el prototipo. Esta condición existe, si las razones de los componentes de velocidad en todos los puntos correspondientes, en el modelo y en el prototipo son iguales. Se requiere entonces que el modelo y el prototipo sean similarmente geoméricos, para así lograr la similitud cinemática⁴⁸.

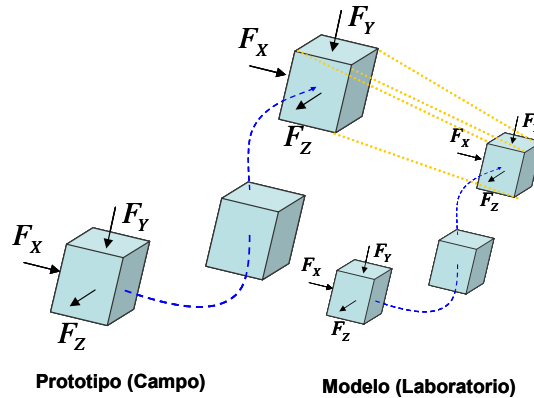
Figura 3. Similitud Cinemática



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

1.3.4 Similitud Dinámica. Dos sistemas geoméricamente similares cumplen esta condición, si las fuerzas en puntos semejantes y tiempos homólogos que actúan sobre elementos de masa de fluido, están en la misma relación en todos los puntos en los dos sistemas⁴⁸.

Figura 4. Similitud dinámica



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Entre las fuerzas que causan el movimiento de los fluidos en el medio poroso se encuentran las fuerzas inerciales, gravitacionales, viscosas y capilares. En un sistema en el que predominan las fuerzas gravitacionales, viscosas y capilares, la similitud dinámica puede alcanzarse si la relación de fuerzas gravitacionales a viscosas y la relación de fuerzas capilares a viscosas tienen el mismo valor en el modelo y en el prototipo.

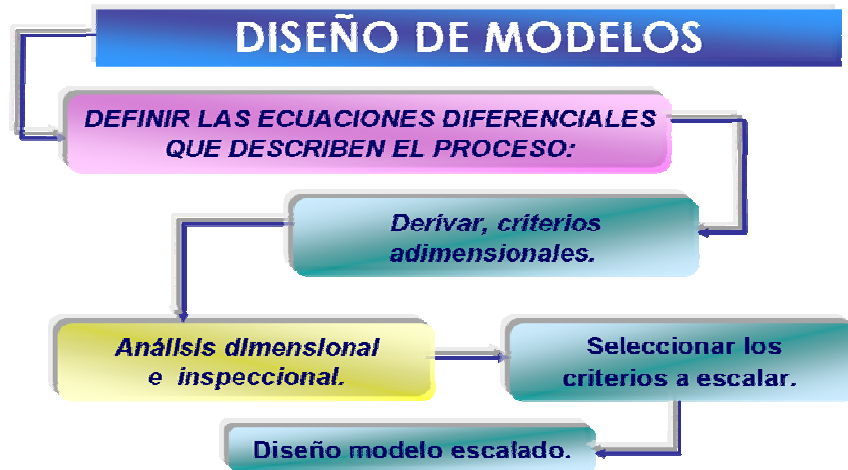
1.3.5 Similitud Térmica. Dos sistemas son térmicamente similares si las diferencias de temperatura entre puntos equivalentes se mantienen en una relación constante durante todo el movimiento⁴⁸.

1.3.6 Similitud Química. Dos sistemas son químicamente afines si contienen fluidos similares y el medio poroso tiene las mismas características químicas⁴⁸.

1.4 METODOLOGÍA DE DISEÑO EN MODELOS ESCALADOS

Para obtener los criterios adimensionales necesarios al momento de escalar un determinado proceso, es necesario seguir las siguientes etapas (ver figura 5):

Figura 5. Metodología de diseño de modelos escalados



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

De acuerdo con el anterior procedimiento, se procede a efectuar el diseño del modelo escalado.

1.4.1 Definición de las ecuaciones diferenciales que describen el proceso.

Antes de aplicar la técnica de escalamiento como tal, es necesario establecer las ecuaciones diferenciales que describen el proceso de recobro mejorado.

En un proceso de escalamiento es importante hallar los criterios adimensionales; para esto hay que definir las ecuaciones que rigen el proceso de recobro que se desea escalar. Por medio del análisis dimensional e inspeccional se obtienen estos criterios adimensionales. En el análisis dimensional, se establecen cuales variables son determinantes en el proceso; estas son ordenadas en grupos adimensionales para constituir la ecuación de estado adimensional; la combinación de las variables se realiza por prueba y error. En el análisis inspeccional, se realiza un proceso matemático con base en las ecuaciones

diferenciales que describen el fenómeno para llevarlas a su forma adimensional y, de allí, obtener un conjunto de grupos adimensionales independientes entre sí.

1.4.2 Derivación de los criterios adimensionales mediante el análisis dimensional e inspeccional. Un conjunto de criterios de escalamiento se derivan por análisis dimensional e inspeccional. El análisis dimensional requiere de un conocimiento completo del conjunto de variables relevantes que influyen en el proceso. El análisis inspeccional requiere las variables en un conjunto de ecuaciones, las cuales describen completamente el proceso. El análisis inspeccional se usa con mayor frecuencia que el análisis dimensional, pero generalmente el análisis inspeccional y dimensional se usan en conjunto para asegurar que ningún grupo de escalamiento sea omitido.

1.4.2.1 Análisis dimensional. Expresa el comportamiento de un sistema físico en términos del menor número de variables independientes, de tal forma que no se afectada por cambios en la magnitud de las unidades de medida.

El primer paso en el análisis dimensional de un proceso es determinar cuáles variables son las más importantes en dicho proceso; variables como la geometría del sistema, las propiedades del medio poroso, la interacción roca-fluido, las propiedades de los fluidos, las condiciones de desplazamiento, entre otros. Esta etapa se debe realizar con especial cuidado para no omitir ninguna variable.

Las variables son ordenadas en grupos adimensionales, que consisten en relaciones de cantidades semejantes (longitudes, velocidades, fuerzas, etc.), los cuales caracterizan el sistema. Estos grupos adimensionales constituyen las variables en la ecuación de estado adimensional propia del sistema físico.

El análisis dimensional se fundamenta en el Teorema π de Buckingham (1957): “Si una ecuación es dimensionalmente homogénea, puede ser reducida a una relación entre un conjunto completo de productos adimensionales”.

1.4.2.2 Análisis inspeccional. Es un proceso matemático realizado con base en las ecuaciones diferenciales que describen un fenómeno específico, su objetivo es transformar estas ecuaciones a su forma adimensional, y de allí, obtener un conjunto de grupos adimensionales independientes entre sí.

Estas ecuaciones se pueden describir como:

Conservación de cantidades básicas en el sistema. Entre las ecuaciones de conservación tenemos: la ecuación de conservación de la materia, la ecuación de conservación del momentum (Ley de Darcy) y, la ecuación de transferencia de calor.

Propiedades de los componentes individuales. Influencia de la presión y temperatura en la densidad de los fluidos (ecuación de estado), influencia de la temperatura en la viscosidad.

Interacción de los componentes individuales. Fenómeno de capilaridad en la interfase de los fluidos.

Todas las ecuaciones son relaciones entre variables independientes, variables dependientes y constantes. El número total de variables menos el número total de ecuaciones determina el número de variables independientes. Las variables independientes pueden convertirse en grupos adimensionales independientes dividiéndolas por un valor con la dimensión característica del sistema. Cuando las ecuaciones son dimensionalmente homogéneas, las variables independientes y

los términos constantes pueden llevarse a la forma adimensional dividiendo cada ecuación por una o más de sus constantes seleccionadas adecuadamente.

1.4.3 Selección de los criterios a escalar. Los diferentes estados de similitud pueden especificarse en términos de criterios de escalamiento, los cuales son relaciones intrínsecas de medidas, fuerzas o variables dentro de cada sistema.

Puesto que estos criterios son relaciones de cantidades semejantes, estos son adimensionales. Los criterios de escalamiento pueden ser derivados utilizando el análisis inspeccional y el análisis dimensional, los cuales se mencionaron anteriormente, obteniendo un conjunto de grupos similares.

Escalar todas las variables dentro de un fenómeno o proceso es bastante complejo, dependiendo del proceso en que se utilicen ciertos parámetros, algunos de los criterios pueden ser relajados o despreciados al momento de realizar el escalamiento.

Basados en ajustes de ingeniería, el conjunto de grupos similares puede ser combinados o modificados, con el fin de obtener un subconjunto de grupos escalados, con los cuales se pueda establecer similitud entre el prototipo de campo y el modelo. Autores como Farouq Ali, Kimber y Puttagunta²⁷, desarrollaron métodos o enfoques que facilitan la elección de los criterios de escalamiento que se van a tener en cuenta y de aquellos que deben ser relajados. Limitando estos subconjuntos a aquellos que usan los mismos fluidos en el modelo, como los que se encuentran en el prototipo, cinco métodos o enfoques para modelos a alta presión se desarrollaron. Estos se ilustran en la figura 6.

Figura 6. Métodos de escalamiento



Fuente: KIMBER K. D., FAROUQ ALI and PUTTAGUNTA V. R.: "New Scaling Criteria and Their Relative Merits for Steam Recovery Experiments". JCPT, July, 1988.

Primer Enfoque: Los mismos fluidos, un medio poroso diferente, una diferente caída de presión y similitud geométrica. Desarrollado originalmente por Pujol y Boberg.

Segundo enfoque: Los mismo fluido, el mismo medio poroso, igual caída de presión y geometría relajada. Este enfoque no escala los efectos gravitacionales.

Tercer enfoque: Los mismos fluidos, un medio poroso diferente, caída de presión diferente y geometría relajada.

Cuarto enfoque: Los mismos fluidos, el mismo medio poroso, diferente caída de presión y similitud geométrica.

Quinto enfoque: Diferentes fluidos, diferente medio poroso, diferente caída de presión, igual relación de movilidad, similitud geométrica.

Al tener en cuenta los enfoques anteriormente mencionados, se hace menos complejo escalar un proceso de recobro, puesto que estos enfoques permiten relajar (despreciar) y escoger los parámetros de escalamiento.

1.4.4 Relajación de los parámetros de escalamiento. El conjunto completo de grupos adimensionales, los cuales se obtienen por análisis dimensional e inspeccional son imposibles de satisfacer simultáneamente. Por esta razón, es necesario relajar algunos de los criterios de escalamiento tales como: Estructura del medio poroso, fuerzas inerciales y capilares, geometría del sistema, efectos de frontera. A continuación se describe la influencia de estos criterios a la hora de realizar un proceso de escalamiento.

1.4.4.1 Estructura del medio poroso. La estructura del medio poroso se escala por medio del grupo L/\sqrt{k} , el cual se puede despreciar si el diámetro medio de los poros es mucho más pequeño que la menor dimensión del yacimiento, es decir, si el valor de L/\sqrt{k} es muy grande. Experimentalmente, Abbasov y Malikov¹ encontraron un valor límite de $26.5 \cdot 10^4$, a partir del cual el recobro de aceite es independiente del grupo que escala la estructura del medio.

1.4.4.2 Fuerzas Inerciales. Las fuerzas inerciales pueden despreciarse si las tasas de flujo en el modelo y en el prototipo son lo suficientemente bajas como para que el número adimensional (Número de Reynolds, $\rho_w |\bar{v}_t| \sqrt{k} / \mu_w$, el cual relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas,) pueda relajarse; es decir, se presenta flujo de tipo laminar a través del medio poroso.

1.4.4.3 Fuerzas capilares. Para lograr un escalamiento completo, se requiere que las relaciones de presión capilar y permeabilidad relativa deben ser funciones de saturación similares entre el modelo y prototipo. Para el caso de recobro de aceites altamente viscosos en arenas no consolidadas, Pujol y Boberg mostraron que las fuerzas capilares no necesitan escalarse. Para procedimientos de desplazamiento inmisible, Demetre concluyó que el recobro al momento de la ruptura en condiciones de relación de movilidad mayor que uno, los efectos en las fuerzas capilares son despreciables.

1.4.4.4 Geometría del Sistema. En sistemas en los que el flujo a través del estrato es despreciable comparado con el flujo paralelo a él, es posible relajar o despreciar el grupo L/H . Sin embargo, en sistemas estratificados, donde la segregación gravitacional es significativa, este grupo no es relajable. Por lo general, esta condición solo se cumple cuando los caudales de inyección utilizados en el patrón son bajos.

1.4.4.5 Efectos de Frontera. El desplazamiento lineal de aceite por el fluido desplazante a través de un medio poroso sigue dos patrones de comportamiento diferentes: el desplazamiento dentro del mismo medio poroso y los efectos finales secundarios que se presentan en las fronteras del medio, que ocasionan una distorsión del comportamiento lineal y estable del flujo; el efecto final de salida causa una saturación excesiva de la fase mojante en la salida, y retarda el momento de la irrupción del frente de inyección. Los efectos finales de entrada se desarrollan en medios mojados por agua como resultado de la imbibición localizada y espontánea de la fase mojante.

1.5 RECIPIENTES A PRESIÓN: USOS Y CARACTERÍSTICAS DE CILINDROS PRESURIZADOS⁹

Los recipientes contenedores para fluidos presurizados pueden ser esféricos, elipsoidales, toroidales, cilíndricos o combinaciones de estas geometrías. A pesar del hecho de que los recipientes esféricos son más favorablemente esforzados que los otros, la ventaja práctica de la facilidad de fabricación hace al recipiente cilíndrico, por mucho, el más ampliamente usado.

En la práctica, los recipientes a presión cilíndricos pueden ser internamente o externamente presurizados; pueden ser de pared delgada o de pared gruesa; y, pueden ser abiertos o cerrados. Ellos pueden ser fabricados como un cascarón monolítico, por medio de la unión de capas múltiples o por medio de la unión de laminas mediante soldadura.

Entre las diferentes aplicaciones y usos se tienen los tanques, las tuberías, las cámaras de los cohetes y los actuadores hidráulicos y neumáticos.

Las discontinuidades geométricas en recipientes a presión requieren especial atención del diseñador. La soldadura entre el recipiente y el mecanismo de cierre debe ser evaluada. Las boquillas en el recipiente para permitir entrada o salida de flujo, la boquilla de inspección y limpieza, la unión del flange, las costuras de la soldadura y las transiciones de espesores deben ser cuidadosamente consideradas en el diseño seguro de un recipiente a presión. Todas estas discontinuidades producen complicados estados de esfuerzo e incertidumbres en el análisis de falla. Se aconseja al diseñador consultar los códigos apropiados de diseño cuando analice recipientes a presión. Los códigos de diseño integran procedimientos para la prevención de fallas con análisis teóricos aplicables para maximizar la fiabilidad y seguridad de la estructura.

1.6 POTENCIALES MODOS DE FALLA

Dependiendo de la aplicación, el nivel de presión, el nivel de temperatura, el ambiente y la composición del fluido presurizado, los recipientes a presión son vulnerables a fallas potenciales por muchos modos posibles. Los modos de falla son procesos físicos que toman lugar o combinan sus efectos para producir una falla.

La falla de un recipiente a presión puede ocurrir por:

- **Falla plástica:** Se presenta cuando ocurre la deformación plástica (irrecuperable) en un elemento dúctil, llevada a cabo por las cargas impuestas, y llega a ser lo suficientemente grande para interferir con la habilidad de la maquina para realizar su función.
- **Fractura dúctil:** Ocurre cuando la deformación plástica en un elemento que exhibe comportamiento dúctil, es llevada al extremo causando la división de la pieza en dos partes (ruptura, rompimiento).
- **Fractura frágil:** La falla ocurre cuando la deformación elástica en un elemento que exhibe comportamiento frágil, es llevada el extremo causando la separación del miembro en dos o más piezas.
- **Fatiga** (incluyendo efecto térmico o corrosión): Es un término general dado a la separación súbita y catastrófica de un elemento en dos o más piezas como resultado de la aplicación de cargas fluctuantes o deformaciones sobre un periodo de tiempo. La falla toma lugar por la iniciación y propagación de una grieta hasta que llega a ser inestable y se propaga súbitamente hasta la falla. Cuando se presenta fatiga por corrosión se tiene un modo combinado de falla en el cual la corrosión forma huecos en el material, los cuales aceleran la falla por fatiga.

- **Creep:** Falla que ocurre en cualquier elemento, el cual actúa sobre un periodo de tiempo bajo la influencia del esfuerzo y la temperatura hasta que los cambios dimensionales interfieren con la habilidad del elemento para desarrollar su función.
- **Falla por corrosión:** Implica que una parte de una máquina es incapaz de realizar su función debido al deterioro indeseado del material como resultado de la interacción química y electroquímica con el ambiente en que esta en contacto. La corrosión a menudo interactúa con otros modos de falla, tales como la fatiga.
- **Esfuerzo bajo corrosión:** La falla ocurre cuando el esfuerzo aplicado a un elemento en un ambiente corrosivo genera una superficie de grieta localizada.
- **Combinación de creep y fatiga.**

1.7 MATERIALES PARA RECIPIENTES A PRESIÓN

Considerando los potenciales modos de falla, se puede observar que los materiales candidatos para recipientes a presión deben tener buena resistencia (incluyendo buena resistencia a la fatiga), alta ductilidad, buena formabilidad, buena soldabilidad y bajo costo. En aplicaciones de elevada temperatura el material seleccionado debe también tener buena resistencia al creep y en muchos casos buena resistencia a la corrosión. Típicamente los aceros reúnen la mayoría de estos criterios y por esto son ampliamente usados en la fabricación de recipientes a presión. En circunstancias especiales, otros materiales pueden ser seleccionados, especialmente cuando manejan altas temperaturas o ambientes corrosivos específicos. El ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL CODE es

sugerido para consultar un extensivo catálogo de especificaciones de material y sus correspondientes esfuerzos de diseño para la construcción de recipientes a presión. Esta lista de materiales incluye aceros al carbón y aceros de baja aleación, aleaciones no ferrosas, aceros de alta aleación, hierro fundido y aceros ferríticos. Se aconseja a los diseñadores de recipientes a presión familiarizarse con el ámbito del código, aun si el código de diseño no es legalmente requerido.

La entidad que se encarga de formular estas reglas estándar para la construcción de calderas y otros recipientes a presión es el ASME BOILER AND PRESSURE VESSEL COMMITTEE. La función de este comité es establecer las reglas de seguridad que gobiernan el diseño, fabricación e inspección durante la construcción de estos equipos con el objetivo de proteger la vida y la propiedad y a su vez proveer un margen de deterioro en servicio tendiente a brindar una larga vida útil con seguridad.

1.8 PRINCIPIO DE LA TEORÍA DE LA ELASTICIDAD

Cuando los diseñadores analizan esfuerzos y tensiones en un elemento de una máquina, basan sus análisis sobre un modelo de resistencia de materiales o sobre un modelo que cumple con la teoría de la elasticidad. La teoría de recipientes a presión trata a profundidad sobre recipientes cilíndricos y cascarones de revolución sometidos a presión. Usando la aproximación en la resistencia de materiales, se pueden hacer simplificaciones sobre la distribución de esfuerzo y tensión en el cuerpo. Es familiar asumir que el esfuerzo permanece plano y que el esfuerzo de flexión es proporcional a la distancia al eje neutro. Por otra parte, el uso de una más complicada pero más precisa teoría de la elasticidad permite una distribución de esfuerzos y tensiones dentro del cuerpo.

Las relaciones básicas de la teoría de la elasticidad necesarias para analizar un cilindro de pared gruesa incluyen:

- Ecuaciones diferenciales de equilibrio.
- Relaciones fuerza-desplazamiento; por ejemplo la ley de Hooke.
- Relaciones de compatibilidad geométrica (continuidad del material).
- Condiciones límite (las fuerzas asociadas con la distribución del esfuerzo dentro del cuerpo deben estar en equilibrio con las fuerzas externas en sus límites).

Un cilindro puede ser analizado como un cilindro de pared delgada si su espesor es el 10 por ciento del diámetro o menos. Para un cilindro de paredes gruesas el esfuerzo tangencial σ_t y el esfuerzo radial σ_r , varían no linealmente a través del espesor de pared. Por supuesto, cualquier recipiente a presión puede ser correctamente analizado como de pared gruesa, pero si se asume que es de pared delgada es válido, una significativa simplificación resulta en su análisis.

1.9 FORMULACIÓN MATEMÁTICA.

Las formulas que expresan el esfuerzo del material debido a la presión para recipientes cilíndricos de pared gruesa son²⁶:

$$\sigma_t = P_i \frac{(r_o^2 + r_i^2)}{(r_o^2 - r_i^2)} \quad (2)$$

$$\sigma_r = -P_i \quad (3)$$

Donde:

σ_t = Esfuerzo tangencial (Máximo esfuerzo localizado en la superficie interna del recipiente)

σ_r = Esfuerzo radial.

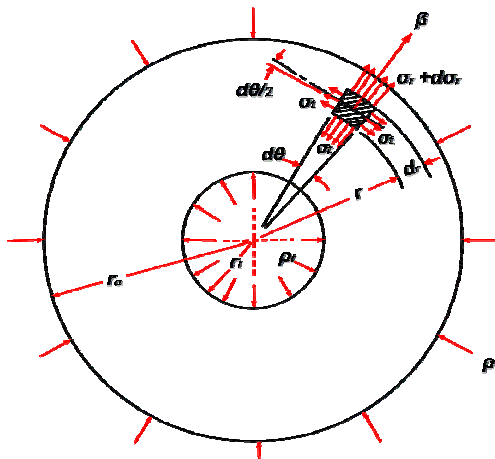
P_i = Presión interna en el recipiente

r_o = Radio externo del recipiente

r_i = Radio interno del recipiente

Estas ecuaciones están deducidas para un cilindro con las condiciones geométricas y de carga que se aprecian en la figura 7, luego de eliminar la presión externa P_o (presión atmosférica).

Figura 7. Cilindro de pared gruesa caso general



Fuente: Juvinal C. "R. Stress, Strain and Strength". Mc Graw Hill 1967.

1.9.1 Teorías de falla. Se tendrán en cuenta dos teorías de falla:

- **Teoría del máximo esfuerzo normal:** La falla se presentará cuando el más alto esfuerzo normal (en comportamiento elástico) en la prueba de tensión se

alcance; el cual es S_y . En esta teoría se utiliza la ecuación (2). Reemplazando el valor del esfuerzo, la ecuación resultante es de la siguiente forma:

$$S_y = P_i \frac{(r_o^2 + r_i^2)}{(r_o^2 - r_i^2)}$$

Despejando para r_o :

$$r_o = \sqrt{r_i^2 \frac{(S_y + P_i)}{(S_y - P_i)}} \quad (4)$$

- **Teoría del máximo esfuerzo de corte:** La falla iniciará cuando el más alto esfuerzo de corte en el cilindro alcance un valor de $S_y/2$. La ecuación a utilizar es la siguiente: $\tau_{\max} = (\sigma_t - \sigma_r)/2$ Donde τ_{\max} es el esfuerzo de corte máximo presente en el material. Reemplazando el valor del esfuerzo, la ecuación resultante es de la siguiente forma:

$$\frac{S_y}{2} = \frac{\sigma_t - \sigma_r}{2}$$

Reemplazando $\sigma_t = y$ $\sigma_r =$ de las ecuaciones (2) y (3):

$$S_y = P_i \frac{(r_o^2 + r_i^2)}{(r_o^2 - r_i^2)} + P_i$$

Despejando para r_o :

$$r_o = \sqrt{r_i^2 \frac{S_y}{(S_y - 2P_i)}} \quad (5)$$

Con la teoría del máximo esfuerzo de corte se obtiene un margen de seguridad mayor que con la teoría del máximo esfuerzo normal.

1.10 EQUIPOS DE MODELOS ESCALADOS SIMILARES ENCONTRADOS EN LA LITERATURA

En esta sección se presenta información útil de artículos que tratan el tema de los modelos físicos escalados recopilados de la literatura, con el objetivo de tener un conocimiento de las metodologías utilizadas por diversos autores, conocer sus experiencias con el escalamiento y el diseño de los modelos de laboratorio (Problemas que se presentaron y como se solucionaron); todo esto con el propósito de hacer las sugerencias o las elecciones correctas para el diseño del equipo.

1.10.1 Artículo 1. An Experimental Study of Heat Flow in Steam Flooding. Autor: P. E. BAKER⁴.

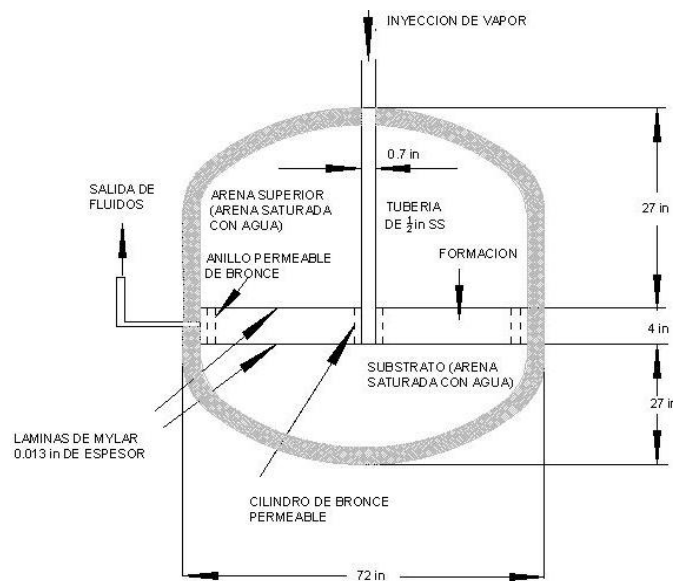
DISCUSIÓN: Se realizó un estudio experimental de flujo de calor en la inyección de vapor en un modelo con flujo de fluidos plano radial. El modelo fue diseñado para estudiar la inyección de agua caliente en flujo plano-radial con inyección desde un pozo central en un cilindro con empaquetamiento de arena que tuvo un radio mucho más grande que su espesor.

EQUIPO EXPERIMENTAL: Incluye un recipiente a presión, yacimiento, arena superior y substrato, pozo de inyección y múltiples para el flujo de salida.

El medio poroso consistió de un empaquetamiento de una arena con las siguientes características:

- Cuatro pulgadas (10.16 cm) de espesor.
- Aproximadamente 6 pies (1.828 m) de diámetro.
- Porosidad de 35 %.
- Permeabilidad de 100 darcies.
- Difusividad térmica de alrededor de 0.75 pies²/día (0.0696 m²/día).

Figura 8. Dibujo esquemático del modelo de flujo.



Fuente: BAKER, P. E.: "An Experimental Study of Heat Flow in Steam Flooding". SPE 2208. 1968.

El yacimiento fue separado de la arena superior y del sustrato por una lamina de 0.013 pulgadas (0.33 mm) de espesor de plástico ("Mylar"), la cual previno la comunicación del fluido pero no afectó significativamente la transferencia de calor conductiva. El pozo inyector fue un tubo de acero inoxidable de 0.5 pulgadas (1.27 cm), 0.7 pulgadas (1.77 cm) de diámetro externo, el cual fue sellado a la lamina superior de Mylar y terminó en un cilindro sinterizado de bronce.

La arena superior y el substrato fueron sobrepresionados de 10 a 15 psi (68.9 a 103.4 kPa) con nitrógeno para asegurar un buen contacto entre las láminas.

1.10.2 Artículo 2. Scaling Accuracy of Laboratory Steam Flooding Models. Autores: Pujol y Boberg³⁵.

DISCUSIÓN: Este artículo trata de la adecuación de los métodos de escalamiento empleados para estudios de inyección de vapor en modelos de laboratorio de yacimientos que contienen aceites viscosos. Para aceites altamente viscosos, se encontró que el escalamiento exacto de la presión capilar no se requiere. Para estos aceites la proporción de fuerzas capilares a viscosas es tan baja que la presión capilar escalada tiene un efecto despreciable sobre el comportamiento de recobro de aceite. Sin embargo, en el caso de aceites de viscosidad media (menores a 10.000 cp), presiones capilares escaladas resultan en la predicción óptima del recobro de aceite.

El modelo de laboratorio simulado fue un octavo (1/8) de un patrón de cinco puntos de 10 acres (0.04046 km²) con una permeabilidad absoluta de 400 darcies y un 15 % de volumen poroso.

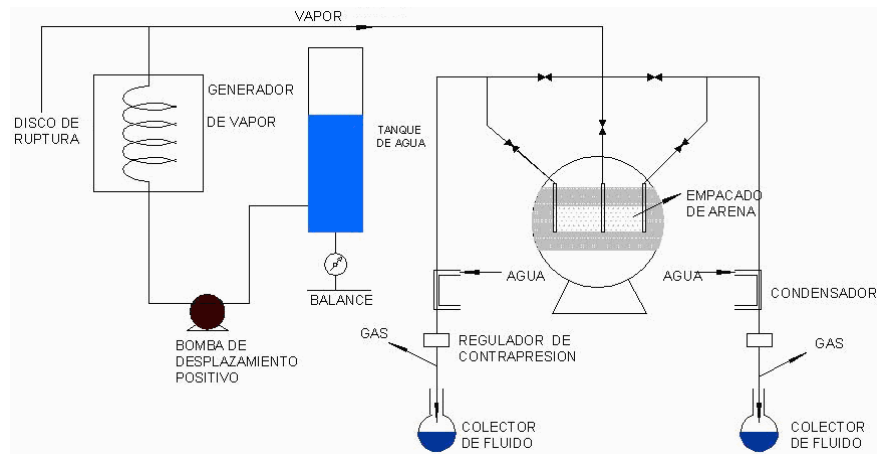
1.10.3 Artículo 3. Laboratory Steamfloods in Half of a Five-Spot. Autores: Hans y Huygen²⁰.

DISCUSIÓN: Se inyectó vapor en un modelo de laboratorio a diferentes temperaturas y presiones en un patrón de cinco puntos. Una pequeña fuga persistió a través de todas las corridas.

EQUIPO EXPERIMENTAL: El modelo consistió de las siguientes partes: (ver figura 9)

- Un empaquetamiento con arena Berea.
- Un pozo de inyección y dos pozos de producción.
- Un recipiente a presión de 31.9 pulgadas (81 cm) de diámetro interno sometido a 1000 psi (6.89 MPa).
- Un generador de vapor de 16 Kilowatts.
- Dos condensadores en las líneas de producción para enfriar y condensar los fluidos antes de alcanzar el regulador de presión, los separadores gas líquido y los recipientes recolectores.
- Indicadores de presión, termocuplas de Cromo-Aluminio y las válvulas necesarias para controlar el flujo de fluidos.
- Se uso una bomba de desplazamiento positivo para bombear agua destilada de un tanque de almacenamiento.
- Tanque de almacenamiento.

Figura 9. Diagrama esquemático del equipo de pruebas.



Fuente: HANS H., HUYGEN A.: "Laboratory Steamfloods in Half of a Five-Spot", SPE 6171. 1976. Gulf Research and Development Co.

Modelo: Dimensiones de la caja: 47.6 pulgadas (12.08 cm) X 24.8 pulgadas (6.30 cm) X 5.98 pulgadas (1.52 cm). Material: Acero inoxidable. Espesor de la lámina: 0.018 pulgadas (0.457 mm). La distancia entre el pozo de inyección y cada uno de los productores fue de 31 pulgadas (7.88 cm).

Presión y Temperatura: Varió de una corrida a otra de 58 psia (0.4 Mpa) y 291 °F (144 °C) a 843 psia (5.76 Mpa) y 524 °F (273 °C).

1.10.4 Artículo 4. Representing Steam Processes with Vacuum Models⁴².
Autores: Stegemeier, Laumbach y Volek.

DISCUSIÓN: Se presentan parámetros para el escalamiento de un modelo físico, sus resultados se escalaron con el objetivo de comparar su comportamiento con el prototipo de un campo. Un conjunto de parámetros de similitud se determinaron por análisis inspeccional. Se presentan técnicas para realizar el escalamiento, incluyendo una descripción de los modelos de laboratorio, materiales típicos y procedimientos para la realización de los experimentos.

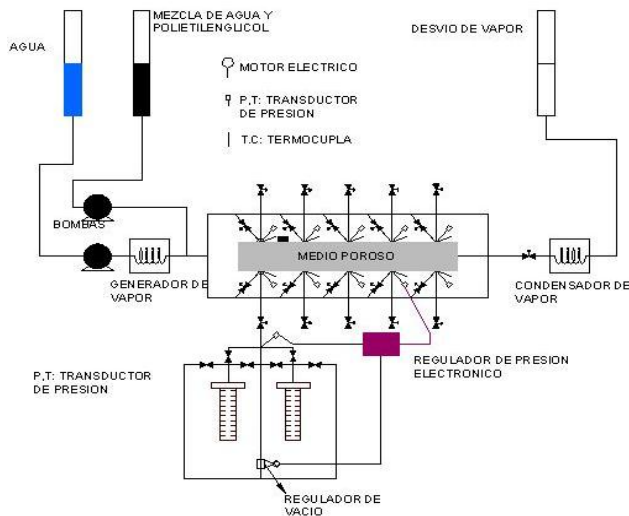
VanMeurs sugirió la aplicación de esta técnica de vacío a experimentos de vapor escalados a baja temperatura, cerca de 200 °F (93.3 °C).

En este modelo se presentaron problemas de fugas que fueron detectadas arrojando agua al modelo y observando burbujeo en el orificio de la fuga.

EQUIPO EXPERIMENTAL: El componente central del aparato utilizado es un paquete de vidrio rodeado en los lados por fibra de vidrio rígida y una delgada lamina flexible de Teflón en la superficie y en el fondo. Los pozos de inyección y producción se ubicaron adecuadamente en una posición dentro de la fibra de vidrio.

El modelo se construyó con la fabricación de un molde de aluminio sobre el cual un marco en forma de U laminado se constituye de capas alternadas de fibra de vidrio y resina epoxy.

Figura 10. Esquema del equipo de inyección y producción.



Fuente: STEGEMEIER, G. L., LAUMBACH, D. D., VOLEK, C. W.: "Representing Steam Processes with Vacuum Models". SPE 6787. 1980. Shell Oil Co.

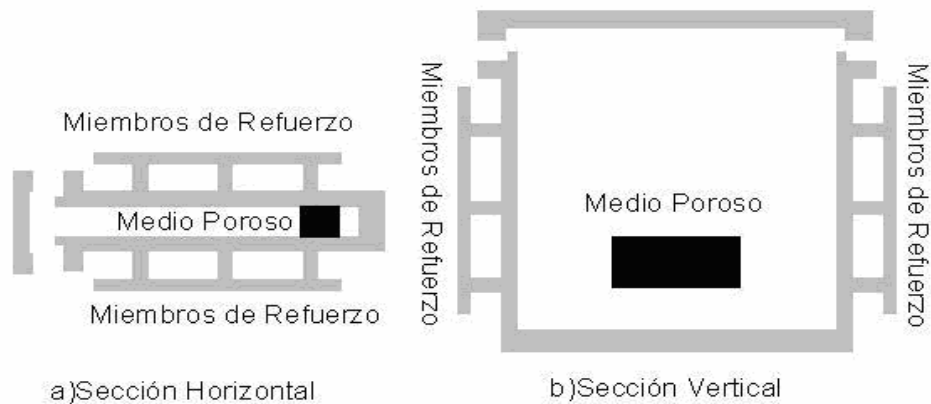
1.10.5 Artículo 5. "Dynamics of Subcritical CO₂/Brine Floods for Heavy-Oil Recovery"⁴¹. Autores: Rojas y Farouq Ali".

DISCUSIÓN: Este artículo describe la técnica de recobro mediante la inyección de CO₂ y salmuera sobre la base de experimentos realizados en un modelo escalado. El CO₂ fue inyectado junto con la salmuera a condiciones subcríticas (800 psi y 70 a 73 °F [5.5 MPa y 21 a 23 °C]). Los modelos físicos escalados pueden ser clasificados en dos tipos: los modelos de alta presión y los de baja presión. Un modelo de alta presión fue escogido para simular precisamente la transferencia de masa entre el CO₂ y los fluidos del yacimiento, la química del proceso y la formación de emulsiones in situ. Debido a que el recipiente rectangular exhibe una

tendencia a hincharse bajo la presión interna del fluido, fue necesario colocar miembros de refuerzo sobre el exterior del recipiente, los cuales fueron unidos a cada lado del recipiente mediante soldadura. La figura 11 muestra dos secciones transversales del recipiente.

EQUIPO EXPERIMENTAL: El elemento básico de la estructura del modelo fue un recipiente a presión rectangular de lámina de acero ver figura 11.

Figura 11. Dos secciones transversales del recipiente a presión rectangular.



Fuente: G. A. ROJAS AND S. M. F. ALI.: "Dynamics of Subcritical CO₂/Brine Floods for Heavy-Oil Recovery". SPE 13598, 1988. U. de Oriente, U. de Alberta.

Principales características del recipiente a alta presión.

- Dimensiones de la lamina: 18 x 18 x 0.866 pulgadas (45.7 x 45.7 x 2.2 cm).
- Máxima presión interna permitida: 1450 psi (10 MPa).
- Peso: 1 Tonelada (1000 kg).
- Número de pozos disponibles: 9.
- Patrones posibles a simular: Cinco puntos, nueve puntos y conducción lineal.
- El pozo central permite la simulación de inyección cíclica.

- El modelo puede ser rotado para inyecciones horizontales, inclinadas y verticales.

1.10.6 Artículo 6. Laboratory Hot Waterfloods Prior to and Following Steamfloods⁴³. Autor: SHEN.

DISCUSIÓN: En este trabajo se emplearon modelos físicos de alta presión para determinar los efectos combinados de inyección de agua caliente e inyección de vapor. Se utilizaron los criterios de escalamiento desarrollados por Pujol y Boberg.

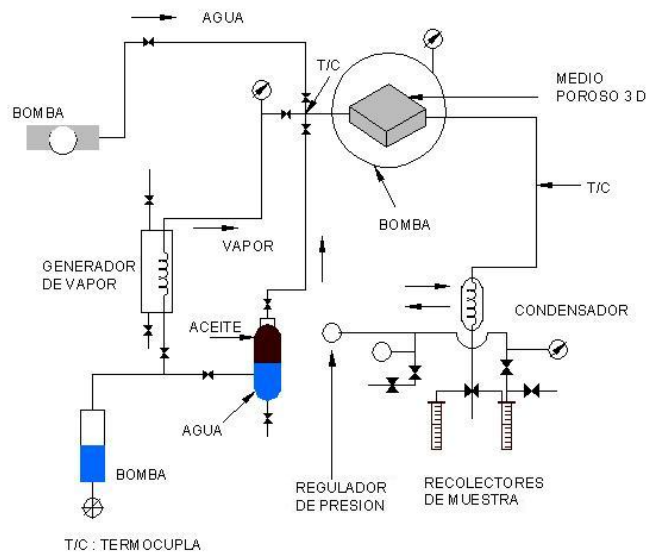
EQUIPO EXPERIMENTAL: El tamaño de los dos modelos es el mismo: 12 x 12 x 6.4 pulgadas (30.48 x 30.48 x 16.25 cm). La diferencia es que uno está completamente encerrado en una caja de acero y el otro tiene una abertura en el tope de esta.

El modelo escalado fue conformado por:

- El modelo homogéneo de arena empacada que representa un cuarto ($\frac{1}{4}$) de un patrón de 2.5 acres (0.01011 km²) y 88 pies (26.8 m) de espesor.
- El modelo de tapa móvil, tiene una caja de acero que abre en el tope y es sellada con una hoja de teflón de espesor 0.031 pulgadas (0.079 cm); posteriormente se empacó con arena de sílice humedecida, mesh 20-40 por medio de vibración, con una porosidad de 30.3 % y una permeabilidad de 340 darcies.
- Los dos modelos fueron construidos de hojas de acero inoxidable de espesor 0.031 pulgadas (0.079 cm). Los cuatro lados verticales del modelo son rodeados de una cámara vacía de 1 pulgada (2.54 cm) de espesor, la cual está llena de arena seca para minimizar las pérdidas de calor en los lados.
- El modelo se encuentra dentro de un recipiente presurizado de 24 pulgadas (360.96 cm) de diámetro con arena y agua llenando el espacio alrededor del modelo. Esto simula las pérdidas de calor hacia estratos superiores e inferiores,

dentro del recipiente existe una presión de 350 psi (2.41 MPa) ejercida por un colchón de nitrógeno, como se muestra en la figura 12.

Figura 12. Esquema general del modelo



Fuente: SHEN, C. W.: "Laboratory Hot Waterfloods Prior to and Following Steamfloods", SPE 18754. Abril de 1989.

1.10.7 Artículo 7. "Scaled Physical Modeling of Steam-Injection experiments"²⁸.
Autores: Kimber y Farouq Ali".

DISCUSIÓN: En este artículo se discuten técnicas de escalamiento que permiten reproducir las condiciones del medio poroso y de presión a utilizarse. Considera la habilidad de los métodos de escalamiento para predecir parámetros tales como la tasa de producción, la distribución de temperatura y las condiciones de presión. Se presentan tres métodos de escalamiento:

- Método 1. Desarrollado originalmente por Pujol y Boberg. Satisface los requerimientos para los efectos de geometría y gravitacionales, pero requiere un

medio poroso y condiciones de presión diferente de aquellas que se encuentran en el campo.

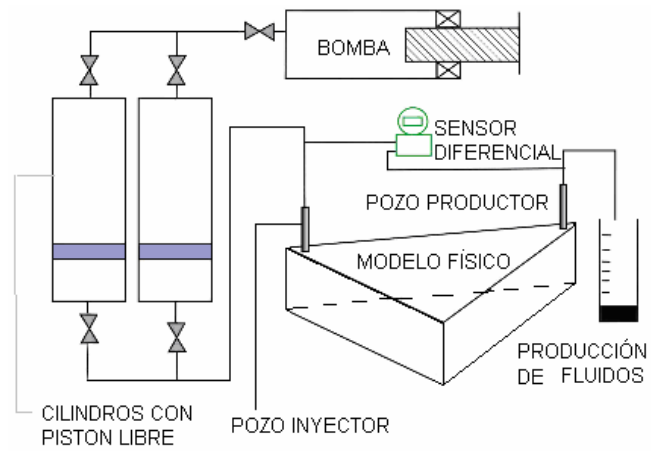
- Método 2. Relajamiento del escalamiento de las condiciones de geometría y de presión. Esto le permite al medio poroso del prototipo usarse en el modelo.
- Método 3, el escalamiento satisface las condiciones de presión y los efectos gravitacionales mientras se usa el medio poroso del prototipo, pero relaja algunos aspectos de similitud geométrica.

1.10.8 Artículo 8. “Estudio del Comportamiento de la Inyección de Agua en las Arenas Inferiores Del Bloque I del Campo Casabe Utilizando Técnicas de Escalamiento⁴⁸. Autores: Uribe y Peralta”.

DISCUSIÓN: En esta tesis de grado se determinaron los grupos adimensionales que escalan la geometría, las fuerzas gravitacionales, viscosas y la relación de movilidad, con resultados similares a los que se obtuvieron en el campo Casabe.

EQUIPO EXPERIMENTAL: El modelo escalado de cinco puntos para inyección de agua es una celda triangular fabricada en acero inoxidable que representa un octavo de un patrón de inyección de agua de cinco puntos. Sus dimensiones son 8.26 pulgadas (21 cm) de base, 8.26 pulgadas (21 cm) de altura y 1 pulgada (2.54 cm) de espesor.

Figura 13. Configuración del sistema de desplazamiento del equipo.



Fuente: URIBE J. K., PERALTA R. C. Estudio del Comportamiento de la Inyección de Agua en las Arenas Inferiores Del Bloque I del Campo Casabe Utilizando Técnicas de Escalamiento.

2. SELECCIÓN DE LA ALTERNATIVA DE DISEÑO

2.1 FILOSOFÍA DEL DISEÑO⁹

El primer objetivo de cualquier proyecto de diseño de ingeniería es la satisfacción de alguna necesidad o deseo humano. Mediante los juicios de ingeniería los recursos naturales, incluyendo los recursos energéticos, son transformados en productos útiles, estructuras o maquinas que beneficien a la humanidad. Los ingenieros utilizan o aplican el conocimiento científico junto con las capacidades artísticas y la experiencia para producir o planificar productos.

Una rama importante de la ingeniería es el diseño mecánico, que consiste en la creación de nuevos mecanismos o mejorar los ya existentes en un intento por proveer el mejor u óptimo diseño de acuerdo con los límites de tiempo, dinero y seguridad. Quienes inician en la actividad del diseño mecánico, encuentran que la mayoría de los problemas de diseño no tienen una solución única; las tareas de diseño tienen muchas formas posibles de abordarse de las cuales la óptima debe ser escogida.

2.2 FUNCIÓN Y FORMA; ESTÉTICA Y ERGONOMÍA

Tradicionalmente la conexión entre función y forma ha sido directa; la forma de un producto necesita solo adaptarse (o ajustarse) a su función. Históricamente, la geometría simple, sin ornamentación, fue escogida casi siempre acomodando el diseño de ingeniería y la producción, buscando reunir las especificaciones de ingeniería como confiabilidad, durabilidad y rentabilidad. Mas recientemente sin

embargo, ha sido reconocido que la demanda para un nuevo producto depende en gran medida de las percepciones del cliente, como son la integración de la apariencia estética y su funcionalidad técnica.

La actividad de diseñar maquinas para uso seguro, fácil, y productivo es llamado ergonomía.

2.3 CLAVES DEL DISEÑO

Como objetivo clave del diseño mecánico se tiene el proveer la mejor combinación de materiales y geometría. Desafortunadamente, un diseño óptimo absoluto raramente puede ser realizado debido a los criterios de desempeño, vida, peso, costo y seguridad que en algunas ocasiones se contraponen a los requerimientos acerca de material y geometría propuestos por el diseñador.

Incertidumbres y variabilidades existen siempre en las predicciones de diseño. Las cargas son a menudo variables y desconocidas para ciertos estados de esfuerzo y ciertos modos de falla, los modelos de calculo envuelven suposiciones que pueden introducir inexactitudes en la determinación de las dimensiones y otras incertidumbres pueden resultar de las variaciones en la calidad de manufactura, condiciones de operación y practicas de mantenimiento. Para brindar una operación segura y confiable, es una práctica común utilizar un factor de seguridad para asegurar que la mínima resistencia o capacidad segura excede el máximo esfuerzo generado para todas las previsibles condiciones de operación.

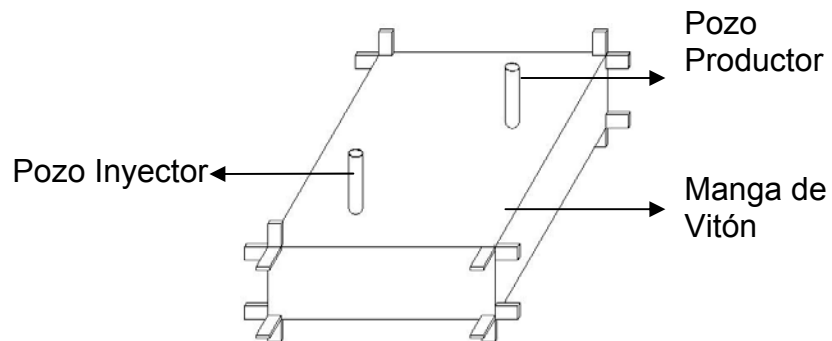
2.4 ANÁLISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE DISEÑO

A continuación se presenta el proceso seguido para la escogencia de la alternativa de diseño que mejor se ajusta a las necesidades del proyecto, teniendo en cuenta

aspectos operacionales como fluido a inyectar, la distribución del flujo en el equipo, condiciones de operación (como presión y temperatura) y la geometría a utilizar lo cual redundará en su funcionalidad.

2.4.1 Requerimientos iniciales. Las primeras ideas sobre el equipo a ser diseñado de acuerdo a los deseos de las personas interesadas en el proyecto se presentan a continuación.

Figura 14. Sistema de confinamiento.



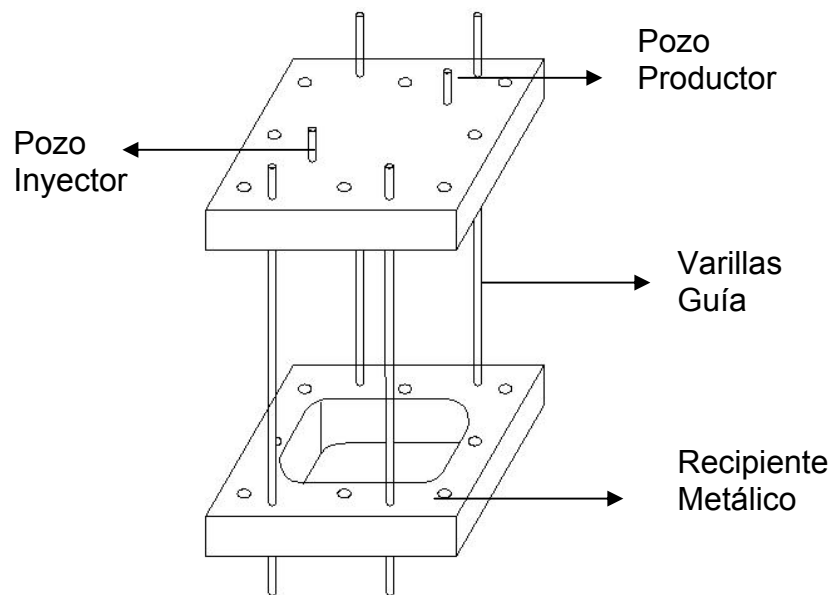
Fuente: Muñoz Navarro S. 2005.

Al inicio del proyecto los requerimientos para el diseño del equipo fueron: Un recipiente que en su interior contenga la arena a la cual se le hará la prueba de desplazamiento, esta arena a su vez se encuentra dentro de un polímero al cual se le aplicara una presión exterior para garantizar el confinamiento de la arena, en la figura 14 se aprecia este sistema de confinamiento para la arena. Se dispondrá de tubos para la inyección y producción de fluidos los cuales simularan pozos inyectores y productores. El recipiente deberá contener la arena y el fluido de confinamiento sin que existan fugas. El recipiente será apernado y para su cierre, se dispondrá de unas varillas guía que garanticen su alineamiento. El equipo debe permitir la operación con la mayoría de los fluidos de desplazamiento, como

son: Agua, vapor, salmuera, CO₂ y crudo vivo. Las condiciones de operación máximas serán 10000 Psi (68947.6 Kpa) y 560 °F (293.3 °C).

En la figura 15 se presenta la configuración del recipiente a presión, que contendrá en su interior al sistema de confinamiento.

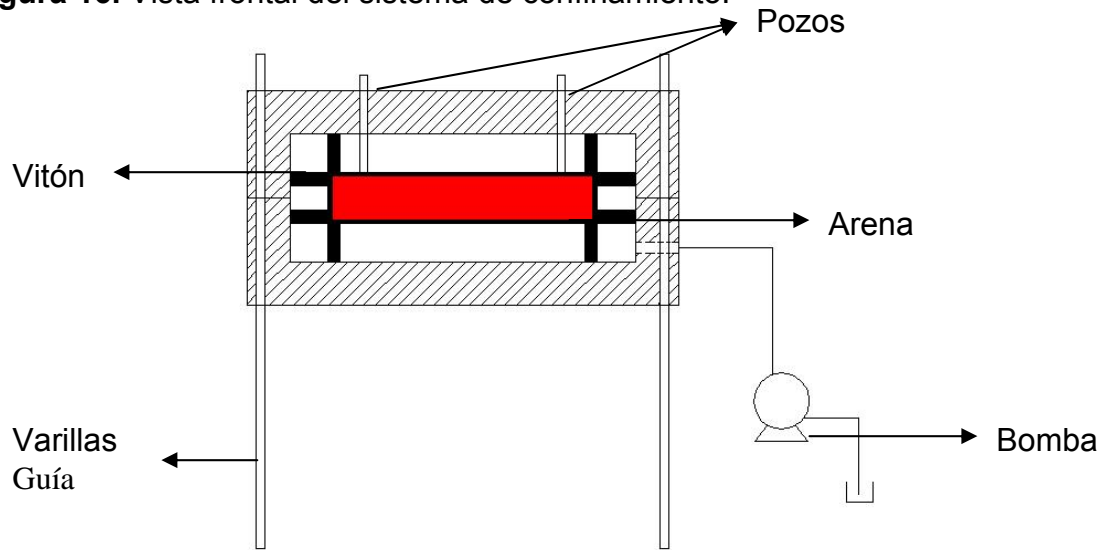
Figura 15. Recipiente a presión



Fuente: Muñoz Navarro S. 2005.

Para la aplicación de la presión de confinamiento se utilizara una bomba, en la figura 16 se presenta una vista frontal de el sistema de confinamiento en la cual se observan sus componentes mas importantes.

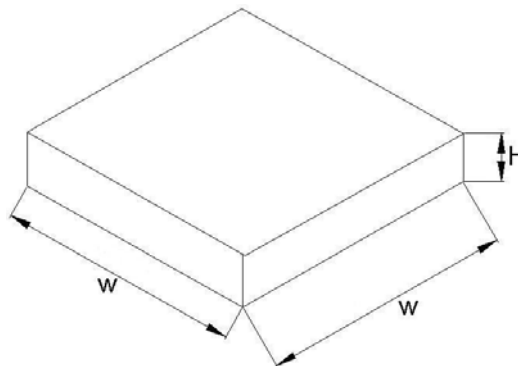
Figura 16. Vista frontal del sistema de confinamiento.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Por medio del escalamiento las dimensiones del medio poroso:

Figura 17. Dimensiones del medio poroso.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Las dimensiones de la arena son: $W = 10.04$ pulgadas (255 mm) de ancho, $W = 10.04$ pulgadas (255 mm) de profundidad y $H = 1.69$ pulgadas (43 mm) de altura.

Se realizó un diseño preliminar en el software de diseño Solid Edge y se evaluó en el software de elementos finitos Ansys Workbench para sus condiciones de operación. Los resultados arrojados por este software permitieron apreciar que si se mantuvieran estas condiciones de operación, el peso del equipo sería de aproximadamente 4409.2 Lb (2000 Kg) lo cual implica el tener un equipo difícil de manejar considerando que el equipo será un equipo de laboratorio, y altos costos de construcción.

Luego de estos resultados se procedió a fijar algunas condiciones de operación que se pudieran manejar de mejor forma. Quedó establecido en reunión con los interesados en el proyecto, la utilización de vapor a una presión máxima de 1200 Psi (8273.7 Kpa) y 560 °F (293.3 °C).

Se presentan a continuación los juicios tenidos en cuenta para la utilización de algunos aspectos relevantes en el diseño, a saber:

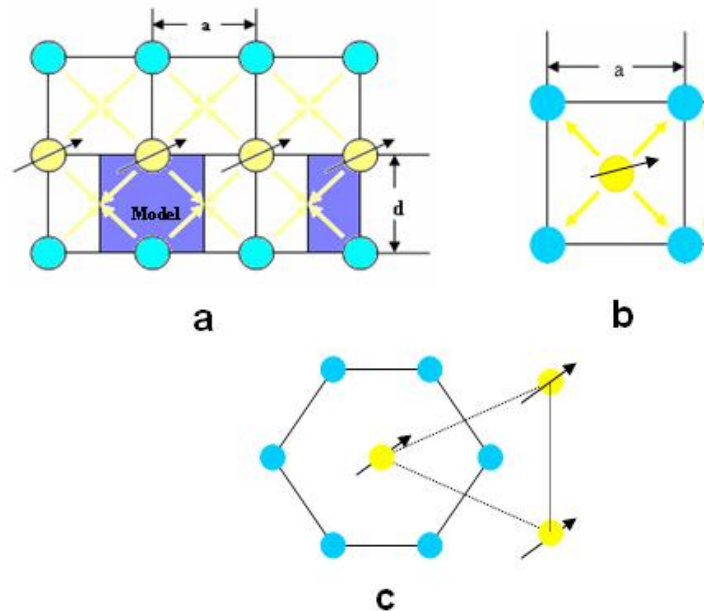
2.4.2 Fluido de inyección. El recobro mejorado incluye métodos térmicos, químicos y empujes miscibles e inmiscibles.

En los métodos térmicos se utilizan varios tipos de fluidos de inyección entre ellos agua caliente y vapor, en los métodos químicos se utilizan fluidos de inyección como surfactantes y polímeros y en los métodos de empujes miscibles e inmiscibles se utilizan fluidos de inyección como GLP y CO₂.

Alternativa escogida. Los métodos térmicos son los mas usados por la gran cantidad de energía que se inyecta a la formación para reducir la viscosidad del petróleo y dentro de los métodos térmicos, la inyección de vapor de agua es el más aplicado a nivel mundial, ya que su fácil implementación y sencillez permiten la obtención de mayores factores de recobro de petróleo. Por estas razones el fluido de inyección a usar en el equipo es el vapor húmedo.

2.4.3 Modelos de inyección. Varios de modelos de inyección son usados, en la figura 18 se aprecian 3 de ellos: a) un modelo en línea recta, b) un modelo de cinco puntos y c) un modelo de siete puntos.

Figura 18. Modelos de Inyección.



Fuente: Medina M. A.: "Análisis de sensibilidad de las variables presentes en un piloto vertical de inyección continua de vapor de cinco puntos utilizando simulación numérica de yacimientos". 2005.

Alternativa escogida. El modelo de cinco puntos fue escogido porque ha llegado a ser el modelo de inyección estándar, es con el que más se ha trabajado a lo largo del tiempo de los que están actualmente en uso.

2.4.4 Presiones de trabajo. Dos clases generales de modelos escalados han evolucionado:

- Modelos que operan a altas presiones y altas temperaturas.

- Modelos que operan a presiones subatmosféricas y bajas temperaturas.

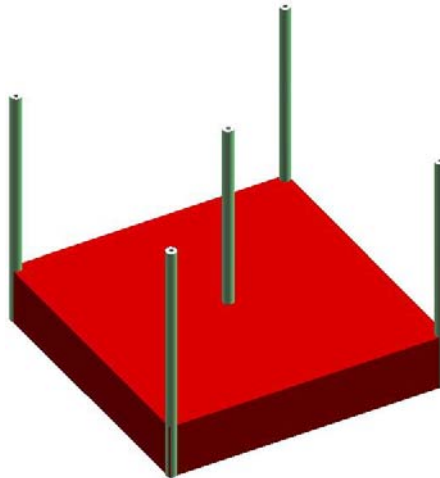
Alternativa escogida. Se escogió trabajar con el modelo de alta presión porque es más representativo en cuanto a las condiciones reales en el yacimiento.

Como otro aspecto importante a tratar se tiene la geometría a ser utilizada para el arreglo de los pozos en la arena, es decir el patrón a simular y también la geometría del recipiente a presión que ha de contenerla.

2.4.5 Geometría del patrón.

Patrón completo de cinco puntos invertido.

Figura 19. Patrón Completo de cinco puntos invertido.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Ventajas.

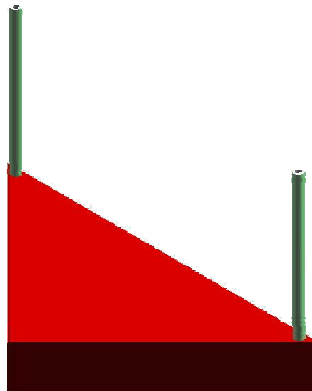
- Se representa de manera más real el proceso.

Desventajas.

- Si se mantiene el factor de escala, se obtiene un área mayor.
- Se requiere un mayor peso del equipo.

Patrón de $\frac{1}{8}$ de cinco puntos.

Figura 20. Patrón de $\frac{1}{8}$ de cinco puntos.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

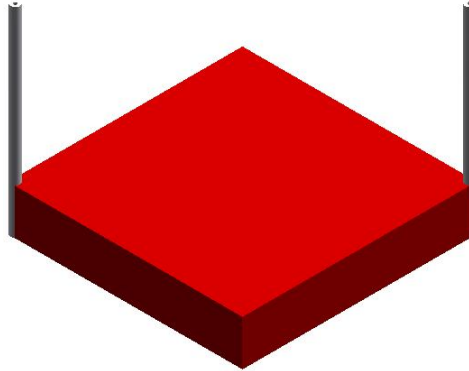
Ventaja. Menor tamaño, por tanto menor peso.

Desventajas.

- Dificultad en el manejo del equipo debido a su geometría.
- Se representa el proceso de una manera menos real debido a que son más representativas las condiciones de frontera (restricciones del flujo al canalizarse).

Patrón de $\frac{1}{4}$ de cinco puntos

Figura 21. Patrón de $\frac{1}{4}$ de cinco puntos.



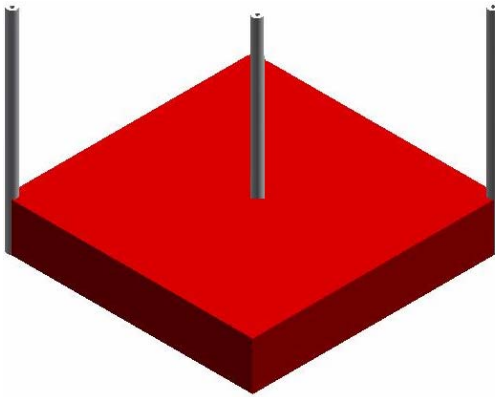
Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Ventajas.

- Disminuye el tamaño en comparación del patrón completo, por tanto menor peso.
- Las restricciones para el flujo se encuentran en un punto intermedio entre el patrón completo y el octavo de patrón.

Alternativa escogida. La alternativa escogida fue el patrón de $\frac{1}{4}$ debido a que presenta más ventajas respecto a las alternativas propuestas. Se propone incluir un pozo en el centro para estimulación.

Figura 22. Patrón de $\frac{1}{4}$ incluyendo el pozo central.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

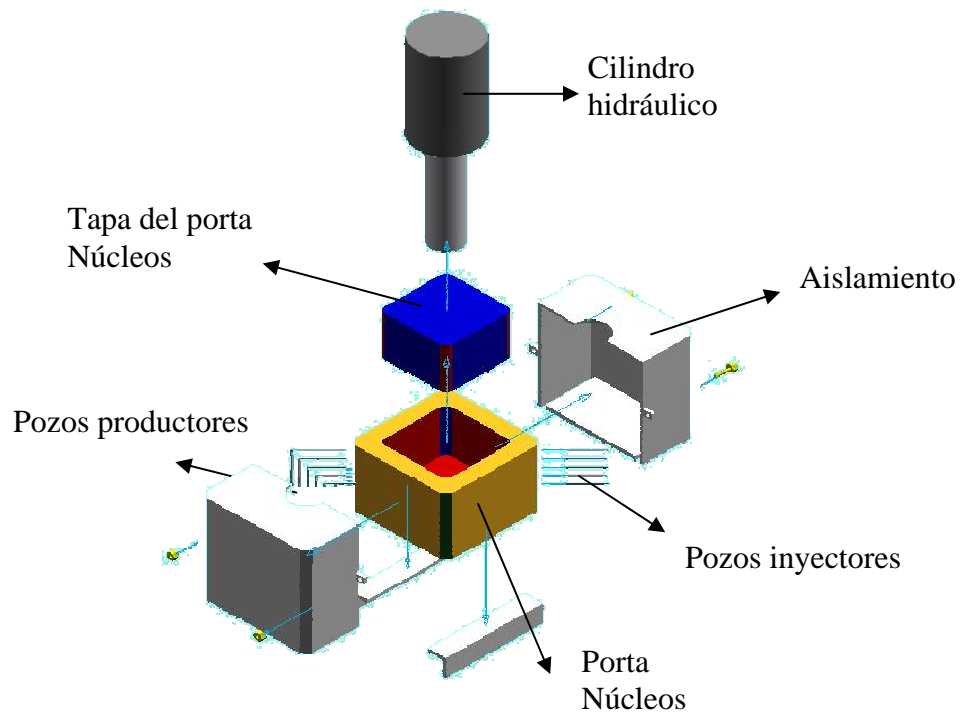
2.4.6 Selección de la geometría para el recipiente a presión.

El recipiente a presión o porta núcleo será el encargado de contener la arena para realizar la prueba. Los demás componentes del diseño dependerán del funcionamiento y la geometría de este. Se presentan tres propuestas hechas durante el transcurso del proyecto, se plantean sus ventajas y desventajas y finalmente se menciona la alternativa escogida.

Propuesta número 1. Descripción: Cuenta con un recipiente para almacenar la arena con su respectiva tapa (Porta núcleos y su tapa), cuenta con tubería ubicada en dos de sus extremos para la inyección del fluido de desplazamiento y la recolección de los fluidos de producción. El recipiente está cubierto por aislamiento para evitar pérdidas de calor. El cilindro hidráulico cumple dos funciones: dar la presión de confinamiento a la arena y levantar la tapa del porta núcleos.

Ventaja. Manejo de espesores variables de arena para simular en el proceso que se desea llevar a cabo.

Figura 23. Propuesta número 1.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Desventajas.

- Posible abrasión debido a los granos del medio poroso que se puedan penetrar en el espacio entre la tapa del porta núcleos y el porta núcleos.
-

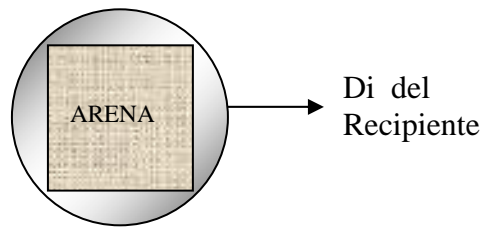
- Taponamiento en los pozos productores debido a los granos del medio poroso, los cuales pueden impedir el flujo a través de los pozos inyectoros.
- Restricción de espacio para el arreglo de la arena a usar en el porta núcleos debido desplazamiento del cilindro.
-
- Se requiere alcanzar tolerancias estrechas entre porta núcleos y tapa del porta núcleos.
-
- Mayores requerimientos de material para soportar los esfuerzos generados en el porta núcleos.

Propuesta número 2. Descripción. La arena esta recubierta por una manga de vitón que posee las dimensiones y la forma de pastel que finalmente representará al yacimiento. Esta manga de vitón tiene como función transmitir o permitir la aplicación de la presión de confinamiento a la arena. Para la aplicación de esta presión de confinamiento, la base del porta núcleos cuenta con unas perforaciones, a través de las cuales se inyecta el fluido de confinamiento; este fluido de confinamiento será un fluido poco compresible como el agua que será inyectado con una bomba de desplazamiento positivo. En el vitón se encuentran los agujeros respectivos para permitir la colocación de los pozos. La manga de vitón junto con la arena están contenidas dentro de un recipiente cilíndrico.

Ventaja. La geometría cilíndrica soporta de una manera mas adecuada los esfuerzos generados por la presión.

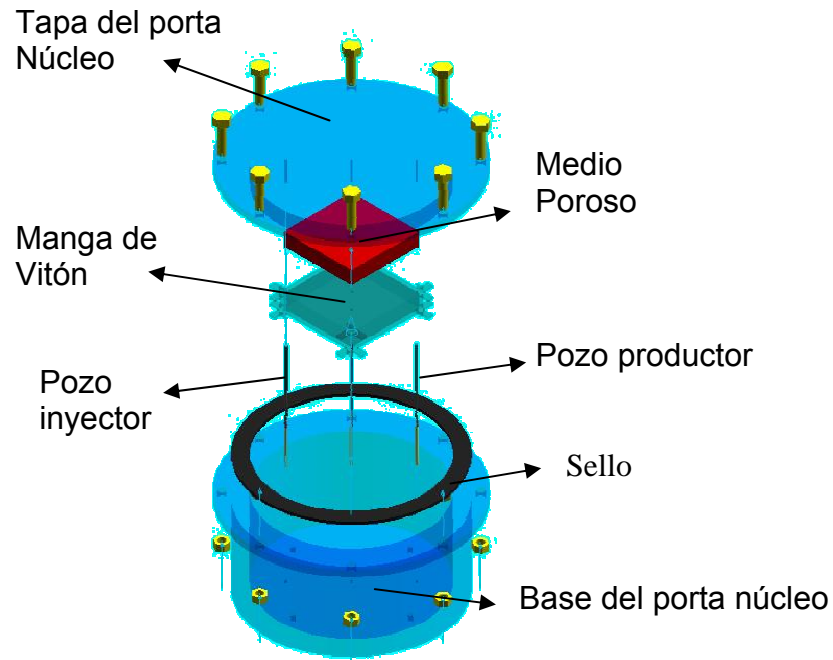
Desventaja. Debido a que la geometría de la arena que va a ser sometida a los ensayos es rectangular, la geometría del recipiente cilíndrico debe ser un círculo circunscrito en la geometría de la arena, lo cual conlleva a mayores áreas y por ende mas materiales conllevando a mayores pesos y mayores costos.

Figura 24. Geometría de la arena en el recipiente cilíndrico



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Figura 25. Propuesta número 2.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

- Dificultad en la alineación de los pozos entre el medio poroso y el porta núcleos.
-
- Dificultad en la manipulación del equipo debido a su geometría cilíndrica.

Propuesta número 3. Descripción. Al igual que en la propuesta numero 2, la arena esta recubierta por una manga de vitón, que tiene como función permitir la aplicación de la presión de confinamiento a la arena. La base del porta núcleos cuenta con unas perforaciones, a través de las cuales se inyecta el fluido de confinamiento con una bomba de desplazamiento positivo. En el vitón se encuentran los agujeros respectivos para permitir la colocación de los pozos.

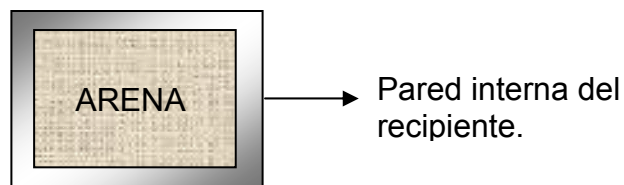
A diferencia de la alternativa numero 2 la manga de vitón junto con la arena están contenidas dentro de un recipiente rectangular.

Ventajas.

- Versatilidad en el manejo de laboratorio.
- Este equipo ocupa un menor espacio en laboratorio en comparación con los anteriores.
- Facilidades para la alineación de los pozos.
- Reducción en tamaño debido a que se presenta una geometría rectangular igual a la de la arena, lo que implica menos requerimientos de material y por tanto menos costos. Los extremos de la arena están mas cerca de las paredes del recipiente, no se presentan áreas desaprovechadas.

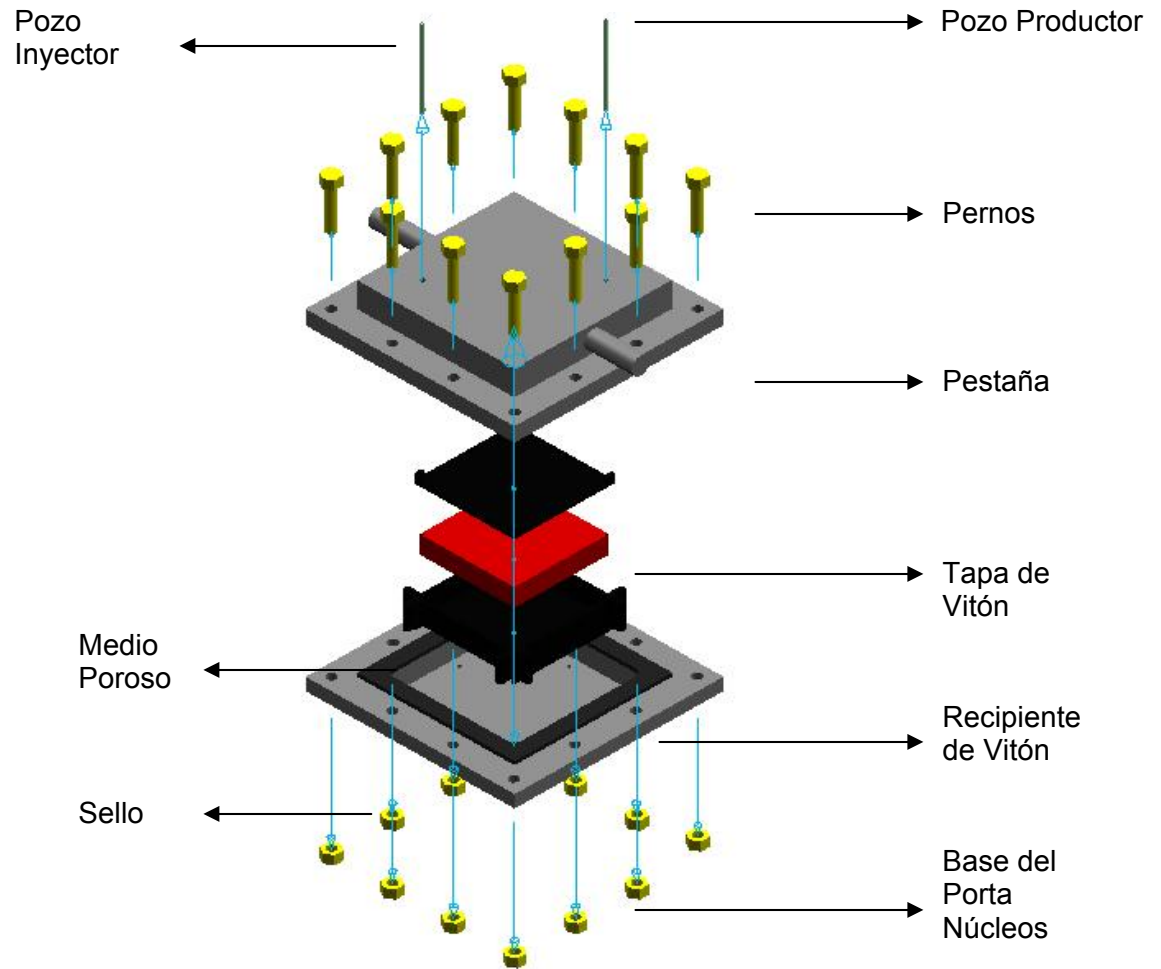
Desventaja. La geometría rectangular no soporta de igual manera a la geometría cilíndrica los esfuerzos generados por la presión.

Figura 26. Geometría de la arena en el recipiente rectangular



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Figura 27. Propuesta número 3.



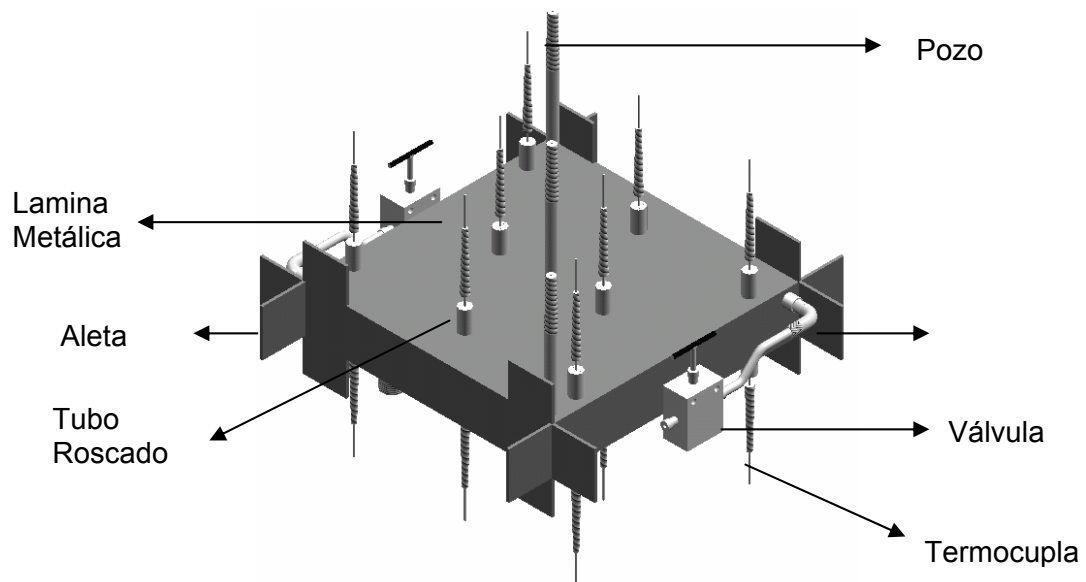
Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Propuesta seleccionada. Se seleccionó la propuesta número 3 porque presenta más ventajas para la consecución del objetivo del presente proyecto: conseguir un diseño favorable, pensando en su fácil manipulación y seguridad.

Recomendaciones hechas para el sistema de confinamiento. En consulta con el Doctor Farouq Ali, especialista en el tema de escalamiento y con muchos años de experiencia en equipos escalados (modelos físicos) de laboratorio, en la cual

se le presentaron las propuestas anteriores y la opción seleccionada para que con su experiencia avalara los avances hechos en el proyecto e hiciera las recomendaciones necesarias, sugirió eliminar el polímero para el sistema de confinamiento y utilizar una caja hecha a partir de lamina metálica. Se presenta a continuación la descripción de este sistema el cual se utilizara para el proyecto.

Figura 28. Sistema de confinamiento con la caja metálica.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

En la figura 28 se aprecia el sistema de confinamiento, el cual es una caja construida con base en lamina metálica calibre 12 con un espesor de 0.1084pulgadas = 2.75mm, esta caja se compone de laminas metálicas unidas mediante soldadura, posee aletas para garantizar la alineación con el recipiente a presión. Los pozos se encuentran soldados a este recipiente al igual que los tubos roscados para insertar las termocuplas (16 en total), las cuales serán removibles. En dos de sus lados se encuentran dispuestos dos codos con sus respectivas válvulas para ingresar la arena a ser utilizada para los ensayos; esta

arena se hará ingresar al recipiente mediante la utilización de una bomba con capacidad para manejar partículas en suspensión de las dimensiones de la arena a utilizar. En uno de estos dos lados se encuentra soldada una malla metálica para que la arena no salga del recipiente. Al terminar la prueba la arena será retirada por un tubo ubicado en la parte inferior de la lamina, el cual se encontrara cerrado durante la realización de la prueba.

Ventajas:

El utilizar la lámina metálica permite la utilización de soldadura y con esto alcanzar el hermetismo deseado para la prueba y evitar las fugas hacia o desde el interior de la caja.

Buena resistencia mecánica del sistema de confinamiento, por consiguiente no sufrirá mayor daño durante la realización de la prueba y podrá ser reutilizado en pruebas posteriores.

Una descripción detallada del funcionamiento del sistema de confinamiento se presenta en el manual de procedimientos.

3. DISEÑO DE MODELOS FISICOS PARA INYECCION DE VAPOR

Los modelos físicos a escala se han usado en diversos problemas de ingeniería desde hace muchos años para reproducir y predecir el comportamiento de sistemas reales a escala de laboratorio. Esto es de gran utilidad, debido al problema que se presenta en la ingeniería de petróleos al tratar de predecir el flujo que tiene lugar en un sistema a gran escala (como lo es un yacimiento) durante un periodo de tiempo determinado; por ese motivo, es de gran interés escalar este sistema a un tamaño mucho menor, de tal manera que las predicciones de flujo puedan hacerse en un intervalo de tiempo razonable y sobre un modelo de tamaño adecuado para laboratorio.

El primer paso en el modelamiento físico de los diversos procesos es el desarrollo de los grupos escalados. Existen dos métodos generales (métodos mencionados anteriormente en el capítulo 1) para la derivación de estos grupos, análisis adimensional y análisis inspeccional¹²

3.1 MODELOS FISICOS DE PROCESOS ESCALADOS CON VAPOR

Un gran número de métodos de escalamiento para procesos de inyección de vapor se han usado por investigadores anteriores. Farouq Ali y Redford¹⁵, presentaron una revisión de los métodos usados; estos métodos presentaron varios grados de complejidad en el escalamiento y pueden dividirse en dos categorías:

- Modelos a baja presión, que operan a presiones mucho menores que las de campo.
- Modelos a alta presión, que operan a presiones de campo.

El criterio más usado para modelos a baja presión, es el presentado por Stegemeier, Volek, y Laumbach⁴², y para modelos a alta presión el desarrollado por Pujol y Boberg³⁵.

Los modelos a alta presión generalmente emplean los mismos fluidos que se encuentran en el prototipo de campo. Mediante el uso de estos mismos fluidos, se pueden escalar las interacciones roca-fluido, propiedades de los fluidos, emulsificación, destilación del vapor, solubilidad del gas y los efectos de compresibilidad de una manera más exacta que aquella que se realiza en los modelos a baja presión.

Hygen^{22,23}, uso un método en el cual solo el flujo de calor se considera en el escalamiento; desarrolló un modelo a alta presión el cual usa crudos de campo. Estudió el efecto de la viscosidad del aceite, la saturación de aceite inicial y la destilación en el recobro de aceite. Pursley³⁶, aplicó el criterio de escalamiento a alta presión de Pujol y Boberg para estudiar las arenas en Cold Lake, Alberta. Ehrlich¹³, también usó las reglas del escalamiento de Pujol y Boberg en su modelo de Wabasca, Alberta.

Bursell y Pittman⁸, usaron un modelo escalado alta presión, representado por un octavo ($\frac{1}{8}$) de un patrón de cinco puntos, para estudiar los efectos del espesor del yacimiento, la viscosidad del aceite y la temperatura de inyección del vapor en la eficiencia de barrido, el aceite residual y el recobro de aceite.

Kimber, Puttagunta y Farouq Ali²⁷, trabajaron para mejorar el equipo experimental, las técnicas y reglas de escalamiento para modelar de una manera más exitosa los prototipos.

3.2 DISEÑO DE UN MODELO ESCALADO

Un conjunto de criterios de escalamiento se derivan por análisis dimensional e inspeccional. El análisis dimensional requiere de un conocimiento completo del conjunto de variables relevantes que influyen el proceso. El análisis inspeccional requiere las variables en un conjunto de ecuaciones, las cuales describen completamente el proceso. El análisis inspeccional se usa con mayor frecuencia que el análisis dimensional, pero generalmente el análisis inspeccional y dimensional se usan en conjunto para asegurar que ningún grupo de escalamiento sea omitido.

3.2.1 Análisis inspeccional. Se basa en la formulación de las ecuaciones básicas, condiciones iniciales y de frontera que describen el fenómeno, por esta razón sus resultados además de ser bastante confiables, tienen un significado físico. El siguiente procedimiento se usa para derivar el conjunto de grupos escalados por análisis inspeccional¹²:

- Formulación de las ecuaciones diferenciales parciales de flujo de fluidos y transferencia de calor en forma adimensional.
- Selección de las condiciones iniciales y de límites.
- Formulación de las relaciones constitutivas y relaciones restrictivas.
- Identificación de los grupos similares.
- Los grupos similares se combinan o modifican basados en ajustes de ingeniería, para obtener un conjunto de grupos escalados que puedan ser semejados entre el modelo escalado y el prototipo de campo.

3.2.1.1 Ecuaciones gobernantes. Al inyectar vapor en yacimientos de aceite pesado para desplazar aceite inmisciblemente los procesos que ocurren básicamente son: flujo de fluidos de tres fases inmiscibles; gaseosa (vapor), aceitosa y acuosa; procesos de difusión-dispersión definidos completamente dentro de cada una de las fases y de la fase agua dentro de la fase gas (vapor); y transferencia de calor por conducción y convección¹².

Las ecuaciones diferenciales parciales se pueden derivar de tres leyes o principios fundamentales:

- Ley de conservación de masa.
- Leyes que describen el transporte de fluido, tales como la Ley de Darcy y la Ley de Fick, y de transferencia de calor como la Ley de Fourier.
- La ecuación diferencial que describe el balance general de energía en el medio poroso puede ser derivada a partir de la Ley de Conservación de Energía y la Ley de Fourier.

Para derivar estas ecuaciones, se deben hacer las siguientes suposiciones:

- El proceso es tratado como flujo de tres fases: gaseosa (vapor), aceitosa y acuosa.
- El aceite existe solamente en fase aceitosa.
- El medio poroso fue asumido homogéneo e isotrópico.
- La compresibilidad de la roca y la expansión térmica se asumieron despreciables.
- Las ecuaciones de Darcy, Fick y Fourier fueron asumidas válidas.
- El sistema se asume en equilibrio termodinámico local.
- Las energías cinética, potencial y disipación viscosa fueron asumidas despreciables comparadas con la energía térmica.

- La entalpía y la energía interna son esencialmente iguales para la fase acuosa y son una función lineal de la temperatura.
- La diferencia entre la entalpía y la energía interna del vapor fue considerada despreciable.
- La temperatura del vapor saturado es considerada la máxima temperatura en cualquier sitio.
- Las permeabilidades relativas dependen exclusivamente de las saturaciones.
- La energía interna de la roca es una función lineal de la temperatura.
- La saturación de aceite residual con vapor, S_{ors} , y la saturación de agua irreducible, S_{wi} , son constantes y uniformes a través del modelo.
- La saturación crítica para flujo de vapor, S_g , se asume cero.
- Los cambios en la densidad del agua inmóvil y aceite residual son despreciables.
- La variación de la entalpía específica del vapor con el tiempo en la zona de vapor es despreciable.
- El medio poroso es considerado mojado por agua.

Ecuaciones de transporte de masa. Un componente particular de un fluido puede transportarse por difusión molecular y por flujo volumétrico. Aunque la difusión solo puede causar el movimiento de componente en un sistema de no flujo, usualmente ocurre tanto la difusión, como el flujo volumétrico. El concepto de fluido o movimiento de componente por medio de la difusión y del flujo volumétrico se asemeja a la transferencia de calor por conducción y convección, respectivamente, en donde la difusión y la conducción resultan de interacciones moleculares, mientras que el flujo volumétrico y la convección son fenómenos macroscópicos¹².

Las tasas de flujo de tres fases en el yacimiento pueden aproximarse por dos procesos independientes, el transporte de masa debido al flujo gobernado por la Ley de Darcy y la dispersión gobernada por una modificación de la Ley de Fick.

- **Ley de Darcy:** Si bien es conocido que el flujo volumétrico de fluidos en medios porosos permeables es gobernado por la Ley de Darcy, es útil analizar el efecto de gradientes de temperaturas. Para sistemas no isotérmicos, sin embargo, un potencial ha de definirse (si existe verdaderamente) para el cual la tasa de volumen de flujo por unidad de sección transversal de área o flujo volumétrico (conocido también como velocidad de Darcy), es proporcional al gradiente del potencial. Se formula la Ley de Darcy para la fase:
 - ✓ Gas (vapor)
 - ✓ Agua
 - ✓ Aceite
- **Modificación de la ley de Fick:** Modificaciones a la ley de Fick por turbulencia y efectos inerciales son tenidos en cuenta y considerados válidos en presencia de variaciones de temperatura. Además del flujo volumétrico, la transferencia de masa por difusión dentro de una fase es importante en algunos procesos de recobro. Por medio de esta ley se obtienen dos expresiones para:
 - ✓ Dispersión del componente aceite dentro de la fase aceitosa.
 - ✓ Dispersión del componente vapor dentro de la fase agua.
- **Mecanismos de transferencia de calor.** Existen solamente tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Cada uno de ellos puede ser descrito tanto en términos físicos, como matemáticos.

- **Calor por conducción:** El calor por conducción es el proceso por el cual el calor es transferido a través de materiales no fluyentes por colisiones moleculares, de una región de alta temperatura a una región de temperatura más baja. La ley física que describe el calor por conducción, conocida como primera Ley de Fourier, usualmente es expresada como:

$$U_{kh} = -K_h \cdot \nabla T \quad (6)$$

Donde:

U_{kh} = Flujo de calor conductivo

K_h = Conductividad térmica del material

∇T = Gradiente de temperatura

- **Calor por convección:** El calor por convección es el nombre comúnmente usado para describir el proceso por el cual la energía es transferida por un fluido fluyendo. El flujo de calor convectivo está asociado siempre a aquellas direcciones paralelas al flujo de fluido y se puede expresar como:

$$U_{thj} = \sum_{i=1} V_{ij} \rho_i (h_i) \quad (7)$$

Donde:

i = Fases, o, w, g

j = Direcciones, x, y, z

Los componentes de flujo total de energía en las direcciones x, y, z corresponden a la suma de un flujo de calor conductivo y flujos de energía convectiva para cada una de las fases fluyentes, expresadas como:

$$U_{o,j} = -K_{hr} \cdot \nabla T + \sum_{i=1} V_{ij} \rho_i (h_i) \quad (8)$$

- **Calor por radiación:** Radiación, es el proceso por el cual el calor es transferido por medio de ondas electromagnéticas. La tasa de transferencia de calor por radiación de una superficie caliente por unidad de área superficial está dada por la Ley de Stefan-Boltzman; sin embargo, a pesar de que existe una pequeña radiación térmica a través de materiales opacos como las rocas, no es un mecanismo importante de transferencia de calor en medios porosos.

Ecuaciones de balance de masa. Agua (tanto en fase líquida como en fase vapor): Esta ecuación tiene en cuenta la transferencia de masa entre el agua y el vapor de agua por difusión y dispersión convectiva. La concentración de agua dentro de la fase gas (vapor), es una función explícita de la distancia (a partir de la interfase vapor/agua) y del tiempo para un yacimiento dado, y puede ser interpretada como una solubilidad adicional del vapor dentro del agua de yacimiento causada por las fuerzas difusivas¹².

Aceite: Esta ecuación tiene en cuenta la transferencia entre el componente aceite y la fase aceitosa y dispersión convectiva.

Ecuación de balance de energía. Esta ecuación tiene en cuenta la transferencia de calor por conducción en el medio poroso, la transferencia de calor por convección debida al flujo de las tres fases: gas (vapor de agua), agua y aceite, y la energía interna del medio poroso, la cual tiene en cuenta la energía interna de la roca porosa y la de los fluidos contenidos en ella. En el desarrollo se considera que la entalpía del vapor y la energía interna pueden ser despreciadas.

Ecuaciones de saturación y presión capilar. Para el flujo en tres fases gas (vapor), agua y aceite, tenemos¹².

$$S_o + S_g + S_w = 1 \quad (9)$$

Considerando el medio mojado por agua, la presión capilar es función de la saturación:

$$P_{cow}(S_o, S_g, S_w) = P_o - P_w \quad (10)$$

$$P_{cog}(S_g, S_o, S_w) = P_g - P_o \quad (11)$$

3.2.1.2 Condiciones iniciales y límites. Las condiciones iniciales y límites deben ser conocidas para completar el modelamiento matemático del yacimiento. El procedimiento más conveniente usado es aquel en el cual el yacimiento es sellado en todas las caras a través de las cuales no existe flujo, y el flujo de fluido tiene lugar en los pozos de inyección y de producción.

El sistema puede ser representado por cuatro variables primitivas para las cuales las condiciones iniciales y límites pueden ser definidas como:

Condiciones iniciales:

$$S_w(i, x, y, z) = S_{wi}(x, y, z) \quad (12)$$

$$S_o(i, x, y, z) = S_{oi}(x, y, z) \quad (13)$$

$$T(i, x, y, z) = T_i \quad (14)$$

$$P_o(i, x, y, z) = P_{oi}(x, y, z) \quad (15)$$

Condiciones límite:

- Límite inferior o límite superior: Las condiciones de límites están referidas al tope o base de la roca del yacimiento en donde no existe flujo de fluidos (vapor, agua, aceite), ni flujo de calor por conducción.
- Paredes o límites de la simetría del modelo: Estas condiciones límites están referidas a las paredes laterales de la simetría del patrón modelado en donde no existe flujo de fluidos (vapor, agua, aceite), ni flujo de calor por conducción.
- Pozo inyector: Se especifican la tasa de inyección de agua, la tasa de inyección de vapor húmedo y el calor total inyectado.
- Pozo productor: En el pozo de producción el flujo de masa o la presión pueden ser especificadas. Por simplicidad, la presión de producción puede ser especificada como:

$$P_o = P_{\text{prod}} \quad (16)$$

$$P_g = P_{\text{prod}} + P_{\text{cgo}} \quad (17)$$

$$P_w = P_{\text{prod}} - P_{\text{cwo}} \quad (18)$$

En la cara del pozo productor se considera que el gradiente de temperatura es cero:

$$\nabla_n T = 0 \quad (19)$$

Especificando la presión de producción, se puede determinar la tasa de masa y la energía producidas sin requerir especificaciones posteriores para estas.

En procesos de vapor, existirá un tiempo en el cual las tasas de inyección de vapor húmedo (W_{wg}) y de agua (W_{ww}), son reducidas a cero. Si el primer tiempo en

que esto ocurre es llamado t_1 , esta restricción temporal puede ser expresada como:

$$t = t_1; \quad W_{gw} = 0; \quad W_{ww} = 0; \quad E = 0 \quad (20)$$

3.2.1.3 Relaciones constitutivas y restrictivas. El análisis de las ecuaciones diferenciales parciales de balance de masa y de conservación de energía, muestra que el sistema puede ser representado por tres variables primitivas: saturación (S), presión (P) y temperatura (T), las cuales son dependientes de las tres variables independientes por las coordenadas cartesianas x, y, z. En la tabla 1 se muestran las relaciones constitutivas y restrictivas para procesos de vapor.

Tabla 1. Relaciones constitutivas y restrictivas para un proceso de desplazamiento con vapor

$S_g + S_w + S_o = 1$	$\phi = \text{constante}$	$g = \text{constante}$
$\rho_o = \rho_o(P_o, T)$	$\rho_w = \rho_w(P_w, T, C_{gw})$	$\rho_g = \rho_g(P_g, T)$
$\mu_o = \mu_o(P_o, T)$	$\mu_w = \mu_w(P_w, T, C_{gw})$	$\mu_g = \mu_g(P_g, T)$
$h_o = h_o(P, T)$	$h_w = h_w(P, T)$	$h_g = h_g(P, T, C_{gw})$
$\bar{K}_o = \bar{K}_o(K, S_o, S_w, S_g)$	$\bar{K}_w = \bar{K}_w(K, S_o, S_w, S_g)$	$\bar{K}_g = \bar{K}_g(K, S_o, S_w, S_g)$
$h_r = h_r(T)$	$K_{hr} = K_{hr}(T)$	$\rho_r = \text{constante}$
$P_g = P_o + P_{cgo}$	$P_w = P_o - P_{cow}$	$z = z(x, y, z)$

Fuente: REMOLINA, Alvaro y TIBOCHA, Fabio. Tesis de grado: "Determinación de Parámetros de Escalamiento para Modelar Físicamente Yacimientos de Aceites en Procesos de Recuperación Mejorada Usando CO₂ o Vapor". UIS. 1992.

3.2.1.4 Forma adimensional de las ecuaciones diferenciales parciales. Para derivar los grupos escalados por análisis inspeccional las ecuaciones diferenciales parciales gobernantes, condiciones iniciales y límites, relaciones constitutivas y restrictivas deben ser rescritas en términos de variables adimensionales.

Cada variable, parámetro y operador pueden hacerse adimensionales dividiéndolos por una cantidad característica de referencia. Estas cantidades se seleccionan, de tal forma que el sistema permanezca invariable a medida que se cambia la escala del modelo al prototipo. Algunas de las cantidades características de referencia para escalar un proceso con vapor, son: ϕ_R (porosidad efectiva más importante), K_R (Permeabilidad más importante, k), ρ_R (densidad más importante, ρ_o), μ_R (viscosidad más importante, μ_o), P_R (máxima diferencia de presión ($P_{\max} - P_{\min}$)), T_R (máxima diferencia de temperatura ($T_{\max} - T_{\min}$)), C_R (calor específico del líquido más importante, C_w ó C_o) y otras.

3.2.1.5 Grupos escalados a través del Análisis Inspeccional. Las ecuaciones en forma adimensional del balance de agua, aceite y energía; las condiciones iniciales y límites adecuadas; y las relaciones constitutivas y restrictivas establecidas representan una descripción matemática del desplazamiento de aceite pesado por inyección con vapor.

Mediante el análisis inspeccional de las ecuaciones diferenciales parciales se obtienen los grupos de escalados adimensionales. Posteriormente se aplica la regla de que los productos adimensionales pueden ser multiplicados y divididos por otros grupos adimensionales y de esta manera se obtienen grupos escalados que son indicadores más generales del proceso.

3.2.2 Análisis dimensional. El análisis dimensional requiere el reconocimiento del conjunto completo de variables importantes que influyen el proceso de desplazamiento de aceite pesado por inyección de vapor. El análisis dimensional permite un conjunto más completo de grupos similares, pero su significado físico generalmente es más aparente que a partir del análisis inspeccional.

Para derivar los grupos escalados para el proceso a partir del análisis dimensional se usa el Teorema- π de Buckingham (1957), el cual establece: “Si una ecuación es adimensionalmente homogénea, puede ser reescrita como una relación entre un conjunto completo de productos adimensionales”.

Las variables que controlan el desplazamiento de aceite pesado para un yacimiento por inyección de vapor son³:

Geometría. Longitud y ancho del sistema. Dependen del tipo de patrón modelado y espesor del sistema.

Características de la arena. Morfología: depende de si la arena (medio poroso) es consolidada o no consolidada, permeabilidad absoluta, porosidad, conductividad térmica, densidad, entalpía.

Interacción roca-fluido. Permeabilidades efectivas de las fases, agua, vapor de agua, aceite; coeficientes de dispersión de aceite de la fase aceitosa; coeficiente de dispersión de agua dentro de la fase gas (vapor); función-J de Leverett aceite-agua y función-J de Leverett aceite-gas.

Propiedades de los fluidos. Viscosidades de las fases agua, vapor de agua, aceite; densidades de las fases agua, vapor de agua, aceite; entalpía de las fases agua, vapor de agua, aceite; tensión interfacial entre la fase gas (vapor de agua) y fase aceite; tensión interfacial entre la fase aceite y fase agua; presión capilar aceite-agua; presión capilar gas (vapor de agua)-aceite y presiones de las fases agua, vapor de agua, aceite.

Otras variables. Tiempo, temperatura, velocidad superficial o total, aceleración de la gravedad, tasa de inyección de vapor húmedo, tasa de inyección de agua, saturaciones de las fases agua, vapor de agua, aceite.

La tabla 2 muestra un resumen de los símbolos, las dimensiones y una descripción de las variables que controlan el desplazamiento de aceite por inyección de vapor.

Tabla 2. Variables que controlan el desplazamiento de aceite por inyección de vapor.

SÍMBOLO	DIMENSIONES	DESCRIPCIÓN
L	L	Espaciamiento entre pozos
H	L	Espesor del sistema
W	L	Ancho del sistema
ρ_w	ML^{-3}	Densidad de la fase acuosa
ρ_g	ML^{-3}	Densidad de la fase gas
ρ_o	ML^{-3}	Densidad de la fase aceitosa
ρ_r	ML^{-3}	Densidad de la roca de yacimiento
h_w	L^2t^{-2}	Entalpía de la fase acuosa
h_g	L^2t^{-2}	Entalpía de la fase gas
h_o	L^2t^{-2}	Entalpía de la fase aceitosa
h_r	L^2t^{-2}	Entalpía de la roca de yacimiento
K_w	L^2	Permeabilidad efectiva de la fase acuosa
K_g	L^2	Permeabilidad efectiva de la fase gas
K_o	L^2	Permeabilidad efectiva de la fase aceite
K	L^2	Permeabilidad absoluta
g	Lt^{-2}	Aceleración debida a la gravedad
μ_w	$ML^{-1}t^{-1}$	Viscosidad de la fase acuosa
μ_g	$ML^{-1}t^{-1}$	Viscosidad de la fase gas
μ_o	$ML^{-1}t^{-1}$	Viscosidad de la fase aceite
K_{hr}	$MLT^{-1}t^{-3}$	Conductividad térmica de la roca de yacimiento
T	T	Temperatura
ϕ	Adimensional	Porosidad
D_{Loo}	L^2t^{-1}	Coefficiente de dispersión longitudinal del aceite dentro de la fase aceitosa
D_{Too}	L^2t^{-1}	Coefficiente de dispersión transversal del aceite dentro de la fase aceitosa
D_{Lgw}	L^2t^{-1}	Coefficiente de dispersión longitudinal del agua dentro de la fase gas
D_{Tgw}	L^2t^{-1}	Coefficiente de dispersión transversal del agua dentro de la fase gas
P_{cgo}	$ML^{-1}t^{-2}$	Presión capilar gas-aceite
P_{cow}	$ML^{-1}t^{-2}$	Presión capilar aceite-agua
W_{ww}	Mt^{-1}	Tasa de inyección de agua

W_{gw}	Mt^{-2}	Tasa de inyección de vapor húmedo
σ_{go}	Mt^{-2}	Tensión interfacial entre la fase gas y la fase aceitosa
σ_{ow}	Mt^{-2}	Tensión interfacial entre la fase aceitosa y la fase acuosa
S_w	Adimensional	Saturación de agua
S_g	Adimensional	Saturación de gas
S_o	Adimensional	Saturación de aceite
V	Lt^{-1}	Velocidad superficial
X	Adimensional	Factor de heterogeneidad o morfología
t	t	Tiempo
P_o	$ML^{-1}t^{-2}$	Presión de la fase aceitosa
P_g	$ML^{-1}t^{-2}$	Presión de la fase gas
P_w	$ML^{-1}t^{-2}$	Presión de la fase agua
$J(S_w)$	Adimensional	Función-J Leverett agua-aceite
$J(S_g)$	Adimensional	Función-J Leverett gas-aceite

Fuente: REMOLINA, Alvaro y TIBOCHA, Fabio. Tesis de grado: "Determinación de Parámetros de Escalamiento para Modelar Físicamente Yacimientos de Aceites en Procesos de Recuperación Mejorada Usando CO₂ o Vapor". UIS. 1992.

Otras suposiciones. La velocidad superficial puede asumirse constante. Aunque es una suposición arbitraria, esto no afecta la escala del modelo, para casos de interés práctico los efectos inerciales son considerados poco importantes, y sus requerimientos de escala son relajados.

La tabla 3 muestra los grupos escalados derivados por análisis inspeccional y análisis dimensional¹².

Tabla 3. Comparación entre los grupos escalados por Análisis inspeccional y Análisis Dimensional para un desplazamiento de aceite por vapor.

GRUPO ESCALADO	ANAL. INSPEC	ANAL. DIMENS.	DESCRIPCIÓN
L / W	SI	SI	Factor geométrico
L / H	SI	SI	Factor geométrico
A_{inyR} / L^2	SI	NO	Relación del área de inyección a las dimensiones del sistema

ρ_g / ρ_w	SI	SI	Relación de densidad vapor-agua
ρ_o / ρ_w	SI	SI	Relación de densidad aceite-agua
P_g / P_w	SI	SI	Relación de presión vapor-agua
P_o / P_w	SI	SI	Relación de presión aceite-agua
h_o / h_w	SI	SI	Relación de entalpía vapor-agua
h_o / h_w	SI	SI	Relación de entalpía aceite-agua
S_o / S_w	SI	SI	Relación de saturación aceite-agua
S_g / S_w	SI	SI	Relación de saturación vapor-agua
S_{oi} / S_w	SI	NO	Relación de saturación aceite inicial-agua
S_{wi} / S_w	SI	NO	Relación de saturación agua inicial-agua
P_{oi} / P_{oR}	SI	NO	Relación de presión aceite inicial-aceite de referencia
$\frac{\varphi S_{oR} \rho_{oR} h_{oR} L^2}{t_R K_{hrR} T_R}$	SI	NO	Relación de capacidad calorífica del aceite al calor por conducción (número de Peclet o de Fourier ⁻¹)
$\frac{\varphi S_{wR} \rho_{wR} h_{wR} L^2}{t_R K_{hrR} T_R}$	SI	NO	Relación de capacidad calorífica del agua al calor por conducción (número de Peclet o de Fourier ⁻¹)
$\frac{\varphi S_{gR} \rho_{gR} h_{gR} L^2}{t_R K_{hrR} T_R}$	SI	NO	Relación de capacidad calorífica del gas vapor al calor por conducción (número de Peclet o de Fourier ⁻¹)
$\frac{\varphi_R S_{wR} \mu_{wR} L^2}{t_R K_{wR} P_R}$	SI	NO	Número de Poiseuille ⁻¹ para agua
$\frac{\varphi_R S_{oR} \mu_{oR} L^2}{t_R K_{oR} P_R}$	SI	NO	Número de Poiseuille ⁻¹ para aceite
$\frac{f_{gR} L_{VR}}{C_{wR} T_R}$	SI	NO	Relación de entalpía vapor a la del agua (número de Jacob modificada)
$\frac{f_{gR} L_{VR}}{K_{hrR} T_R}$	SI	NO	Relación de entalpía latente del vapor al calor por conducción
$\frac{f_{gR} \rho_{oR} \mu_{gR}}{\rho_{gR} \mu_{oR}}$	SI	NO	Relación de gradiente de presión del vapor al gradiente de presión del aceite
$\frac{\rho_{cR} C_{pR} L^2}{K_{hCR} T_{cR}}$	SI	NO	Relación de capacidad calorífica al calor por conducción en la capa o base de la roca
$\frac{\varphi_R S_{oR} \mu_{oR} L}{t_R \rho_{oR} K_{oR} g_R}$	SI	NO	Número de Stokes para aceite
$\frac{\varphi_R S_{wR} \mu_{wR} L}{t_R \rho_{wR} K_{wR} g_R}$	SI	NO	Número de Stokes para agua
T_i / T_R	SI	SI	Relación de temperaturas
$\frac{\mu_w K_g}{\mu_g K_w}$	SI	SI	Relación de fuerzas viscosas gas-agua
$\frac{\mu_w K_o}{\mu_o K_w}$	SI	SI	Relación de fuerzas viscosas aceite-agua

$\frac{\rho_w h_w K_w P_w}{\mu_w K_{hr} T}$	SI	SI	Relación de transferencia calor convectivo a calor conductivo para agua
$\frac{\rho_o h_o K_o P_o}{\mu_o K_{hr} T}$	SI	SI	Relación de transferencia calor convectivo a calor conductivo para aceite
$\frac{\rho_w g H}{P_w}$	SI	SI	Relación de fuerzas gravitacionales a fuerzas viscosas para agua
$\frac{\rho_g g H}{P_w}$	SI	SI	Relación de fuerzas gravitacionales a fuerzas viscosas para gas
$\frac{\rho_o g H}{P_o}$	SI	SI	Relación de fuerzas gravitacionales a fuerzas viscosas para aceite
$\frac{\rho_{cow}}{P_w}$	SI	NO	Relación de presión capilar aceite-agua a la presión de agua
$\frac{\rho_{cgo}}{P_w}$	SI	NO	Relación de presión capilar gas-aceite a la presión de agua
$\frac{\sigma_{ow} \sqrt{K\theta}}{L \mu_w V}$	NO	SI	Relación de fuerzas capilares a fuerzas viscosas aceite-agua
$\frac{\sigma_{go} \sqrt{K\theta}}{L \mu_g V}$	SI	SI	Relación de fuerzas capilares a fuerzas viscosas gas-aceite
$\frac{\rho_w V \sqrt{K}}{\mu_w}$	SI	SI	Número de Reynolds
\sqrt{K} / L	SI	SI	Relación de permeabilidad a las dimensiones del sistema
$\frac{\rho_{rR} h_{rR}}{\rho_{rR} h_{wR} S_{wR}}$	SI	SI	Relación de energía almacenada en el yacimiento a la almacenada en la fase de agua
$\frac{\Phi_R S_{oR} H_{oR} D_{Lo,oR}}{K_{oR} P_{oR}}$	SI	SI	Relación de fuerzas dispersivas a fuerzas viscosas de la fase aceite
$\frac{D_{To,oR}}{D_{Lo,oR}}$	SI	SI	Relación de dispersión transversa a dispersión longitudinal aceite-aceite
$\frac{D_{Lgw}}{D_{Lo,oR}}$	SI	SI	Relación de dispersión longitudinal vapor-agua a dispersión longitudinal aceite-aceite
$\frac{D_{TgWR}}{D_{Lo,oR}}$	SI	NO	Relación de dispersión transversa vapor-agua a dispersión longitudinal aceite-aceite
$\frac{\mu_{wR} W_{gWR}}{K_{wR} \rho_{wR} P_{wR} L}$	SI	SI	Relación de tasa de inyección de vapor húmedo a fuerzas viscosas
$\frac{\mu_{wR} W_{wwR}}{K_{wR} \rho_{wR} P_{wR} L}$	SI	SI	Relación de tasa de inyección de agua a fuerzas viscosas
$\frac{W_{gWR} t_R}{\theta_R S_{wR} \rho_{wR} L^3}$	SI	SI	Número de Poiseville dividido por el número de Poiseville modificado
S_{wR}	NO	SI	Saturación de agua
S_{oR}	SI	SI	Saturación de aceite

S_{gR}	SI	SI	Saturación de gas
X	NO	SI	Factor de in homogeneidad
θ_R	SI	SI	Factor de porosidad
g_R	SI	SI	Aceleración de la gravedad
J_{Sw}, J_{Sg}	NO	SI	Función-J de Leverett para agua y gas respectivamente
$\frac{\mu_g \rho_o}{\mu_o \rho_g}$	SI	SI	Relación de la viscosidad cinemática del vapor a la del aceite a la temperatura del vapor

Fuente: REMOLINA, Alvaro y TIBOCHA, Fabio. Tesis de grado: "Determinación de Parámetros de Escalamiento para Modelar Físicamente Yacimientos de Aceites en Procesos de Recuperación Mejorada Usando CO₂ o Vapor". UIS. 1992.

3.3 DISEÑO DE MODELOS FISICOS ESCALADOS.

El diseño del modelo escalado para procesos de inyección de vapor se orienta según los siguientes pasos, según lo propuesto por Farouq Ali y Kimber²⁷. Estos son:

- Selección de un prototipo.
- Condiciones de operación del prototipo.
- Método particular de escalamiento.
- Diseño del modelo escalado.

3.3.1 Selección del prototipo. El prototipo seleccionado se escogió principalmente por:

El prototipo seleccionado es un objetivo potencial para proyectos de inyección de vapor.

Datos del prototipo. A veces un solo valor de un determinado dato no es representativo de todo el yacimiento; por esto es conveniente seleccionar una

distribución similar o un valor promedio de los datos del prototipo. En la tabla 4 se muestran datos y condiciones de operación del prototipo. La temperatura del yacimiento es de 110 °F (43.3 °C), la presión del yacimiento es de 860 psia (5929.4 kPa). El modelo de laboratorio se diseña para representar un cuarto del patrón de cinco puntos.

Tabla 4. Propiedades promedio del prototipo

PARÁMETRO	PROTOTIPO	
Área patrón, A_p	8 (0.0323)	acres (km ²)
Espesor de la arena, h	50 (15.24)	ft (m)
Profundidad del tope de la arena	1800 - 2500 (548.64 – 762)	ft (m)
Radio promedio del pozo, r_w	0,5	ft (m)
Porosidad, Φ	28	Porcentaje
Permeabilidad promedio, k	600 (0.592)	mD (μm)
Presión del yacimiento, P_y	860 (5929.4)	Psia (KPa)
Temperatura del yacimiento, T_y	110 (43.3)	°F (°C)
Viscosidad del aceite, μ_o	4500 - 8000	cp (mPa*s)
API	12,3	°API
S_{oi}	0,8	
S_{wc}	0,3	
Conductividad térmica de la arena	1,592 (0.919)	BTU/hr.ft.°F (W/m.K)
Calor específico de la arena	0,252 (0.06018)	BTU/lb.°F (J/kg.K)
Calor específico estratos adyacentes	0,213 (0.05087)	BTU/lb.°F (J/kg.K)
Tasa de inyección, Q_{iny}	40 (6.35949)	bl/Día (m3/día)
Presión de inyección, P_{iny}	1100 (7584.2)	psia (KPa)
Calidad del vapor, X_f	65	Porcentaje
Mínima P_{wf} permisible	260 (1792.6)	psia (KPa)
Tipo de roca	Arenisca	

Fuente: Datos suministrados por el ICP.

3.3.2 Selección de las condiciones de operación. Consiste en seleccionar el proceso más indicado dentro de los procesos de recobro; en este caso, se trabaja con inyección de vapor. Las condiciones de operación son:

- Tasa de inyección de vapor húmedo. Ver tabla 4.
- Presión de inyección. Ver tabla 4.

3.3.3 Selección de un enfoque de escalamiento. Escalar todas las variables dentro de un proceso de inyección de vapor es muy complejo debido al gran número de grupos de escalamiento a satisfacer. Algunos de estos grupos se deben relajar para llevar a cabo el escalamiento, es decir, son despreciados al momento de aplicar dicha técnica. Autores como Farouq Ali y Kimber, desarrollaron enfoques que facilitan la elección de los criterios de escalamiento que se van a tener en cuenta y de aquellos que se deben relajar. La tabla 5 presenta una breve descripción de los enfoques; en ella se observa si los fluidos, el medio poroso, la caída de presión y la geometría son iguales o diferentes entre el prototipo y el modelo.

Tabla 5. Enfoques de escalamiento

	Fluidos	Medio poroso	Caída de presión	Geometría
Enfoque 1	Igual	Diferente	Diferente	Similar
Enfoque 2	Igual	Igual	Igual	Similar
Enfoque 3	Igual	Igual	Igual	Relajada
Enfoque 4	Igual	Igual	Igual	Relajada
Enfoque 5	Igual	Diferente	Diferente	Relajada

Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

La selección de un enfoque de escalamiento depende de los mecanismos más importantes del yacimiento (prototipo) seleccionado. La figura 6 (ver capítulo 1), presenta un resumen de los cinco diferentes enfoques propuestos por Farouq Ali y Kimber para escalar un proceso de inyección de vapor.

Al observar la tabla 5 y la figura 6, se concluye que la base de los cinco enfoques es el uso de los mismos fluidos del prototipo en el modelo. Con esta condición se escalan propiedades como la densidad, la viscosidad, la capacidad calorífica y la difusividad; como resultado escalamiento de un proceso de inyección de vapor sea menos complejo.

El modelo físico diseñado en este proyecto, requiere que presente una geometría similar y emplee los mismos fluidos del prototipo. De los cinco enfoques empleados en el escalamiento de inyección de vapor, se tendrán en cuenta el primer y segundo enfoque (enfoque 1 y enfoque 2), los cuales emplean una geometría similar y utilizan los mismos fluidos del prototipo. Debido a esto, se podrán realizar experimentos del enfoque 1 y posteriormente se podrán realizar experimentos del enfoque 2, con este modelo. El enfoque 1 es el criterio más ampliamente usado para modelos a alta presión; fue desarrollado por Pujol y Boberg³⁵, con su trabajo demostraron la dificultad de escalar simultáneamente las fuerzas viscosas, gravitacionales y capilares en un desplazamiento con vapor.

El método 1 se eligió sobre el método 2 por:

1. El enfoque 1, es el criterio más ampliamente usado para modelos a alta presión.
2. El criterio de escalamiento que dicta las dimensiones del modelo para el método 1 es similar para el método 2. Por tanto, los experimentos pueden conducirse después, con el mismo modelo, para examinar la influencia de otros grupos.
3. Aunque grupos similares se satisfacen por ambos métodos (enfoques), la caída de presión en el modelo para el enfoque 1, es reducida por un factor

a escala “a”, mientras que para el enfoque 2 esta caída de presión debe ser igual a la caída de presión que se presenta en el prototipo.

3.4 DISEÑO DEL MODELO ESCALADO

3.4.1 Determinación del factor de escala. Determinar el tamaño del modelo es el primer factor a escalar en el diseño de un modelo escalado. Generalmente se determina por el máximo tamaño disponible para el experimento¹²; para esto se deben tener en cuenta las condiciones de operación, las fallas estructurales que se pueden presentar bajo estas condiciones, los posibles materiales a emplear en su construcción y sus costos. Estos y otros parámetros se seleccionan, de tal forma que el tamaño del modelo sea conveniente en el laboratorio y la duración del experimento no sea demasiado grande como para requerir mucho tiempo para su ejecución.

La longitud más importante es el espaciamiento (distancia) entre pozos, por lo que se puede definir el factor de escalamiento “a”, como:

$$a = \frac{\left(\text{espaciamiento entre pozos en el prototipo} \right)}{\left(\text{espaciamiento entre pozos en el modelo} \right)} \quad (21)$$

$$a = \frac{L_P}{L_M} = \frac{H_P}{H_M} \quad (22)$$

La siguiente grafica relaciona el factor de escala con la longitud del modelo y el espesor del modelo. De ella se observa que a mayores valores del factor de escala menores serán las longitudes del modelo (será menor el tamaño del modelo). A partir de esta grafica se obtiene una base para la selección de las dimensiones del modelo (máximo tamaño disponible para el experimento).

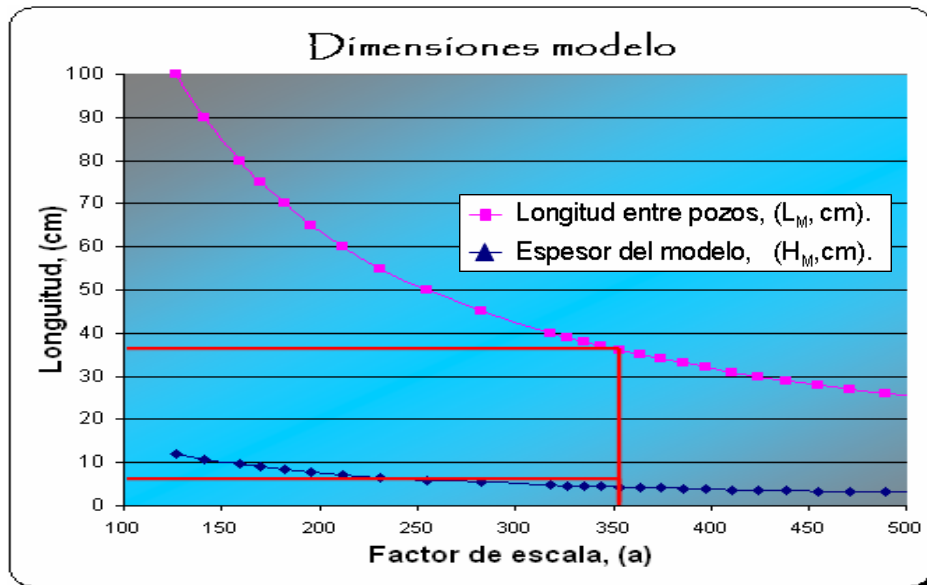
Para el caso actual ($A_p = 8$ acres (0.0323 km^2), $L_p = 417.4 \text{ ft}$ (127.2 m)).

$$a = \frac{L_p}{L_M} = \frac{417.4 * 30.48 \text{ cm}}{36 \text{ cm}} \quad (23)$$

$$a = 353.4 \quad (24)$$

Con base en el factor de escalamiento se pueden determinar los parámetros que influyen en el comportamiento de la inyección de vapor en el modelo, conociendo previamente los valores con que cuenta el prototipo.

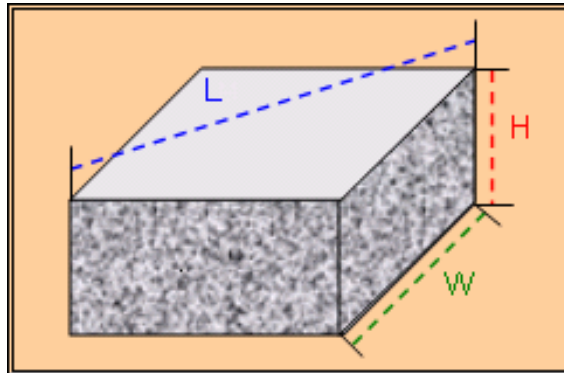
Figura 29. Dimensiones del modelo.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

3.4.2 Geometría del modelo. A partir del factor de escalamiento se pueden encontrar el espesor y el ancho del modelo escalado.

Figura 30. Geometría del modelo



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

L = Longitud del modelo, cm.

H = Longitud del modelo, cm.

W = Longitud del modelo, cm.

Esto se realiza mediante el grupo que relaciona la geometría. El espesor en el modelo será:

$$L/H \tag{25}$$

$$L/W \tag{26}$$

Por similitud⁴ en entre el modelo y el prototipo.

⁴ Con esto se busca establecer una misma relación entre las dimensiones lineales (tales como longitud, ancho, espesor). Dicha relación se conoce como Factor de Escalamiento.

$$\left(\frac{L}{W}\right)_P = \left(\frac{L}{W}\right)_M \quad (27)$$

$$\left(\frac{L}{H}\right)_P = \left(\frac{L}{H}\right)_M \quad (28)$$

El espesor en el modelo será:

$$\frac{H_P}{H_m} = a \quad (29)$$

$$H_m = 4.31 \text{ cm} \quad (30)$$

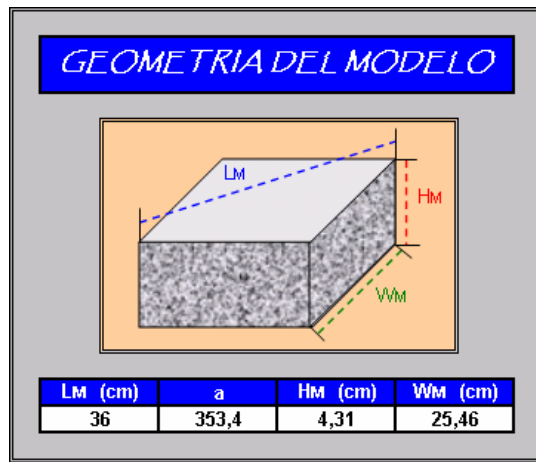
Y el ancho será:

$$\frac{W_P}{W_M} = a \quad (31)$$

$$W_m = 25.5 \text{ cm} \quad (32)$$

A continuación se muestra una grafica en la cual se especifican las dimensiones del modelo y su factor a escala.

Figura 31. Dimensiones del modelo.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

L_M = Longitud del modelo, cm.

H_M = Longitud del modelo, cm.

W_M = Longitud del modelo, cm.

3.4.3 Selección de las propiedades de los fluidos. Una de las condiciones más importantes en el escalamiento es que las propiedades adimensionales deben ser iguales a las funciones de las variables adimensionales en el modelo y en el prototipo. Por lo tanto, por el uso de los fluidos del prototipo en el modelo se escalan las propiedades de los fluidos tales como la viscosidad, la densidad, la capacidad calorífica y la difusividad. Esto solo es cierto si las condiciones de presión son iguales en el modelo y en el prototipo.

La selección de los mismos fluidos permite satisfacer los siguientes grupos de escalamiento:

$$\left(\frac{h_o}{h_w} \right), \left(\frac{h_{st}}{h_w} \right) \quad (33)$$

$$\left(\frac{\rho_o}{\rho_w}\right), \left(\frac{\rho_{st}}{\rho_w}\right) \quad (34)$$

h_{st} = Entalpía del vapor. h_o = Entalpía del aceite.

h_w = Entalpía del agua. ρ_{st} = Densidad del vapor.

ρ_o = Densidad del aceite. ρ_w = densidad del agua.

A su vez los grupos en los cuales están presentes estos parámetros se reducen, haciendo más fácil el escalamiento.

3.4.4 Condiciones de presión. La caída de presión se escala mediante el grupo gravitacional:

$$\left(\frac{\Delta P}{\Delta \rho g H}\right)_P = \left(\frac{\Delta P}{\Delta \rho g H}\right)_M \quad (35)$$

Debido al método de escalamiento empleado, la caída de presión en el modelo se selecciona de manera tal que la reacción de fuerzas gravitacionales a viscosas se escale. Teniendo en cuenta los datos del prototipo, tenemos que:

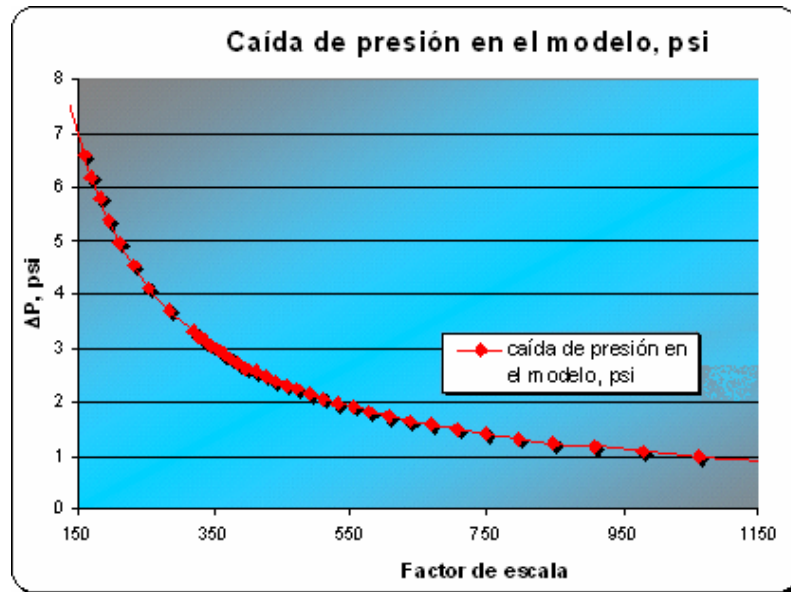
(Piny)P	1100	psia
(Pwf)P	50	psia
(Δpmax)P	1050	psi

$$(\Delta P_{max})_M = \frac{H_M}{H_P} (\Delta P_{max})_P = \frac{1}{a} (\Delta P_{max})_P \quad (36)$$

$$(\Delta P_{max})_M = 2.97 \text{ psi} \quad (37)$$

La siguiente figura muestra la relación del factor de escala con la caída de presión en el modelo; en ella se observa que a mayores valores del factor de escala menor será la caída de presión en él, esto se debe a que el factor de escala es inversamente proporcional a la caída de presión en el modelo.

Figura 32. Caída de presión en el modelo.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

3.4.5 Permeabilidad. Para escalar la permeabilidad se usa el número adimensional que relaciona la transferencia de calor conectiva y conductiva:

$$\left(\frac{K\rho_0 h_0 \Delta P}{\mu_0 K_{hr} \Delta T} \right)_M = \left(\frac{K\rho_0 h_0 \Delta P}{\mu_0 K_{hr} \Delta T} \right)_P \quad (38)$$

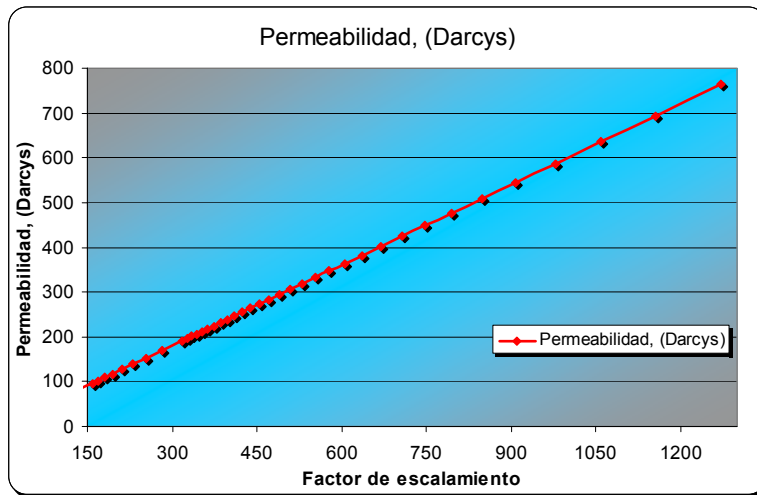
El uso de iguales fluidos (y un medio poroso similar), y de condiciones similares implica que el anterior grupo adimensional se reduzca a:

$$K_M = \frac{(\Delta P)_P}{(\Delta P)_M} * K_P \tag{39}$$

$$K_M = a * K_P$$

$$K_M = 212 D \tag{40}$$

Figura 33. Permeabilidad en el modelo.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

La figura 33, muestra la relación del factor de escala con la permeabilidad en el modelo; en ella se observa que a mayores valores del factor de escala mayor será la permeabilidad en el modelo. A partir de esta grafica se puede observar el comportamiento de la permeabilidad tiene una tendencia lineal, la cual se incrementa al aumentar el factor de escala.

3.4.6 Tasa de inyección. La tasa de inyección se escala usando el grupo que relaciona la tasa de inyección de vapor/agua con las fuerzas viscosas.

$$\frac{W_{st}\mu_w}{\rho_w k \Delta PH} \quad (41)$$

Por similitud entre el modelo y el prototipo, tenemos que:

$$\left(\frac{W_{ww}\mu_w}{\rho_w k \Delta PH} \right)_M = \left(\frac{W_{ww}\mu_w}{\rho_w k \Delta PH} \right)_P \quad (42)$$

El modelo opera a las mismas condiciones que opera el prototipo; esto quiere decir, que propiedades como la viscosidad, la densidad y la entalpía son similares en el modelo y en el prototipo. Como resultado de esto, el grupo adimensional que relaciona la inyección de agua /vapor a fuerzas viscosas, se reduce a:

$$(W_{ww})_M = \frac{(W_{ww})_P}{4 * a} \quad (43)$$

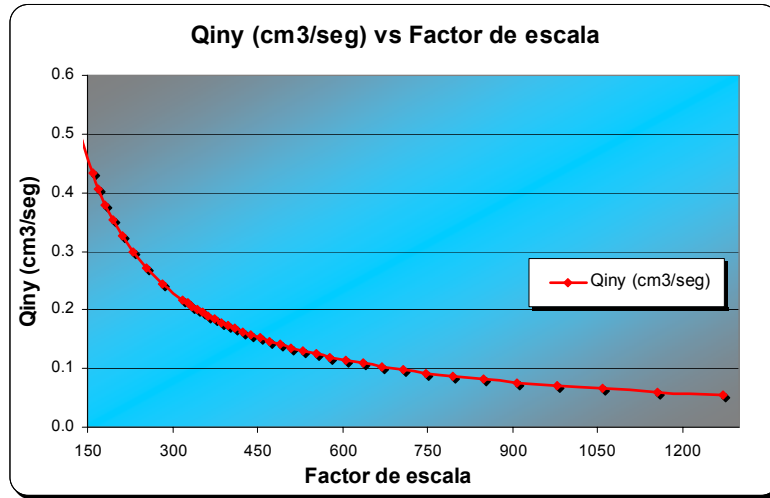
La tasa de inyección de agua en el modelo se reduce por un factor de cuatro, debido a que el trabajo se realiza con base a un cuarto de patrón de cinco puntos.

La tasa de inyección de vapor requerida para el modelo solo es una cuarta parte de la calculada, puesto que el modelo representa un cuarto del patrón de cinco puntos.

$$(W_{ST})_M = \frac{(W_{ST})_P}{4 * a} \quad (44)$$

La siguiente grafica relaciona el factor de escala con la tasa de inyección en el modelo; en ella se observa que a mayores valores del factor de escala menor será la tasa de inyección en el modelo.

Figura 34. Tasa de inyección en el modelo.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

3.4.7 Tiempo. El escalamiento del tiempo se hace usando el grupo:

$$t_D = \left(\frac{tW_{st}}{\phi\rho_w HL^2} \right)^2 \quad (45)$$

Por similitud entre el modelo y el prototipo, tenemos que:

$$\left(\frac{tW_{st}}{\phi\rho_w HL^2} \right)_P = \left(\frac{tW_{st}}{\phi\rho_w HL^2} \right)_M \quad (46)$$

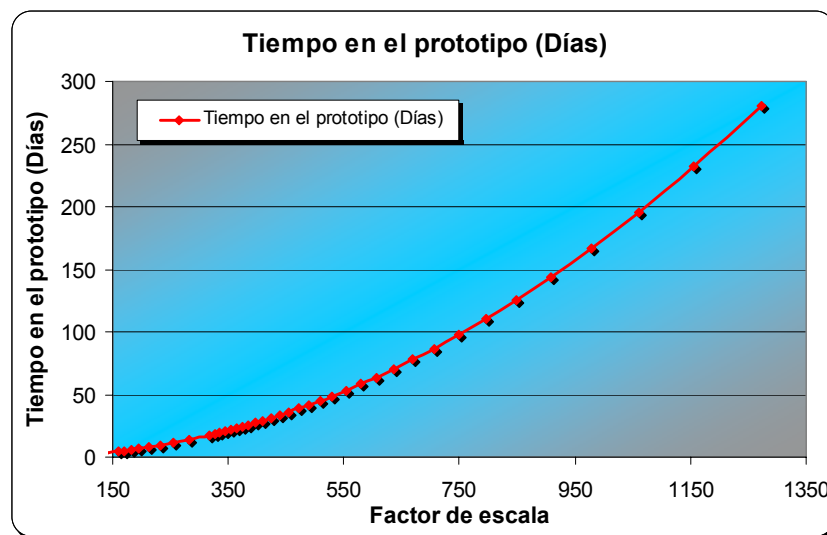
$$t_P = a^2 * t_M \quad (47)$$

Para una relación de minutos en el modelo a días en el prototipo, tenemos que.

$$\frac{t_P}{t_M} = a^2 \frac{\text{dias}}{\text{min}} \quad (48)$$

La siguiente grafica relaciona el factor de escala con el tiempo en el prototipo, (tomando como base un minuto en el modelo, para conocer su equivalencia en el prototipo); en ella se observa que a mayores valores del factor de escala mayor será el tiempo en el prototipo.

Figura 35. Tiempo en el modelo.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

3.4.8 Diseño de los pozos. Stegemeier y otros⁴², desarrollaron una técnica para representar el pozo como una ranura. El ancho de la ranura se determina usando el grupo de escalamiento:

$$\left(\frac{A_{iny}}{LH} \right)_M = \left(\frac{A_{iny}}{LH} \right)_P \quad (49)$$

El área abierta al flujo en el prototipo (es un cuarto) y en el modelo esta dada por:

$$(A_{iny})_M = \left(\frac{A_{iny}/4}{LH} \right)_P (LH)_M \quad (50)$$

El área del pozo en el modelo será igual al ancho de la abertura que simula los pozos por el espesor del modelo o longitud del pozo:

$$(A_{iny})_M = w'H \quad (51)$$

Donde:

w' = Ancho de la abertura que simula el pozo.

H = Espesor del modelo o longitud del modelo.

$$(w'H)_M = \left(\frac{\pi d_{well} H / 4}{LH} \right)_P (LH)_M \quad (52)$$

$$(w')_M = \frac{\pi(d_{well})_P}{4a} \quad (53)$$

PROTOTIPO		
d (ft)	1	Diametro del pozo, (ft)

MODELO		
w_1	0,677	Area de inyección, (mm)

El escalamiento de los pozos es muy difícil de alcanzar, debido a que el modelo físico escalado requiere de tamaños muy pequeños para estos y usar estos

resultados no es práctico, además el tamaño del pozo pierde importancia cuando el diámetro de los granos que constituyen el medio poroso se aproxima o excede su diámetro. Según recomendaciones de Farouq Ali, se puede asumir la mitad del diámetro de las líneas, como diámetro del pozo. Es decir las líneas en el modelo son de un octavo ($1/8$) de pulgada (3.175 mm), se puede asumir de un dieciseisavo $1/16$ de pulgada (1.58 mm) como diámetro del pozo.

4. CÁLCULOS DE DISEÑO Y SELECCIÓN

4.1 SELECCIÓN DEL MATERIAL DEL PORTA NÚCLEOS³⁷

Hay más de 100 diferentes tipos de aceros inoxidable. Estos materiales tienen alto contenido de cromo o altas aleaciones de níquel – cromo conteniendo pequeñas cantidades de otros constituyentes esenciales. Ellos presentan una excelente resistencia a la corrosión y excelentes propiedades de resistencia al calor. Los aceros inoxidable más comunes tales como los tipos 302 o 304, contienen aproximadamente 18 % de cromo y 8 % de níquel, y son designados como aceros inoxidable 18 - 8.

La adición de molibdeno a la aleación, como en el tipo 316 incrementa la resistencia a la corrosión y al esfuerzo a alta temperatura.

La tabla 6 presenta las características más importantes de una gran variedad de aceros inoxidable. Estas características nos permitirán seleccionar el tipo de acero adecuado para el porta núcleo.

Para las condiciones de operación, el porta núcleo va a estar sometido a grandes esfuerzos a altas temperaturas. El material que mejores características presenta es el acero Tipo AISI 316. Este material fue seleccionado para el porta núcleo y sus principales propiedades se listan en la tabla 7.

Tabla 6. Aceros inoxidable comúnmente usados en la industria.

TIPO	Cr	Ni	C máx.	Otros elementos	Características	Propiedades	Aplicaciones
302	17-19	8-10	0.15		Propósitos generales tipo austenítico con buena resistencia a la corrosión y propiedades mecánicas.	Propósitos Generales.	Intercambiadores de calor, torres, tanques, tubería, equipo químico general.
303	17-19	8-10	0.15	S 0.15 min.	Modificación del tipo 302 contiene sulfuro extra.	Tipo 303Se disponible para partes con extensivo maquinado.	Bombas, válvulas, instrumentos.
304	18-20	8-12	0.08		Variación de bajo carbón del tipo 302, mínima precipitación de carburos durante la soldadura.	Propósitos generales. También disponible como 304L con 0.03 % de carbón. Buena resistencia a la corrosión.	Tubing de Intercambiadores de calor, tubos precalentadores.
305	17-19	10-13	0.12		Más alta resistencia al calor y a la corrosión que el tipo 304.	Buena resistencia a la corrosión.	Tolvas, utensilios, cubiertas.
308	19-21.9	10-12	0.08		Alto cromo y níquel produce buena resistencia a la corrosión y el calor.	Presenta incrementada resistencia a la corrosión a alta temperatura.	Barras soldadas.
309	22-24	12-15.06	0.2		Alto cromo y níquel produce buena resistencia a la corrosión y el calor.	Presenta incrementada resistencia a la corrosión a alta temperatura.	Barras soldadas para tipo 304, intercambiadores de calor, partes de bombas.
310	24-26	19-22.9	0.25		Más alto contenido de aleación mejoras las características básicas del tipo 309.	Presenta incrementada resistencia a la corrosión a alta temperatura.	Enchafetados de alta temperatura, reactores de alta presión, tubos de refinamiento de petróleo.
314	23-26	19-22	0.25	Si 1.5-3	Alto contenido de Silicio.	Resistente a la oxidación en aire a 2000 °F.	Tubos radiantes, cajas recocidas.
316	16-18	10-14	0.08	Mo 2-3	El Mo mejora la resistencia a la corrosión y a la picadura general y al esfuerzo a alta temperatura.	Resistencia a la alta corrosión y picadura.	Equipos de destilación para producción de ácidos, equipos de procesamiento de papel de sulfito.
317	18-20	11-15	0.08	Mo 3-4	Alto contenido de aleación mejora ventajas básicas del tipo 316.	Tipo 317 tiene el la mas alta resistencia a la corrosión acuosa de todos los aceros inoxidables.	Equipos de proceso de ácidos fuertes o solventes clorinados.
321	17-19	9-12	0.08	Ti 5 x C, min.	Permite el uso a temperaturas estables de 420 °C hasta 870 °C.	Estabilizado con titanio para permitir su uso para grandes estructuras.	Como el tipo 302 pero usado cuando la precipitación de carburos durante la fabricación o servicio puede ser perjudicial.

Fuente: PETERS, M. AND TIMMERHAUS, K. "Plant Design and Economics for Chemical Engineers". Mc Graw-Hill, inc. 1991.

Tabla 7. Propiedades del acero AISI 316

PROPIEDADES FÍSICAS	Sistema Métrico	Sistema Inglés
Densidad	7990 Kg/m ³	0.289 lb/pulgadas ³
PROPIEDADES MECÁNICAS		
Dureza, Rockwell B	79	79
Esfuerzo último	558 MPa	80900 Psi
Limite elástico (Sy)	290 MPa	42100 Psi
Módulo de elasticidad(tensión)	193 GPa	28000 Ksi
PROPIEDADES TÉRMICAS		
Cte lineal a 20 °C	16 µm/m-°C	8.89 µ pulgadas / pulgadas -°F
Calor específico.	0.5 J/g-°C	0.12 BTU/lb-°F
Conductividad térmica a 100 °C	16.2 W/m-K	112 BTU-pulgadas/hr-ft ² -°F
Conductividad térmica a 500 °C	21.4 W/m-K	149 BTU-pulgadas/hr-pie ² -°F
PROPIEDADES DE PROCESAMIENTO.		
Temperatura de fusión.	1371-1399 °C	2500 – 2550 °F

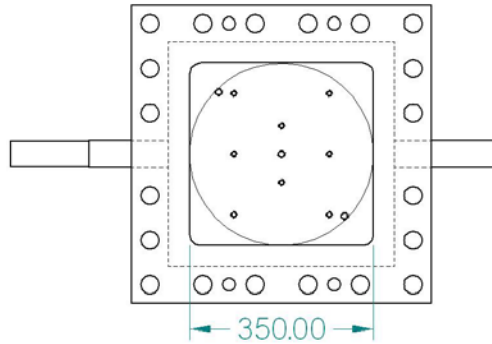
Fuente: www.matweb.com.

4.2 CÁLCULOS PRELIMINARES

La teoría de recipientes a presión trata a profundidad sobre recipientes cilíndricos y cascarones de revolución sometidos a presión. La geometría rectangular sometida a presión no es tratada en la teoría y la resistencia de materiales tradicional no aplica para esta geometría bajo estas condiciones de operación; por tanto la forma de enfrentar este problema es aproximar el porta núcleos a un recipiente cilíndrico de pared gruesa (Caso ideal) y por medio del software CAE (Ingeniería Asistida por Computador) ajustar y validar el diseño para que se cumplan los requerimientos de esfuerzo, teniendo en cuenta que como mínimo el

porta núcleos debe soportar la presión de la prueba hidrostática que por norma es 1.5 veces la presión de operación.

Figura 36. Circulo inscrito, aproximación a recipiente cilíndrico.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Aproximando a recipiente cilíndrico (con un círculo inscrito en el área rectangular sometida a presión ver figura 36), con diámetro de 13.78 pulgadas (350 mm).

Se realizó el cálculo para la presión especificada, según ecuaciones 4 y 5 para realizar los diseños en CAD y exportarlos al CAE para poder simular su comportamiento. Este cálculo se presenta en la tabla 8.

Tabla 8. Cálculo de los espesores como aproximación a recipiente cilíndrico

Sy material = 42000 Psi	ri = 6.89 pulgadas			
Presión (Psi)	ro formula (c) pulgadas	ro formula (d) pulgadas	Espesor [†] (pulgadas)	Espesor (mm)
2000	7.24	7.27	0.38	10

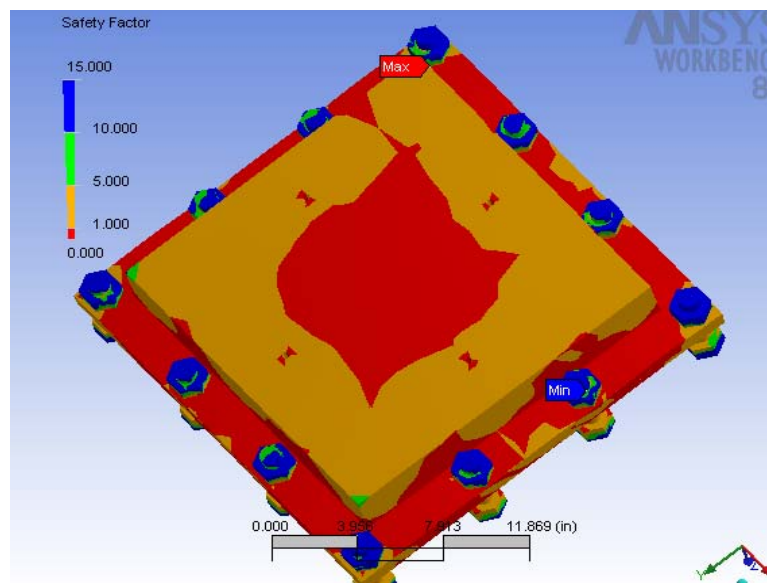
Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

[†] Espesor calculado según la teoría de máximo esfuerzo de corte.

Estos valores suponen que el material esta libre de discontinuidades. Estas discontinuidades son concentradores de esfuerzos, es decir debilitan al material, y es por esto que se requiere un mayor espesor para resistir estas cargas.

Los resultados obtenidos luego de la simulación pusieron en evidencia la necesidad de aumentar el espesor del porta núcleos para que presente un mejor comportamiento frente a las cargas aplicadas. Para varios espesores del material se obtuvieron factores de seguridad menores a 1 ver figura 37.

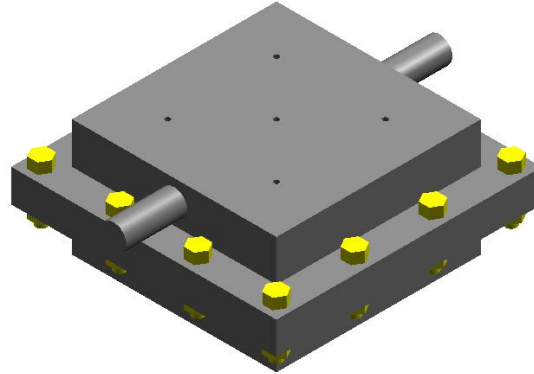
Figura 37. Factor de seguridad en la base del porta núcleos espesor 20 mm.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

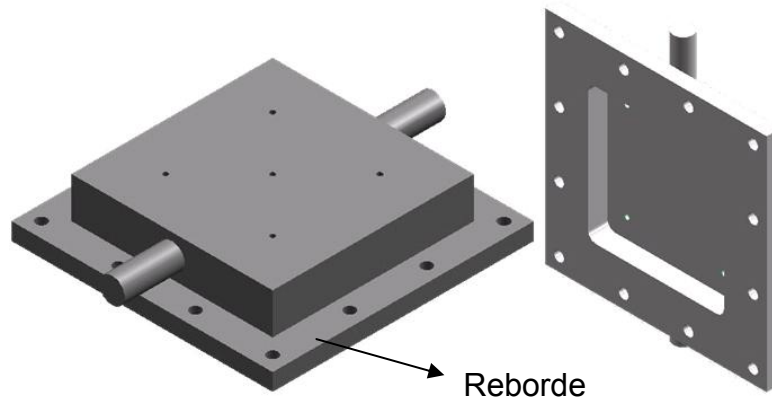
Optimización del diseño. Buscando un diseño que resista de manera adecuada las cargas que se presenten durante su operación y que tenga el menor peso posible, por tanto menos requerimientos de material, se realizó una optimización del diseño para la configuración que se muestra en las figuras 38 y 39.

Figura 38. Configuración del equipo (diseño optimizado).



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Figura 39. Vistas de la tapa del equipo (diseño optimizado).



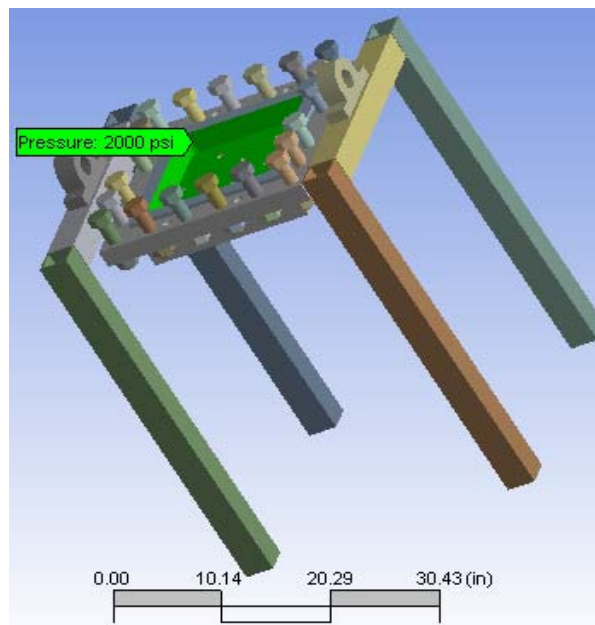
Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

4.3 ANÁLISIS CAE.

Para este diseño se realizó el análisis CAE en el software ANSYS WORKBENCH Versión 8.1. Las condiciones de operación y los resultados obtenidos luego de la simulación se presentan a continuación.

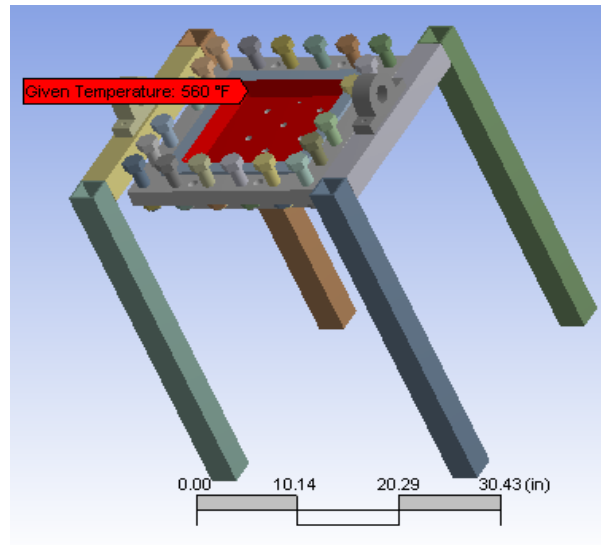
Las cargas aplicadas al modelo son: Cargas de Presión y Temperatura. Estas cargas son aplicadas en todas las paredes interiores del porta núcleos. La figura 40 muestra la presión aplicada en la base en las áreas resaltadas con color verde y la figura 41 muestra la temperatura aplicada en la base en las áreas resaltadas con color rojo. De manera similar estas cargas se aplicaron a la tapa del modelo. Se realizaron las simulaciones para condiciones de presión de 2000 Psi (13789.5 Kpa) (teniendo en cuenta la presión de prueba) y de temperatura de 560°F (293.3°C).

Figura 40. Presión aplicada a la base.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Figura 41. Temperatura aplicada a la base.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Se realizó la simulación del modelo y se analizaron los resultados de esfuerzo (en este análisis se tiene en cuenta el esfuerzo térmico: influencia de la temperatura en el comportamiento del material) y su correspondiente factor de seguridad. A continuación se presentan las gráficas de factor de seguridad y deformación total para la tapa y la base. Las gráficas presentan amplia gama de valores de factor de seguridad y deformación distribuidas en franjas de colores las cuales son de la siguiente manera:

Tabla 9. Factores de seguridad.

COLOR	FACTOR DE SEGURIDAD
Rojo	0-1
Naranja	1-5
Verde	5-10
Azul	10-15

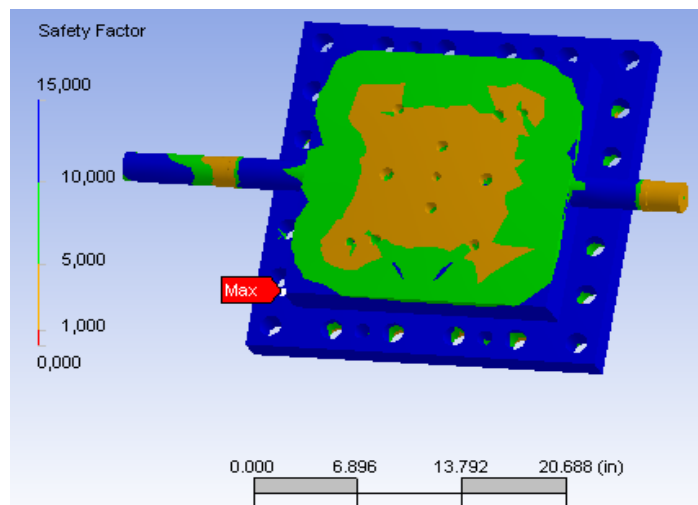
Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Tabla 10. Deformaciones.

COLOR	DEFORMACIONES (pulgadas)
Azul	0.012-0.019
Celeste	0.027-0.035
Verde	0.043-0.051
Amarillo	0.059-0.067
Naranja	0.067-0.075
Rojo	0.075-0.083

Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

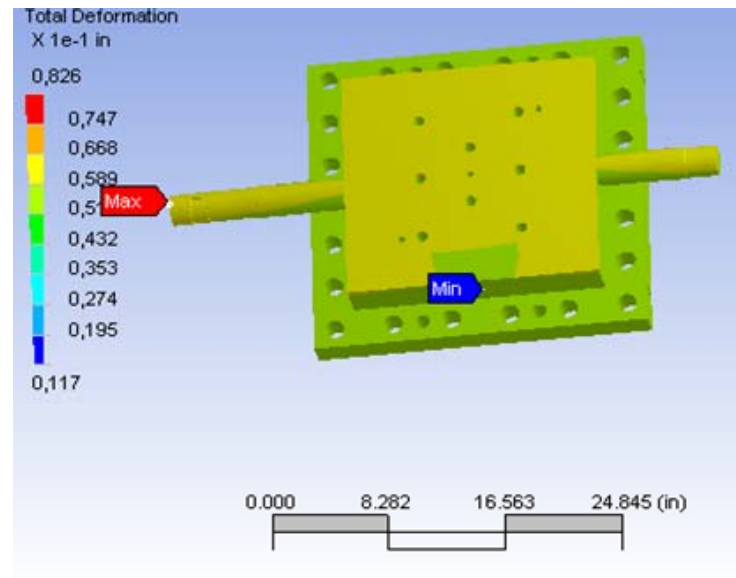
Figura 42. Factor de seguridad en la tapa.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

En la figura 42 se aprecia la distribución del factor de seguridad para la tapa. Se presenta una adecuada distribución de factores de seguridad en el elemento. En la figura 43 se presentan las deformaciones de la tapa, este elemento exhibe un apropiado comportamiento.

Figura 43. Deformaciones en la tapa.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

La máxima deformación tendrá un valor de 0.061 in = 1.54 mm .

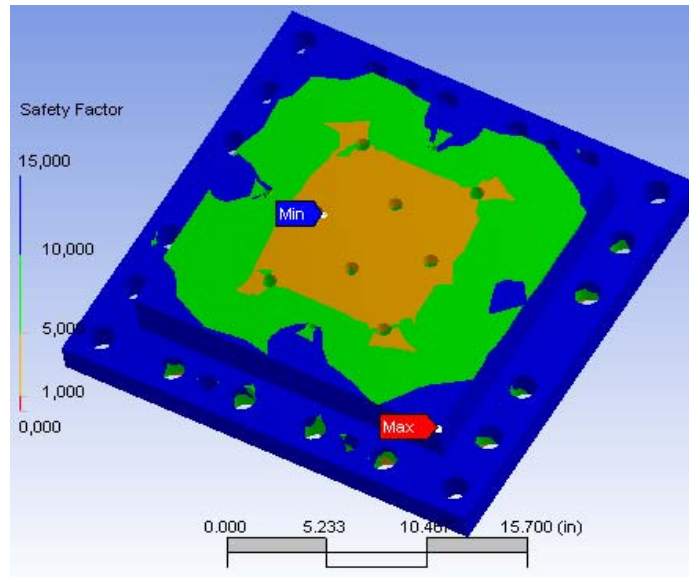
El factor de seguridad mínimo tiene un valor de 1.8.

En la figura 44 y 45 se presentan la distribución de valores para el factor de seguridad y las deformaciones ocurridas en la base. Al igual que en la tapa se presenta una adecuada distribución de factores de seguridad y se exhibe un apropiado comportamiento en lo referente a deformaciones.

La máxima deformación tendrá un valor de 0.056 pulgadas = 1.42 mm

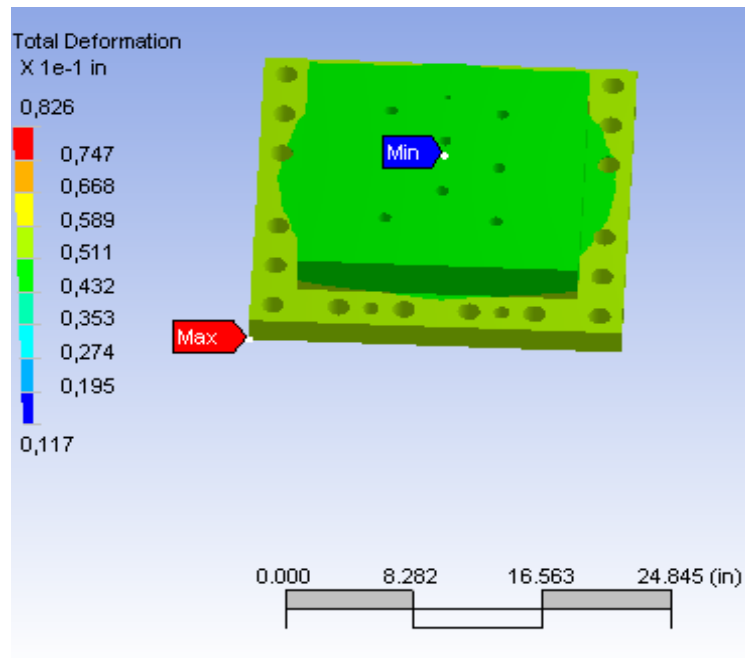
El factor de seguridad mínimo tiene un valor de 1.8.

Figura 44. Factor de seguridad en la base.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Figura 45. Deformaciones en la base.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

El comportamiento del porta núcleos es adecuado para las condiciones de carga. A continuación se presentan los resultados obtenidos.

Tabla 11. Resultados obtenidos luego de la simulación en unidades métricas.

P (Kpa)	MASA (kg)	t (mm)
13789.5	380	40

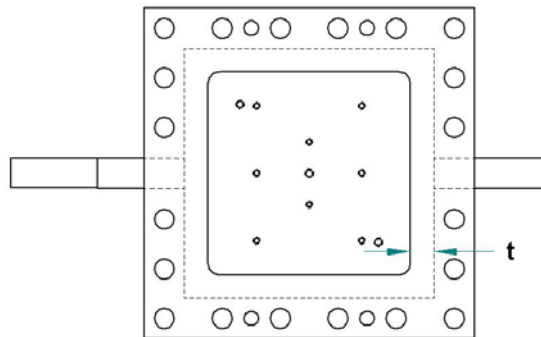
Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Tabla 12. Resultados obtenidos luego de la simulación en unidades inglesas.

P (Psi)	MASA (Lb)	t (pulgadas)
2000	836	1.57

Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Figura 46. Espesor de la tapa del porta núcleos.



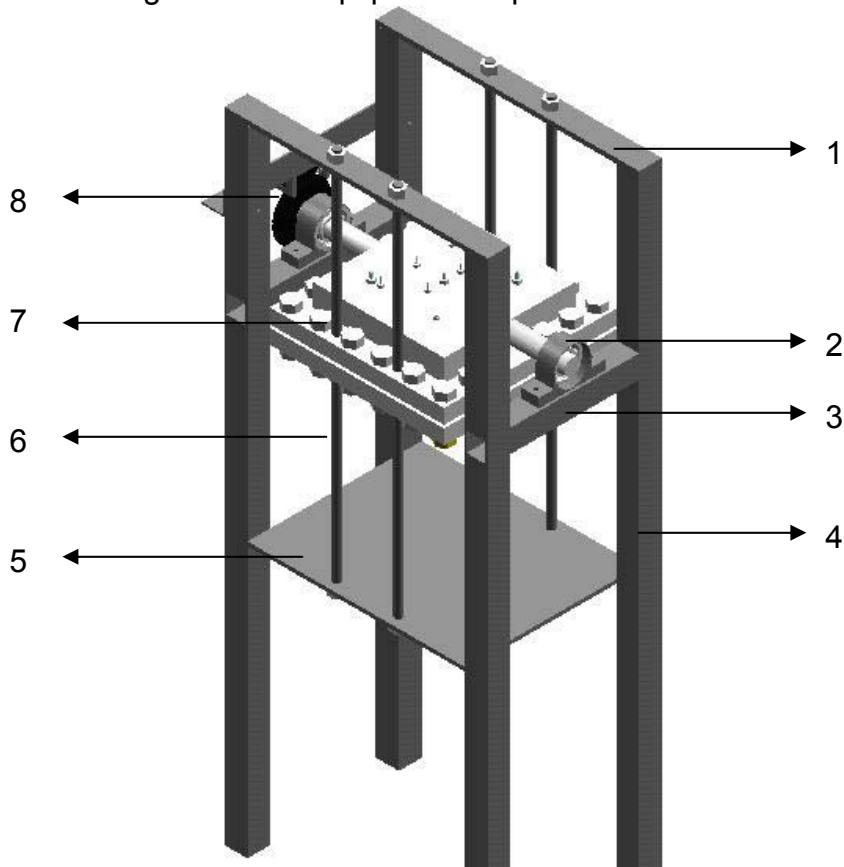
Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

En estas tablas la medida llamada t es referida a las dimensiones de cada uno de los componentes del porta núcleos (Ver figura 46).

Las masas ubicadas en las tablas 11 y 12 son la suma de las masas de los componentes del porta núcleos (Tapa y base).

4.4 DISEÑO DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DEL EQUIPO

Figura 47. Vista general del equipo de desplazamiento.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

En la figura 47 se aprecian algunos de los principales componentes del equipo de desplazamiento diseñado, entre ellos se encuentran: 1) Sostén de varillas guía, 2) Chumaceras, 3) Perfil actuando como viga, 4) Perfil actuando como columna, 5)

Placa sostén del gato hidráulico, 6) Varilla guía, 7) Pernos, 8) Mecanismo sinfín-corona. A continuación se presentan los cálculos de diseño para tales componentes y los criterios utilizados para la selección de algunos equipos.

4.5 CARGAS EN LOS PERNOS²

Elemento número 7 en la figura 47.

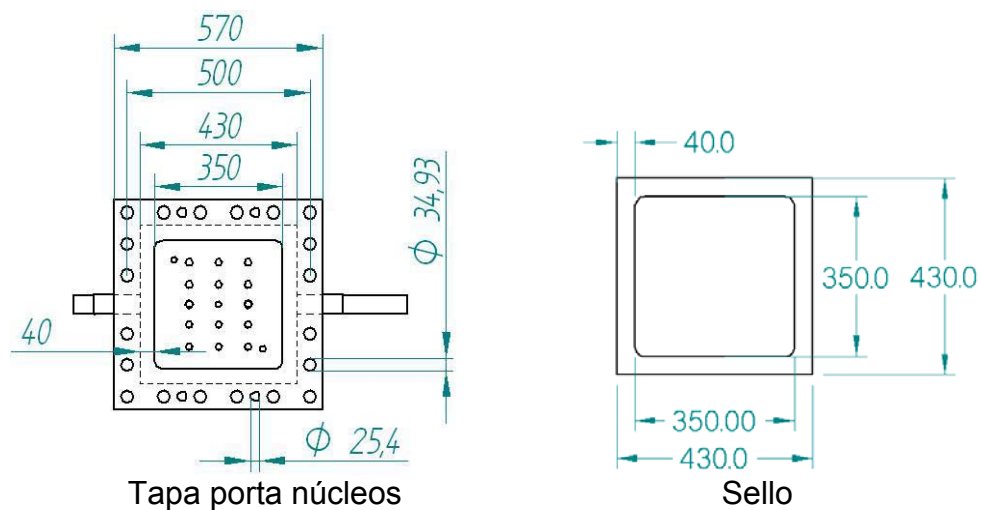
$$\text{Fuerza hidrostática total: } H' = 0.785 * G^2 * P \quad (54)$$

Donde

G = Diámetro a la localización de la reacción en el sello.

$$G = 16.93 \text{ pulgadas} = 430 \text{ mm}$$

Figura 48. Dimensiones del porta núcleos y el sello (milímetros).



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

$$P = \text{Presión de diseño y es por definición } P = 1.1 * P_o \quad (55)$$

donde:

$P_o = 1200 \text{ Psi} = 8273.71 \text{ Kpa}$ Es la presión de operación.

$$P = 1320 \text{ Psi} = 9101.08 \text{ Kpa}$$

$$H' = 296970.3 \text{ Lbf} = 1320989.71 \text{ N}$$

$$\text{Carga total de compresión para contacto de la junta: } H_p = 2 * b * 3.14 * G * m * P \quad (56)$$

Donde

b = Superficie de contacto efectiva para asentamiento del sello. Según tabla 3-320.2 del Código ASME para una configuración del sello tipo 1^a el espesor básico de asentamiento del sello es $b = b_o = N / 2$ (57)

donde N = Es el ancho del sello. Para nuestro caso el ancho del sello es:

$$N = 1.57 \text{ pulgadas} = 40 \text{ mm}$$

$$b = 0.79 \text{ pulgadas} = 20 \text{ mm}$$

m = Factor de sello tabla 3-320.1 código ASME.

$m = 4$ Para sello de metal sólido plano de aluminio suave.

$$H_p = 442002.35 \text{ Lbf} = 1966124.41 \text{ N}$$

Mínima carga requerida en los pernos para condiciones de operación:

$$W_{m1} = H + H_p \quad (58)$$

$$W_{m1} = 738972.69 \text{ Lb} = 3287114.29 \text{ N}$$

Mínima carga requerida en los pernos para asentamiento del sello:

$$W_{m2} = 3.14 * b * G * Y \quad (59)$$

Donde

Y = Carga para asentar la junta o superficie de contacto (asentar el sello).

$Y = 8800 \text{ Psi}$ De la tabla 3-220.1 del código ASME. En nuestro caso 8800 Psi para aluminio blando.

$$W_{m2} = 368335.3 \text{ Lbf} = 1638437.04 \text{ N}$$

Área requerida de pernos: A_m = Es la más grande entre

$$A_{m1} = \frac{W_{m1}}{S_b} \quad \text{y} \quad A_{m2} = \frac{W_{m2}}{S_a} \quad (60)$$

Donde

S_b = Esfuerzo permisible de los pernos a la temperatura de diseño para un perno de material SA 540 clase 3. La temperatura de diseño es $560^\circ F$

$$S_b = 36000 \text{ Psi} = 248211.26 \text{ Kpa}$$

S_a = Esfuerzo permisible de los pernos a la temperatura atmosférica para un perno de material SA 540 clase 3.

$$S_a = 43000 \text{ Psi} = 296474.56 \text{ Kpa}$$

Los valores de esfuerzo permisible a temperatura de diseño para el material SA-540 Grado B24 Clase 3 usado con **flanges** para diferentes temperaturas se listan en la tabla 13.

$$A_{m1} = 20.53 \text{ pulgadas}^2 = 0.013 \text{ m}^2$$

$$A_{m2} = 8.57 \text{ pulgadas}^2 = 0.0055 \text{ m}^2$$

Tabla 13. Esfuerzo a diferentes temperaturas para material SA-540 Grado B24 Clase 3.

		Esfuerzo Permisible (Ksi) de los pernos para temperaturas del metal que no excedan:							
Su mínimo (Ksi)	Sy mínimo (Ksi)	100 °F	200 °F	300 °F	400 °F	500 °F	600 °F	700 °F	800 °F
145	130	43.3	41.4	40.2	38.8	37.6	35.9	33.7	...

Fuente: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.: "Asme Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 2". ASME. 1983.

Por tanto

$$A_m = 20.53 \text{ pulgadas}^2 = 0.013 \text{ m}^2$$

Numero de pernos: 20. El área mínima requerida para un perno es:

$$\frac{A_m}{20} = 1.03 \text{ pulgadas}^2 = 6.64 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

De las tablas de propiedades para roscas se escoge el perno con el siguiente tamaño por arriba del área mínima requerida según denominación UNC ver tabla 14.

El tamaño del perno escogido es $1\frac{3}{8}$ pulgadas = 34.925mm .

Tabla 14. Propiedades de roscas.

TAMAÑO	ÁREA DE ESFUERZO	ÁREA DE ESFUERZO
	Cuerdas gruesas: UNC pulgadas ²	Cuerdas finas: UNF pulgadas ²
7/16	0.106	0.1185
1/2	0.1416	
1/2	0.1374	0.1597
9/16	0.1816	0.2026
5/8	0.2256	0.2555
3/4	0.334	0.3724
7/8	0.4612	0.5088
1	0.6051	0.6624
1 1/8	0.7627	0.8549
1 1/4	0.9684	1.0721
1 3/8	1.1538	1.3137
1 1/2	1.4041	1.5799
1 3/4	1.8983	2.1853

Fuente: FAIRES, V. M.: "Design of Machine Elements". Mc MILLAN. 1998.

4.6 CALCULO NECESARIO PARA EL APRIETE DE LOS PERNOS¹⁶

Torque necesario para el apriete: $T = K' \cdot D' \cdot W'$ (61)

Donde

K' = Constante dependiente de la lubricación presente: 0.15 si existe lubricación, 0.2 si los hilos están limpios y secos. Tomamos un $K' = 0.2$.

D' = Diámetro exterior nominal de las cuerdas: $D' = 1\frac{3}{8}$ pulgadas .

W' = Carga por perno en este caso la mayor entre W_{m1} y W_{m2} ecuaciones 58 y 59 dividida en el número de pernos. $W' = 36948.63 \text{ Lbf} = 164355.69 \text{ N}$

$T = 10160.87 \text{ Lbf} \cdot \text{pulgada} = 1148.02 \text{ N} \cdot \text{m}$

4.7 DISEÑO DEL SELLO^{2 18}

Este elemento se encuentra ubicado entre la tapa y la base del porta núcleos.

Presión de Operación: $P = 2000 \text{ Psi} = 13789.51 \text{ Kpa}$

En la figura 48 se aprecian las dimensiones del sello.

Espesor básico de asentamiento del sello de la ecuación 57
 $b_o = 0.79 \text{ pulgadas} = 20 \text{ mm}$. SEGÚN TABLA 3-320.2 código ASME.

N : Es el ancho del sello. $N = 1.57 \text{ pulgadas} = 40 \text{ mm}$

$$\text{Área eficaz de la junta: } A_g \text{ Se puede calcular así: } A_g = \pi * D_{\text{int}} * N \quad (62)$$

Donde

$D_{\text{int}} = 13.78$ pulgadas = 350 mm . Es el diámetro mas interno del sello.

Nuestro sello es cuadrado, como diámetro interno tomamos el espacio entre caras internas en el sello.

$$A_g = 68.17 \text{pulgadas}^2 = 0.044 \text{m}^2$$

$$\text{Fuerza ejercida por la presión del líquido: } F_1 = A_i * P \quad (63)$$

Donde

$$A_i = \text{Área sometida a la presión interna del fluido: } \frac{\pi * D_{\text{int}}^2}{4} \quad (64)$$

$$A_i = 149,13 \text{pulgadas}^2 = 0.096 \text{m}^2$$

$$F_1 = 298256.25 \text{Lbf} = 1326709.89 \text{N}$$

$$F_j = A_g * m * P \quad (65)$$

Donde

$m = 4$ Coeficiente de junta o factor de sello de tabla 3-320.1 código ASME para un sello metálico sólido plano de aluminio suave.

$$F_j = 545382.85 \text{ Lbf} = 2425983.78 \text{ N}$$

$$\text{Fuerza necesaria en los tornillos para el apriete inicial: } F_b = F_1 + F_j \quad (66)$$

$$F_b = 843639 \text{ Lbf} = 375292.01 \text{ N}$$

$$\text{Tensión de tracción en el perno: } \frac{F_b}{A_{perno} * \# \text{ pernos}} \quad (67)$$

Donde:

$A_{perno} = 1.1538 \text{ pulgadas}^2 = 7.44 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ Es el área de tracción de un perno de $1\frac{3}{8}$ pulgadas de diámetro. Ver tabla 14.

$$\# \text{ pernos} = 20$$

$$\text{Tensión de tracción en el perno} = 36559.16 \text{ Psi} = 252066.53 \text{ Kpa}$$

Presión ejercida sobre la junta por el apriete de los tornillos:

$$q = \frac{P * (A_i + A_g * m)}{A_g} \quad (68)$$

$$q = 12375 \text{ Psi}$$

Este valor de q se compara con el valor de fluencia de la junta o mínimo esfuerzo de diseño para asentamiento de la junta γ . Este valor de γ es la presión mínima de contacto para lograr una junta estanca y es dado por la tabla 3-320.1 del código ASME.

$Y = 8800 \text{ Psi}$ Para un sello metálico sólido plano de aluminio suave.

Este valor de q es satisfactorio porque según la tabla 3-320.1 del código ASME con presiones superiores a 8800 Psi para aluminio se obtiene un adecuado cierre de la junta.

4.8 CALCULO DE LAS VARILLAS GUÍA³³

Elemento número 6 en la figura 47.

Las varillas y su disposición se muestran en la figura 49.

$$\text{Formula de Euler para columna larga: } P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * A}{\left[\frac{K'' * L'}{r} \right]^2} \quad \text{O} \quad P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{[K'' * L']^2} \quad (69)$$

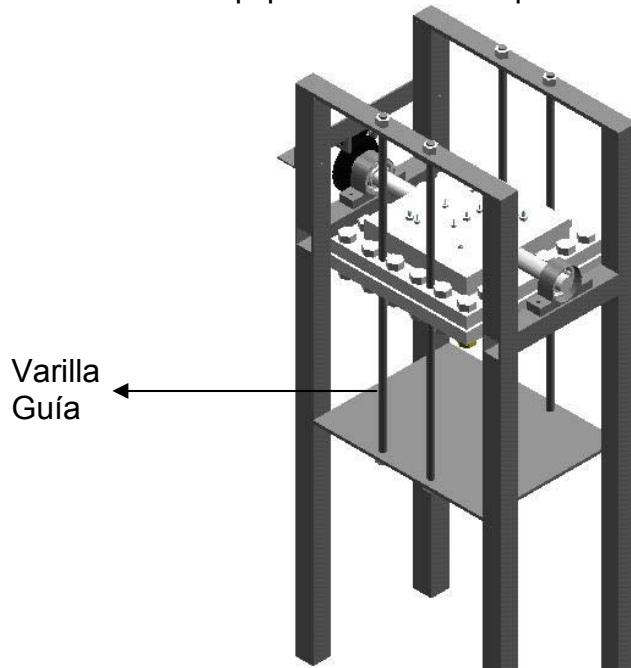
Donde

P_{cr} = Carga critica a la cual la columna empezara a pandearse.

E = Modulo de elasticidad del material.

$E = 30 \text{ e } 6 \text{ Psi} = 200 \text{ Gpa}$ Para el acero.

Figura 49. Sección del equipo en donde se aprecian las varillas guía.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

A = Área de la sección transversal. El diámetro D'' de la barra es 1 pulgada por tanto el área de la sección transversal es: $A = \frac{\pi * D''^2}{4}$ (70)

$$A = 0.785 \text{pulgadas}^2 = 5.1e - 4 \text{m}^2$$

K'' = Factor de empotramiento. Igual a 1 porque la columna se atornilla a los extremos.

L' = Longitud real de la columna entre soportes. $L' = 49.41 \text{pulgadas} = 1255.01 \text{mm}$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}} \text{ Es el radio de giro.} \quad (71)$$

I = Momento de inercia de la sección transversal.

$$\text{Para una sección redonda sólida } r = \frac{D'}{4} \quad (72)$$

$$\text{Entonces } r = \frac{1}{4} = 0.25 \text{ pulgadas} = 6.35 \text{ mm} .$$

El material de la columna será acero AISI 1020 de $S_y = 51000$ Psi.

$$\text{Razón de delgadez: } K'L'/r \quad (73)$$

$$K'L'/r = 197.64$$

$$\text{Calculo de la constante de columna: } C_c = \sqrt{\frac{2 * \pi^2 * E}{S_y}} \quad (74)$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2 * \pi^2 * E}{S_y}} = 107.75$$

Puesto que el valor de $C_c = 107.75$ es menor que $K'L'/r = 197.64$ la columna es larga y se puede utilizar la formula de Euler para columna larga.

$$P_{cr} = 5953.52 \text{ Lbf} = 26482.57 \text{ N} .$$

$$\text{Calculo del factor de seguridad: } N' = \frac{P_{cr}}{P} \quad (75)$$

Donde P = Carga real en la columna.

$$P = \frac{W'}{4} \tag{76}$$

Donde $W' = 1320 \text{ Lbf} = 5871.65 \text{ N}$ Peso total del porta núcleos y sus elementos.

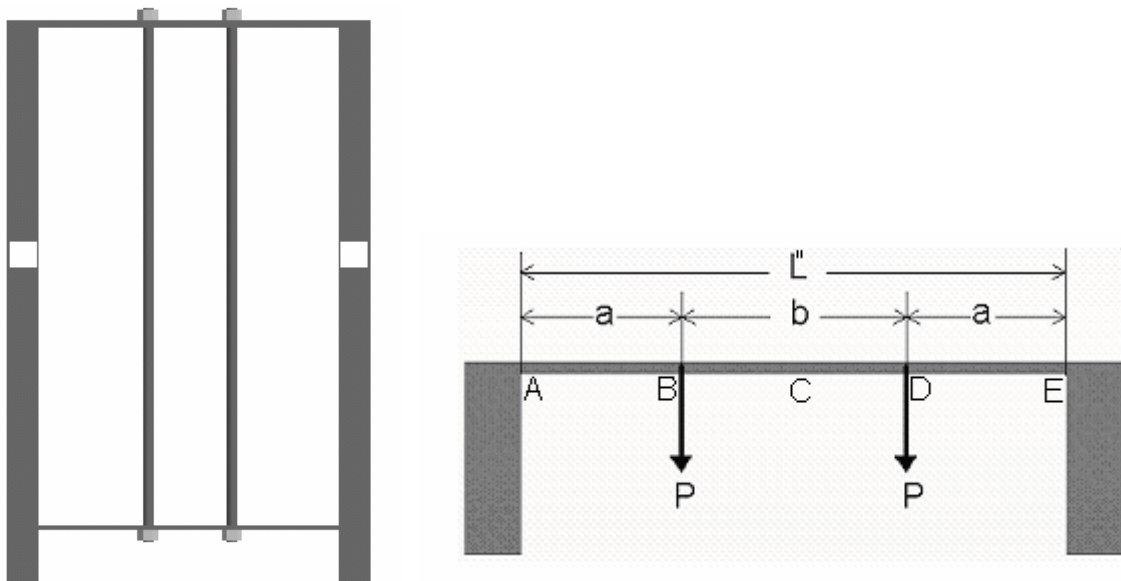
$$P = \frac{W'}{4} = \frac{1320}{4} \text{ Lbf} = 330 \text{ Lbf} = 1467.91 \text{ N}$$

$$N' = \frac{5953.52 \text{ Lbf}}{330 \text{ Lbf}} = 18.04$$

4.9 PERFIL SOSTÉN DE VARILLAS EN LA PARTE SUPERIOR²¹

Elemento número 1 en la figura 47. Se aprecian también en la siguiente figura.

Figura 50 Perfil soporte varillas guía (actuando como viga) y sus cargas.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Son cuatro columnas, cada una soporta un cuarto de la carga total del equipo.

De la ecuación 76 $P = \frac{W'}{4} = \frac{1320}{4} \text{ Lbf} = 330 \text{ Lbf} = 1467.91 \text{ N}$ Por tanto cada una de estas vigas soporta dos fuerzas cada una de este valor.

Longitud de cada viga: $L'' = 27.95 \text{ pulgadas} = 710 \text{ mm}$

Distancia entre los extremos y la ubicación de la carga:
 $a = 10.04 \text{ pulgadas} = 255.04 \text{ mm}$

Distancia entre las cargas: $b = 7.87 \text{ pulgadas} = 199.92 \text{ mm}$

Momento máximo en la viga (Viga empotrada): $M = \frac{-P * a * (L'' - a)}{L''}$ (77)

$M = 2123.26 \text{ Lbf} * \text{pulgada} = 239.89 \text{ N} * \text{m}$

Viga de Acero estructural: $S_y = 36000 \text{ Psi} = 248211.26 \text{ Kpa}$

Esfuerzo permisible: De acuerdo a la teoría del máximo esfuerzo de corte:

$\sigma_{perm} = \frac{S_y}{2}$ (78)

$\sigma_{perm} = 18000 \text{ Psi} = 124105.63 \text{ Kpa}$

$\sigma_{perm} = \frac{M}{S_{req}}$, despejando: $S_{req} = 0.118 \text{ pulgadas}^3 = 1.93e - 6 \text{ m}^3$ (79)

$$\text{En donde } S_{req} = \frac{I}{C} \quad (80)$$

En donde:

I = Momento de inercia de la sección.

C = Distancia desde el eje neutro a la fibra mas larga.

Tanto C como I son desconocidos. El procedimiento para fijar el perfil de la viga es el siguiente:

Se define el ancho del perfil y se varia la altura de este, evaluando las propiedades de la sección hasta que cumpla con los requisitos mínimos de S_{req} . El ancho predefinido del perfil es: $b = 2.95$ pulgadas = 75 mm .

El momento de inercia de la sección para un perfil rectangular se define como:

$$I = \frac{b * h^3}{12} \quad (81)$$

En donde h' es la altura del perfil.

Este procedimiento fue hecho en una hoja de cálculo y arrojó los siguientes resultados:

Tabla 15. Resultados obtenidos para la altura del perfil.

h(in)	I in ⁴	S=I/c
0.1	0.00024606	0.00492126
0.2	0.0019685	0.01968504
0.3	0.0066437	0.04429134
0.4	0.01574803	0.07874016
0.5	0.03075787	0.1230315
0.6	0.05314961	0.17716535
0.7	0.08439961	0.24114173
0.8	0.12598425	0.31496063
0.9	0.17937992	0.39862205
1	0.24606299	0.49212598
1.1	0.32750984	0.59547244
1.2	0.42519685	0.70866142
1.3	0.54060039	0.83169291
1.4	0.67519685	0.96456693
1.5	0.8304626	1.10728346
1.6	1.00787402	1.25984252
1.7	1.20890748	1.42224409
1.8	1.43503937	1.59448819
1.9	1.68774606	1.7765748
2	1.96850394	1.96850394

Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

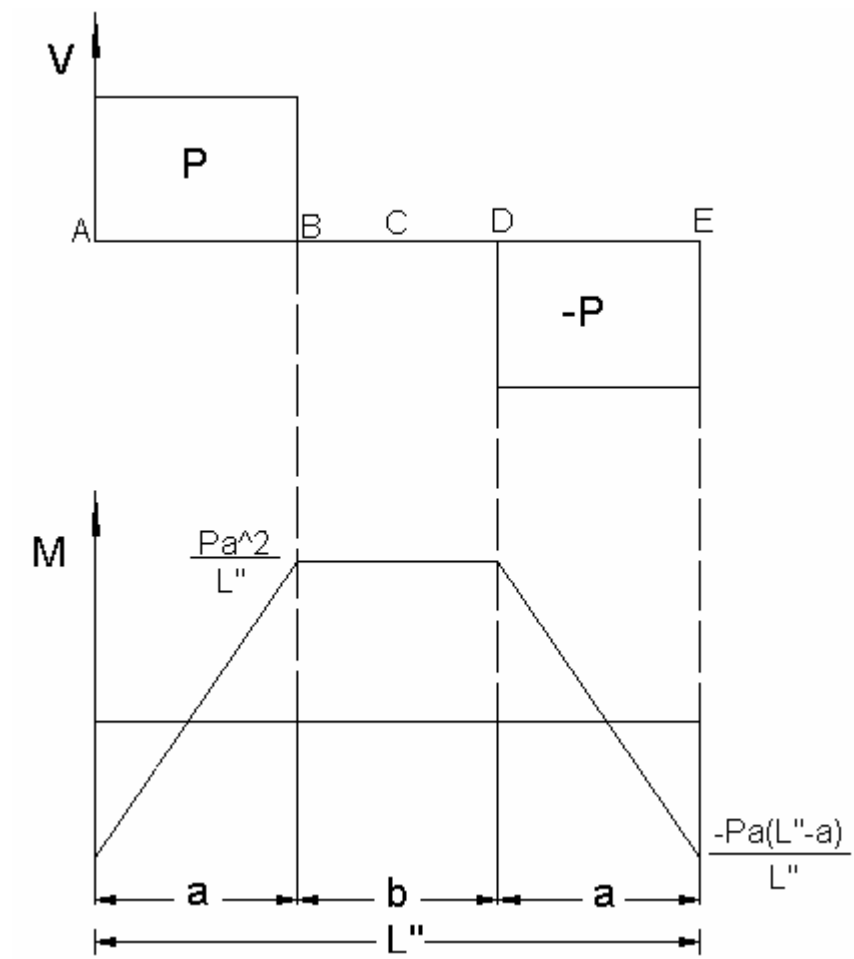
Los perfiles que cumplen con el S_{req} son los que aparecen con la trama celeste.

Se escogió por tanto una altura de perfil de $h' = 0.63$ pulgadas = 16 mm .

Para el análisis de deformaciones, utilizando el método de área-momento, y realizando los diagramas de cortante y momento para la viga (figura 51):

La máxima deformación se presentará en C y tendrá un valor de -0.005 pulgadas = -0.13 mm

Figura 51 Diagramas de cortante y momento para la viga.

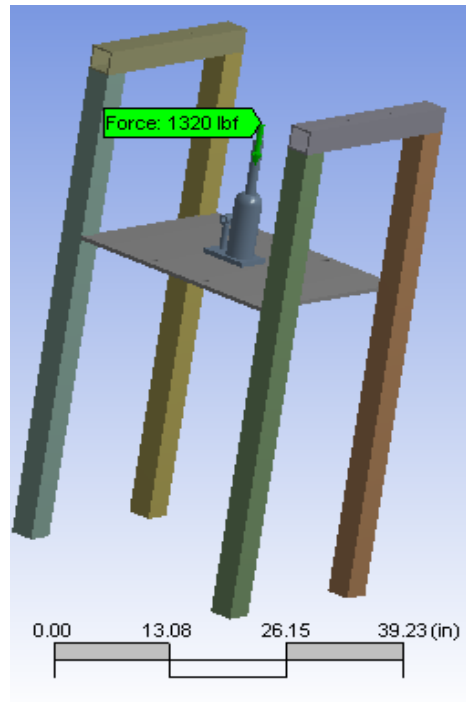


Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

4.10 ANÁLISIS DE LA PLACA SOSTÉN DEL GATO HIDRÁULICO⁴⁷

Elemento número 5 en la figura 47.

Figura 52. Placa soporte del gato hidráulico con la carga.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

$W' = P = 1320\text{Lbf} = 5871.65\text{N}$. Carga total del equipo.

Longitud de la placa: $L'' = 27.95$ pulgadas = 710 mm

Ancho de la placa: $b = 22.44$ pulgadas = 570 mm .

Espesor de la placa: $h = 0.5$ pulgadas = 12,7 mm .

La placa es de acero estructural con un $S_y = 36000 \text{ Psi} = 248211.26 \text{ Kpa}$

Aproximando a placa cuadrada centralmente cargada y fijada solamente en las esquinas. Si la carga P es distribuida uniformemente sobre una pequeña área circular o rectangular, la siguiente ecuación expresa el valor del momento que tiene lugar en el centro del área cargada:

$$M_x = M_y = \left(0.1034 * \log\left(\frac{a}{u}\right) + 0.129 \right) * P \quad (82)$$

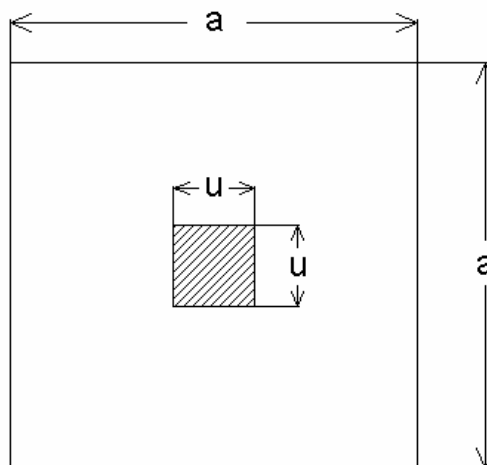
Donde:

$a = 22.44 \text{ pulgadas} = 570 \text{ mm}$ es la longitud de la placa.

$u = 2 \text{ pulgadas} = 50.8 \text{ mm}$ es el lado del área cuadrada en la que se distribuye la carga.

Ver figura 53.

Figura 53. Placa soporte y área de distribución de la carga.



Fuente: Timoshenko , S.; Woinowsky-KRIEGER S.: "Theory of Plates and Shells". McGRAW HILL 1959.

Reemplazando estos valores en la ecuación 82:

$$M_x = M_y = 313.48 \text{Lb} \cdot \text{pulgada} = 35.42 \text{N} \cdot \text{m}$$

$$\text{Esfuerzo máximo en la placa suponiendo viga: } \sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (83)$$

$$\text{Con } I = \frac{b \cdot h^3}{12} = 0.233 \text{pulgadas}^4 = 9.69 \text{e} - 8 \text{m}^4$$

$$C = \frac{h}{2} = 0.25 \text{pulgadas} = 6.35 \text{mm}$$

$$\sigma = 336.35 \text{Psi} = 2319.06 \text{KPa}$$

En las figuras 54 y 55 se presentan la distribución de esfuerzos en la placa y la deformación total de la misma, luego de la simulación con ANSYS.

EL máximo esfuerzo en la placa de acuerdo a los resultados obtenidos en la simulación es: $18274.75 \text{Psi} = 126000 \text{Kpa}$.

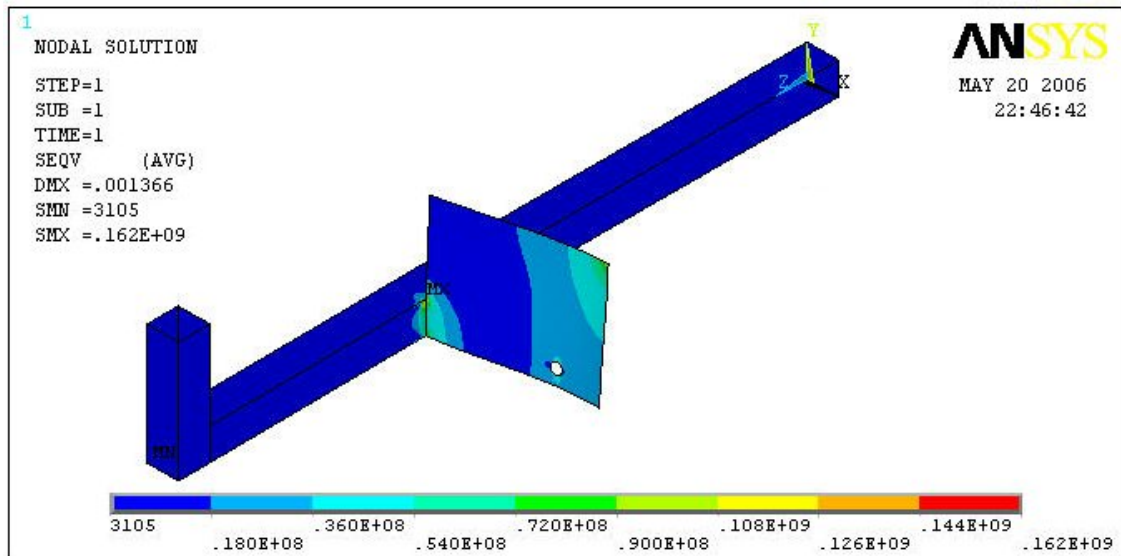
La máxima deformación se presentará en el centro de la placa y tendrá un valor de $-0.053 \text{ pulgadas} = -1.36 \text{ mm}$.

La placa presenta un factor de seguridad mínimo de 1.96.

Estos resultados indican que se obtienen mejores resultados al utilizar el software de elementos finitos que las aproximaciones utilizadas en la teoría de placas.

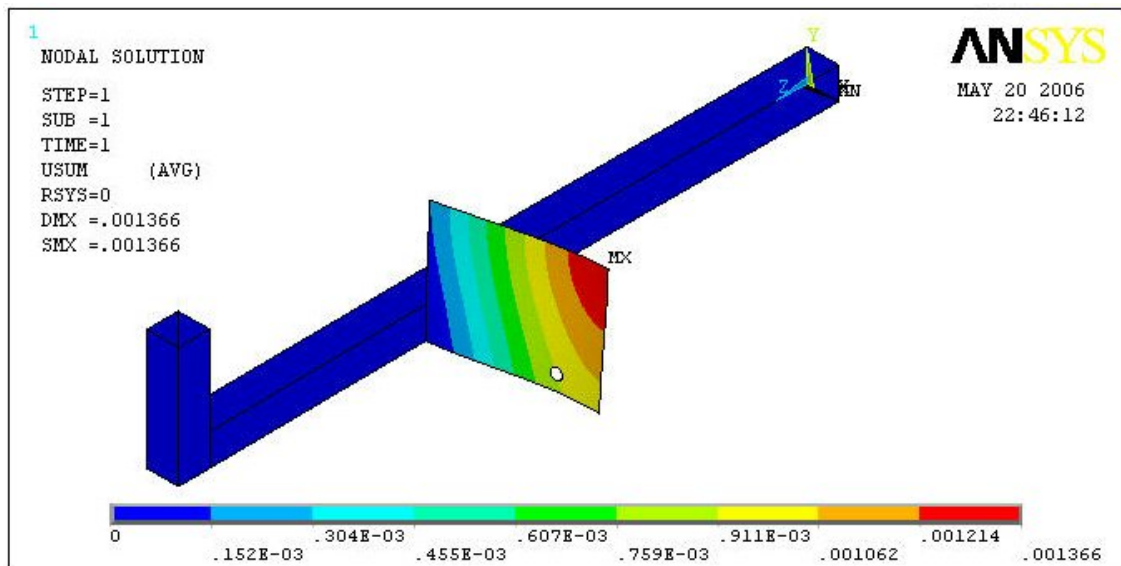
La placa presenta un adecuado comportamiento al ser sometida a estas condiciones de carga.

Figura 54. Esfuerzo equivalente de la placa luego de la simulación.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

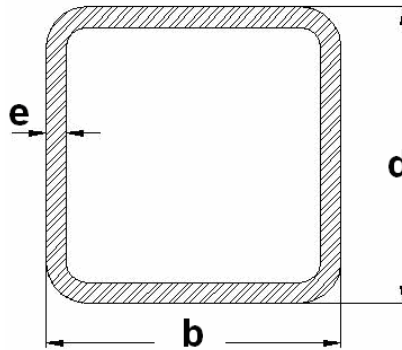
Figura 55. Deformación total de la placa luego de la simulación.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

4.11 CALCULO DE LOS PERFILES (SOPORTES)

Figura 56. Sección del perfil.



Fuente: Fabrica de perfiles COLMENA

4.11.1 Características y denominación del perfil. De acuerdo a la figura anterior, las características del perfil se presentan en las dos tablas siguientes.

Tabla 16. Dimensiones y datos importantes del perfil seleccionado.

TAMAÑO DEL PERFIL				ESPESOR DE PARED e (mm)	PESO (Kg/m)	ÁREA (Cm ²)
NOMINAL		REAL				
PULGADAS	Milímetros	d' (mm)	b (mm)			
3 x 3"	75 x 75	75	75	6	12.27	15.63

Fuente: Fabrica de perfiles COLMENA

Tabla 17. Propiedades de área de la sección transversal del perfil.

PROPIEDADES ESTÁTICAS					
FLEXIÓN					
MOMENTO INERCIA I _x =I _y		MODULO ELÁSTICO S _x =S _y		RADIO DE GIRO r _x =r _y	
cm ⁴	pulgadas ⁴	cm ³	ln ³	cm	pulgadas
120.16	2,89	32.04	1,95	2.77	1,09

Fuente: Fabrica de perfiles COLMENA

4.11.2 Perfil actuando como viga (a FLEXIÓN)²¹:

Elemento número 3 en la figura 47.

CARGA TOTAL DEL PORTA NÚCLEOS: $W' = 1320 \text{ Lbf} = 5871.65 \text{ N}$

Longitud de cada viga:

$L'' = 22.44 \text{ pulgadas} = 570 \text{ mm}$

Momento máximo en la viga: $M = \frac{W' \cdot L''}{8}$ (84)

suponiendo viga empotrada.

$M = 3702.76 \text{ Lbf} \cdot \text{pulgada} = 418.35 \text{ N} \cdot \text{m}$

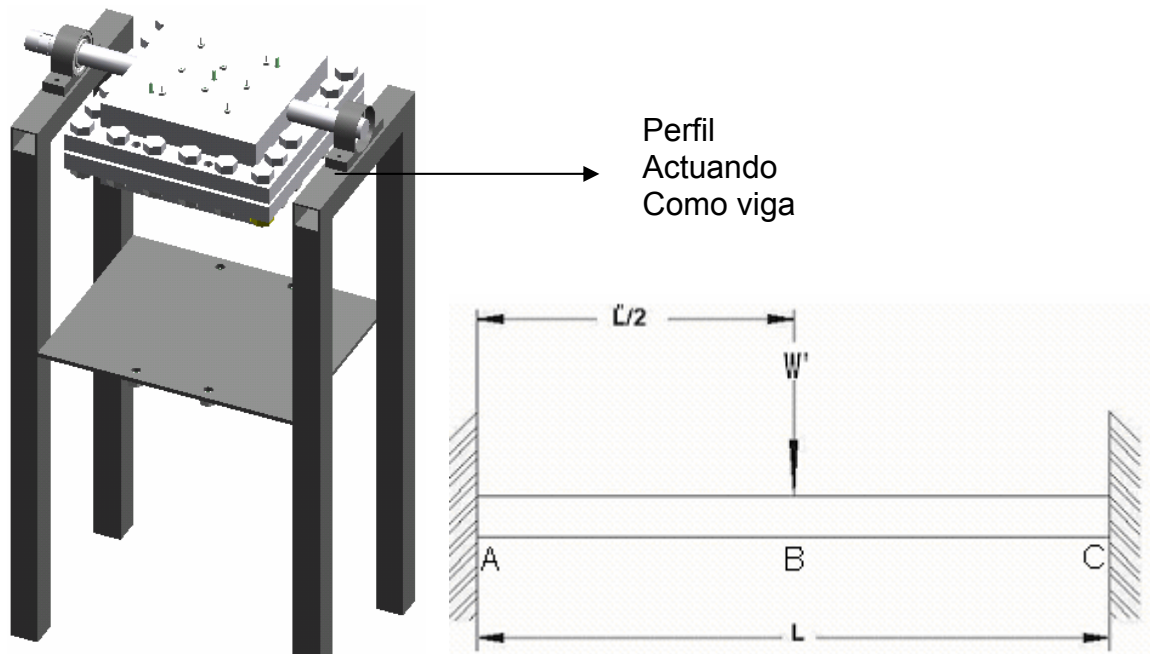
Distancia de la fibra mas alejada de la viga al eje neutro:

$c = 1.48 \text{ pulgadas} = 37.5 \text{ mm}$

De la ecuación 83, el esfuerzo máximo en la viga es:

$S = \frac{M \cdot c}{I} = 1893.64 \text{ Psi} = 13056.19 \text{ Kpa}$

Figura 57. Perfil (actuando como viga) y su correspondiente carga.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Perfiles de Acero estructural

$$S_y = 36000 \text{ Psi} = 248211.26 \text{ Kpa}$$

Esfuerzo permisible: De acuerdo a la teoría del máximo esfuerzo de corte:
ecuación 78.

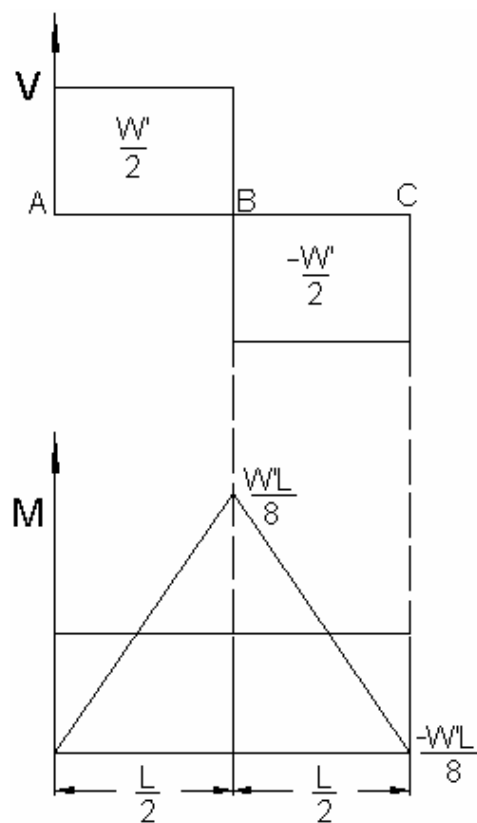
$$\sigma_{\text{perm}} = 18000 \text{ Psi} = 124105.63 \text{ Kpa}$$

$$\text{Factor de seguridad: } N' = \frac{\sigma_{\text{perm}}}{S} \tag{85}$$

$$N' = \frac{\sigma_{perm}}{S} = 9.5$$

Para el análisis de deformaciones, utilizando el método de área-momento, y realizando los diagramas de cortante y momento para la viga (figura 58):

Figura 58. Diagramas de cortante y momento para el perfil actuando como viga.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

La máxima deformación se presentará en B y tendrá un valor de -0.0009 pulgadas = -0.023 mm

4.11.3 Perfil actuando como columna²¹:

Elemento número 4 en la figura 47.

De la ecuación 69
$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{[K''*L']^2}$$

Donde

$I = 2.89 \text{pulgadas}^4 = 1.2e - 6 \text{m}^4$ Momento de inercia de la sección transversal.

$E = 30 \text{e} 6 \text{Psi} = 200 \text{Gpa}$ Para el acero estructural.

$S_y = 36000 \text{Psi} = 248211 \text{Kpa}$

La placa actúa como un arriostramiento para la columna.

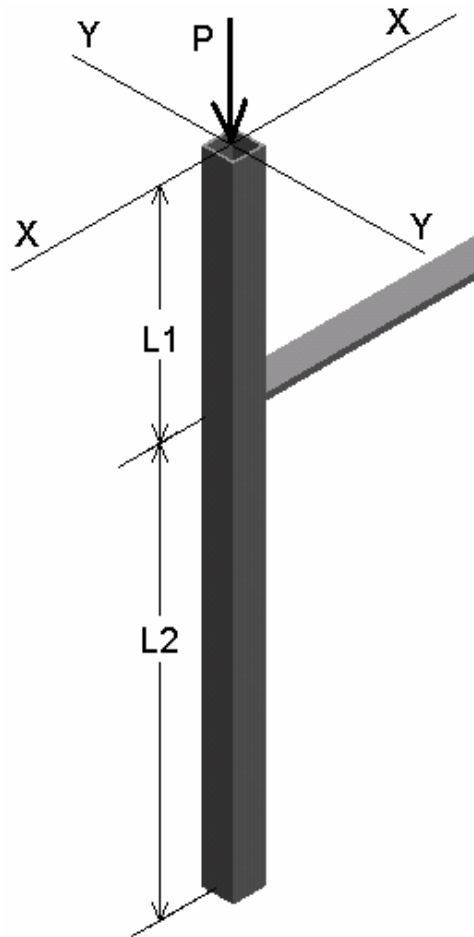
$K'' = 2$ Factor de empotramiento. Un extremo empotrado el otro extremo libre.

$L' =$ Longitud real de la columna entre soportes. $L' = 59.05 \text{pulgadas} = 1500 \text{mm}$

$L_1 = 20.9 \text{pulgadas} = 530.94 \text{mm}$ Distancia del arriostramiento al punto de aplicación de la carga.

$L_2 = 38.15 \text{pulgadas} = 969.06 \text{mm}$ Distancia del arriostramiento al extremo inferior de la columna.

Figura 59. Perfil actuando como columna y su correspondiente carga.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

El comportamiento por pandeo de la columna será diferente con respecto al eje x que respecto al eje y debido al arriostramiento.

La longitud efectiva respecto al eje x es $(K''*L')_x = 2 * 59.05\text{pulgadas} = 118.1\text{pulgadas}$

La longitud efectiva respecto al eje y es $(K''*L')_y = 2 * 38.15\text{pulgadas} = 76.3\text{pulgadas}$

Reemplazando en la ecuación 69:

$$(P_{cr})_X = 61350.63 \text{ Lbf} = 272901.21 \text{ N}$$

$$(P_{cr})_Y = 146983.9 \text{ Lbf} = 653816.96 \text{ N}$$

Por comparación: crítico el eje x. Pero la carga para que ocurra pandeo es muy alta en comparación con el peso del equipo: 1320 Lbf.

El área de la sección transversal del perfil es: $A = 2.42 \text{ pulgadas}^2 = 15.63 \text{ cm}^2$.

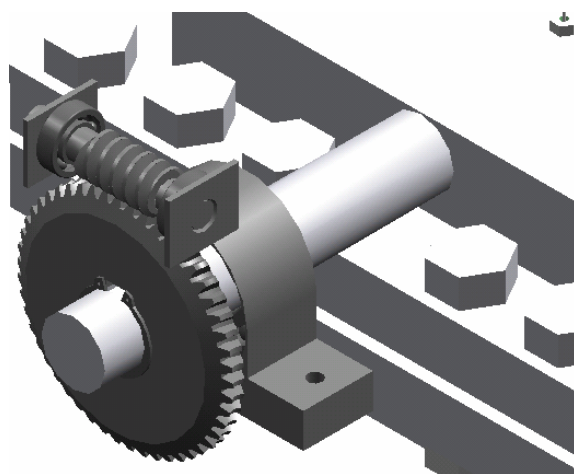
La carga para que ocurra fluencia es: $P = \sigma_{perm} * A = 87120 \text{ Lbf} = 387529.06 \text{ N}$

El pandeo se presentará antes de que el material fluya.

4.12 CALCULO DEL MECANISMO SINFIN- CORONA^{9 49}

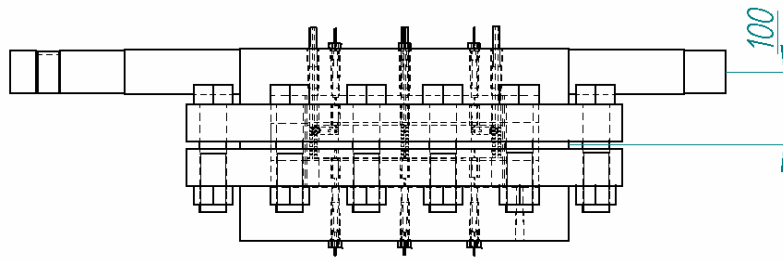
Elemento número 8 en la figura 47.

Figura 60. Mecanismo Sinfín Corona.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Figura 61. Distancia de palanca del centroide al eje (mm).



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

El peso completo del equipo es de: $W' = 1320 \text{ Lbf} = 5871.65 \text{ N}$.

La distancia de palanca para el torque es de: $d' = 3.937 \text{ pulgadas} = 100 \text{ mm}$.

Torque: $T = W' * d'$ (86)

$$T = 5196.85 \text{ Lbf} * \text{pulgada} = 587.16 \text{ N} * \text{m}$$

Tomando una distancia entre centros de: $C' = 8.5472 \text{ pulgadas} = 217.1 \text{ mm}$

Se recomienda un diámetro del tornillo de: $DW = \frac{C'^{0.875}}{2.25}$ (87)

$$DW = \frac{C'^{0.875}}{2.25} = 2.905 \text{ pulgadas} = 73.79 \text{ mm}$$

Se tiene por tanto un diámetro de la corona de: $DG = 2 * C' - DW$ (88)

$$DG = 2 * C' - DW = 14.189 \text{ pulgadas} = 360.4 \text{ mm}$$

El tornillo será de un solo filete, es decir $N_w = 1$.

Escogiendo una relación de engranajes de: $m' = 150$. Esta relación fue escogida luego de varias iteraciones para satisfacer el torque necesario de entrada al tornillo sinfín, el cual debe cumplir con los máximos valores de torque que otorgan los motores paso a paso del mercado.

La relación de engranajes se define también de la siguiente manera:

$$m' = \frac{NG}{Nw} \quad (89)$$

Despejando el número de dientes de la corona: $NG = 150$.

Se define el Diametral pitch como: $Pd = \frac{NG}{DG}$ (90)

$$Pd = \frac{NG}{DG} = 10.571 \text{ 1/pulgada}$$

Se define el paso axial como: $Px = \frac{\pi}{Pd}$ (91)

$$Px = \frac{\pi}{Pd} = 0.2971 \text{ pulgadas} = 7.54 \text{ mm}$$

Se define el avance como: $L''' = \frac{\pi * DG * Nw}{NG}$ (92)

$$L''' = \frac{\pi * DG * Nw}{NG} = 0.2971 \text{ pulgadas} = 7.54 \text{ mm}$$

Se define el ángulo de avance como: $\lambda = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{L'''}{\pi * DW}\right)$ (93)

$$\lambda = \text{Tan}^{-1}\left(\frac{L'''}{\pi * DW}\right) = 1.865 \text{grados.}$$

Puesto que $\lambda < 6$ grados el tornillo es autobloqueante.

AGMA recomienda un valor máximo para el ancho de cara F' como:

$$F'_{\max} \leq 0.67 * DW \quad (94)$$

$$F'_{\max} = 1.946 \text{pulgadas} = 49.439 \text{mm}$$

Tomando un ángulo de presión de: $\phi_n = 20$ grados. Para este ángulo de presión el mínimo número de dientes en la corona es 21.

Brindando una velocidad en la corona $n_G = 0.3R_{\text{pm}}$

Por tanto las revoluciones del tornillo son: $n_W = n_W * m'$ (95)

Rpm para el tornillo: $n_W = 37.5R_{\text{pm}}$.

Para el cálculo de fuerzas:

La fuerza tangencial en la corona: $W_tG = \frac{2 * T}{DG}$ (96)

$$W_tG = \frac{2 * T}{DG} = 732.5 \text{ Lbf} = 3258.32 \text{ N}$$

Esta fuerza es igual a la fuerza axial en el tornillo, $W_{xW} = W_{tG} = 732.5 \text{ Lbf} = 3258.32 \text{ N}$

Velocidad de la línea de paso del tornillo:

$$V_{tW} = \frac{\pi * DW * nW}{12} \quad (97)$$

$$V_{tW} = \frac{\pi * DW * nW}{12} = 22.81 \frac{\text{Pies}}{\text{min}} = 6.95 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Basado en la velocidad de la línea de paso del tornillo:

$$V_s = \frac{V_{tW}}{\cos(\lambda)} \quad (98)$$

$$V_s = \frac{V_{tW}}{\cos(\lambda)} = 22.829 \frac{\text{Pies}}{\text{min}} = 6.96 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

Coefficiente de fricción:

$$\mu' = 0.1024 * e^{\left(-0.07 * V_s^{0.645}\right)} + 0.012 \quad \text{Si } V_s < 10 \frac{\text{Pies}}{\text{min}} \quad (99)$$

Ó

$$\mu' = 0.103 * e^{\left(-0.11 * V_s^{0.45}\right)} + 0.012 \quad \text{Si } V_s > 10 \frac{\text{Pies}}{\text{min}} \quad (100)$$

$$\mu' = 0.077$$

Carga axial en la corona:

$$W_{xG} = \frac{W_tG * (\cos(\varphi_n) * \text{sen}(\lambda) + \mu' * \cos(\lambda))}{(\cos(\varphi_n) * \cos(\lambda) - \mu' * \text{sen}(\lambda))} \quad (101)$$

$$W_{xG} = 84.655 \text{Lbf} = 376.56 \text{N}$$

Esta fuerza es igual a la carga tangencial en el tornillo.

$$W_{tW} = W_{xG} = 84.655 \text{Lbf} = 376.56 \text{N}$$

Carga radial en la corona:

$$W_{rG} = \frac{W_tG * (\text{sen}(\varphi_n))}{(\cos(\varphi_n) * \cos(\lambda) - \mu' * \text{sen}(\lambda))} \quad (102)$$

$$W_{rG} = 267.472 \text{Lbf} = 1189.77 \text{N}$$

Esta carga es igual a la carga radial en el tornillo:

$$W_{rW} = W_{rG} = 267.472 \text{Lbf} = 1189.77 \text{N}$$

Fuerza producida por la fricción:

$$W_f = \frac{W_tG * (\mu' * W_tG)}{(\cos(\lambda) * \cos(\varphi_n))} \quad (103)$$

$$W_f = 60.608 \text{Lbf} = 269.6 \text{N}$$

Perdida de potencia por fricción:

$$PL = \frac{Vs * Wf}{33000} \quad (104)$$

$$PL = 0.042HP = 31.32W$$

Torque necesario para mover el tornillo:

$$To = \frac{WtW * DW}{2} \quad (105)$$

$$To = 122.967 \text{ Lbf} * \text{pulgadas} = 13.895 \text{ N} * \text{m}$$

$$\text{Potencia de salida en el tornillo: } Po = \frac{To * nW}{33000} \quad (106)$$

$$Po = \frac{To * nW}{33000} = 0.058 \text{ Hp} = 43.25W$$

$$\text{Potencia de entrada al tornillo (requerida): } Pi = Po + PL \quad (107)$$

$$Pi = Po + PL = 0.1Hp = 74.56W$$

4.12.1 Análisis de tensiones en los engranajes

La combinación de materiales para el mecanismo sinfín corona es Hierro Gris para la Corona y acero 1020 Endurecido por inducción a 60 HRC para el sinfín.

Material para la corona: Hierro Gris con $S_u = 120000\text{Psi} = 827370.87\text{Kpa}$.

Resistencia a la fatiga del material: Para hierro fundido es:

$$S_n = 0.35 * S_u \quad (108)$$

$$S_n = 0.35 * S_u = 42000 \text{ Psi} = 289579.8\text{Kpa}$$

$$V_{tG} = \frac{\pi * D_G * n_G}{12}$$

$$V_{tG} = \frac{\pi * D_G * n_G}{12} = 0.743 \frac{\text{Pies}}{\text{min}} = 0.23 \frac{\text{m}}{\text{min}}$$

$$K_v = \left(\frac{1200}{1200 + V_{tG}} \right) \quad (109)$$

$$K_v = \left(\frac{1200}{1200 + V_{tG}} \right) = 0.999$$

$$W_d = \frac{W_{tG}}{K_v} \quad (110)$$

$$W_d = \frac{W_{tG}}{K_v} = 732.957 \text{ Lbf} = 3260.35 \text{ N}$$

$y = 0.125$ para $\phi_n = 20$ grados.

$$P_n = P_x \cdot \cos(\lambda) \quad (111)$$

$$P_n = P_x \cdot \cos(\lambda) = 0.297 \text{ in}$$

$$S_n = \frac{W_d}{y \cdot F' \cdot P_n} \quad (112)$$

Despejando para el ancho de cara mínimo para resistir esta carga F' :

$$F' = 0.47 \text{ pulgadas} = 11.938 \text{ mm}$$

Pero como se mencionó anteriormente, AGMA recomienda un valor máximo para el ancho de cara F' según ecuación 94.

$F'_{\max} = 1.946 \text{ pulgadas} = 49.439 \text{ mm}$. Tomamos un valor de 30 mm como el ancho de cara para la corona.

4.13 CALCULO DEL EJE^{16, 33, 49}

Material AISI 316 con:

Esfuerzo ultimo del material $S_U = 84000 \text{ Psi} = 579159.61 \text{ Kpa}$

Resistencia a la fatiga $S_n = 42000 \text{ Psi} = 289579.8 \text{ Kpa}$

De acuerdo a las condiciones de operación del equipo se presentan los siguientes factores de fatiga:

$C_L = \text{Factor de carga}$. Tenemos carga combinada entonces $C_L = 1$.

C_d = **Factor de tamaño (diámetro)**. Nuestra primera aproximación supone un diámetro entre 0.4 y 2 pulgadas entonces $C_d = 0.9$.

C_c = **Factor de confiabilidad**. (99%) entonces $C_c = 0.814$.

C_s = **Factor de superficie**. Superficie mecanizada entonces $C_s = 0.88$.

C_t = **Factor de temperatura**. Los aceros aumentan su resistencia a la fatiga de 21.1 a 316 °C y luego la disminuyen rápidamente. $C_t = 1$.

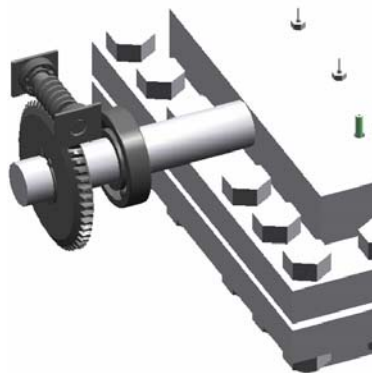
C_o = **Otros**. $C_o = 1$.

Se define la resistencia por durabilidad como:

$$S_{n'} = C_L * C_d * C_c * C_s * C_t * C_o * S_n \quad (113)$$

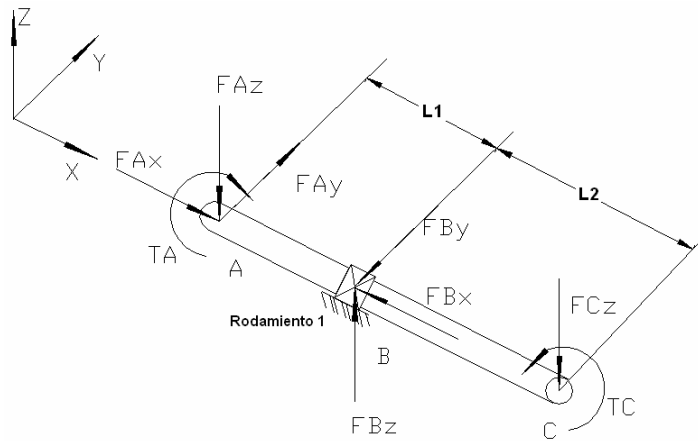
$$S_{n'} = C_L * C_d * C_c * C_s * C_t * C_o * S_n = 27076.9 \text{ Psi} = 186688.65 \text{ Kpa}$$

Figura 62. Eje con rodamiento y mecanismo sinfín corona.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Figura 63. Cargas en el eje.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Solo tenemos flexión rotativa entonces solo tenemos σ_a .

Torque constante entonces tenemos T_m .

Primera aproximación con un factor de seguridad $N = 2$.

Los valores de las fuerzas en las localizaciones A (debido al mecanismo sinfín-corona) son conocidas y en B (debido al rodamiento) serán conocidas luego de realizar la estática.

$$F_{Ax} = 310.29 \text{ Lbf} = 1380.24 \text{ N} = W_{XG} \quad (\text{Fuerza axial en la corona})$$

$$F_{Ay} = 1492.66 \text{ Lbf} = 6639.68 \text{ N} = W_{TG} \quad (\text{Fuerza tangencial en la corona})$$

$$F_{Az} = 551.09 \text{ Lbf} = 2451.37 \text{ N} = W_{RG} \quad (\text{Fuerza radial en la corona})$$

$$F_{Cz} = 660 \text{ Lbf} = 2935.83 \text{ N} \quad \text{Mitad del peso del equipo.}$$

$$T_A = 5196.85 \text{ Lb} \cdot \text{pulgada} = 587.165 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T_C = 5196.85 \text{ Lb} \cdot \text{pulgada} = 587.165 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Los valores de las longitudes son:

$$L_1 = 3.94 \text{ pulgadas} = 100 \text{ mm}$$

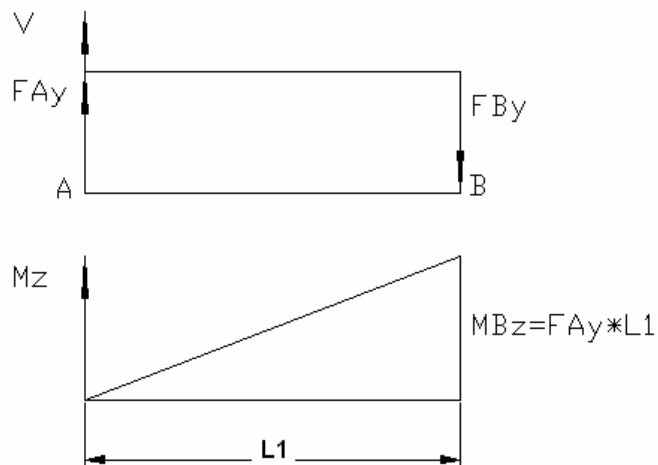
$$L_2 = 5.92 \text{ pulgadas} = 150.5 \text{ mm}$$

La longitud total entre puntos cargados es:

$$L = 9.86 \text{ pulgadas} = 250.5 \text{ mm}$$

Luego de realizar estática de fuerzas se encuentran las reacciones en la localización B, la localización del rodamiento:

Figura 64. Diagramas de Carga para X-Y.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

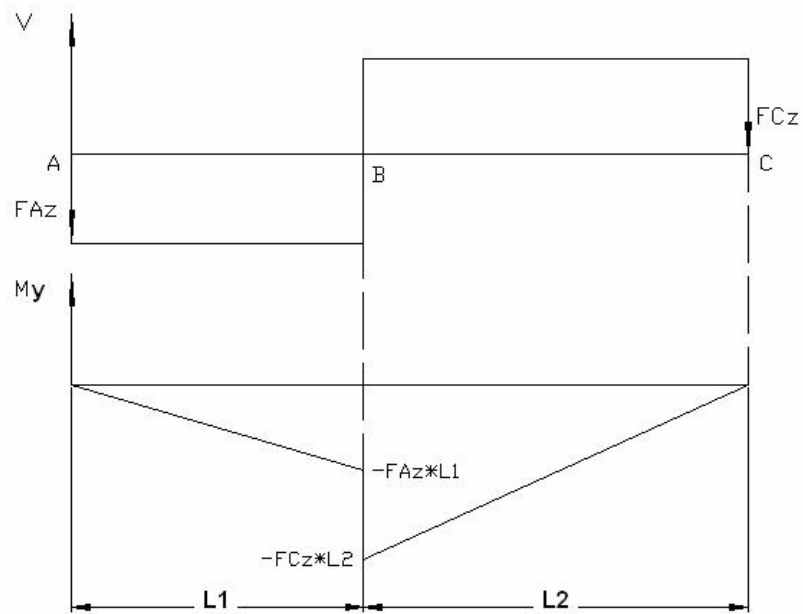
$$F_{By} = 1492.66 \text{ Lbf} = 6639.68 \text{ N}$$

$$F_{Bz} = 1211.09 \text{ Lbf} = 5387.2 \text{ N}$$

$$M_{By} = -1740.98 \text{ Lbf} \cdot \text{pulgada} = -196.59 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$M_{Bz} = 5876.64 \text{ Lbf} \cdot \text{pulgada} = 663.97 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Figura 65. Diagramas de Carga para X-Z.



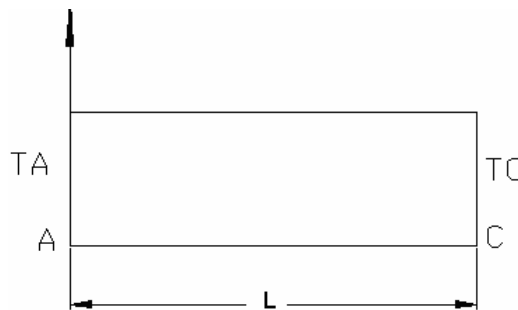
Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Figura 66. Diagrama de Carga AXIAL.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Figura 67. Diagrama de Torque.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Los momentos resultantes luego de los diagramas de carga.

$$M_R = 7058.89 \text{ Lbf} \cdot \text{pulgada} = 797.55 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$$T = 5196.85 \text{ Lbf} \cdot \text{pulgada} = 587.16 \text{ N} \cdot \text{m}$$

Como primera aproximación utilizamos un factor de concentración de esfuerzo por fatiga para un hombro $K_f = 1.9$.

El diámetro aproximado según la siguiente formula:

$$d'' = \left[\frac{32 * N}{\pi} * \left[\left(\frac{K_f * M}{S_{n'}} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left(\frac{T_m}{S_u} \right)^2 \right]^{1/2} \right]^{1/3} \quad (114)$$

$$d'' = 2.21 \text{ pulgadas} = 56.04 \text{ mm}$$

Recalculamos el valor de $S_{n'}$ puesto que el factor C_d cambia. Para un diámetro entre 1.96 pulgadas = 50 mm hasta 9.84 pulgadas = 250 mm (D en mm) con la ecuación:

$$C_d = 1.85 * D^{-0.19} \quad (115)$$

Y con un diámetro de 2.2 pulgadas = 56 mm.

$$C_d = 0.861$$

$$S_{n'} = C_L * C_d * C_c * C_s * C_t * C_o * S_n = 25904.33 \text{ Psi} = 178604.06 \text{ Kpa}$$

El diámetro aproximado es:

$$d'' = 2.19 \text{ pulgadas} = 55.8 \text{ mm}$$

Para comprobar que tenemos un adecuado factor de seguridad realizamos los siguientes cálculos:

Tomando $d''=2.16$ pulgadas = 55 mm

Para un radio de entalla $r'=1.5$ mm aproximadamente 1/16 pulgadas.

El hombro tendrá un diámetro de $D = d'' + 2 * r' = 2.28$ pulgadas = 57.91 mm .

$$\frac{r'}{d''} \tag{116}$$

$$\frac{r'}{d''} = 0.03$$

$$\frac{D}{d''} \tag{117}$$

$$\frac{D}{d''} = 1.05$$

Con estas relaciones se encuentra el valor del concentrador teórico de esfuerzo K_t .

$K_t = 1.9$ Tomado del apéndice 15-1 de MOTT.

Factores de concentración de tensión para flecha redonda:

Factor de Sensibilidad a las muescas o a la entalla. q'

$q' = 0.77$ Tomado de Faïres figura AF 5.

$$K_f = 1 + q'*(K_t - 1) \tag{118}$$

$$K_f = 1.69$$

$$\sigma_a = \frac{32 * M}{\pi * d^3} \quad (119)$$

$$\sigma_a = 7081.88 \text{ Psi} = 48827.84 \text{ Kpa}$$

$$\tau_m = \frac{16 * T}{\pi * d^3} \quad (120)$$

$$\tau_m = 2606.88 \text{ Psi} = 17973.8 \text{ Kpa}$$

De la siguiente formula para el factor de seguridad:

$$\frac{1}{N'} = \left[\left(\frac{K_f * \sigma_a}{S_n} \right)^2 + 3 * \left(\frac{\tau_m}{S_u} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (121)$$

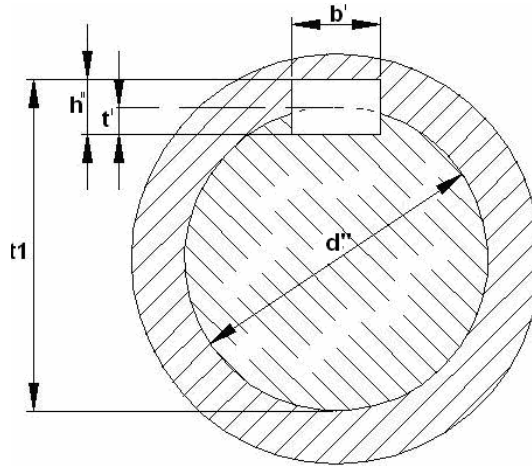
Despejamos para N y obtenemos:

$$N' = 2.14$$

Este factor de seguridad es satisfactorio.

4.13.1 Para la lengüeta del engranaje

Figura 68. Sistema Eje-Cubo del engranaje junto con su respectiva lengüeta.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

$$F = 1492.66 \text{ Lbf} = 6639.68 \text{ N}$$

$$d'' = 2.16 \text{ pulgadas} = 55 \text{ mm}$$

Para un eje de este diámetro las dimensiones recomendadas de la lengüeta son:

$$b' = 0.63 \text{ pulgadas} = 16 \text{ mm}$$

$$h'' = 0.39 \text{ pulgadas} = 10 \text{ mm}$$

$$t_1 = d'' + 5 = 2.36 \text{ pulgadas} = 60 \text{ mm}$$

$$h_1 = t_1 - d'' = 0.19 \text{ pulgadas} = 5 \text{ mm}$$

Material de la lengüeta: Aluminio con:

$$S_y = 19000 \text{ Psi} = 131000.38 \text{ Kpa}$$

$$S_{y_s} = 0.5 * S_y = 9500 \text{ Psi} = 65500.19 \text{ Kpa}$$

Considerando un factor de seguridad de: $N' = 2$

Para cortante

$$T_{perm} = \frac{S_{y_s}}{2} \tag{122}$$

$$T_{perm} = \frac{S_{y_s}}{2} = 4750 \text{ Psi} = 32750.1 \text{ Kpa}$$

Para aplastamiento

$$S_{b_{perm}} = \frac{S_y}{2} \tag{123}$$

$$S_{b_{perm}} = \frac{S_y}{2} = 9500 \text{ Psi} = 65500.19 \text{ Kpa}$$

Calculo de la longitud de la lengüeta por cortante:

$$T = \frac{F}{b * L} \leq T_{perm} \tag{124}$$

Despejando para L: $L_T = 0.49 \text{ pulgadas} = 12.67 \text{ mm}$

Calculo de la longitud de la lengüeta por aplastamiento:

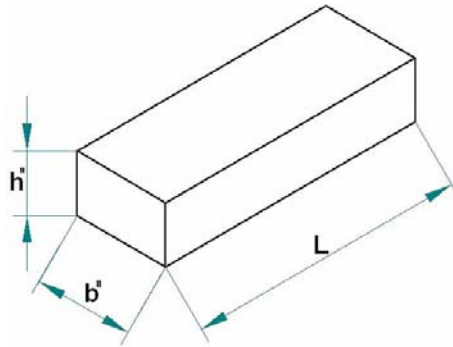
$$S_b = \frac{F}{h_1 * L} \leq S_{b_{perm}} \quad (125)$$

Despejando para L:

$$L_b = 0.8 \text{ pulgadas} = 20.27 \text{ mm}$$

Se toma una longitud de la lengüeta de 21 mm.

Figura 69. Dimensiones de la lengüeta.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

4.13.2 Selección de los rodamientos⁴⁴:

Las cargas en el rodamiento 1 son:

$$F_r = \sqrt{F_{By}^2 + F_{Bz}^2} \quad (126)$$

$$F_r = \sqrt{F_{By}^2 + F_{Bz}^2} = \sqrt{(1492.66Lb)^2 + (1211.09Lb)^2} = 1922.18Lb = 8550.46N$$

$$F_a = F_{Bx} = 310.3Lb = 1380.2N$$

$$\frac{F_a}{F_r} \quad (127)$$

$$\frac{F_a}{F_r} = 0.16$$

Nuestro eje tiene 2.16 pulgadas = 55 mm de diámetro interior. De catalogo SKF seleccionamos la chumacera SY 55 PF con la siguiente información de importancia:

Los datos más importantes del rodamiento son:

$$e = 0.22$$

$$X = 0.56$$

$$Y = 2$$

Capacidad de carga dinámica del rodamiento $C = 9666.78 \text{ Lbf} = 43000 \text{ N}$

Capacidad de carga estática del rodamiento $C = 6519.46 \text{ Lbf} = 29000 \text{ N}$

Calculo de la carga dinámica equivalente en el rodamiento P según se cumplan alguna de las siguientes condiciones:

$$\text{Cuando } \frac{F_a}{F_r} \leq e : \quad P = F_r \quad (128)$$

$$\text{Cuando } \frac{F_a}{F_r} > e : \quad P = X * F_r + Y * F_a \quad (129)$$

$$P = 1922.22 \text{ Lbf} = 8550.46 \text{ N}$$

Vida útil de diseño, es la vida esperada en millones de revoluciones:

$$L_{10} = \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad (130)$$

Donde p es exponente de la ecuación de vida útil.

Para rodamiento de bolas $p = 3$.

$$L_{10} = 124.18 \text{ Mrev}$$

Carga estática equivalente del rodamiento:

$$P_0 = 0.6 * F_r + 0.5 * F_a \quad (131)$$

$$P_0 = 1308.47 \text{ Lbf} = 5820.38 \text{ N}$$

Cuando $P_0 < F_r$, $P_0 = F_r$ debe ser usada.

$$P_0 = 1922.22 \text{ Lbf} = 8550.46 \text{ N}$$

La carga en el rodamiento 2 es solo radial:

$$F_r = 660 \text{ Lbf} = 2936 \text{ N}$$

$$F_a = 0 \text{ N}$$

$$\frac{F_a}{F_r} = 0$$

Utilizaremos la misma chumacera: la chumacera SY 55 PF.

$$e = 0.22$$

$$X = 0.56$$

$$Y = 2$$

Capacidad de carga dinámica del rodamiento $C = 9666.78 \text{ Lbf} = 43000 \text{ N}$

Capacidad de carga estática del rodamiento $C = 6519.46 \text{ Lbf} = 29000 \text{ N}$

Cálculo de la carga dinámica equivalente en el rodamiento P según se cumplan las condiciones de acuerdo a las ecuaciones 128 y 129:

$$P = 660.04 \text{ Lbf} = 2936 \text{ N}$$

Vida útil de diseño, es la vida esperada en millones de revoluciones según ecuación 130:

$$L_{10} = 3141.89 \text{ Mrev}$$

Carga estática equivalente del rodamiento según ecuación 131:

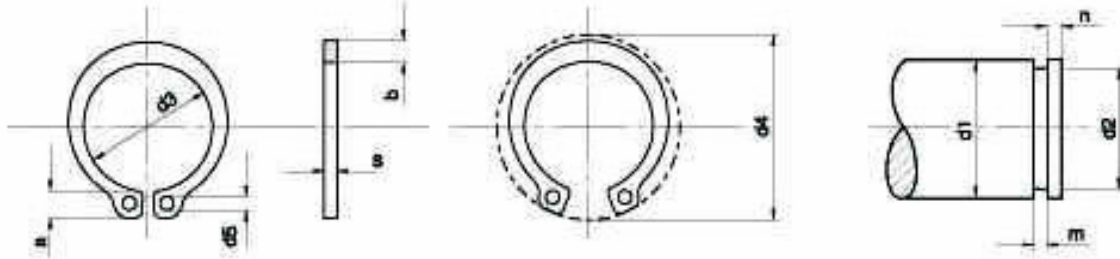
$$P_0 = 396.02 \text{ Lbf} = 1761.57 \text{ N}$$

Cuando $P_0 < F_r$, $P_0 = F_r$ debe ser usada.

$$P_0 = 660.04 \text{ Lbf} = 2936 \text{ N}$$

4.13.3 Selección anillo de seguridad

Figura 70. Datos del anillo de seguridad.



Fuente: www.otia.com.

Tabla 18 Dimensiones de anillo de seguridad.

Med. Nom	ANILLO							RANURA				Fza Axial Kgf<=
	s	a	b	d3	Toler	d4	d5	d2	Toler	m	n	
55	2	7.2	5.4	50.3	+0.46 -1.1	70.2	2.5	52	h2 +0 -0.3	2.15	4.5	6300

Fuente: www.otia.com.

El anillo seleccionado es el que posee un d1 de 2.16 pulgadas = 55 mm y puede soportar 13889.12 Lbf = 61781.89 N de fuerza axial.

4.14 BOMBA DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO SELECCIONADA

Figura 71. Bomba de desplazamiento positivo y sus datos.



Fuente: www.isco.com

Tabla 19 Datos bomba de desplazamiento.

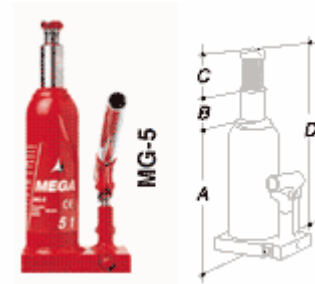
ESPECIFICACIONES					
Modelo	Capacidad	Flujo Rango (ml/min)	Presión Rango (Psi)	Puertos	Suministro de Potencia
1000D	1015 ml	0.100-408	0-2000	¼ NPT	100 Vac, 117 Vac, 50/60 Hz

Fuente: www.isco.com

Bomba ISCO de la serie D. Se escogió la 1000 D por la presión de operación, posee un amplio rango de flujos (0.1 - 408 ml/min) y entrega el caudal de una forma mas constante. Esta bomba realizara un bombeo indirecto, no estará en contacto con fluidos corrosivos ni con partículas abrasivas.

4.15 GATO HIDRÁULICO SELECCIONADO:

Figura 72. Gato hidráulico.



Fuente: www.ferreteriametro.com.co.

Figura 73. Datos del gato hidráulico.

Fuerza (t)	2	3	3	5	8	10
Medidas (mm)						
A	160	168	210	212	219	219
B	100	105	150	150	150	150
C	50	65	65	75	75	75
D	310	338	425	437	444	444
Peso (kg) con palanca	3,6	3,9	4,2	5	5,9	6,5
Referencias	MG-2	MG-3	MG-3A	MG-5	MG-8	MG-10

Fuente: www.ferreteriametro.com.co.

Se selecciono la referencia MG-5 debido a su altura alcanzada en su extensión. Este gato hidráulico esta en capacidad de levantar 5 Toneladas de carga.

5. SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO Y MODELO

La simulación de yacimientos se ha practicado desde el inicio de la ingeniería de petróleos. La principal causa de su amplio uso se debe a su capacidad de resolver problemas de una manera práctica y rápida, además produce una mejor descripción del yacimiento que la geología y las pruebas de producción por separado. Sus beneficios se extienden a aplicaciones de diferentes escalas tales como; pruebas de laboratorio, modelo de pozos, modelos conceptuales, modelos completos de campos o pruebas de laboratorio.

La simulación de yacimientos es una herramienta poderosa que sirve para predecir el comportamiento de los yacimientos que se encuentran bajo diferentes esquemas de explotación, siendo su principal objetivo, el optimizar los procesos de recuperación de hidrocarburos, disminuyendo los costos operativos de las diferentes técnicas de recobro mejorado³².

5.1 PROTOTIPO DE CAMPO Y MODELO DE LABORATORIO

Para contar con una herramienta de validación de la técnica de escalamiento y corroborar lo dicho en la teoría, se planteo la simulación de un prototipo de campo y un modelo de laboratorio (al cual se le aplico la técnica del escalamiento), para posteriormente comparar sus resultados.

La siguiente metodología se desarrollo para realizar la simulación:

- Descripción y construcción del modelo. En esta etapa, se seleccionaron datos preliminares para la construcción del modelo de simulación del prototipo de campo (esta información es representativa de campos Colombianos de crudo pesado, en los cuales hay interés de implementar un proceso de recobro mejorado). En la siguiente fase en esta etapa, se construyó el modelo de laboratorio, aplicándole la técnica de escalamiento a los datos del prototipo de campo, esto con el fin de obtener sus parámetros operacionales y de yacimiento.
- Ejecución de la simulación. Se realizaron varias corridas con el objetivo de verificar la validez de los modelos construidos, para identificar los posibles problemas que presentarían y ajustarlos posteriormente, lo anterior con el fin de obtener pronósticos adecuados.
- Ajuste de parámetros. Después de identificar los parámetros a ajustar, se procedió a realizar varios ajustes con el objetivo de obtener resultados confiables.
- Resultados de la simulación. Se realizaron varias corridas de simulación tanto del prototipo de campo como el modelo de laboratorio (los resultados de este se escalaron a campo, con el fin de comparar su comportamiento con el del prototipo de campo).
- Análisis de sensibilidad. Se realizó varias corridas de simulación variando una determinada cantidad de parámetros del modelo de laboratorio, con el propósito de estudiar su comportamiento bajo estas características.

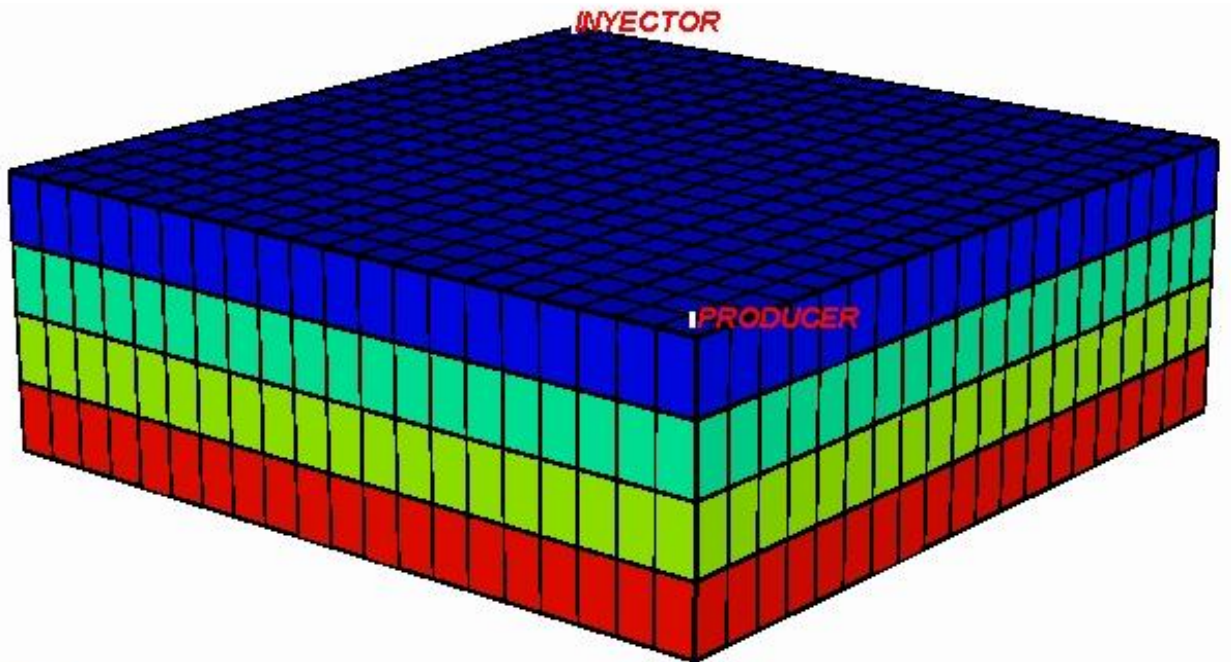
A continuación se presenta una descripción detallada del trabajo realizado.

5.2 PROTOTIPO DE CAMPO

Se tomo un cuarto de patrón de cinco puntos, compuesto por 1 pozo productor y un pozo inyector de vapor de agua, con 1600 celdas activas (20 x 20 x 4), porosidad de 0.28, permeabilidad en todas las direcciones igual a 600 md (0.592 μm^2) y saturación inicial de agua de 0.2. El objetivo de este modelo es contar con una base, para posteriormente comparar sus resultados con los resultados del modelo de laboratorio.

5.2.1 Enmallado del prototipo de campo. La tabla 20 muestra la descripción del enmallado del prototipo de campo (tipo de enmallado, dimensiones, coordenadas, área, etc.) y la figura 75 muestra la configuración del enmallado y la ubicación de los pozos.

Figura 74. Esquema del grid para el prototipo de campo a simular.



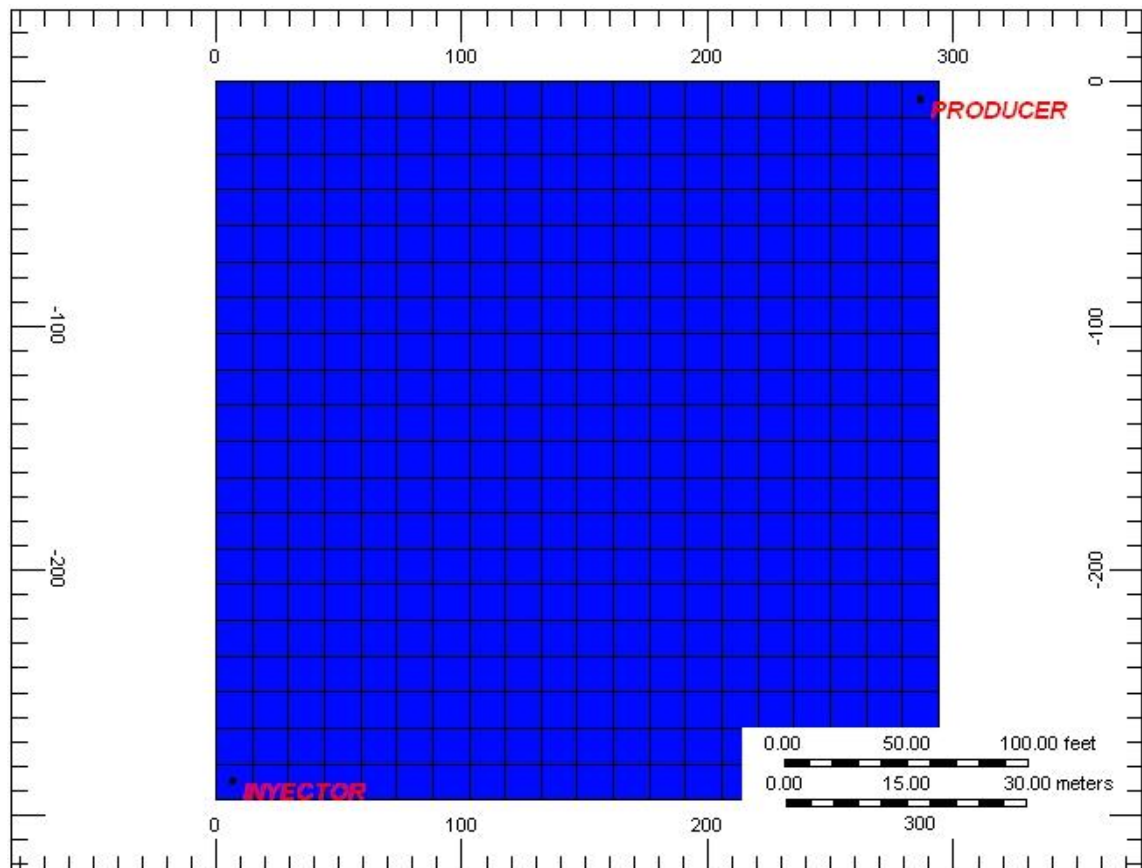
Fuente: Simulador CMG.

Tabla 20. Descripción del enmallado del prototipo de campo.

ENMALLADO		
TIPO: Cartesiano.	COORDENADAS: x ,y ,z	DIMENSIONES: 20 * 20 * 4
AREA: 8 Acres (0.0323 km ²) ⁵ .	CELDAS (x,y): 14.75 pies (4.5 m).	TOPE: 1800 pies (548.6 m)
ESPESOR DE LAS CAPAS: 12.5 pies (3.81 m), cada una.		

Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Figura 75. Vista areal del prototipo de campo, coordenadas (x,y).



Fuente: Simulador CMG.

⁵ Esta área corresponde al patrón completo.

El eje x y y están divididos en veinte celdas de 14.75 pies (4.49 m) cada una, como se puede apreciar en la figura 75. El eje z esta dividido en cuatro capas de 12.5 pies (3.81 m) cada una, como se muestra en la figura 74.

5.2.2 Propiedades de la roca. En la tabla 21 se presentan las propiedades de la roca, tales como la permeabilidad, la porosidad la conductividad térmica, la capacidad calorífica.

Tabla 21. Propiedades de la roca del prototipo de campo.

PROPIEDADES DE LA ROCA			
	Kh (md)	Kv (md,)	Porosidad
Capa 1- 4	600 (0.592 μm^2)	600 (0.592 μm^2)	0.28
Conductividad térmica: 38.208 BTU/(ft*D*°F) (0.919 W/(m*k))			
Capacidad calorífica: 35.784 BTU/ft ³ *°F (2.39989 J/(cm ³ *C))			
Compresibilidad efectiva: 2*10-6 psi ⁻¹ (2.90*10-7 kPa ⁻¹)			

Fuente: Datos suministrados por el ICP.

5.2.3 Propiedades del crudo. En la tabla 22 se presentan las propiedades del crudo presente en el prototipo de campo.

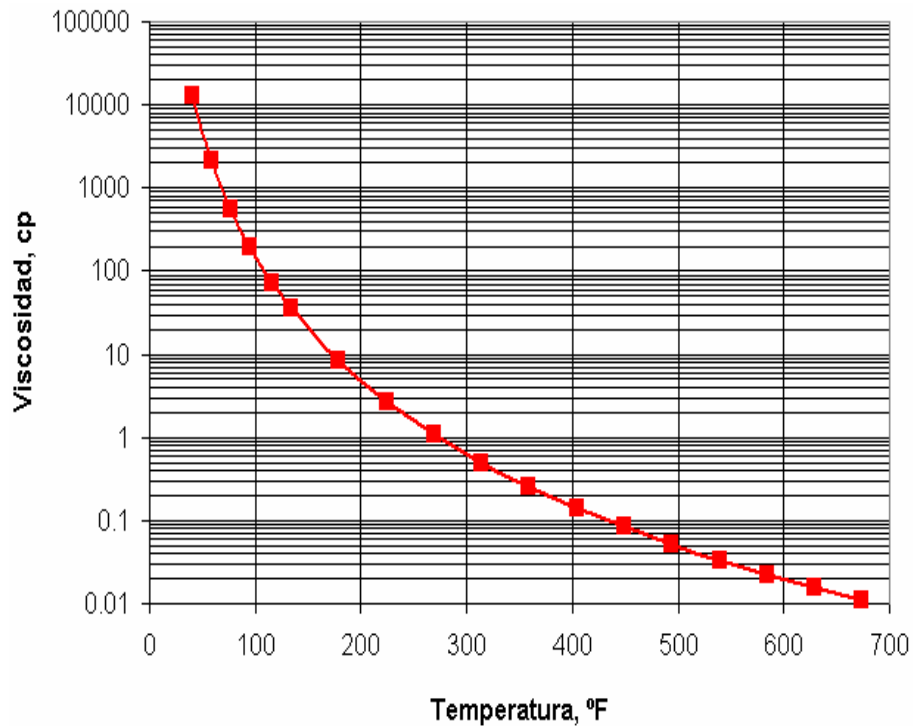
Tabla 22. Propiedades del crudo presente en el prototipo de campo.

PROPIEDADES DEL ACEITE	
DENSIDAD:	53.3548 lb/ft ³ (0.854 g/cm ³)
COMPRESIBILIDAD	4,06*10-6 psi ⁻¹ (5.888*10-4 kPa ⁻¹)
PESO MOLECULAR	525.37 lb/lbmol (0.5253 kg/gmol))
COEFICIENTE DE EXPANSIÓN TÉRMICA:	0,000216657 1/F (3.92*10-4 1/C)
CONSTANTE DE CALOR ESPECIFICO:	4.056*10-6 BTU/lb (9.43 J/kg)

Fuente: Datos suministrados por el ICP.

La figura 76 muestra el comportamiento de la viscosidad del crudo con el incremento de la temperatura.

Figura 76. Comportamiento de la viscosidad del crudo con el incremento de la temperatura.



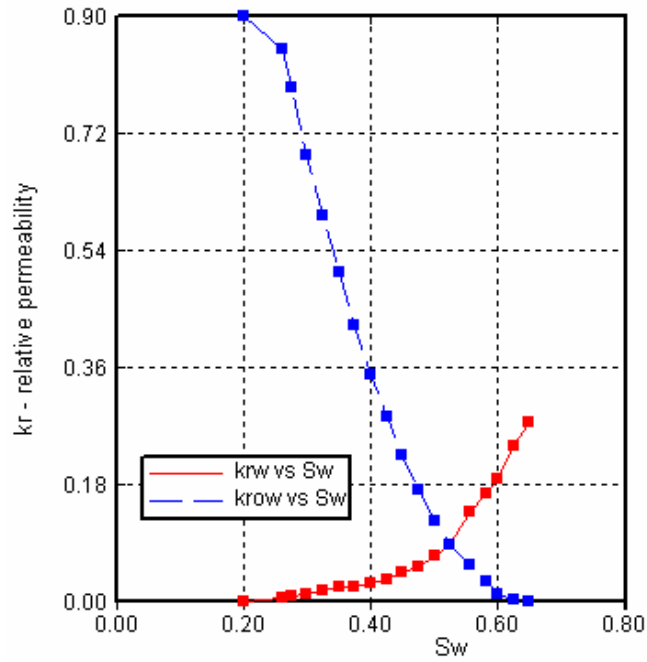
Fuente: Datos suministrados por el ICP.

5.2.4 Permeabilidades relativas. La figura 77 y 78 muestra las permeabilidades relativas del prototipo de campo.

5.2.5 Condiciones iniciales. La tabla 23 presenta las condiciones iniciales del prototipo de campo, en el momento de iniciar el proceso de inyección de vapor.

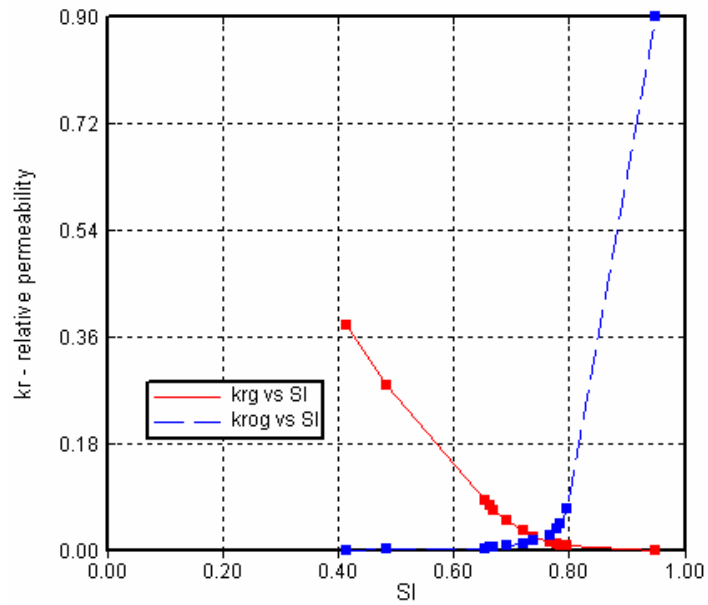
5.2.6 Condiciones de operación. La tabla 24 muestra las restricciones bajo las cuales trabajarán el pozo productor y el pozo inyector.

Figura 77. Curvas de permeabilidades relativas agua/aceite.



Fuente: Simulador CMG.

Figura 78. Curvas de permeabilidades relativas liquido/gas.



Fuente: Simulador CMG.

Tabla 23. Datos de las condiciones iniciales del prototipo en el momento de comenzar el proceso de inyección de vapor.

CONDICIONES INICIALES			
So:	0.8	Sw:	0.2
TEMPERATURA DEL YACIMIENTO:		110 °F (43.33 °C)	
PRESION INICIAL DEL YACIMIENTO:		860 psi (5929.49 KPa)	

Fuente: Datos suministrados por el ICP.

Tabla 24. Condiciones operativas de los pozos presentes en el prototipo.

CONDICIONES DE OPERACIÓN				
PARÁMETROS DE INYECCIÓN				
	TEMPERATURA DE INYECCIÓN:	CALIDAD DEL VAPOR:	TIEMPO DE INFECCIÓN	TASA DE INFECCIÓN
POZO INYECTOR	560 °F (293.3 °C)	0,65	10 Años	40 bl/día (6.35 m ³ /día)
MÁXIMA PRESIÓN DE INYECCIÓN:			1100 psi (7.58 MPa)	
MÁXIMA TASA DE INYECCIÓN:			40 bl/día (6.35 m ³ /día)	
PARÁMETROS DE PRODUCCIÓN				
MÍNIMA PRESIÓN DE FONDO FLUYENDO:			50 psi (344.7 kPa)	
MÁXIMA TASA DE LIQUIDO:			150 STB (23.8 m ³)	

Fuente: Datos suministrados por el ICP.

5.3 MODELOS DE LABORATORIO.

Para demostrar tanto las ventajas como desventajas de la simulación de los modelos de laboratorio y corroborar la teoría de escalamiento, se planteo la simulación de dos modelos cartesianos, modelo de laboratorio 1 y modelo de laboratorio 2. Los dos modelos, representan un cuarto de patrón de cinco puntos invertido para inyección continua de vapor, las tabla 25 y 29 presentan la descripción del enmallado.

Al analizar las corridas iniciales realizadas al modelo de laboratorio 1, se observó una gran inestabilidad de las curvas de tendencia del modelo de laboratorio, es decir, estas tendencias no eran estables y presentaban oscilaciones irreales.

A pesar de contar con información detallada del modelo, existen parámetros como: ***time steps***⁶, ***dtwell***⁷, ***etc***, cuyas variaciones pueden afectar los resultados de una simulación.

Teniendo presente los objetivos del presente trabajo, es necesario realizar una variación de estos parámetros, pues las tendencias obtenidas en la sensibilidad de parámetros no eran similares. El objetivo de realizar este trabajo, es obtener una representación válida de los resultados alcanzados mediante la simulación del modelo de laboratorio, resultados que posteriormente mediante la aplicación de la técnica de escalamiento se compararan, con aquellos obtenidos con la simulación del prototipo de campo.

Para asegurar que los resultados sean válidos; en primera instancia, se seleccionaron el tamaño del ***grid*** y del ***timestep*** de tal forma que estos fuesen lo suficientemente pequeños como para³¹:

- Poder identificar saturaciones y presiones en lugares y tiempos específicos requeridos para el desarrollo del estudio.
- Representar adecuadamente la geometría y las propiedades físicas iniciales del yacimiento.
- Describir la dinámica de los perfiles de saturación y de presión con suficiente detalle como para mantener los objetivos del estudio.
- Modelar adecuadamente la mecánica de los fluidos de yacimiento.

⁶ Hace referencia a intervalos de tiempo.

⁷ Es el primer tamaño del intervalo de tiempo, empleado inmediatamente después de haber definido el pozo.

- Permitir que las soluciones de las ecuaciones de flujo de fluidos sean precisas y estables.

Tras realizar este proceso, se selecciono un modelo con un grid de 10 x 10 x 4. Las razones de seleccionar este grid y no una con un mayor número de celdas se deben; a que un grid con una mayor discretización de celdas resultaría en un mayor número de iteraciones, en un mayor tiempo de simulación, inestabilidades y oscilaciones en las tendencias, así como problemas de de convergencia. Sin embargo, los resultados obtenidos para este modelo no eran muy confiables, debido a que las tendencias de las curvas obtenidas eran poco reales como para tenerlas en cuenta para un análisis de sensibilidades. Debido a estos inconvenientes, fue necesario identificar los parámetros que podrían afectar estos resultados, este se realizo en una segunda etapa posterior.

En la segunda etapa se realizaron varias corridas, donde se identificaron dos secciones del ModelBuilder de CMG (*Well and recurrent data* y *Numerical Methods Control*), en las cuales se identificaron los parámetros, que afectan los resultados de la simulación. En la sección de *Well and recurrent data* (Datos de pozos y datos recurrentes), se definen las propiedades de los pozos involucrados en la simulación y sus restricciones de operación. En esta sección también se diseña el cronograma de eventos (fechas de inyección, cierre de pozos, inicio de producción, entre otras). Al realizar ciertas modificaciones (cambiar las **constraints** o restricciones de los pozos) se mejoraron los resultados pero aun continuaron los problemas, por ello fue necesario realizar una siguiente etapa.

La tercera etapa consistió principalmente en adquirir un conocimiento de la sección *Numerical Methods Control* (Control por métodos numéricos). En esta sección se definen los parámetros que controlan las actividades numéricas del simulador, tales como intervalos de tiempo, la solución iterativa de ecuaciones de flujo no lineales y la solución del sistema de ecuaciones lineales que se produce⁴⁶,

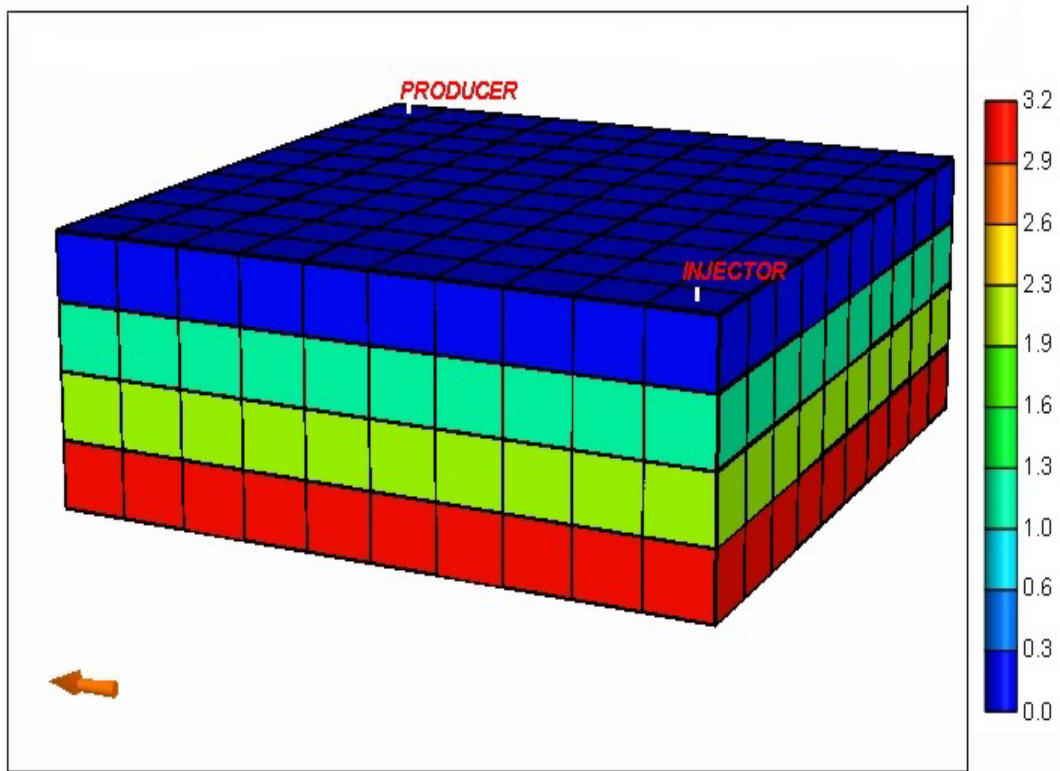
esta sección esta comprendida por tres subsecciones; **time step control**, **solution method control** y **linear solver control**; cada una de estas subsecciones contiene un determinado número de **keywords**, las cuales usan valores definidos por defecto por el simulador.

Las opciones y valores que por defecto se utilizan en las técnicas de solución numérica, dan una solución sólida y eficiente para la mayoría de los problemas de simulación, tal es el caso de la simulación de modelos de campo, pero para el caso de modelos de laboratorio es necesario variar los valores que por defecto se usan en esta sección (por ejemplo, el intervalo de tiempo en campo es de años, mientras en el laboratorio es de minutos y/o horas). Esta sección es opcional, pero debido a los problemas presentados, se modificaron algunas de estas opciones, al realizar esto los resultados de las corridas mejoraron y como consecuencia de esto se obtuvo tendencias más confiables, mucho más estables y acordes con los resultados que se esperarían. Una vez finalizada la anterior etapa, se puede establecer el modelo base y posteriormente realizar las corridas necesarias.

5.3.1 Modelo de laboratorio 1. Este modelo, es un cuarto de patrón de cinco puntos, compuesto por 1 pozo productor y un pozo inyector de vapor de agua, con 400 celdas activas (10 x 10 x 4, ver sección de ajuste de parámetros), porosidad de 0.36, permeabilidad en todas las direcciones igual a 212 D (209 μm^2) y saturación inicial de agua de 0.16. El objetivo de este modelo, es validar la técnica de escalamiento, la cual fue aplicada al prototipo, para luego obtener el modelo de laboratorio.

5.3.1.1 Enmallado del modelo de laboratorio 1. La figura 79 muestra la configuración del enmallado y la ubicación de los pozos. En la tabla 25 se presenta la descripción detallada del enmallado realizado al modelo de laboratorio.

Figura 79. Esquema del grid para el modelo de laboratorio 1 a simular.



Fuente: Simulador CMG.

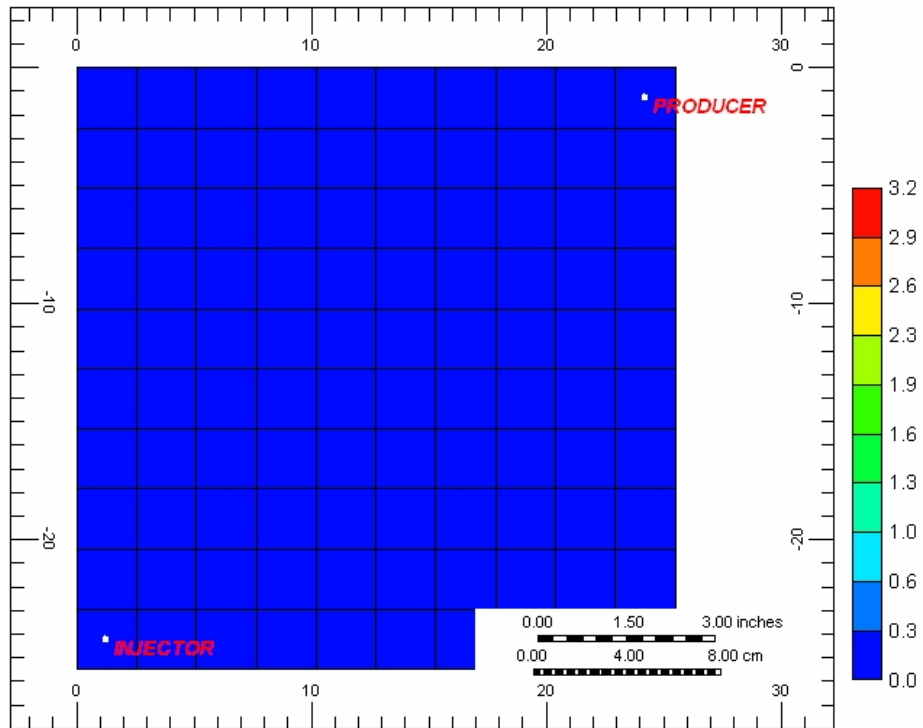
Tabla 25. Descripción del enmallado del modelo de laboratorio 1.

ENMALLADO		
TIPO: Cartesiano.	COORDENADAS: x ,y ,z	DIMENSIONES: 10 * 10 * 4
AREA: 650.25 cm ² (0.7 pies ²)		CELDAS (x,y): 2.55 cm (0.0837 pies).
ESPESOR DE LAS CAPAS: 1.0775 cm (0.0354 pies).		

Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

El eje x y y se dividen en diez celdas de 2.55 cm (0.0837 pies), ver figura 80. El eje z en cuatro capas de de 1.0775 cm (0.0354 pies), ver figura 79.

Figura 80. Vista areal del modelo de laboratorio 1, coordenadas (x,y).



Fuente: Simulador CMG.

5.3.1.2 Propiedades de la roca. En la tabla 26 se presentan las propiedades de la roca, tales como la permeabilidad, la porosidad la conductividad térmica, la capacidad calorífica.

Tabla 26. Propiedades de la roca del modelo de laboratorio 1.

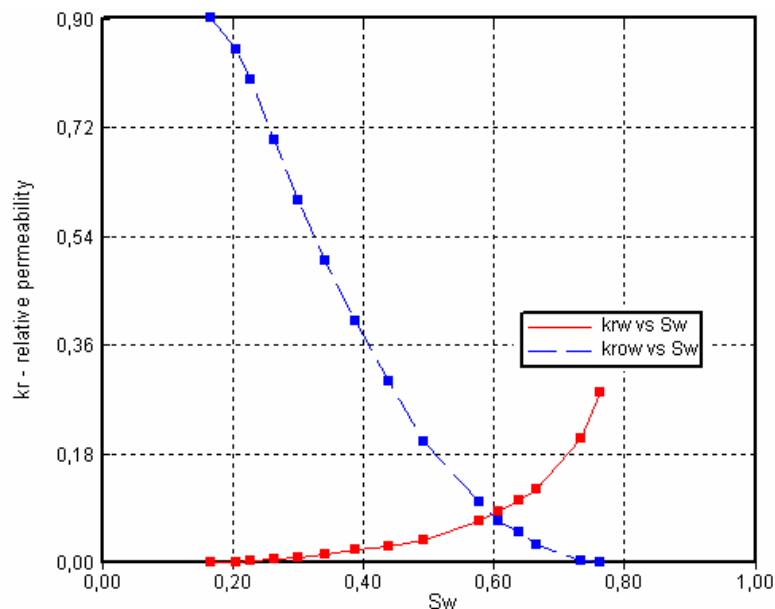
PROPIEDADES DE LA ROCA			
	Kh	Kv	Porosidad
Capa 1 - 4	212 D ($209 \mu\text{m}^2$)	212 D ($209 \mu\text{m}^2$)	0.36
Conductividad térmica: $2.56256 \text{ J}/(\text{cm} \cdot \text{min} \cdot ^\circ\text{C})$ ($38.208 \text{ BTU}/(\text{ft} \cdot \text{D} \cdot ^\circ\text{F})$)			
Capacidad calorífica: $2.39815 \text{ J}/(\text{cm}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ ($35.784 \text{ BTU}/\text{ft}^3 \cdot ^\circ\text{F}$)			
Compresibilidad efectiva: $2.90075 \cdot 10^{-7} \text{ 1/kPa}$ ($2 \cdot 10^{-6} \text{ psi}^{-1}$)			

Fuente: Datos suministrados por el ICP.

5.3.1.3 Propiedades del crudo. En el modelo de laboratorio se usan los mismos fluidos del prototipo de campo, esto con el fin de facilitar el escalamiento, ver tabla 22, en ella se presentan las propiedades del crudo presente en el modelo de laboratorio.

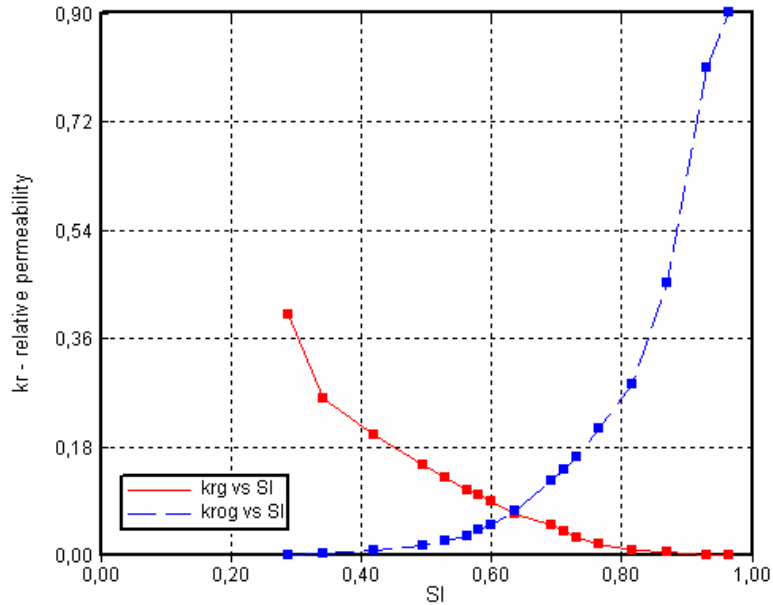
5.3.1.4 Permeabilidades relativas. Los requerimientos del escalamiento dictan que la permeabilidad del modelo sea mucho mayor que la del prototipo, como consecuencia de esto la saturación irreducible de agua y saturación residual de aceite difieren del prototipo⁶. En relación a este tema, la literatura sugiere normalizar las curvas de permeabilidad relativa, para conservar los requerimientos del escalamiento, en cuanto a la permeabilidad. La figura 81 y 82 muestra las permeabilidades relativas del modelo de laboratorio.

Figura 81. Curvas de permeabilidades relativas agua/aceite.



Fuente: Simulador CMG.

Figura 82. Curvas de permeabilidades relativas liquido/gas



Fuente: Simulador CMG.

5.3.1.5 Condiciones iniciales. La tabla 27 presenta las condiciones iniciales del modelo de laboratorio.

Tabla 27. Datos de las condiciones iniciales del modelo de laboratorio en el momento de comenzar el proceso de inyección continua de vapor.

CONDICIONES INICIALES			
So:	0.8327	Sw:	0.1673
TEMPERATURA DEL YACIMIENTO:		43.33 °C (110 °F)	
PRESIÓN INICIAL DEL YACIMIENTO:		5929.49 KPa (860 psi)	

Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

5.3.1.6 Condiciones de operación. La tabla 28 muestra las restricciones bajo las cuales trabajarán el pozo productor y el pozo inyector.

Tabla 28. Condiciones operativas de los pozos presentes en el modelo de laboratorio 1.

CONDICIONES DE OPERACIÓN				
PARÁMETROS DE INYECCIÓN				
	TEMPERATURA DE INYECCIÓN:	CALIDAD DEL VAPOR:	TIEMPO DE INYECCIÓN	TASA DE INYECCIÓN
POZO INYECTOR	560 °F(293 °C)	0,65	55 min	0.1132 bl/d (12.5 cm ³ /min)
MÁXIMA PRESIÓN DE INYECCIÓN:			1100 psi (7584.23 KPa)	
MÁXIMA TASA DE INYECCIÓN:			0.1132 bl/d (12.5 cm ³ /min)	
PARÁMETROS DE PRODUCCIÓN				
MÍNIMA PRESIÓN DE FONDO FLUYENDO:			1097.3 psi (7565.62 KPa)	
MÁXIMA TASA DE LIQUIDO:			0.1811 bl/d (20 cm ³ /min)	

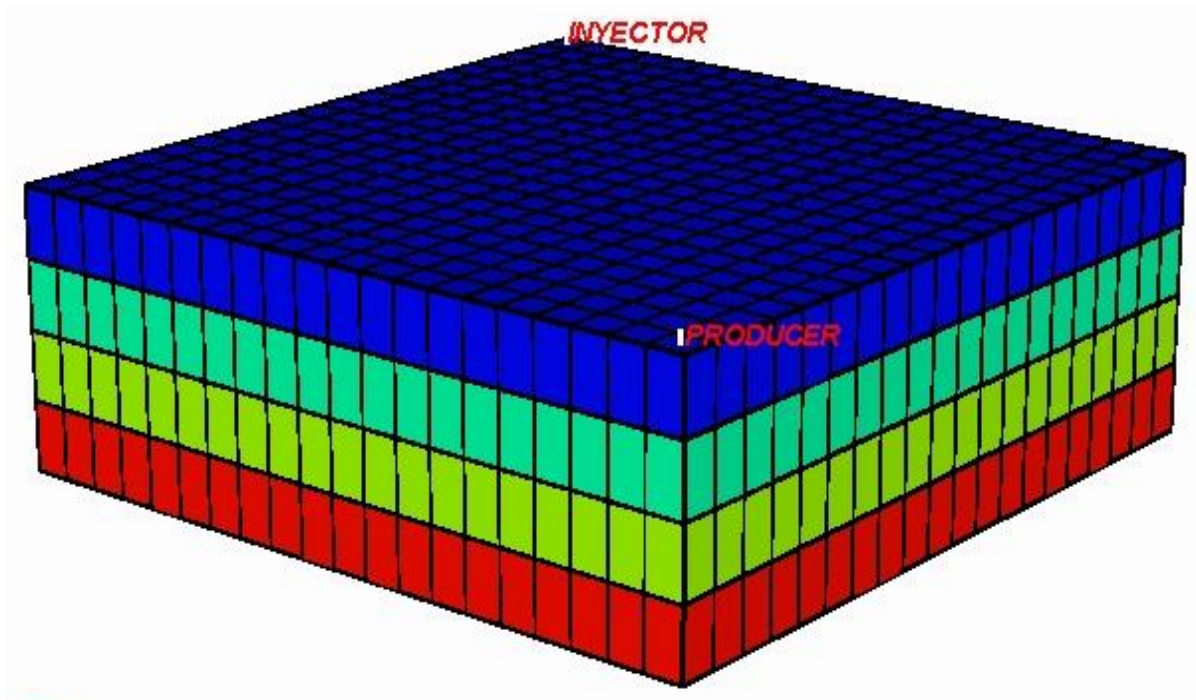
Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

5.3.2 Modelo de laboratorio 2. Este modelo, es un cuarto de patrón de cinco puntos, compuesto por 1 pozo productor y un pozo inyector de vapor de agua, con 1600 celdas activas (20 x 20 x 4, ver sección de ajuste de parámetros), porosidad de 0.28, permeabilidad en todas las direcciones igual a 600 md (0.592 μm²) y saturación inicial de agua de 0.2. El objetivo de este modelo, es de validar la técnica de escalamiento, la cual fue aplicada al prototipo, para luego obtener el modelo de laboratorio 2.

5.3.2.1 Enmallado del modelo de laboratorio 2. Enmallado del modelo de laboratorio 2. En la tabla 29 se presenta la descripción detallada del enmallado realizado al modelo de laboratorio (tipo de enmallado, dimensiones, coordenadas,

área, etc.). La figura 83 muestra la configuración del enmallado y la ubicación de los pozos.

Figura 83. Esquema del grid para el modelo de laboratorio 2, a simular.



Fuente: Simulador CMG.

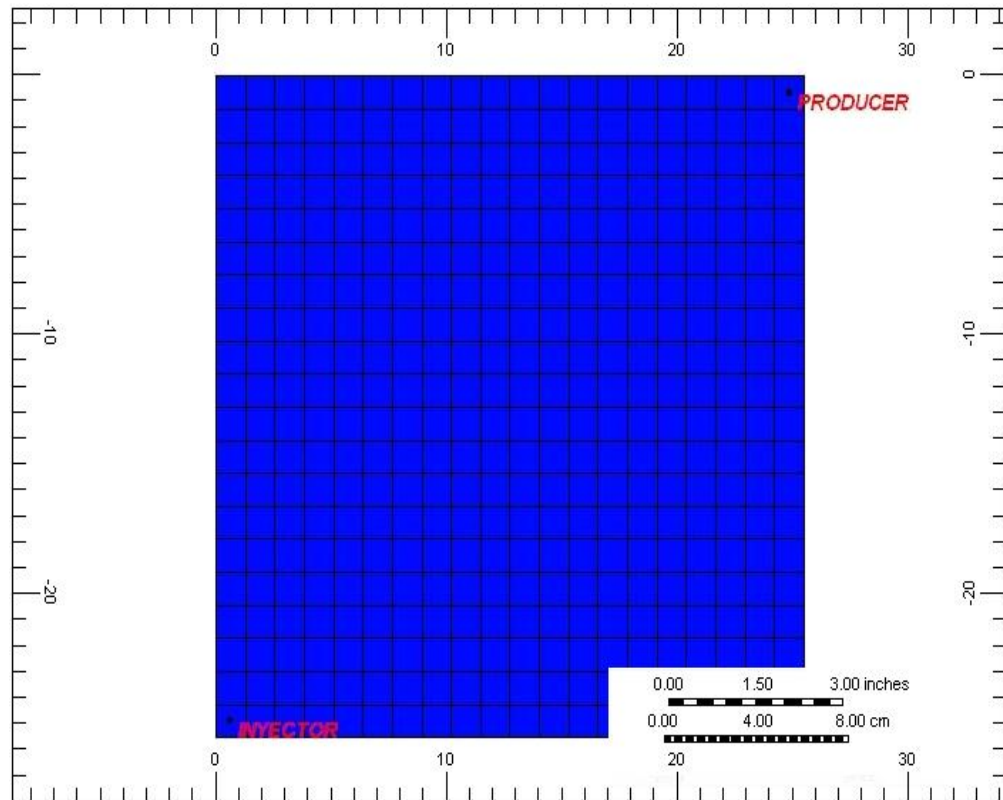
Tabla 29. Descripción del enmallado del prototipo del modelo de laboratorio 2

ENMALLADO		
TIPO: Cartesiano.	COORDENADAS: x ,y ,z	DIMENSIONES: 20 * 20 * 4
AREA: 650.25 cm ² (0.7 ft ²)		CELDAS (x,y): 1.275 cm (0.04183 ft).
ESPESOR DE LAS CAPAS: 1.0775 cm (0.0354 ft).		

Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

El eje x y y se dividen en veinte celdas de 1.275 cm (0.04183 pies), ver figura 84. El eje z en cuatro capas de de 1.0775 cm (0.0354 pies), ver figura 83.

Figura 84. Vista areal del modelo de laboratorio 2, coordenadas (x,y).



Fuente: Simulador CMG.

5.3.2.2 Propiedades de la roca. En la tabla 30 se presentan las propiedades de la roca, tales como la permeabilidad, la porosidad la conductividad térmica, la capacidad calorífica.

Tabla 30. Propiedades de la roca del modelo de laboratorio.

PROPIEDADES DE LA ROCA			
	Kh (mD)	Kv (mD)	Porosidad
Capa 1 - 4	600(0.592 μm^2)	600(0.592 μm^2)	0.28
Conductividad térmica: 2.56256 J/(cm*min*C) (38.208 BTU/(ft*D*°F)			
Capacidad calorífica: 2.39815 J/(cm ³ *C) (35.784 BTU/ft ³ *°F)			
Compresibilidad efectiva: 2.90075*10 ⁻⁷ 1/kPa (2*10-6 psi ⁻¹)			

Fuente: Datos suministrados por el ICP.

5.3.2.3 Propiedades del crudo. En el modelo de laboratorio se usan los mismos fluidos del prototipo de campo, esto con el fin de facilitar el escalamiento, ver tabla 8, en ella se presentan las propiedades del crudo presente en el modelo de laboratorio.

5.3.2.4 Permeabilidades relativas. Baja las condiciones con las cuales trabaja el enfoque 2, es decir, mediante el uso de un medio poroso igual al del prototipo, se asegura que tanto las permeabilidades y las saturaciones sean las mismas en el modelo de laboratorio y prototipo. La figura 77 y 78 muestra las permeabilidades relativas del modelo de laboratorio.

5.3.2.5 Condiciones iniciales. La tabla 23 presenta las condiciones iniciales del modelo de laboratorio 2.

5.3.2.6 Condiciones de operación. La tabla 31 muestra las restricciones bajo las cuales trabajarán el pozo productor y el pozo inyector.

Tabla 31. Condiciones operativas de los pozos presentes en el modelo de laboratorio.

CONDICIONES DE OPERACIÓN				
PARÁMETROS DE INYECCIÓN				
	TEMPERATURA DE INYECCIÓN:	CALIDAD DEL VAPOR:	TIEMPO DE INYECCIÓN	TASA DE INYECCIÓN
POZO INYECTOR	293 °C (560 °F)	0,65	44 min	12.5 cm ³ /min (0.1132 bl/d)
MÁXIMA PRESIÓN DE INYECCIÓN:			7584.23 KPa (1100 psi)	
MÁXIMA TASA DE INYECCIÓN:			12.5 cm ³ /min (0.1132 bl/d)	
PARÁMETROS DE PRODUCCIÓN				
MÍNIMA PRESIÓN DE FONDO FLUYENDO:			344.7 KPa (50 psi)	
MÁXIMA TASA DE LIQUIDO:			20 cm ³ /min (0.1811 bl/d)	

Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

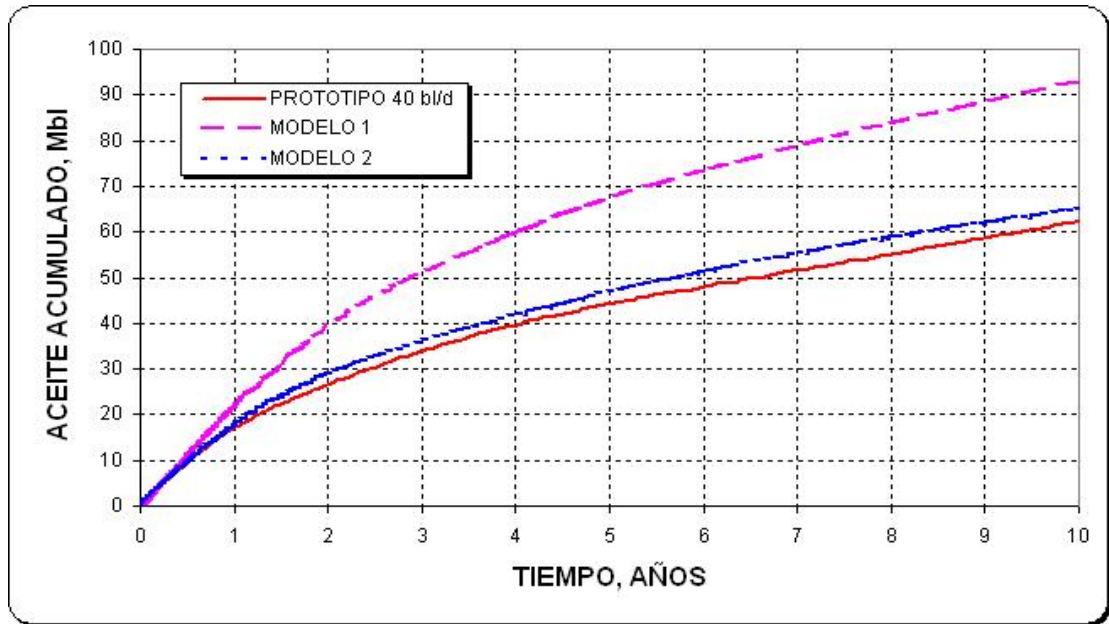
5.4 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN.

Se realizaron varias corridas de simulación para compara el comportamiento del prototipo de campo con el modelo de laboratorio (los resultados de este se escalaron de laboratorio a campo, con el fin de comparar sus resultados con los resultados del prototipo de campo). Se simulo el comportamiento del prototipo de campo durante un periodo de tiempo de diez años, para el modelo de laboratorio 1, el tiempo simulado fue de 55 minutos y para el modelo de laboratorio 2, fue de 44 minutos (este tiempo es escalado de campo a laboratorio y equivale a diez años).

5.4.1 Producción acumulativa de aceite. En la siguiente figura 85, se muestra una comparación de la producción acumulativa de aceite del prototipo de campo y la producción acumulativa predicha por los modelos de laboratorio (los resultados de estos, se escalaron de laboratorio a campo), los cuales emplean dos diferentes

enfoques de escalamiento. De ella se observa la diferencia de predicción de los dos métodos de escalamiento.

Figura 85. Producción acumulada de aceite contra el tiempo de inyección.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Como se muestra en la figura 85, el modelo 1 (enfoque 1) sobreestima la producción acumulada de aceite con respecto al prototipo, esto se debe a que el modelo 1 tiene una porosidad de 0.36 y saturación de agua de 0.17, mientras que el prototipo de campo tiene una porosidad de 0.28 y una saturación de agua de 0.2. Al comparar el volumen de hidrocarburos del modelo, este sobreestima el volumen de aceite en un 34.2 % con respecto al prototipo, la tendencia del modelo 1 de laboratorio a realizar predicciones más aproximadas a aquellas hechas por el prototipo, depende del medio poroso que se utilice y de su diferencia o similitud con las propiedades que presentan en el prototipo de campo. El uso de un medio poroso en el modelo de laboratorio con propiedades y características similares a

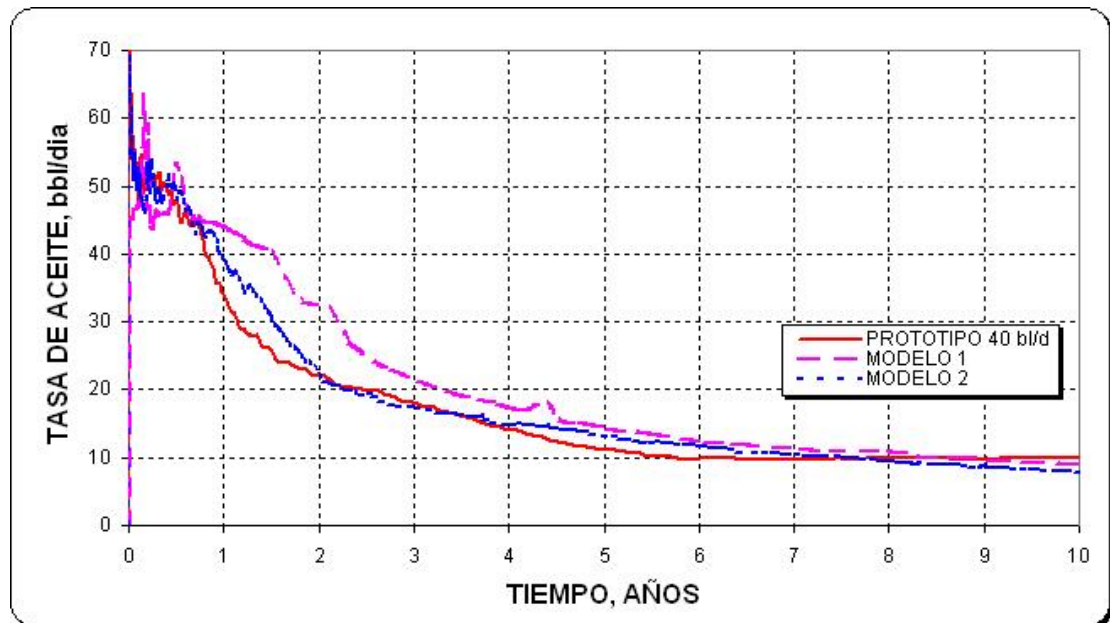
las presentadas en el prototipo, resultará en que el modelo realice mejores predicciones del comportamiento del prototipo, con el cual se compara.

La figura 85 muestra la producción acumulativa de aceite del modelo 2, este hace mejores predicciones de la producción acumulativa de aceite con respecto al prototipo (este modelo se construyó mediante el uso del enfoque 2), debido a que este modelo usa un medio poroso con propiedades similares a las presentes en el prototipo de campo, la tendencia del comportamiento del modelo 2 es más similar al prototipo. Con base en esta figura, se compara el comportamiento del modelo 1 y 2, con respecto al prototipo de campo, mediante esta se concluye que el comportamiento del modelo 1 será más similar al prototipo dependiendo de la similitud de sus medios porosos, esto es de interés por que en la mayoría de modelos escalados se usa el enfoque 1. Para observar el comportamiento del modelo 1 frente a diferentes valores de porosidad, ver el numeral 5.5.2.2, el cual corresponde a una variación de la porosidad del modelo 1.

5.4.2 Tasa de producción de aceite. En la figura 86, se muestran las tasas de producción de aceite del prototipo y las predichas por los modelos 1 y 2 (predicción hecha mediante el escalamiento), para un periodo de diez años. La tasa de producción de aceite es un parámetro sensible a eventos como la ruptura y al máximo desarrollo de la zona de vapor²⁸; por tanto, se puede observar que estas curvas se caracterizan por presentar inicialmente altas tasas de producción a medida que se desarrolla la zona de vapor. Después de alcanzar un máximo valor, la tendencia de la curva comienza a declinar, es en este punto donde ocurre la ruptura. El enfoque 1, predice un tiempo de ruptura de 1.3 años comparado con el enfoque 2, el cual predice un tiempo de ruptura de 0.65 años esto se ve más claramente en la figura 88, en ella se muestra la producción de agua acumulada contra el tiempo. Este efecto se debe a que en el modelo 1, hay un mayor desarrollo de la zona de vapor comparado con el modelo 2, por tanto la cámara de vapor es mayor y la ruptura ocurrirá más tarde.

La figuras 86 muestra las tasas de producción de aceite tanto para el prototipo de campo como para los modelos 1 y 2. Al observar esta figura, se debe notar que en la etapa inicial de producción estas curvas presentan variaciones en sus tendencias. Esto corresponde a un sobrepaso en las restricciones establecidas para los pozos productor e inyector (es decir, el simulador viola una restricción para solucionar las ecuaciones que maneja). Una vez el simulador detecta la violación de esta restricción de operación, nivela la tasa a los límites establecidos. Estas alteraciones no constituyen alteraciones significativas en el proceso, pues la violación solo ocurre durante time steps iniciales de la etapa de producción.

Figura 86. Tasa de producción de aceite contra el tiempo.

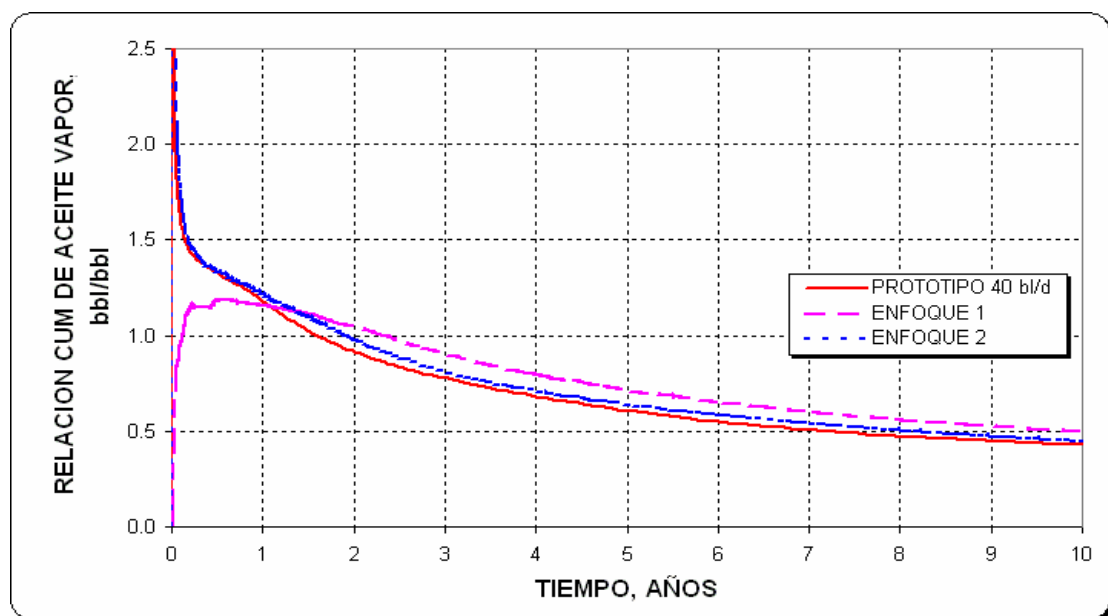


Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

5.4.3 Relación acumulativa de aceite vapor. En la figura 87 se muestra una comparación de la relación acumulativa de aceite vapor contra el tiempo de

inyección (tanto para el prototipo como para los modelos 1 y 2). Durante las etapas iniciales la relación aceite vapor se incrementa conforme la zona de vapor se expande hasta alcanzar su máximo valor, luego de alcanzar este valor se presenta una declinación gradual como resultado de las pérdidas de calor. Después de este tiempo las tendencias son similares para las dos tasas.

Figura 87. Relación acumulativa de aceite vapor contra el tiempo de inyección.



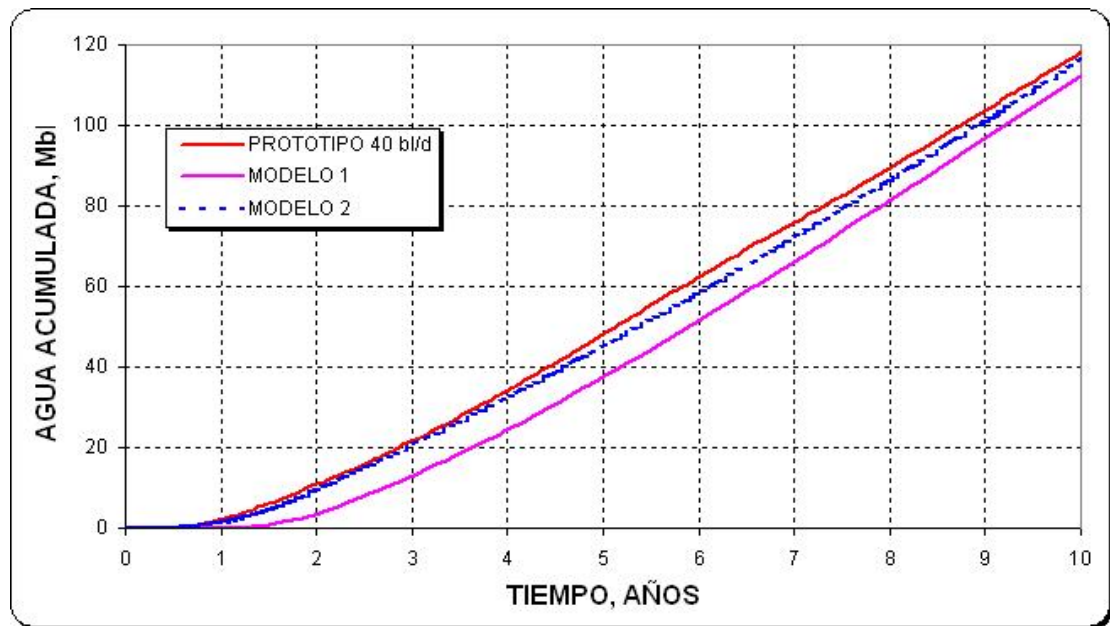
Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

5.4.4 Agua acumulada. La figura 88 muestra, el agua acumulada tanto para el prototipo como para el modelo de laboratorio (sus resultados se escalaron, de laboratorio a campo), para un periodo de diez años.

Como se muestra en la figura 88, el enfoque 1 subestima la producción acumulativa de agua con respecto al del prototipo, debido a que el modelo presenta una mayor porosidad y una saturación de agua menor, por tanto el volumen de agua predicho

por el modelo 1, será menor al del prototipo. Al comparar el volumen de agua del modelo (volumen de agua; modelo 46860 bl, prototipo 43450 bl), este sobreestima el volumen de agua en un 7.85 % con respecto al prototipo, esto se ve reflejado en el tiempo a el cual ocurre la ruptura. Como se ve en la figura, la ruptura en el prototipo ocurre antes que en el modelo. Se debe tener presente, que se están inyectando cantidades equivalentes de agua en un período de tiempo igual.

Figura 88. Agua acumulada contra el tiempo de tiempo.



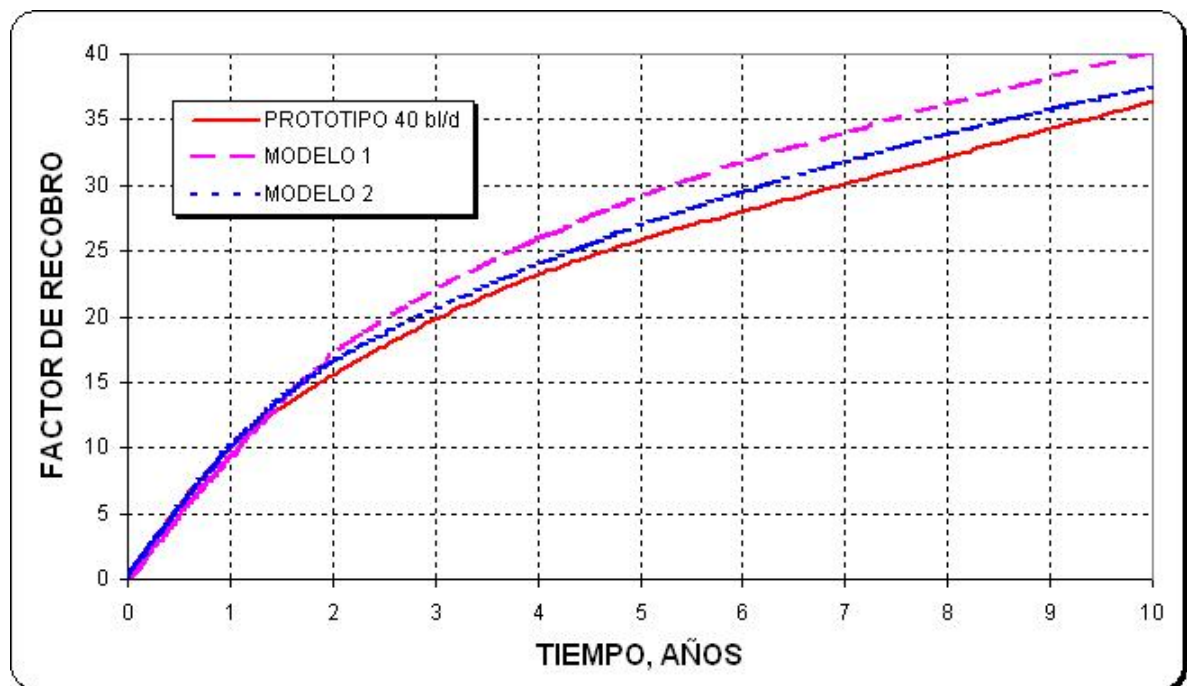
Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G. J. D.

El enfoque 2 hace muy buenas predicciones del agua acumulada con respecto al del prototipo (este modelo se construyo mediante el enfoque 2, su objetivo es comparar el comportamiento del modelo 1 y prototipo), debido a que este cuenta con un medio poroso con características similares a las presentadas en el prototipo de campo, la tendencia del comportamiento del modelo 2 es mas similar al prototipo. Es decir, el medio poroso empleado en el, presenta una porosidad, saturaciones y además esta sometido a condiciones similares a las del prototipo,

es por ello que las predicciones son mas similares. La tendencia del modelo a realizar mejores predicciones depende de las características del tipo del empaquetamiento seleccionado para usar en el modelo.

5.4.5 Factor de recobro. Representa la relación entre el aceite total producido y el original in-situ; es la fracción de este aceite recuperado. En la figura 89 se muestra el factor de recobro para el prototipo y por los modelos 1 y 2 (sus resultados se escalaron, de laboratorio a campo), para un periodo de diez años.

Figura 89. Factor de recobro vs tiempo.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

Dado que el modelo que usa el enfoque 1, emplea un medio poroso con una mayor porosidad a la del prototipo, y además las saturaciones iniciales son

diferentes. Las predicciones del factor de recobro del modelo están por encima de las del prototipo de campo, debido a que el modelo presenta un mayor volumen de aceite del que se puede recobrar en el prototipo. Los factores de recobro obtenidos por el enfoque 1, es de 40% y para el obtenido con el enfoque 2, es de 37.6%, comparados con el obtenido con el prototipo de campo, el cual fue de 36.4%. Las predicciones del factor de recobro del modelo que utiliza el enfoque 2, se ajustan casi perfectamente a las del prototipo de campo.

5.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDADES.

En un análisis de sensibilidad se realizan variaciones sobre una determinada cantidad de parámetros, con el propósito de estudiar su comportamiento bajo estas características. Esto se puede clasificar en; parámetros operacionales y parámetros de yacimiento.

La tabla 32 presenta un resumen de los parámetros estudiados y los valores para los cuales se realizaron las corridas. Con base a los resultados de cada una de estas corridas se realizó el análisis de sensibilidad.

Tabla 32. Variación de los parámetros operacionales.

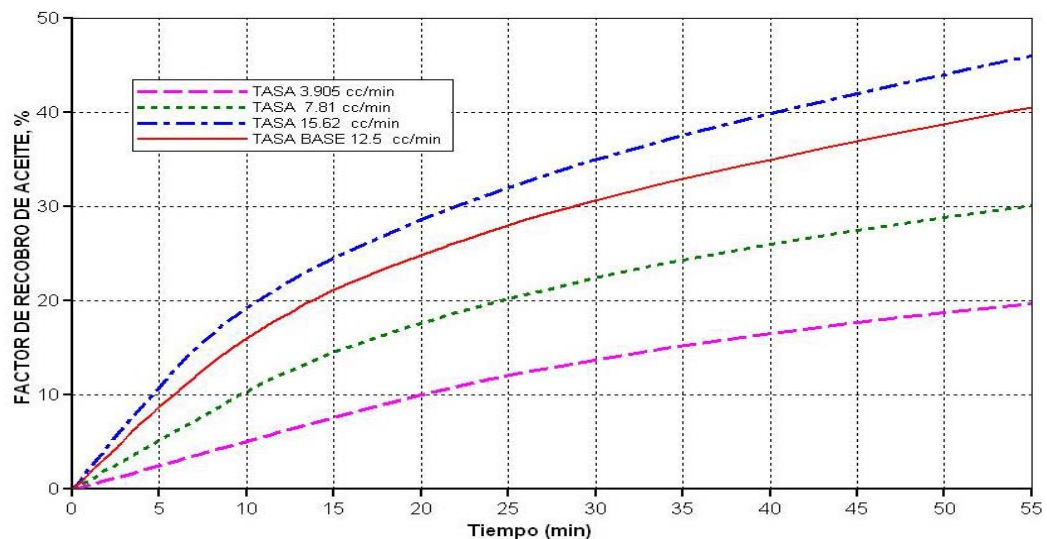
PARÁMETRO	VALORES	UNIDADES
Caudal de inyección	3.9 (0.035), 7.81 (0.7), 12.5 (0.11), 15.6 (0.14)	cm ³ /min (bl/día)
Calidad de vapor	0.3, 0.5, 0.65, 0.8	Fracción
Temperatura de inyección	293.3 (560), 270 (520), 241.1 (466), 212.9 (415.2)	C, (F)
Presión de inyección.	2068.4 (300), 3447.4 (500), 5515.8 (800), 7584.2 (1100)	kPa, (psi)
Presión de producción.	103.4 (15), 206.8 (30), 344.7 (50), 482. (70)	kPa, (psi)

Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G. J. D.

5.5.1 Parámetros operacionales. Son aquellos parámetros que pueden ser variados y controlados en un proceso de inyección continua de vapor, con los resultados obtenidos se puede establecer las condiciones de operación más favorables para alcanzar el éxito de un proceso de inyección continua de vapor.

5.5.1.1 Caudal de inyección. Este es un parámetro muy importante en un proceso de inyección de vapor, valores muy altos conducirán a efectos de digitación viscosa y pobres eficiencias de barrido, reflejándose en bajos factores de recobro. En la figura 90 se compara el factor de recobro obtenido mediante el enfoque 1, claramente se ve el efecto de la tasa de inyección, note que el factor de recobro aumenta al aumentar la tasa de inyección, se debe a que un mayor volumen de vapor es inyectado al yacimiento por unidad de tiempo, con ello se lleva más energía al yacimiento en un periodo de tiempo menor y como consecuencia el tiempo de ruptura del vapor en el pozo productor se reduce. Para altas tasas de inyección de vapor el comportamiento de las curvas del factor de recobro tiende a ser más similar y su diferencia es menor.

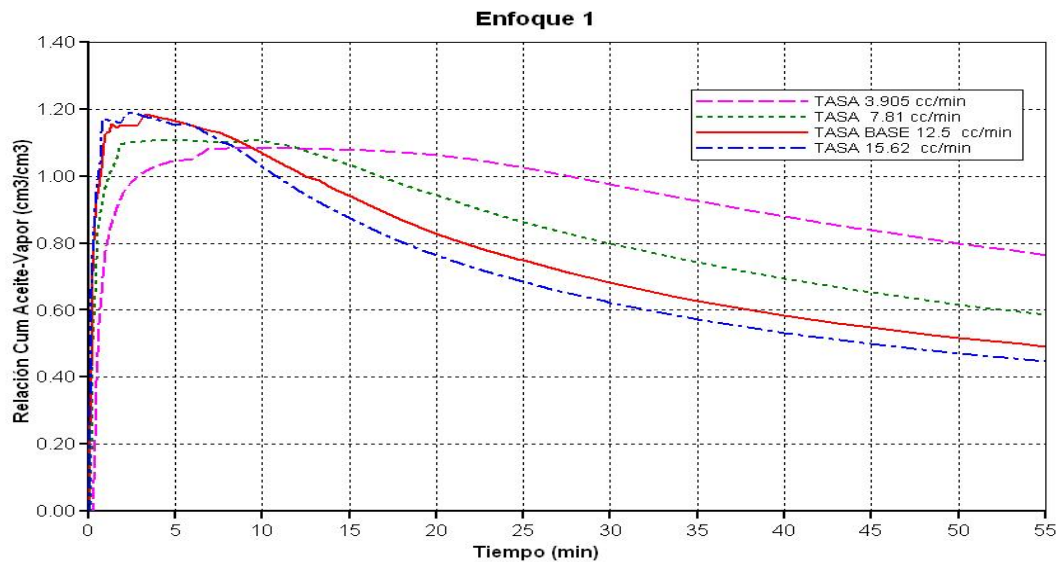
Figura 90. Efecto de la tasa sobre el factor de recobro vs tiempo.



Fuente: Simulador CMG.

El efecto de ruptura de vapor se ve más claramente en una curva de “RAV” contra tiempo. El RAV es la relación aceite vapor, este es un indicador económico, que indica cuanto vapor (BCWEPD)⁸ se requiere para producir un barril de aceite. De la figura 91, se observa que estas curvas se caracterizan por presentar una etapa donde se incrementa gradualmente el RAV (en esta etapa el aceite se calienta progresivamente reduciendo su viscosidad e incrementando su movilidad hasta un punto donde puede producirse mas fácilmente) hasta alcanzar un máximo valor, luego de alcanzar este valor la curva comienza a declinar identificándose el momento en el cual ocurre la ruptura del vapor en el pozo productor.

Figura 91. Efecto de la tasa de inyección en la relación aceite vapor.



Fuente: Simulador CMG.

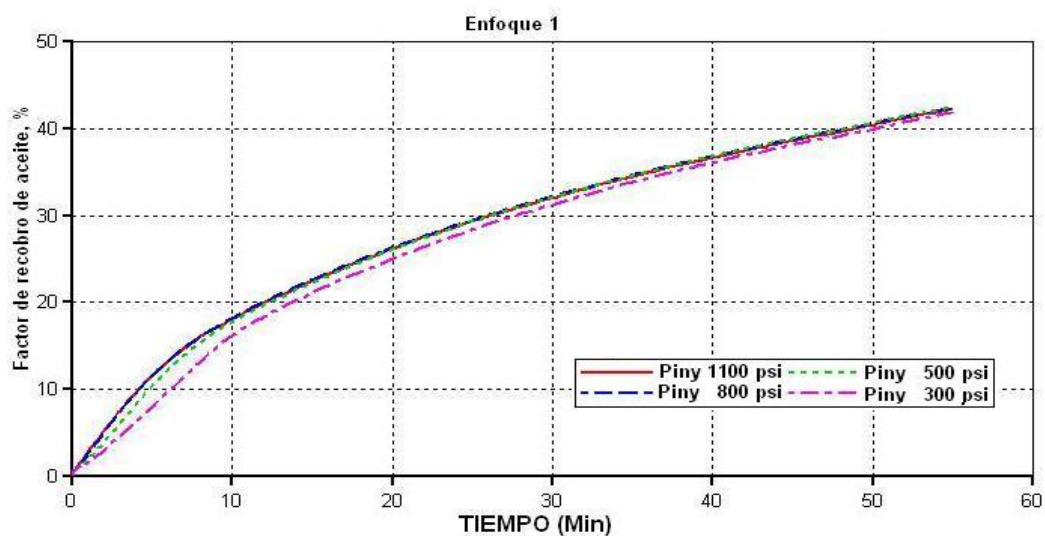
Para altas tasas de inyección, los tiempos de ruptura serán menores debido al efecto de aparición de canales preferenciales de flujo para el vapor entre el pozo inyector y el pozo productor. Como consecuencia la eficiencia térmica se reduce al

⁸(BCWEPD) Por las siglas en el idioma ingles, hacen referencia a barriles de agua fría equivalentes al vapor inyectado por día.

disminuir el tiempo de ruptura a causa de un menor tiempo en el cual el vapor transfiere su energía a los fluidos del yacimiento.

5.5.1.2 Presión de inyección. Es un parámetro de gran interés, pues con este se establece cual es la temperatura del vapor inyectado. Para establecer el efecto de la presión de inyección se construyeron cuatro modelos, en las cuales solo se vario la presión de inyección. La figura 92, se muestra el comportamiento del factor de recobro de aceite; se puede apreciar que el factor de recobro se incrementa a medida que se aumentan la presión de inyección, hasta un punto en el cual por mas que se usen altas presiones de inyección su efecto sobre el factor de recobro es mínimo, aumentar la presión en este punto no es viable pues el incremento en la producción no justificaría esos gastos. Esto se debe a que a mayores presiones de inyección aumenta la temperatura del vapor causando un incremento en la energía del yacimiento (la temperatura promedio del yacimiento se eleva, se reduce la viscosidad del aceite y su movilidad se mejora), en consecuencia aumentara la producción de aceite.

Figura 92. Efecto de la tasa de inyección en el factor de recobro de aceite.

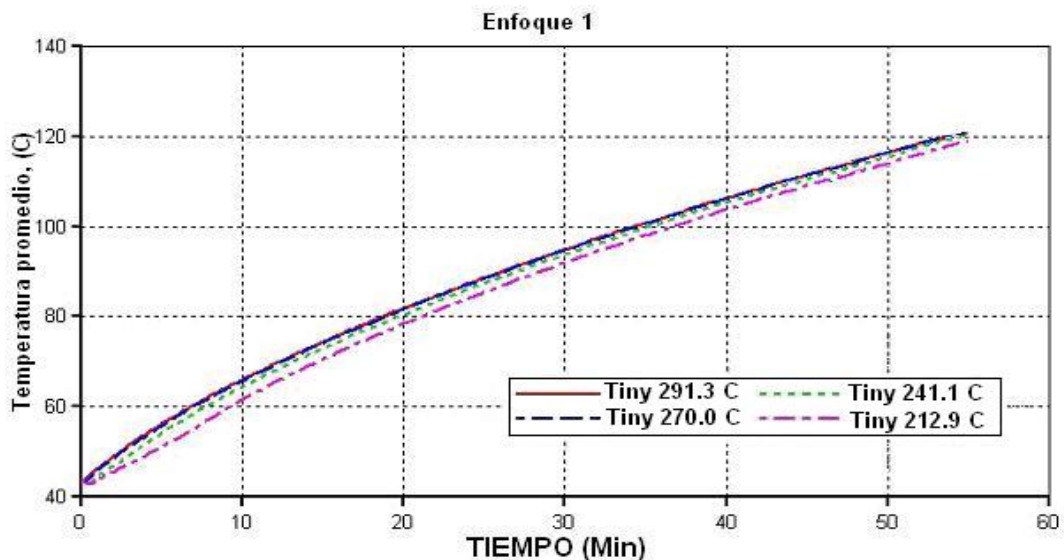


Fuente: Simulador CMG.

Se debe tener en mente que a presiones bajas las cantidades de aceite recuperado disminuyen, debido a que la presión es muy baja para vencer la alta resistencia presentada por la baja movilidad del fluido y el incremento de la temperatura no es lo suficiente como para mejorar su movilidad.

5.5.1.3 Temperatura de inyección. La figura 93 muestra el efecto de la temperatura de inyección del vapor sobre la temperatura promedio del yacimiento. Aquí se confirma lo estipulado en la literatura, a mayor temperatura de inyección, mayor factor de recobro. Se explica del hecho que al incrementar la temperatura se incrementa la cantidad de energía transferida al yacimiento⁴⁵.

Figura 93. Efecto de la temperatura en la relación aceite vapor.

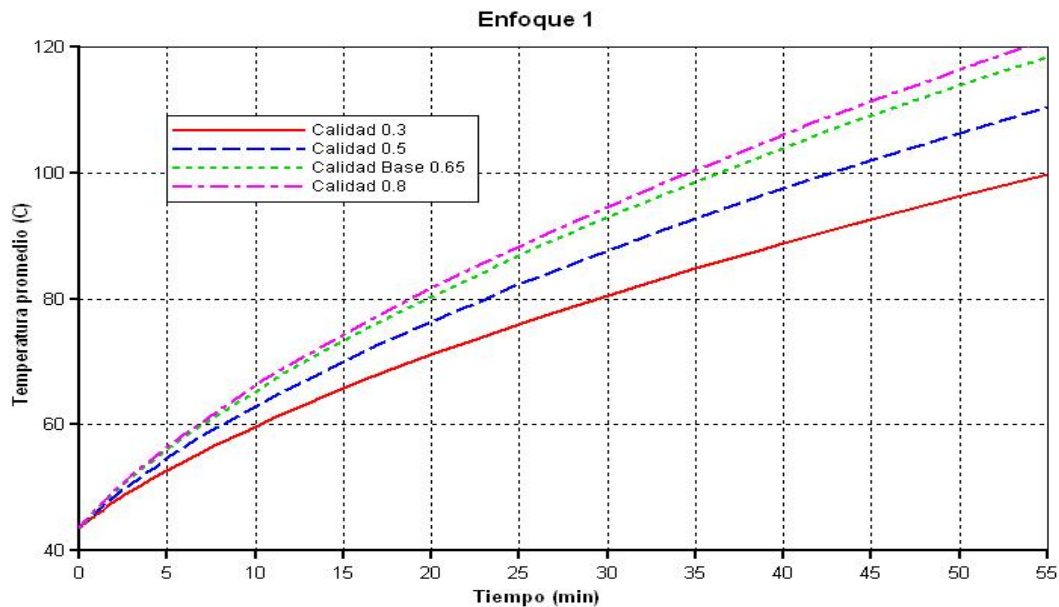


Fuente: Simulador CMG.

5.5.1.4 Calidad del vapor. Es una relación entre la cantidad de vapor seco y el vapor húmedo que se inyecta al yacimiento, es un indicador de cuanta energía lleva el vapor al yacimiento. Para establecer el efecto de la calidad en el modelo de laboratorio, se construyeron varios modelos de simulación, en los cuales se

vario la calidad del vapor inyectado. En la figura 94, se muestra el incremento de la temperatura promedio del modelo al incrementar la calidad del vapor inyectado a este ultimo, se debe al hecho que vapores con altas calidades contienen mayores cantidades de vapor seco (es decir, una alta calidad significa un alto contenido de calor por unidad de masa del vapor), por tanto pueden transmitir mayores cantidades de energía en un periodo de tiempo igual al que se transmitiría una calidad menor. Este parámetro es de gran interés pues en campo es fácil de medir y controlar el flujo de vapor de alta calidad en las instalaciones de superficie.

Figura 94. Efecto de la variación de la calidad del vapor en la temperatura promedio.

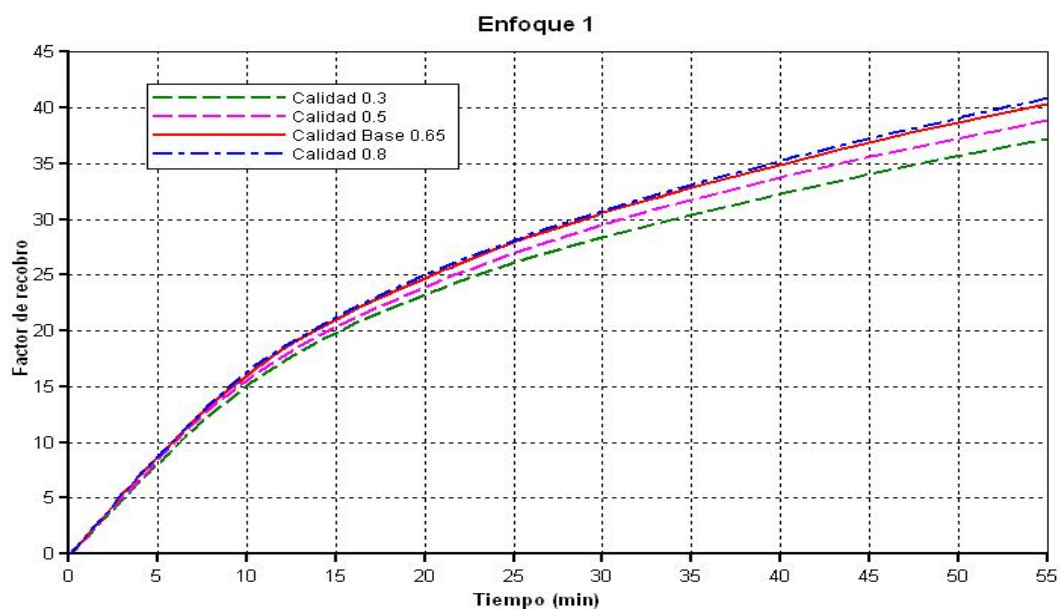


Fuente: Simulador CMG.

De la figura 95, se muestra el efecto de la calidad del vapor en el recobro de aceite, en general el recobro se incrementa con el a medida que se aumenta la

calidad del vapor inyectado⁷. Se debe a que una calidad alta contiene más calor por unidad de masa, al entregar más calor se eleva mas la temperatura promedio del yacimiento haciendo que la viscosidad se reduzca mas y se incremente su movilidad mejorando la producción de aceite. Se debe notar que a altas calidades del vapor, el comportamiento del factor de recobro se hace mas similar y su diferencia es mínima. Por esta razón, el control de este parámetro es importante, puesto que para obtener altas calidades se requiere altos costos, lo cual puede llevar a realizar gastos innecesarios.

Figura 95. Efecto de la calidad del vapor en el factor de recobro de aceite.

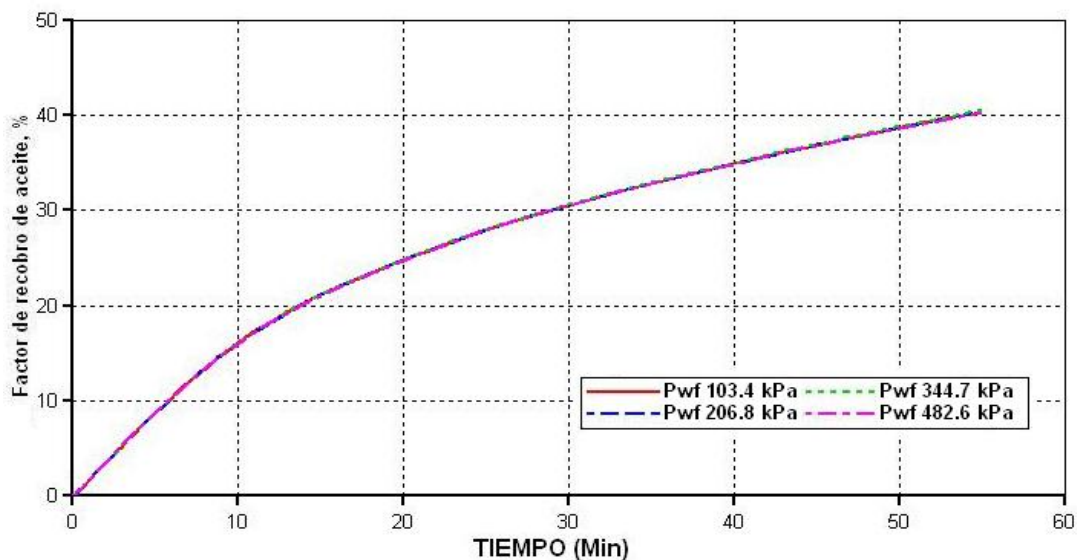


Fuente: Simulador CMG.

5.5.1.5 Presión de producción. La figura 96 muestra el efecto de variar la presión de producción sobre la producción de aceite, se debe tener presente que la productividad de un pozo y la caída de presión son proporcionales, si se aumenta la presión de producción, la caída de presión disminuye y en

consecuencia la producción disminuye y el factor de recobro se reduce. Debido a que en el enfoque 1, las caídas de presión son pequeñas su efecto sobre la producción a penas es perceptible, la variación de la presión de producción en el modelo de laboratorio se aprecia más claramente en la tabla 33. Esta tabla muestra la presión de inyección, las presiones de producción, las caídas de presión en el prototipo y su valor escalado para el modelo, como se puede apreciar las variaciones de la presión de producción son mínimas y por tanto es lógico que su efecto en el modelo no se pueda apreciar con facilidad.

Figura 96. Efecto de la presión de producción en el factor de recobro de aceite.



Fuente: Simulador CMG.

Tabla 33. Comparación de la presiones del prototipo y del modelo de laboratorio 1.

$(P_{iny})_P$	1100		
P_{wfP}	$\Delta P_{Prototipo}$	ΔP_{Modelo}	$(P_{wf})_M$
70	1030	2.915	1097.09
50	1050	2.971	1097.03
30	1070	3.028	1096.97
15	1085	3.070	1096.93

Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

5.5.2 Parámetros de yacimiento. Son aquellos parámetros de yacimiento que definen el yacimiento y sus características, no pueden alterarse directamente, pero se varían por medio de un simulador numérico, esto con el objetivo de estudiar su comportamiento al presentar esas propiedades.

La tabla 34 presenta un resumen de los parámetros estudiados y los valores para los cuales se realizaron las corridas, debido a que el enfoque empleado es muy sensible al tipo de medio poroso usado en el modelo de laboratorio. En base a los resultados de cada una de estas corridas se realizó el análisis de sensibilidad

Tabla 34. Variación de los parámetros de yacimiento.

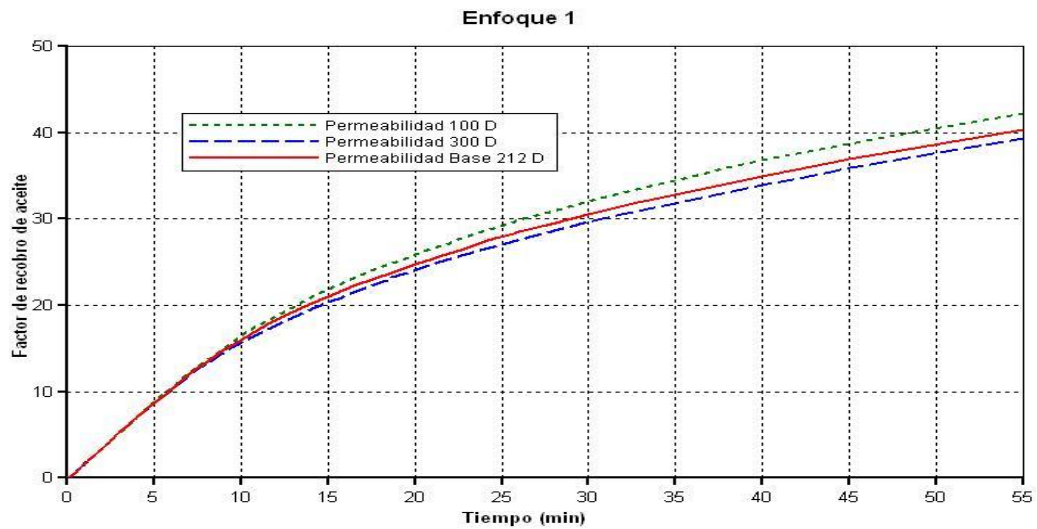
PARÁMETRO	VALORES	UNIDADES
Permeabilidad	100 (98.7), 212 (209), 300 (296)	Darcys (μm^2)
Porosidad	0.28, 0.33, 0.36	Fracción

Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

5.5.2.1 Permeabilidad. En la figura 97 se compara las predicciones del factor de recobro obtenido mediante el enfoque 1, se ve la influencia de la permeabilidad absoluta del empaquetamiento del modelo y su efecto en los resultados de las pruebas de repetitividad, las cuales se podrían realizar en este modelo. Inicialmente las curvas del factor de recobro son similares hasta el tiempo de ruptura (se debe a que el vapor no ha irrumpido en los pozos productores y es efecto sobre estos no es considerable). Después de la ruptura se presentan cambios significativos en el comportamiento del factor de recobro. Se debe tener en cuenta, que un medio poroso con una permeabilidad baja presentara un tiempo de ruptura mayor, comparado con aquel tiempo presentado por un medio poroso con una permeabilidad mayor, como consecuencia de esto se presentara un recobro mayor. Esto posiblemente se explica debido a que un modelo con una

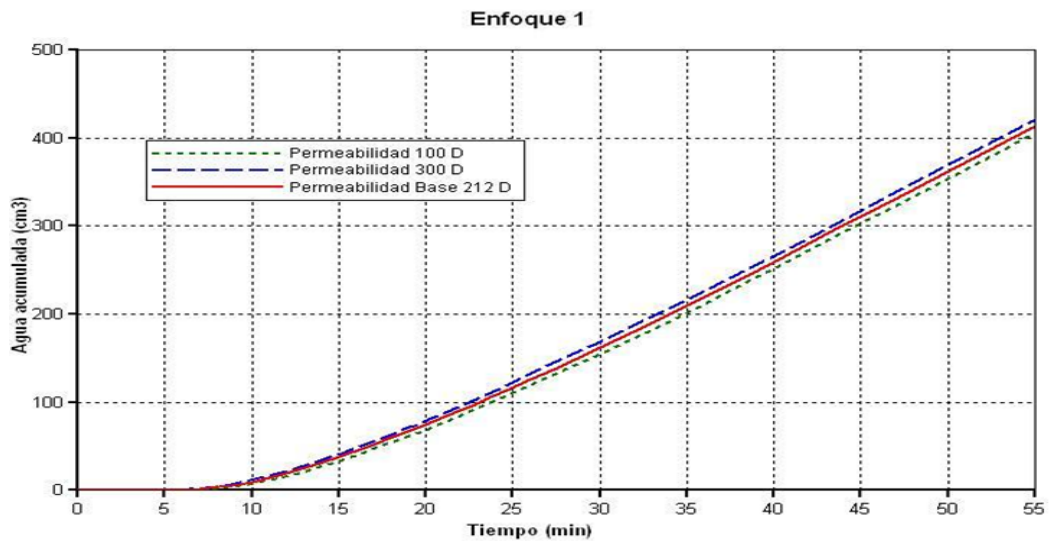
permeabilidad baja presentara una eficiencia térmica un poco mayor a la presentada con uno de mayor permeabilidad.

Figura 97. Efecto de la variación de la permeabilidad en el factor de recobro.



Fuente: Simulador CMG.

Figura 98. Efecto de la variación de la permeabilidad en el agua acumulada.

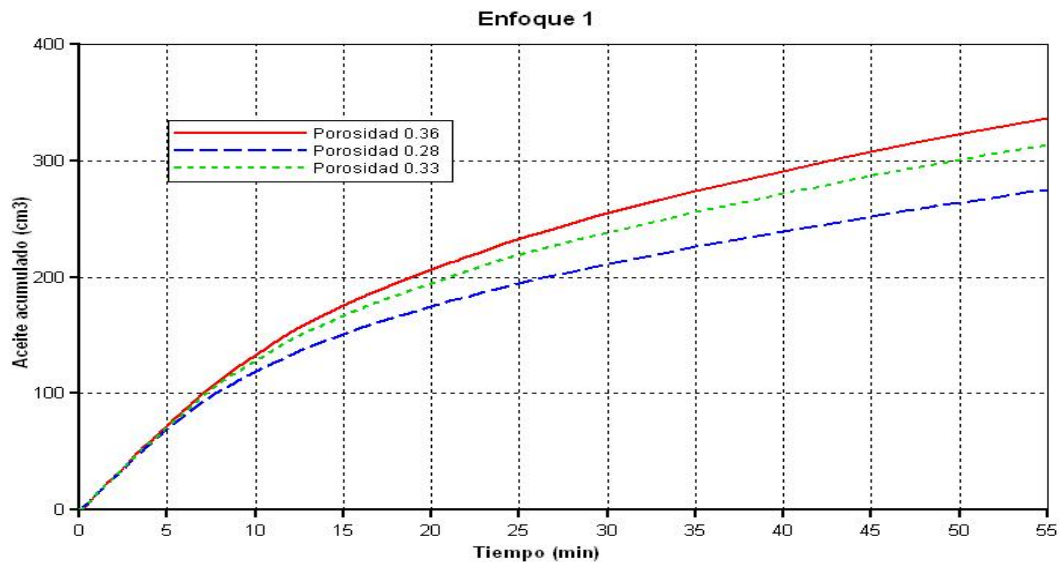


Fuente: Simulador CMG.

De la figura 98 se concluye que modelos con empaquetamientos con alta permeabilidad presentaran producciones de agua mas altas comparado con aquellos que presentan menores permeabilidades. Este efecto se explica del hecho que el agua presenta una mayor movilidad que la presentada por el aceite.

5.5.2.2 Porosidad. En la figura 99 se compara las predicciones del aceite acumulado obtenido mediante el enfoque 1, se puede observar la influencia de la porosidad del empaquetamiento del modelo. Hay que tener presente, que un medio poroso con diferentes porosidades presentara diferentes volúmenes in-situ de los fluidos presentes en él, lo anterior se refleja en los tiempos de ruptura, como se puede apreciar de la figura. Modelos con porosidades similares del prototipo repercutirán en mejores predicciones hechas por éste.

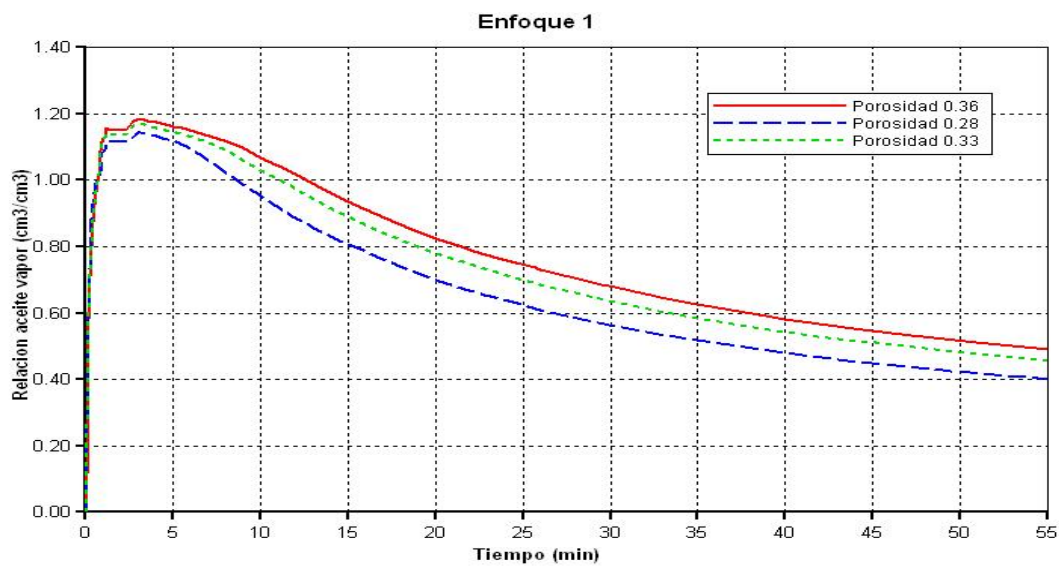
Figura 99. Efecto de la variación de la porosidad en el aceite acumulado.



Fuente: Simulador CMG.

La figura 100, muestra el efecto de la variación de la porosidad en la relación aceite vapor (RAV), de esta se debe notar que la relación aceite vapor se incrementa al aumentar la porosidad⁷. Esto se debe a que un modelo con una porosidad mayor a la del prototipo presentara un mayor volumen disponible para hidrocarburos, por tanto se producirá una mayor cantidad de aceite comparada con aquella que se puede recuperar con uno de menor porosidad. El uso de un medio poroso con propiedades y características similares a las presentadas en el prototipo, resultará en predicciones más acertadas.

Figura 100. Efecto de la variación de la porosidad en la relación aceite vapor.

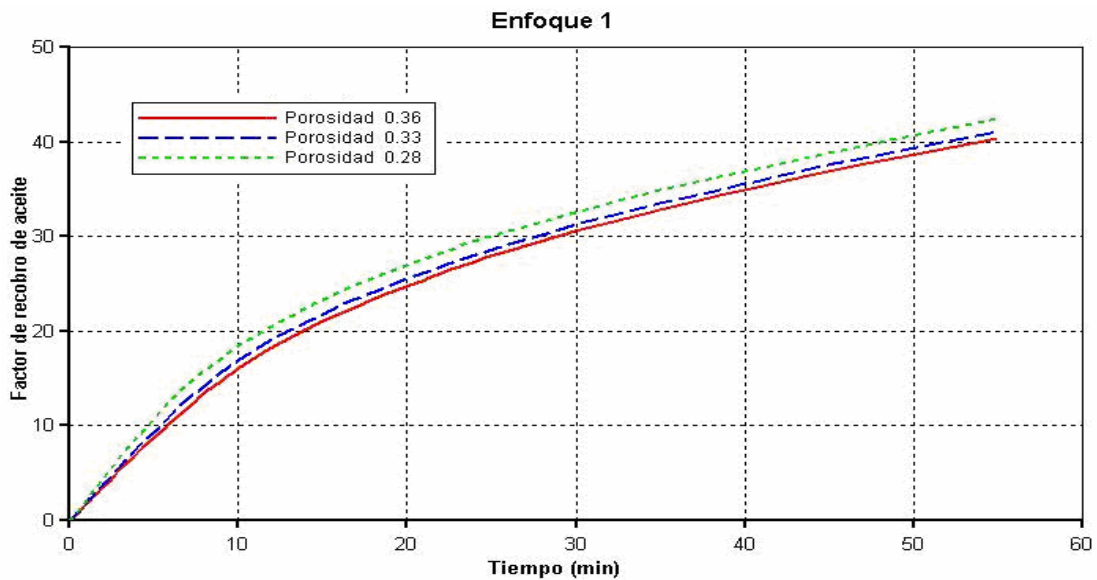


Fuente: Simulador CMG.

La figura 101, muestra el efecto de la variación de la porosidad en el factor de recobro de aceite, se observa que los tiempos de ruptura ocurren a tiempos más tardíos a medida que la porosidad del modelo aumenta (para valores altos de porosidad, mayor será el volumen disponible para hidrocarburos). El factor de recobro es mayor para el modelo con porosidad de 0.28, comparado con los otros

dos modelos, como se varía la porosidad sus volúmenes de aceite son diferentes, por tanto los factores de recobro son diferentes, esto se aprecia más claramente en la siguiente tabla.

Figura 101. Efecto de la variación de la porosidad en el factor de recobro.



Fuente: Simulador CMG.

Tabla 35. Efecto de la variación de la porosidad en el volumen.

	$\Phi = 0.36$	$\Phi = 0.33$	$\Phi = 0.28$
Volumen poroso (cm ³)	1010	925	785
Volumen de agua (cm ³)	169	155	131
Volumen de aceite (cm ³)	840	770	653

Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

6 CONCLUSIONES

- Se diseñó un equipo de desplazamiento para realizar pruebas de recobro mejorado con vapor en medios porosos, acorde a las necesidades del ICP y a las condiciones de operación de yacimientos en los cuales es recomendable la realización de proyectos de recobro térmico.
- Un conjunto completo de grupos escalados para procesos de inyección de vapor es imposible de satisfacer simultáneamente debido; a el número de grupos adimensionales (55 para este caso), las condiciones de operación y los requerimientos de diseño del modelo físico, sin embargo, es posible establecer una similitud entre el prototipo y el modelo empleando un enfoque de escalamiento, alcanzando buenos resultados.
- El escalamiento que realiza el enfoque 2 para procesos de inyección de vapor, es más preciso que el enfoque 1, esto se debe a las características del medio poroso empleado en el enfoque 1, este último utiliza un medio poroso diferente al presente en el prototipo. Esto es crítico en los procesos de inyección de vapor.
- Parámetros como la tasa de inyección, la caída de presión, la porosidad, permeabilidad, viscosidad y las dimensiones del prototipo son determinantes en el escalamiento de un proceso de inyección de vapor. Sin embargo, el aspecto más influyente resultó ser la similaridad que debe existir entre las curvas de permeabilidades relativas entre el prototipo y el modelo, principalmente en sus end points; aunque esto sea muy difícil de lograr a nivel de laboratorio.

- El uso de modelos físicos, junto con simuladores numéricos y analíticos permiten evaluar el efecto de determinadas variables sobre el comportamiento de un proceso de inyección de vapor al proporcionar información valiosa y confiable para tomar decisiones claves a la hora de de implementar un procesos de recobro mejorado.
- Los resultados obtenidos por medio de las simulaciones realizadas, indican que las predicciones hechas por medio de los enfoques 1 y 2 son razonables. El enfoque 2 hace mejores predicciones que las hechas por el enfoque 1. Esto se debe al uso de un medio poroso similar al del prototipo y al escalamiento mas preciso de las propiedades del vapor.
- Las herramientas de diseño asistido por computador (CAD) como el software Solid Edge proporcionan un excelente apoyo en el diseño de elementos mecánicos, gracias a su facilidad de operación y la posibilidad de corregir errores de manera sencilla.
- La simulación mecánica y térmica realizada con herramientas de ingeniería asistida por computador (CAE) como el programa ANSYS WORKBENCH, permitió la realización de un diseño confiable.
- Las herramientas de ingeniería asistida por computador se convierten en soporte y complemento de la resistencia de materiales tradicional.
- El diseño realizado permitirá realizar el montaje y lograr la operación del equipo, en el momento de ser aprobado el presupuesto para ello, puesto que los detalles de diseño, construcción y operación han sido incluidos en los planos y en el manual de procedimientos desarrollado.

- El manual preliminar de procedimientos de ensayo para pruebas de desplazamiento con vapor del equipo presenta la manera de realizar las pruebas en el equipo diseñado, sin embargo podría estar sujeto a cambios una vez se realice su montaje y puesta a punto.

opppp

7 RECOMENDACIONES

Utilizar los fluidos del prototipo de campo para aplicación adecuada del escalamiento.

La presión máxima de operación del equipo no debe exceder los 1200 Psi.

Para obtener un flujo constante para la realización, recomendamos el uso de la bomba dosificadora marca ISCO.

Utilizar agua destilada para la realización de la prueba y garantizar la duración de los equipos.

Una vez se realice el montaje del equipo de desplazamiento diseñado, se recomienda elaborar un manual de mantenimiento y seguridad para el manejo del equipo.

Utilizar tubería para alta presión aislada, para el tramo de tubería que transportara el vapor entre el evaporador y el pozo inyector.

Utilizar un aislante para cubrir el recipiente a presión y evitar quemaduras del personal que tenga contacto con el.

Utilizar un filtro en la línea de inyección de aceite antes de que este fluido ingrese al porta núcleos.

Realizar un análisis de pérdidas en tubería con el fin de tener en cuenta el taraje que deben tener las válvulas de seguridad.

Realizar pruebas al sistema de confinamiento y sus respectivas mediciones de presión antes de construir el porta núcleos, para tener un conocimiento real del confinamiento aplicado a la arena y poder realizar los ajustes necesarios a este sistema.

Para la automatización del equipo se recomienda la utilización de los siguientes equipos:

Tabla 36. Elementos recomendados para la automatización

CANT	DESCRIPCION
1	Modulo de Potencia para el motor paso a paso.
1	Modulo de posicionamiento para el motor paso a paso.
1	Motor paso a paso 14 N aproximadamente.
3	Modulo de 8 entradas análogas S7-300
1	Fuente de 5 Amp. para S7-300
1	CPU S7-300 alimentación de 24 VDC.
1	Modulo de 16 entradas digitales a 24 VDC.
1	Modulo de 16 salidas digitales a relé de 8 Amp.
1	Software Win CC Flexible Run Time.
1	Interface CPU S7-300 a PC.
16	Termocuplas tipo J
1	PC

Fuente: SENSOMATIC DEL ORIENTE.

Estas recomendaciones fueron hechas por el departamento técnico de la empresa distribuidora en Bucaramanga de productos SIEMENS.

En cuanto a la construcción del porta núcleos (recipiente a presión), el constructor debe garantizar el seguimiento de las normas dictadas por el código ASME para recipientes a presión. La construcción deberá hacerse por personal certificado por la ASME.

Los soldadores deben estar calificados bajo la norma.

Es de importancia mencionar algunos aspectos a tener en cuenta y que son sugeridos por el código.

PARTE AG: REQUERIMIENTOS GENERALES²

ARTICULO G-3 Responsabilidades y deberes de usuario, constructor e inspector.

AG 302 Responsabilidad del constructor

AG 302.1 Conformidad con los requerimientos de esta división.

b. Los materiales deben estar de acuerdo con las reglas de esta división y reunir las especificaciones del usuario y deben mostrarse en el reporte de construcción.

d. Algunos trabajos como examinación no destructiva y tratamiento térmico pueden ser desarrollados por otros (para soldadura ver AF 140.1 Ajuste y alineación de la soldadura y AF 210 Calificación de soldadura y registro.

Se deben realizar las pruebas no destructivas al recipiente para comprobar la buena realización de la soldadura.

Se debe realizar la prueba hidrostática al recipiente a presión antes de realizar su montaje en el equipo. Esta prueba debe certificarla el constructor.

PARTE AM: REQUERIMIENTOS DE MATERIAL

ARTICULO M-2 Requerimientos especiales para materiales ferrosos.

AM 204: Requerimientos generales de resistencia para todos los productos de acero. A excepción de lo tratado en AM 213.1, AM 214.1, AM 218 O AM 311.4. La prueba de impacto charpy V-notch de acuerdo con AM 204.1 será hecha para materiales usados para cascarones, toberas y otras partes conteniendo presión.

AM 213: Los aceros de alta aleación para trabajos con temperatura deben ser probados.

c. Para todas las temperaturas: Los siguientes materiales serán probados al impacto: Tipo 309, 310, 316, 309 Cb o 316 Cb, materiales que son tratados térmicamente luego de la soldadura a temperaturas por debajo de 1650 °F. Ver AD 155.

AM 214 Requerimientos de resistencia para materiales apernados o atornillados. Tabla ABM-1.

AM 214.2 Para materiales de tornillos listados en la tabla ABM-2. Se presentan los valores de esfuerzo permisible en tensión para materiales de tornillos ferrosos para uso con flanges diseñados de acuerdo a apéndices 4,5 y 6.

ARTICULO M5 Requerimientos especiales para Atornillado.

AM 500 Para todos los materiales de tornillos.

AM 501 Especificaciones de material y valores de esfuerzo. Especificaciones, reglas suplementarias y máximos valores de esfuerzo permisible para materiales aceptables para tornillos se dan en la tabla ABM-1 para materiales ferrosos y en las tablas ABM -1.1, ABM-1.2 Y ABM-1.3 para materiales no ferrosos. Para uso con flanges diseñados de acuerdo con apéndices 4, 5 y 6. Especificaciones, reglas suplementarias y valores de esfuerzo permisible para materiales aceptables para tornillos se dan en la Tabla ABM-2 para materiales ferrosos y en las tablas ABM-2.1, ABM-2.2 Y ABM2.3 para materiales no ferrosos.

AM 501.1. Examinación de tornillos, clavos (pernos) y tuercas. Los cubiertos en ABM-2 serán sujetos a:

- a. Examinación Visual: Discontinuidades como dobleces, grietas o roturas son inaceptables.
- b. Todos los tornillos, pernos y tuercas con diámetro nominal mayor a 2 in serán examinados por el método de partículas magnéticas según Artículo 9-1 o líquidos penetrantes artículo 9-2.

AM 502: El roscado de los tornillos deberá ser por lo menos de $1\frac{1}{2}$ veces el diámetro (longitud de roscado).

AM 503 El uso de arandela es opcional, si es usada será de material forjado.

AM 512: Requerimientos para tuercas: Las tuercas serán semiacabadas, achaflanadas y recortadas. Las tuercas serán roscadas a clase 2B o tolerancia mas finas de acuerdo a ANSI B1.1.

Se dispone de tres clases de rosca externa (1A, 2A Y 3A) y tres de rosca interna (1B, 2B Y 3B). Difieren en la cantidad de permisividad y tolerancia de cada clase.

A continuación se describen las características y usos generales de las distintas clases.

Clases 1A y 1B: Estas clases producen el ajuste mas pobre, es decir, tienen el mayor juego (movimiento libre) en un ensamble. Son útiles en los trabajos en lo que es esencial la facilidad de ensamble y desensamble.

Clases 2A y 2B: Están diseñadas para el grado de bondad que tienen los productos comerciales, tales como tornillos de maquinas y cierres y para la mayoría de partes intercambiables.

Clases 3A y 3B: Estas se emplean en productos comerciales de grado excepcionalmente alto, en los que es esencial un ajuste estrecho o cómodo.

Recomendamos realizar el roscado a la clase 3A para tornillos y 3B para tuercas Artículo M6. Datos de diseño del material.

AM 600 Contenido de tablas y datos de diseño del material. Son datos requeridos para diseñar.

- a. Tablas de valores de intensidad de esfuerzo máximo permisible S_m para diversos materiales.
- b. Tablas de valores del límite elástico para estos mismos materiales sobre un rango de temperaturas.

PARTE AD REQUERIMIENTOS DE DISEÑO

AD 121 Definiciones.

AD 121.3 Presión de operación: La presión a la que normalmente opera el recipiente no será mayor que la presión de diseño y estará por debajo del taraje de la válvula de alivio.

AD 121.4 Presión de prueba: Es la aplicada para probar el recipiente según AT-300, AT-301 y AT410 para pruebas hidrostática y neumática.

AD 121.5 Taraje de la válvula de seguridad: La presión a la cual abra esta válvula será establecido por AR 140 (el taraje de la válvula no debe exceder la presión de diseño).

8 BIBLIOGRAFIA

1. ABBASOV, A. A., MELIKO, M.: "Modeling of and Oil recovery Process" (In Rusia)", Neft i Gaz (March, 1969) 41-42.
2. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.: "Asme Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Division 1 y 2". ASME. 1983.
3. ARAQUE D., MONTAÑEZ A.: "Habilitación del equipo modelo de cinco puntos SCALA", Tesis de grado UIS 2005.
4. BAKER, P. E.: "Heat Wave Propagation and Losses in Thermal Oil Recovery Process", Proc., Seventh World Pet. Cong., Ciudad de Mexico (1967) 3, 451.
5. BAKER, P. E.: "Effect of Pressure and Rate on Steam Zone Development in Steamflooding", SPE 4141. 1972. CHEVRON OIL FIELD RESEARCH CO.
6. BENTSEN R. G.: "Scaled Fluid-Flow Models with Permeabilities Differing from that of the Prototype", J. Can. Pet. Tech. 1976, pág. 46.
7. BOBERG, Thomas C.: "Thermal methods of oil recovery". Unites States of America, 1988, 140 p. (EXXONJ Monograph). ISBN 0-471-63300-3.

8. BURSELL, G. G. and PITTMAN, G. N.: "Performance of steam Displacement Kenn River Field". Houston. SPE 5017 of Society of Petroleum engineers. 49th Annual Fall Meeting. 1974.
9. COLLINS, J. A.: "Mechanical design of machine elements and machines". John Wiley & Sons. 2003.
10. CROES G. A., SCHWARZ N.: "Dimensionally Scaled Experiments and the Theories on the Water Drive Process". Trans. AIME (1955) 204, pág. 35.
11. DIETZ, D. N.: "Hot Water Driver", Proc., Seventh World Pet. Cong., Ciudad de Mexico (1967) 3, 451.
12. DUARTE CABRERA A. B.: "Diseño de un modelo escalado en dos dimensiones para inyección de vapor". Instituto Colombiano del Petróleo, 1993.
13. EHRILICH, R.: "Laboratory Investigation of Steam Displacement in the Wabasca Grand Rapids Sand". Symp. Edmonton, Alberta, CIM Special Volumen No. 17, pp. 364-379, 1977.
14. FAROUQ ALI S. M.: DONOHUE D. A., STAHL C. D.: "Fluid Flow in Porous Media-Problems in Relating Experiments to Field Projects" Trans. AIME (1967) 146, pág. 122.
15. FAROUQ ALI, S. M.: and REDFORD, D. A.: "Physical Modeling of In-situ recovery Methods for Oil Sands". Symp. Edmonton, Canadá, CIM Special Volumen No. 17, pp. 319-326, 197.
16. FAIRES, V. M.: "Design of Machine Elements". Mc MILLAN. 1998.

17. GEERTSMA, J., CROES, G. A., SCHWARZ, N.: "Theory of Dimensionally Scaled Models of Petroleum Reservoir". Trans AIME (1956) 207, 459.
18. GÓMEZ A., MARTÍNEZ A.: "Sellos Mecánicos y Empaquetaduras". TESIS UIS. 1979.
19. GREEN D.W., WILLHITE G. P.: "Enhanced Oil Recovery". 1998.
20. HANS H., HUYGEN A.: "Laboratory Steamfloods in Half of a Five-Spot", SPE 6171. 1976. Gulf Research and Development Co.
21. HIBBELER R. C.: "Mecánica de Materiales". PRENTICE HALL. 1997.
22. HUYGEN, H. H. A.: "Laboratory Steam floods in Half of a five-spot". SPE 6171, 51st Annual Meeting, SPE of AIME, New Orleans, Louis, 1976.
23. HUYGEN, H. H. A., LOWRY, W. E.: "Steamflooding Wabasca Tar Sand Through the Bottomwater Zone-Scaled Models Tests", SPEJ (Feb. 1983) 92.
24. INCROPERA F. P., DE WIT D. P.: "FUNDAMENTOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR". PEARSON 1999.
25. JONES J. B., DUGAN R.E.: "Ingeniería Termodinámica". PRENTICE HALL. 1997.
26. JUVINALL C. R.: "Stress, strain and strength". Mc Graw Hill 1967.

27. KIMBER, K. D., FAROUQ ALI, S. M., PUTTAGUNTA, V. R. : "New Scaling Criteria and their Relative Merits for Steam Recovery Experiments" J. Can. Pet. Tech., Vol. 27, No. 4, pp. 86-94, July-Aug. 1988.
28. KIMBER, K. D., FAROUQ ALI, S. M.: "Verification of Scaling Approches for Steam Injection Experiments" J. Can. Pet. Tech., Vol. 28, No. 1, pp. 40-47, Jun-Feb. 1989.
29. KIMBER, K. D., FAROUQ ALI, S. M.: "Scaled Physical Modeling of Steam-Injection experiments", SPE 18751, November 1991.
30. LEVERETT, M. C., LEWIS, W. B., TRAE, M. E.: "Dimensional-Model Studies of Oil-Field Behavior". Trans. AIME (1942) 146, pág. 175.
31. MATTAX C. C., DALTON R. L.: " Reservoir Simulation", Monograph Volume 13 SPE, 1990.
32. MEDINA M.: "Análisis de Sensibilidades de las Variables Presentes en un Piloto vertical de Inyección Continua de vapor de cinco Puntos Utilizando Simulación Numérica de Yacimientos", Tesis de grado UIS 2005.
33. MOTT, R.L.: "Diseño de Elementos de Maquinas" PRENTICE HALL. 1992.
34. MUÑOZ NAVARRO S. F.: "Generalidades de la Explotación del Petróleo". 1986.
35. PUJOL, L. y BOBERG, T. C.: "Scaling Accuracy of Laboratory Steam-flooding Models", SPE 4191". California Regional Meeting of the SPE, Noviembre, 1972.

36. PURSLEY, S. A.: "Experimental Studies of Thermal recovery Processes". Paper Presented at the heavy Oil Symp. Maracaibo, Venezuela.
37. PETERS, M. AND TIMMERHAUS, K.: "Plant design and economics for chemical engineers". McGraw-Hill, inc. 1991.
38. RAPOPORT L. A., Leas, W. J.: "Properties of Linear Waterfloods". Trans AIME (1953) 198, 139.
39. RAPOPORT L. A. "Scaling Laws for Use in Design and Operation of Water-Oil Flow models". Trans AIME (1955) 204.
40. REMOLINA, A., TIBOCHA, F.: "Determinación de los parámetros de escalamiento para modelar físicamente yacimientos de aceite en procesos de recuperación mejorada usando dióxido de carbono o vapor". Tesis de grado UIS-ICP 1992.
41. ROJAS. G. A. AND S. M. F. ALI.: "Dynamics of Subcritical CO₂/Brine Floods for Heavy-Oil Recovery". SPE 13598. 1988. U. de Oriente, U. de Alberta.
42. STEGEMEIER, G. L., LAUMBACH, D. D., VOLEK, C. W.: "Representing Steam Processes with Vacuum Models". SPE 6787. 1980. Shell Oil Co.
43. SHEN, C. W.: "Laboratory Hot Waterfloods Prior to and Following Steamfloods", SPE 18754. Abril de 1989.
44. SKF Catalogo general. Catalogo 5000E. Junio 2003.

45. SANDOVAL ROY, LACAYO JUAN.: “Análisis de sensibilidades para pozos de crudo pesado sometidos a inyección cíclica de vapor mediante la herramienta STARS”, 2003.
46. STARS, ModelBuilder. User guides 2004 y 2005. Computer Modeling Group Ltd.
47. TIMOSHENKO S. P., WOINOWSKY-KRIEGER S. “Theory of Plates and Shells “. McGRAW-HILL, 1959.
48. URIBE J. K., PERALTA R. C. “Estudio del Comportamiento de la Inyección de Agua en las Arenas Inferiores Del Bloque I del Campo Casabe Utilizando Técnicas de Escalamiento“. Tesis de grado, UIS 2000.
49. VASQUEZ CH., L.: “Notas de clase Diseño de Maquinas I”. 2002.
50. www.matweb.com
51. www.isco.com
52. www.otia.com
53. www.ferreteriametro.com.co
54. www.smar.com

ANEXOS

ANEXO A. CALCULO DE LAS RESISTENCIAS DEL CALENTADOR.

Para vapor a 1200 Psi se tiene una temperatura fijada de 560 °F.

Se tiene para estas condiciones $h_f = 571.7 \frac{\text{Btu}}{\text{Lbm}} = 1329.77 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$ y

$$h_g = 1183.9 \frac{\text{Btu}}{\text{Lbm}} = 2753.75 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} .$$

$$v_f = 0.022 \frac{\text{ft}^3}{\text{Lbm}} \text{ y } v_g = 0.36 \frac{\text{ft}^3}{\text{Lbm}}$$

$$h = h_f + X * (h_g - h_f) \tag{132}$$

Para una calidad de $X = 0.6$ se tiene una entalpía de:

$$h = 939.02 \frac{\text{Btu}}{\text{Lbm}} = 2184.16 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

y un volumen específico según la siguiente fórmula:

$$v = v_f + X * (v_g - v_f) \tag{133}$$

de

$$v = 0.23 \frac{\text{Pies}^3}{\text{Lbm}} = 0.014 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}$$

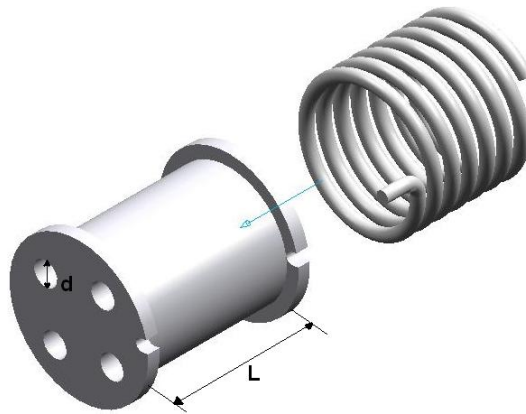
$$\rho = \frac{1}{v} \tag{134}$$

$$\rho = \frac{1}{v} = 70.19 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Esta densidad es para cuando ya se tiene el agua convertida en vapor. Pero se debe llevar de liquido a vapor por lo tanto tomamos una densidad igual a

$$\rho = 1000 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} .$$

Figura A1. Generador de vapor.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G. J. D.

La longitud del cilindro contenedor de las resistencias es de:

$$L = 11.81 \text{pulgadas} = 30 \text{mm} .$$

Son cuatro resistencias y el diámetro de la resistencia es de:

$$d = 0.44\text{pulgadas} = 11.31\text{mm} .$$

$$\text{Para un caudal de } Q = 8 \frac{\text{ml}}{\text{min}} = 1.33\text{e}^{-7} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Con

$$\dot{m} = \rho * Q \tag{135}$$

$$\text{Tenemos: } \dot{m} = \rho * Q = 1.33\text{e}^{-4} \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$$

Realizando un balance de calor:

$$\text{Potencia} = \dot{m} * h \tag{136}$$

Potencia : es la potencia necesaria para evaporar el agua.

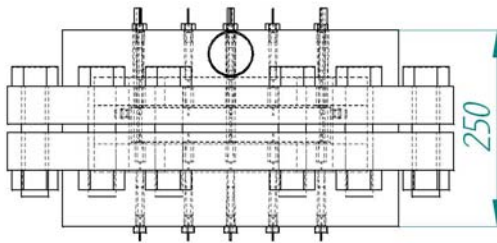
$$\text{Potencia} = 291 \text{ W}$$

Se necesitan 4 resistencias de 291 W para trabajar a 110 V.

ANEXO B. CÁLCULO DEL ESPESOR DEL AISLANTE²⁴

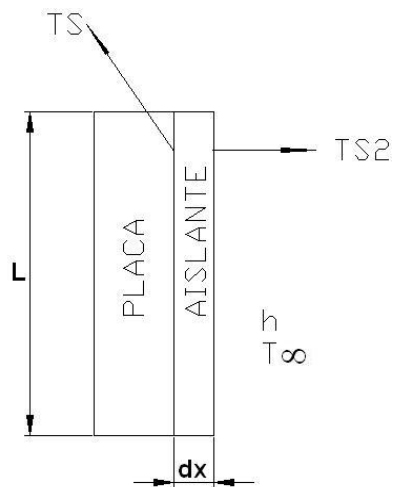
Suponiendo una placa vertical (para una de las paredes del recipiente) con convección libre.

Figura B1. Longitud de la placa.



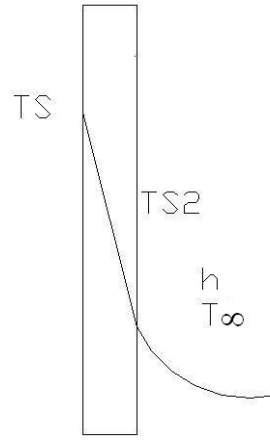
Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G. J. D.

Figura B2. Sistema Placa-aislante.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G. J. D.

Figura B3. Distribución de la temperatura entre aislante y el medio.



Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G. J. D.

Deseamos encontrar el espesor del aislante para recubrir el recipiente y evitar lesiones al personal que lo manipule.

Realizando un balance de calor a la placa de aislante:

$$\frac{K * A * (T_s - T_{s_2})}{dx} = h * A * (T_{s_2} - T_{\infty}) \quad (137)$$

Para hallar el coeficiente de transferencia de calor para el ambiente se utilizan las correlaciones empíricas desarrolladas para geometrías comunes inmersas (flujo externo). Las correlaciones son adecuadas para los cálculos de ingeniería y por lo general son de la siguiente forma:

$$\text{Número de Nusselt: } \overline{NuL} = \frac{\bar{h} * L}{K} = C * RaL^n \quad (138)$$

donde el número de Rayleigh es:

$$RaL = GrL * Pr = \frac{g * \beta * (Ts - T_{\infty}) * L^3}{\nu * \alpha} \quad (139)$$

Se basa en la longitud característica L de la geometría. Teniendo en cuenta que:

$g =$ Es la gravedad, $\frac{m}{s^2}$.

$\beta =$ Es el coeficiente de expansión térmica, $\frac{1}{K}$.

$T_s =$ Es la temperatura de superficie de la parte de la placa en contacto con el medio convectivo, K.

$T_{\infty} =$ La temperatura del medio convectivo, K

$\nu =$ Es la viscosidad cinemática, $\frac{m^2}{s}$

$\alpha =$ Es la difusividad térmica, $\frac{m^2}{s}$

Normalmente $n = \frac{1}{4}$ y $\frac{1}{3}$ para flujos laminar y turbulento respectivamente. Se debe tener en cuenta que todas las propiedades se evalúan a temperatura de película

$$T_f = \frac{T_s + T_{\infty}}{2} \quad (140)$$

Para una placa vertical se recomienda el uso de la siguiente correlación:

$$NuL = 0.68 + \frac{0.67 * RaL^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{9}}} \quad \text{Para } RaL \leq 10e9 \quad (141)$$

Estos resultados se obtienen para una placa isotérmica.

Los valores de las variables anteriores son:

$$g = 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{ es la gravedad}$$

Se desea tener una temperatura de superficie máxima de $T_{s2} = 40^\circ\text{C} = 313\text{K}$

El medio es aire con una temperatura de $T_\infty = 14^\circ\text{C} = 287\text{K}$

De la ecuación 140 la temperatura de película es: $T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} = 300\text{K}$

El coeficiente de expansión térmica: $\beta = \frac{1}{T_f} = 0.00333 \text{ 1/K}$

Longitud representativa de la placa: $L = 9.84\text{pulgadas} = 250\text{mm}$ según se aprecia en la figura 102.

De tablas, para el aire a la temperatura de película:

$$\nu = 1.59\text{e} - 5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\alpha = 2.25\text{e} - 5 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

La conductividad del aire es: $K = 2.63\text{e} - 2 \frac{\text{W} * \text{m}}{\text{K}}$

El número de Prandtl es $Pr = 0.707$

Según estos datos en la ecuación 139 el número de Rayleigh es

$$Ra_L = 37156492.6$$

Puesto que $Ra_L \leq 10e9$

Según la ecuación 141 el número de Nusselt es: $Nu_L = 40.81$

Despejando h de la ecuación 138: $\bar{h} = 4.29 \frac{W}{m^2 * K}$

La conductividad del uretano es: $K_{uretano} = 0.026 \frac{W}{m * K}$

De la ecuación 107 para el balance de calor se despeja el espesor del aislante necesario:

$$dx = 2.32 \text{pulgadas} = 0.059 \text{m}$$

ANEXO C. COSTOS DEL EQUIPO

Tabla C.1. Costo del equipo (bomba ISCO)

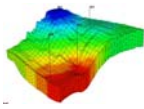
DISEÑO DE UN EQUIPO DE DESPLAZAMIENTO RADIAL PARA SIMULAR PROCESOS DE RECOBRO MEJORADO	
PRESUPUESTO CON BOMBA MARCA ISCO	
DESCRIPCIÓN	VALOR
Ingeniería	36,000,000
Técnicos	6,000,000
Back Pressure	12,430,000
Bomba ISCO	112,167,000
Bomba manual ENERPAC	4,400,000
Chumaceras	423,170
Codos	136,400
Componentes Automatización	29,605,136
Conectores Pozos	198,000
Conectores Termocuplas	1,408,000
Cilindros Free piston	8,360,000
Gato hidráulico	160,600
Lámina metálica y varillas guía	354,640
Manómetros calibrados	2,585,000
Perfiles y soldadura de ellos	1,738,572
Pernos (espárragos y tuercas)	572,374
Pozos	330,000
Porta núcleos (Material)	29,906,888
Porta núcleos (Maquinado)	20,462,400
Resistencias del calentador	74,800
Sello	385,000
Sensor Dif. de Presión Smart	6,600,000
Sistema de Confinamiento	495,000
Transmisión mvto.	297,000
Tubing 1/8 in y válvulas	9,253,200
Subtotal	284,697,820
Imprevistos	34,163,738
TOTAL	318,861,558

Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.

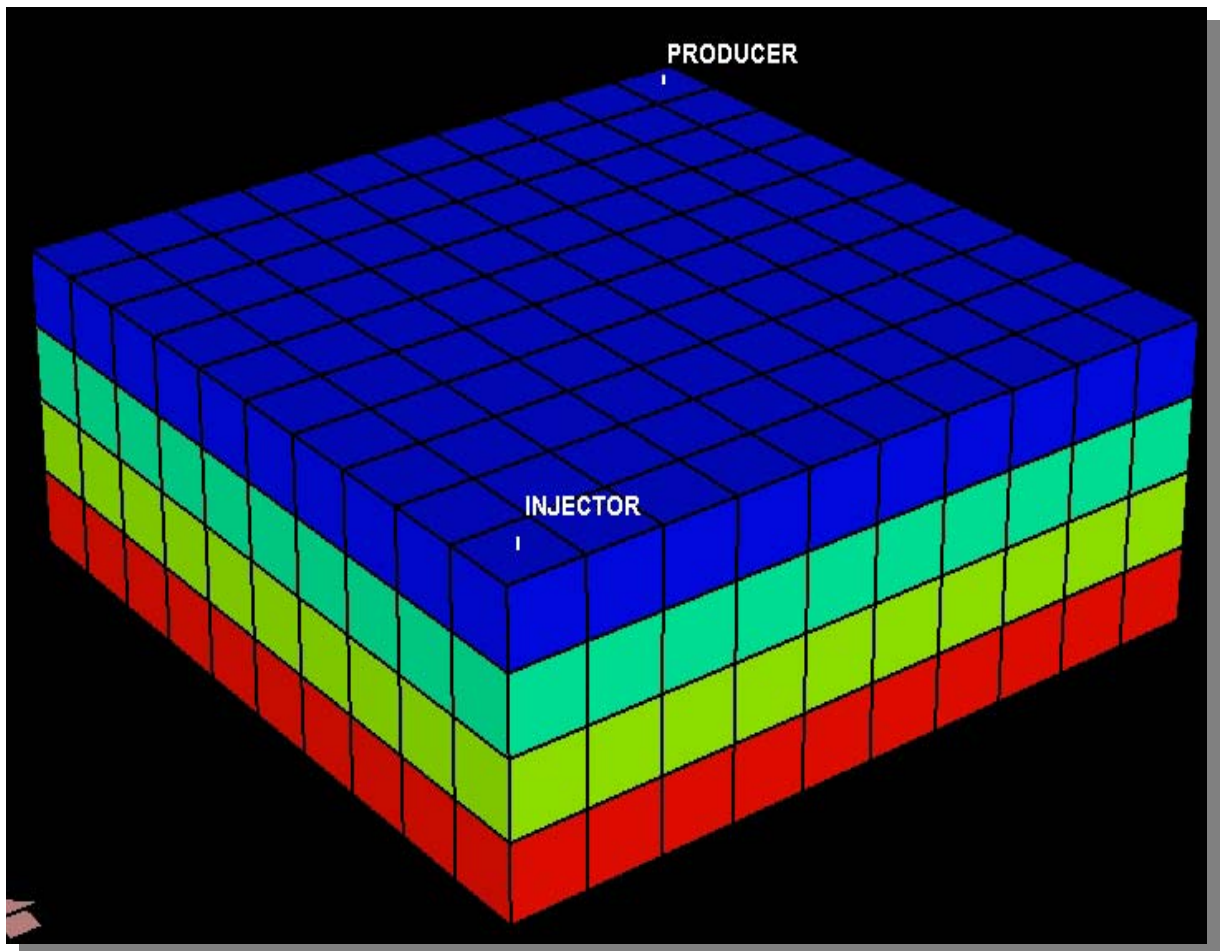
Tabla C.2. Costo del equipo (bomba GILSON)

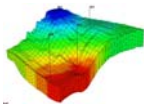
DISEÑO DE UN EQUIPO DE DESPLAZAMIENTO RADIAL PARA SIMULAR PROCESOS DE RECOBRO MEJORADO	
PRESUPUESTO CON BOMBA MARCA GILSON	
DESCRIPCION	VALOR
GASTOS ADMINISTRATIVOS	
Ingeniería	36,000,000
Técnicos	6,000,000
Back Pressure	12,430,000
Bomba GILSON	19,940,800
Bomba manual ENERPAC	4,400,000
Chumaceras	423,170
Codos	136,400
Componentes Automatización	29,605,136
Conectores Pozos	198,000
Conectores Termocuplas	1,408,000
Cilindros Free piston	8,360,000
Gato hidráulico	160,600
Lámina metálica y varillas guía	354,640
Manómetros calibrados	2,585,000
Perfiles y soldadura de ellos	1,738,572
Pernos (espárragos y tuercas)	572,374
Pozos	330,000
Porta núcleos (Material)	29,906,888
Porta núcleos (Maquinado)	20,462,400
Resistencias del calentador	74,800
Sello	385,000
Sensor Dif. de Presión Smart	6,600,000
Sistema de Confinamiento	495,000
Transmisión mvto.	297,000
Tubing 1/8 in y válvulas	9,253,200
Subtotal	192,471,620
Imprevistos	23,096,594
TOTAL	215,568,214

Fuente: LONDOÑO G., F. W.; LESMES G., J. D.



ANEXO D. GUIA DE SIMULACIÓN PROCESOS DE INYECCIÓN DE VAPOR (MODELOS DE LAB) STARS – CMG versión 2004.10 y 2005.13






INTRODUCCIÓN

La presente guía de simulación esta enfocada a procesos de inyección de vapor (**modelos de laboratorio**). Esta guía esta orientada a personas con conocimientos básicos en simulación de yacimientos, su estructura proporciona una herramienta muy útil, puesto que proporciona los pasos básicos para realizar simulaciones los parámetros más influyentes en un proceso de inyección de vapor. Se aconseja acudir a los manuales profesionales de simulación incorporados en el simulador CMG (*Technologies launcher/help...* o ubicando los manuales en la siguiente dirección, **archivos de programa/CMG/STARS/2004.10/st2004sp.**) en caso de querer ingresar datos extras a la simulación o tener dudas en el funcionamiento de alguna sección.

D.1. INICIO DE LA PLATAFORMA DE LANZAMIENTO (TECHNOLOGIES LAUNCHER)



Haga doble clic en el icono de **CMG** , o en el menú de programas del computador donde esta instalado el simulador, seleccione la carpeta **CMG** y luego haga clic en **Launcher 2004.10**. A continuación se abrirá el **Technologies Launcher** (ver figura D.1), la plataforma que sirve de enlace a los diferentes simuladores, pre-procesadores y post-procesadores que conforma la familia **CMG**, y que a la vez funciona como directorio de proyectos. Mediante esta interfase grafica usted podrá manipular los archivos de proyectos usados en la simulación y los generados por el simulador e iniciar las simulaciones.

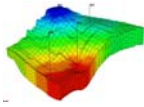
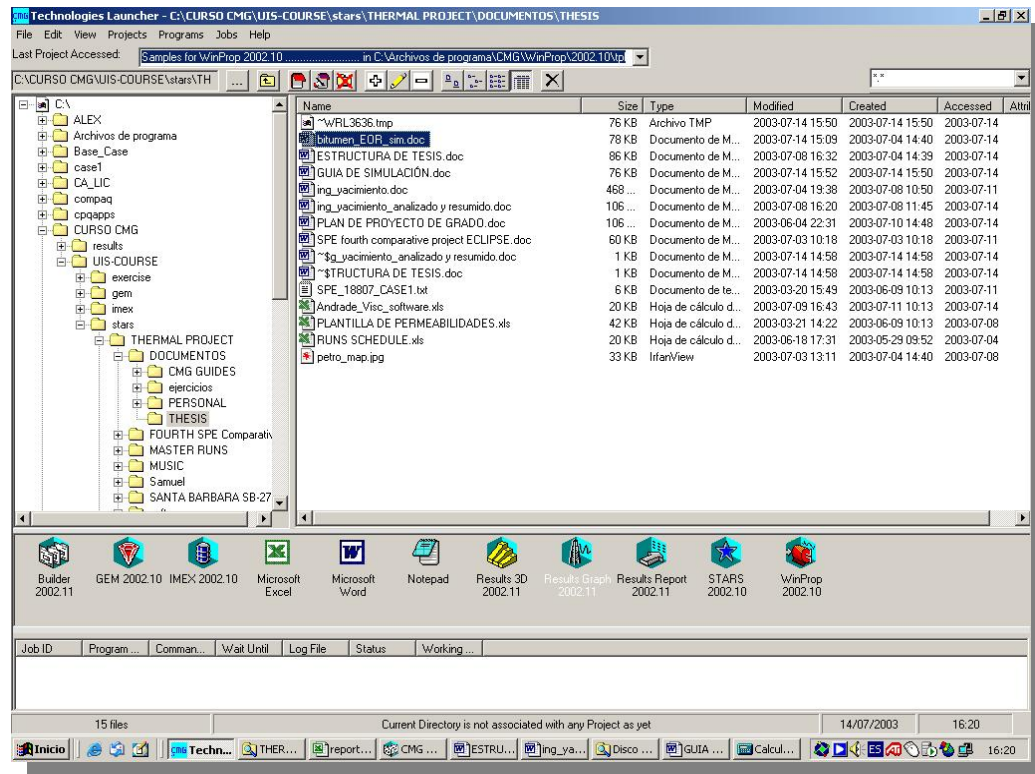



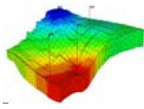
Figura D.1. Entorno grafico del Technologies Launcher 2004.10.



Fuente: Simulador CMG.

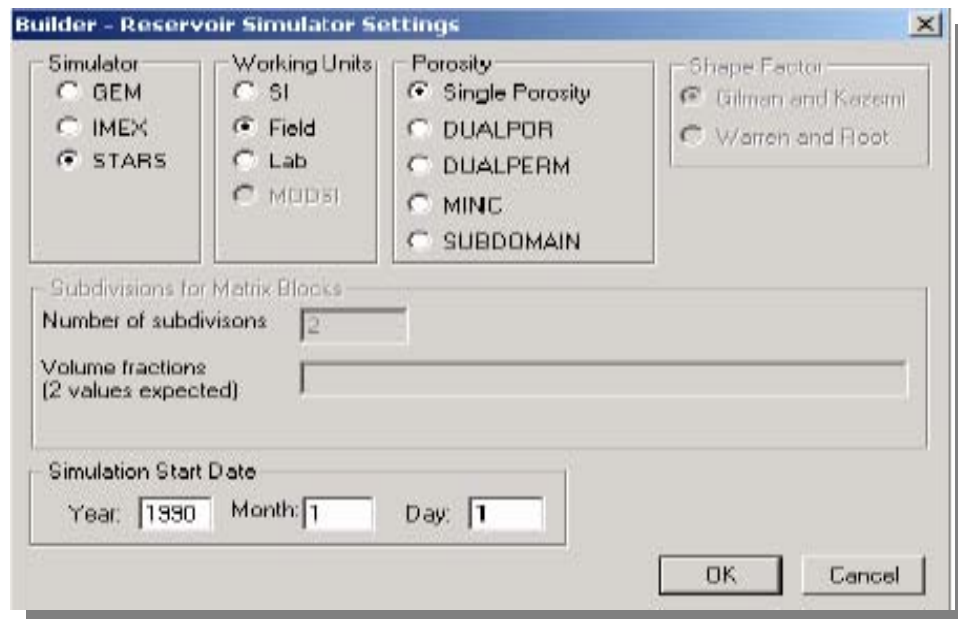
D.2. CREACIÓN DE UN NUEVO ARCHIVO DE SIMULACION.

Haga doble clic en el icono de **Modelbuilder**  (constructor del modelo), se desplegara una ventana (ver figura D. 2), la cual permite escoger el tipo de simulador a utilizar, en nuestro caso Stars, el tipo de unidades a utilizar (unidades internacionales, SI, unidades de campo, field y unidades de laboratorio, lab), la porosidad (con ella se especifica si se modela un yacimiento normal o uno fracturado) y la fecha de inicio de del proceso de simulación.



Seleccione el simulador **STARS**, unidades de campo laboratorio (**lab field**), y un sistema de porosidad normal (**single porosity**). Ingrese el año, mes y día en que comienza la simulación.

Figura D.2. Ventana para la configuración del simulador.



Fuente: Simulador CMG.

A continuación se desplegará una ventana (ver figura D. 3), la cual muestra todos los ítems seleccionados y advierte que una vez seleccionados no se podrán realizar cambios. Haga clic en **OK**.

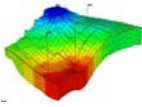
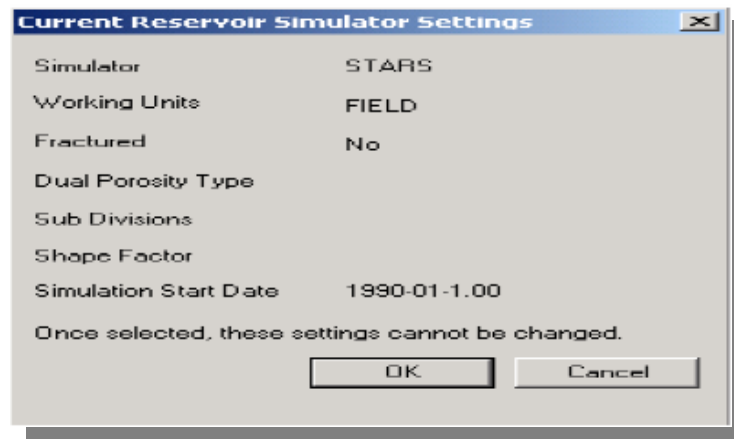


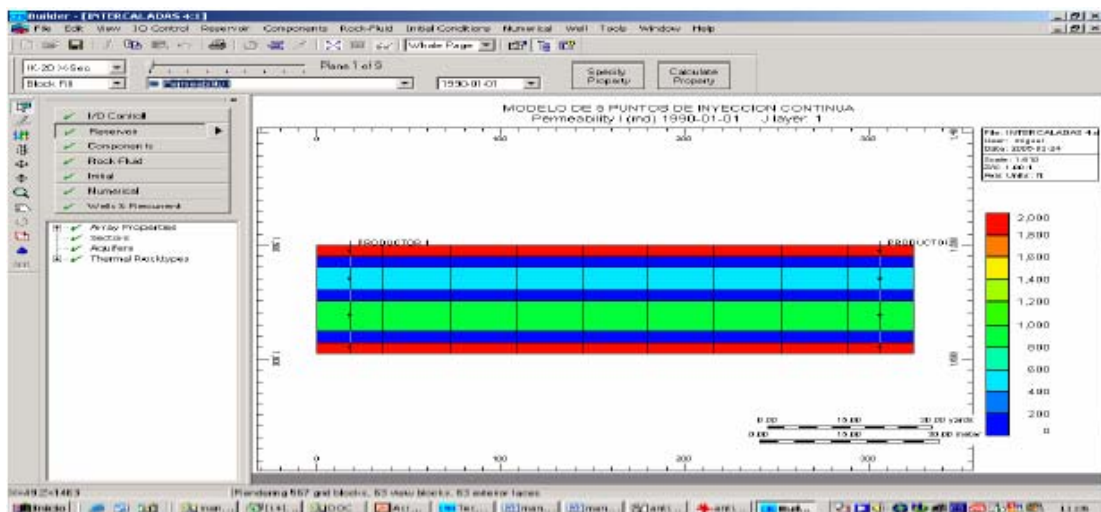
Figura D.3a. Ventana para la configuración actual del simulador.



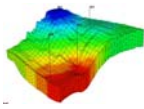
Fuente: Simulador CMG.

El simulador ingresa automáticamente a la sección **modelbuilder**, la cual contiene la ventana principal en ella aparecen siete secciones.

Figura D.3b. Ventana principal del Modelbuilder.



Fuente: Simulador CMG.

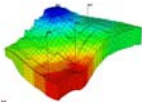


D.3. INGRESO DE DATOS EN EL MODELUILDER.

Básicamente el *ModelBuilder* está dividido en siete secciones, dos son opcionales (*Input/Output Control* y *Numerical Methods Control*, pero algunas veces es necesario configurarlas, tal es el caso de los modelos de laboratorio), las otras cinco son fundamentales y constituyen el cuerpo de nuestra simulación.

Las siete secciones son:

- ***Input/Output Control (Control de entradas y salidas)***. Define los parámetros que controlan las actividades de entrada y salida del simulador, tales como nombres de archivos, unidades, títulos, selecciones y frecuencia con la que éstas se escriben tanto al archivo de salida como al archivo SR2, y control de reinicio. No hay palabras claves requeridas u obligatorias en esta sección. Cada palabra clave cuenta con un valor por defecto que se puede emplear.
- ***Reservoir description (Descripción del yacimiento)***. Se define las características geométricas del grid a utilizar y se ingresan las características generales de la formación, como son porosidad, acuíferos, permeabilidad, propiedades térmicas y compactación entre otras. También se pueden definir la gran mayoría de condiciones iniciales en el yacimiento como son temperatura, presión y saturaciones entre otras. Esta sección está enlazada al ***Gridbuilder***, que es el pre-procesador que nos ayudara a modelar la geometría de nuestro yacimiento. Se escoge el sistema de coordenadas en las cuales se trabajara, se cuenta con las opciones de enmallado cartesiano, radial, de profundidad y espesor variable y enmallado tipo puntos de esquina.
- ***Component properties (Propiedades de los componentes)***. En esta sección se definen los componentes que constituyen nuestro fluido, al igual que sus propiedades físicas y termodinámicas.



- **Rock-fluid data (Propiedades del sistema roca-fluido).** Se definen las propiedades de interacción del sistema roca – fluido y se generan las tablas de saturación.
- **Initial conditions (Condiciones iniciales).** Especifica las condiciones iniciales para la simulación.
- **Numerical Methods Control (Control por métodos numéricos).** Se definen los parámetros que controlan las actividades numéricas del simulador, tales como intervalos de tiempo, la solución iterativa de ecuaciones de flujo no lineales y la solución del sistema de ecuaciones lineales que se produce.
- **Well and recurrent data (Datos de pozos y datos recurrentes).** Se definen las propiedades de los pozos involucrados en la simulación y sus restricciones de operación. En esta sección también se diseña el cronograma de eventos (fechas de inyección, cierre de pozos, inicio de producción, entre otras).

Se ingresa a cada sección haciendo clic en su respectivo botón. Para realizar una simulación, se recomienda completar cada sección en el orden en que aparecen, pues algunas dependen de la anterior. El simulador le indica de la siguiente manera el estado de las diferentes secciones.



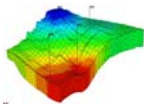
Indica cuando una sección se ha completado correctamente y no se generaran errores en la simulación. Una simulación podrá llevarse a cabo cuando todas las secciones se encuentren con este símbolo.



Indica cuando una sección no se ha completado, pues hacen falta datos básicos por ingresar en la sección.

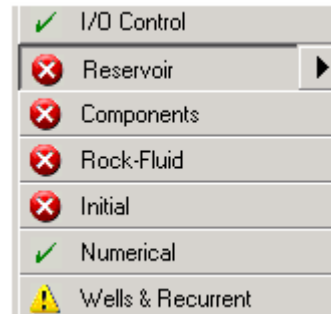


Indica cuando a una sección le hace falta información o la información o la información ingresada no es la adecuada, esto podría ocasionar fallas en la



simulación. Es un mensaje de alerta y se aconseja reevaluar la información contenida en ella.

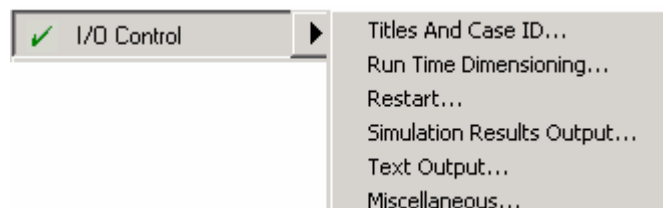
Figura D.4. Principales secciones para la construcción del modelo.



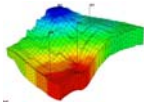
Fuente: Simulador CMG.

D.3.1 Input/output control (Control de entradas y salidas). En esta sección se genera la identificación del proyecto. Esta dividido en seis secciones, **Titles and case ID, Run Time Dimensioning, Restart files, Simulation Results Output files, Text Output, Miscellaneous**. Para ingresar a cada sección haga clic en la pestaña correspondiente, como se muestra en la figura D.5.

Figura D.5. Menú de la sección de entradas y salidas.



Fuente: Simulador CMG.



A continuación se describen cada uno de estos ítems.

D.3.1.1 Titles and case ID (Nombre y numeración de la corrida). En ella aparecen tres cuadros de texto, mediante estos podrá ingresar el nombre, una breve descripción del modelo, esto servirá como identificador durante la corrida.

D.3.1.2 Run Time Dimensioning. Esta sección se activa en caso tal que los parámetros que vienen por defecto en el simulador no sean suficientes. El dimensionamiento en Stars esta diseñado para obtener toda la información necesaria para la asignación del yacimiento de un barrido preliminar de los datos como parámetros para la solución de matrices, conexiones entre bloques.

D.3.1.3 Restart (Reinicio). Se usa cuando se cuenta con un modelo ya elaborado en el cual se elige un tiempo para reiniciar la simulación.

D.3.1.4 Simulation Results Output files (Resultados de la salida de la simulación). Aquí se selecciona las propiedades que serán reportadas en los archivos de resultados de la simulación (Temperatura, viscosidades, saturaciones, perdidas de calor, entre otras). Estos archivos serán cargados en **Results Graph** y **Results 3D** para generar las graficas y animaciones de las propiedades escogidas. Haga clic en **Simulation Results Output files**, a continuación aparecerá la siguiente ventana igual a la de la figura D.6.

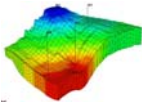
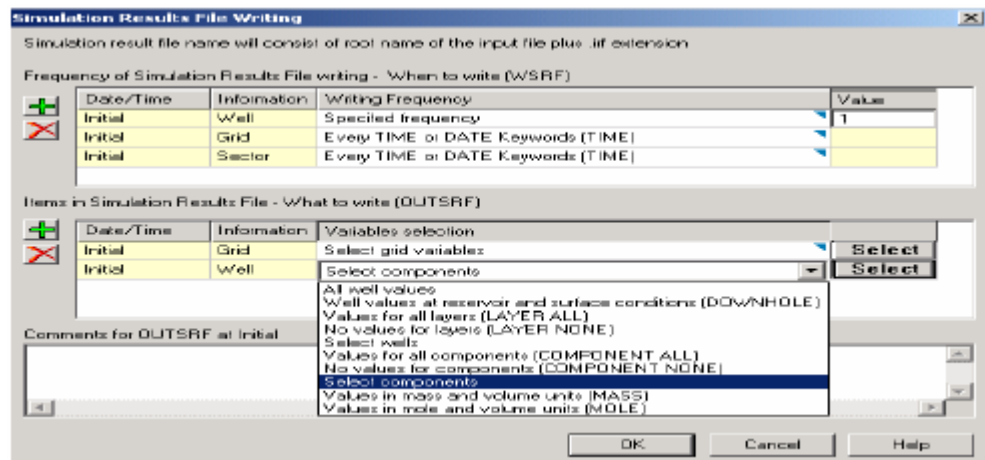


Figura D. 6. Ventana de selección de datos reportados en los archivos de salida.



Fuente: Simulador CMG.

En las casillas **Well information**, **Grid information** y **Sector information**, en **Writing Frequency**, escoja **Specify frequency**. En la casilla **value**, escriba 1. Con esto le solicitamos al simulador que nos genere reportes del pozo, del grid y del sector a cada **time step** (paso de tiempo).

D.3.1.5 Text Output (Texto de salida). En esta sección se seleccionan las variables que estarán presentes en los archivos de salida, estas variables se seleccionan al hacer clic en **select**, una ventana se desplegará mostrando la ventana **simulation results file**, en donde se encuentran todas las variables que presenta el simulador (ver figura D.7).

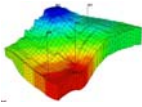
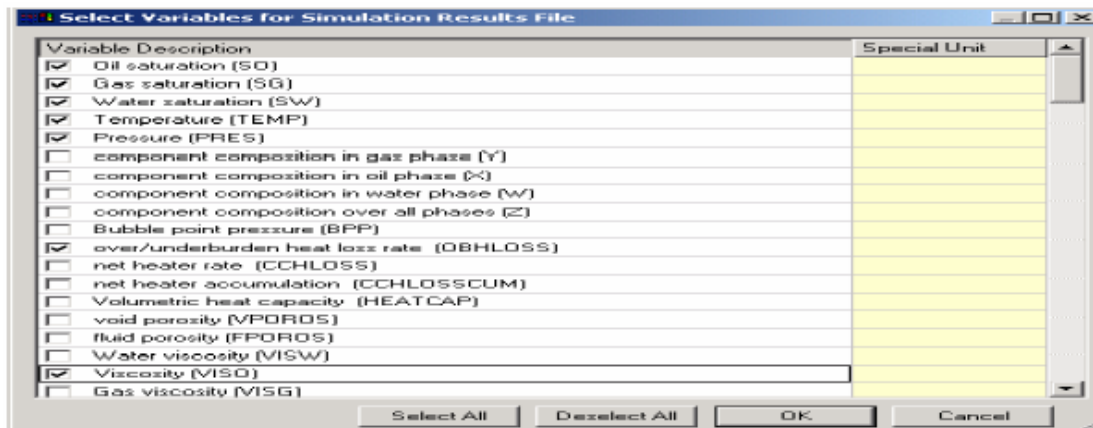


Figura D.7. Ventana de selección de variables de salida.

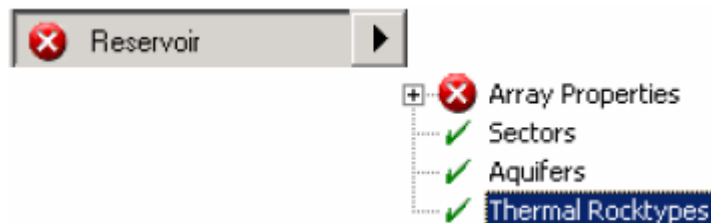


Fuente: Simulador CMG.

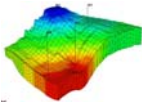
D.3.1.6 Miscellaneous (Varios). En esta sección se selecciona la tolerancia de los errores y la acción a tomar.

D.3.2 Reservoir description (Descripción del yacimiento). En esta sección se configura la geometría del enmallado de simulación y la distribución de algunas propiedades fundamentales en los bloques que componen el enmallado así como las propiedades térmicas.


Figura D. 8. Menú de propiedades del yacimiento.



Fuente: Simulador CMG.

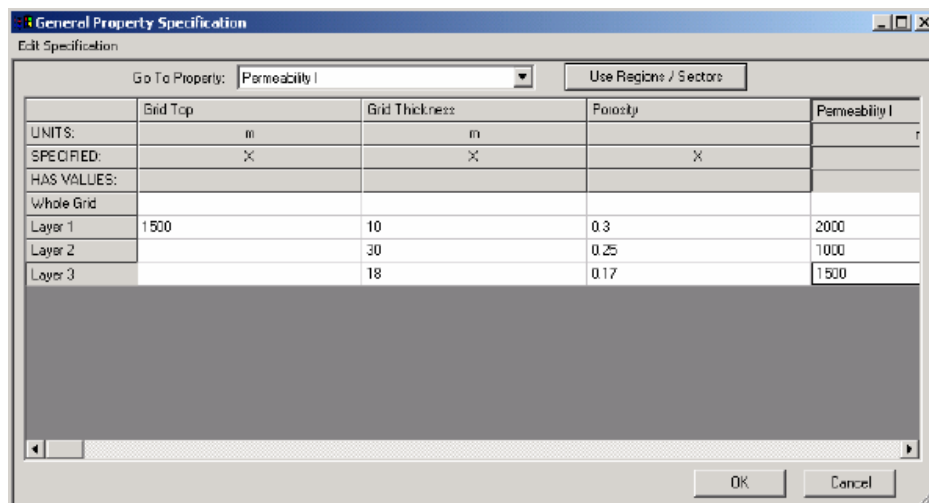


D.3.2.1 Array properties (Propiedades del modelo). En esta sección se definirán algunas de las propiedades del yacimiento como tope de la formación permeabilidad, porosidad, espesores brutos y netos, temperatura, presión, saturaciones de los fluidos contenidos en el yacimiento, entre otras. Como se observa en la figura D.9.

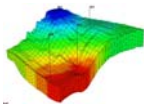
Después de ingresar los valores de las propiedades, haga clic en **OK**, seleccione , esto activará la opción de para calcular la distribución de las propiedades anteriormente definidas a lo largo del yacimiento. Aparecerá una ventana con el encabezado **Block/Corner Value calculation** y una lista de las propiedades calculadas. Haga clic en **OK**. Inmediatamente, aparecerá una vista areal de su modelo.

D.3.2.2 Sectors (Sectores). Se crean sectores que poseen las mismas características, como por ejemplo sectores que posean el mismo valor de porosidad.

Figura D.9. Propiedades generales del yacimiento.



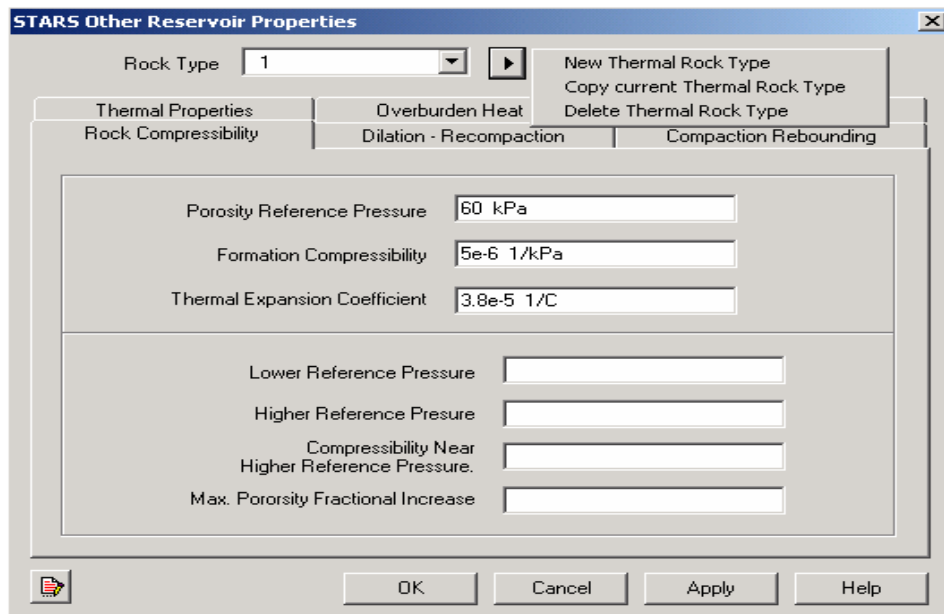
Fuente: Simulador CMG.




D.3.2.3 Acuífers (Acuífero). Se utiliza para crear acuíferos que generen un empuje sobre los hidrocarburos contenidos en el yacimiento, y para mantener la presión del mismo.

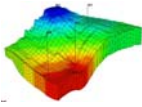
D.3.2.4 Thermal Rocktypes (Propiedades térmicas de la roca). Al ingresar aparece una ventana en la cual se introducen los valores de conductividad, compresibilidad, capacidad calorífica de la roca generadora y adyacente, como lo muestra la figura D.10.

Figura D.10. Otras propiedades del yacimiento.




Fuente: Simulador CMG.

Para ingresar un nuevo tipo de roca, se hace clic sobre , desplegando un menú, se selecciona **New thermal rock types** para activar todas las casillas de las seis pestañas, introduzca los datos necesarios y pulse **OK**, estas secciones son:



- **Rock compressibility (compresibilidad de la roca).** Aquí se debe especificar la **Porosity referente pressure** (presión de referencia) y **Formation compressibility (compresibilidad de la formación)**, pulse **Apply**.
- **Thermal properties (Propiedades térmicas de la roca).** En la primera casilla, **Volumetric heat capacity**, ingrese el valor de capacidad calorífica volumétrica de su yacimiento. En la casilla **Reservoir rock** ingrese el valor de conductividad térmica de la roca. Si desea puede ingresar las conductividades térmicas para las fases componentes, aunque no es necesario (es opcional), pulse **Apply**.
- **Overburden heat loss (Perdidas de calor a formaciones adyacentes).** Si desea tener en cuenta las pérdidas de calor hacia as formaciones adyacentes a su yacimiento, haga clic en **Overburden heat loss** e ingrese los valores de capacidad calorífica volumétrica y conductividad térmica de las formaciones inferior y superior(es opcional), pulse **Apply**.

Después de todo este proceso debe aparecer , para la opción de **reservoir**, indicando que se ha completado con éxito esta etapa.

D.3.3 Components (Propiedades de los componentes). A continuación deberá crear los componentes de su fluido y definir la fase en la que se encuentran cada uno de estos. Observe la figura D.11.

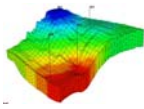
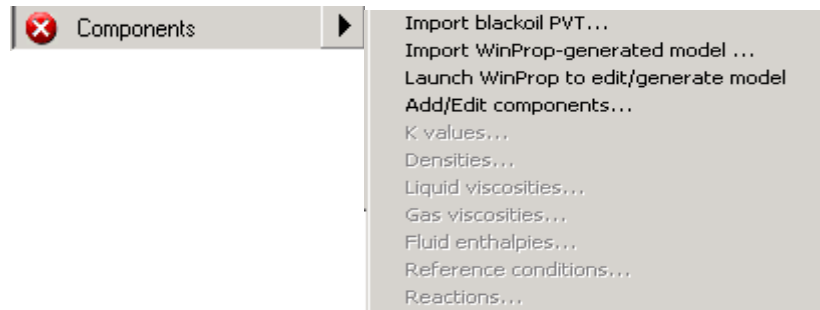


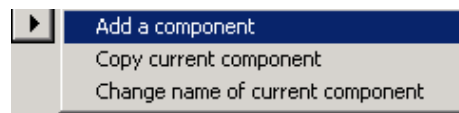
Figura D. 11. Pasos para la adición de un componente.



Fuente: Simulador CMG.

Al hacer clic en **components** se despliega el menú de componentes, seleccione **Add/Edit components** y en la ventana que aparece a continuación (figura D. 12), **component and phase properties** pulse el icono **Add/Edit components**, se abre la ventana **component definition**, se puede introducir el componente manualmente de la siguiente manera, especifique la fase de referencia y las otras fases en las que puede estar presente el componente.

Figura D. 12. Adición de componentes en forma manual.



Fuente: Simulador CMG.

Otra opción es seleccionar un componente de la lista de componentes presentes en el software (Figura D. 13.), selecciónelo y pulse **OK**.

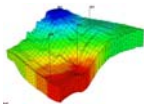
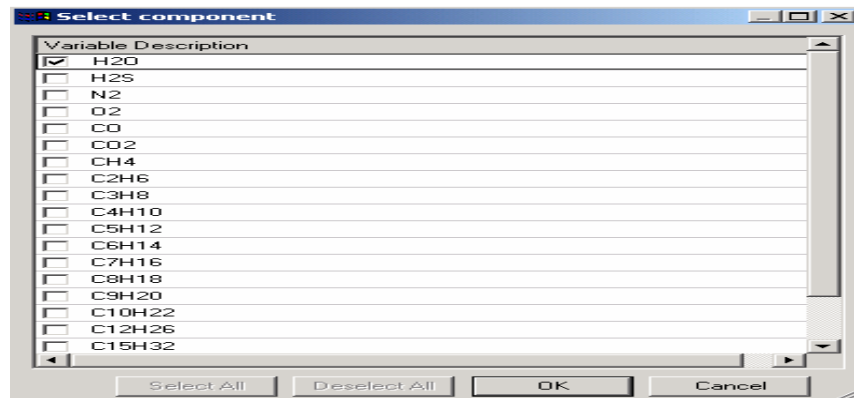


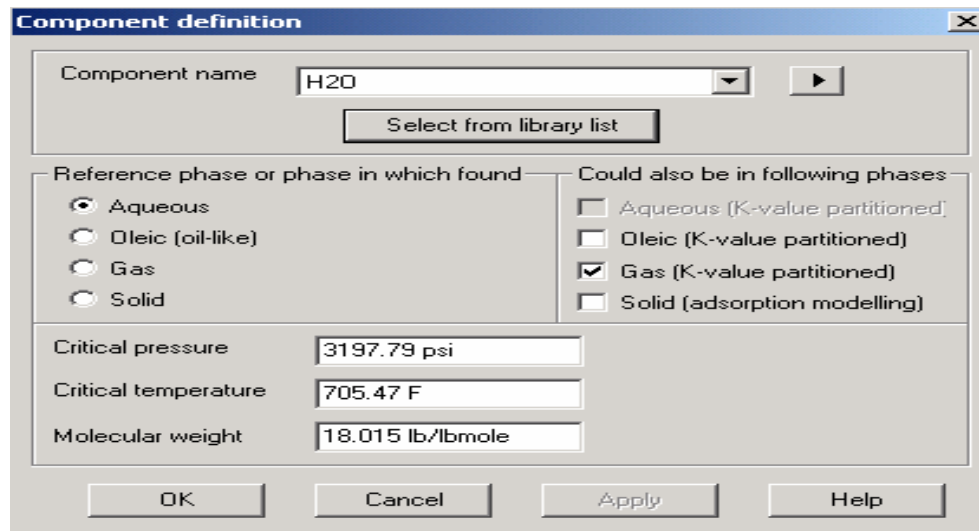
Figura D. 13. Selección de los componentes de cada fluido.



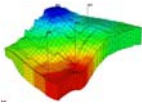
Fuente: Simulador CMG.

Seleccione la fase de referencia del componente y las otras fases en que puede estar presente, ingrese los valores de presión, temperatura crítica y el peso molecular del componente, como se muestra en la figura D.14, y pulse **OK**.

Figura D. 14. Definición de los componentes.

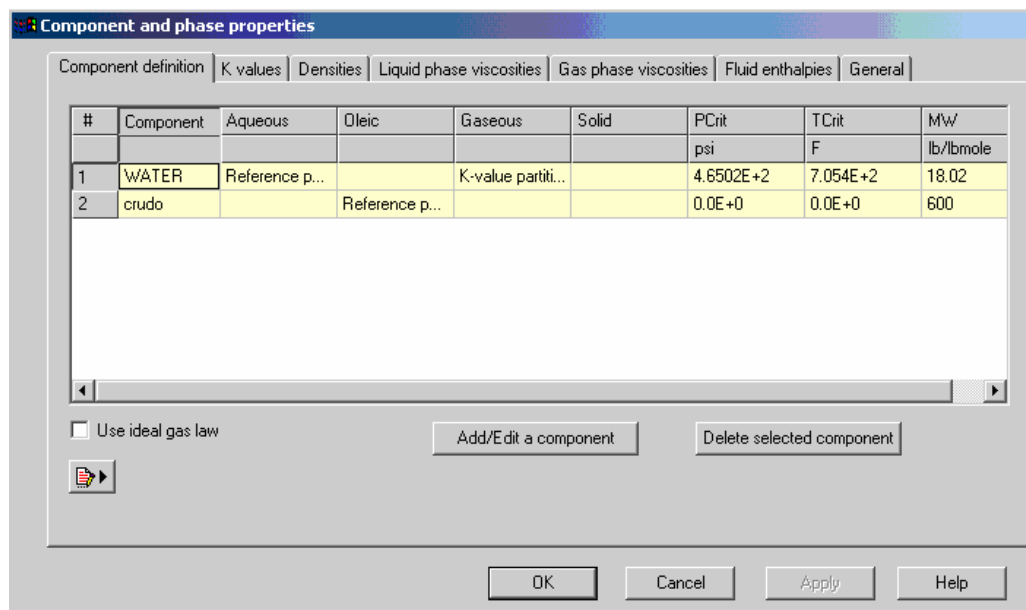


Fuente: Simulador CMG.



A continuación aparecerá una ventana como la figura D.15, en la cual se proporciona información de cada componente seleccionado, sus propiedades y la fase en que se encuentra cada uno de ellos, pulse **OK**, para guardar los cambios realizados.

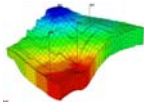
Figura D. 15. Componentes y fases de cada componente.



Fuente: Simulador CMG.

D.3.3.1 Densidades. Haga clic en la pestaña **Component densities**. Ingrese los valores de densidad para el agua y el crudo. La compresibilidad y los coeficientes de expansión térmica se pueden considerar opcionales. Para guardar los cambios haga clic en **Apply**.

D.3.3.2 Viscosidad. Haga clic en la pestaña **Viscosity**. En la sección **Liquid Viscosity**, asegúrese de que este seleccionada la siguiente opción:



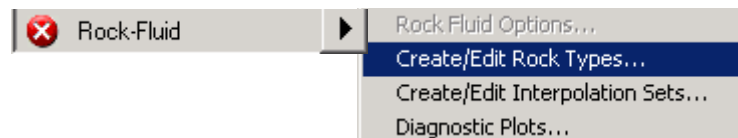
- ✓ Use *Viscosity table*.

En la tabla de viscosidad ingrese los valores de viscosidad para el crudo a la respectiva temperatura y deje los valores del agua en cero. El simulador por correlaciones internas asignará valores de viscosidad para el componente acuoso.

D.3.3.3 Condiciones de referencia. Haga clic en la pestaña **Reference conditions**. Aquí usted se definirá las condiciones de referencia para las propiedades de los fluidos que fueron reportadas en esta sección y las condiciones en superficie del campo.

D.3.3.4 Rock–Fluid (Propiedades del sistema roca-fluido). Haga clic en **rock-fluid**, para crear el tipo de roca (figura D. 16). Se desplegará una ventana (figura D.17), por defecto el tipo de roca que cree primero será 1.

Figura D. 16. Pasos para la creación de un nuevo tipo de roca



Fuente: Simulador CMG.

Pulse sobre **new rock type** para activar todas las opciones (figura D.17). En la pestaña (**Rock properties**) verifique que estén seleccionadas las siguientes opciones

- ✓ *Water wet*.
- ✓ *Stone second model*

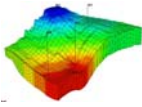
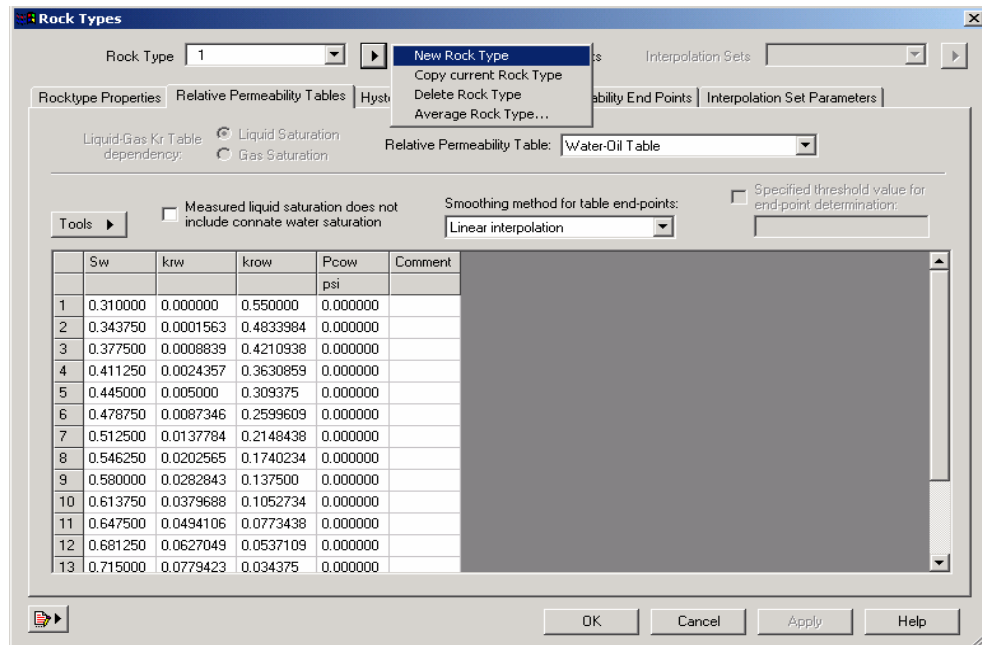


Figura D. 17. Ventana de tablas de permeabilidad relativa.



Fuente: Simulador CMG.

Después de verificar esto, en la pestaña **relative permeability tables**, ingrese los valores de la tabla permeabilidad relativa, saturaciones.

D.3.3.5 Initial (condiciones iniciales). En esta sección se genera una región de inicio, la cual consta de varias celdas las cuales comparten parámetros de inicio, como lo son: Presión inicial, profundidad de referencia, contactos agua/petróleo y petróleo/gas. Diferentes regiones de inicio son usadas cuando el problema presenta varias zonas productoras independientes.

Haga clic en **initial**, aparece la opción **initialization settings (configuración de inicio, figura D.18)**, que hace que aparezca la ventana en donde se introducen los valores de las condiciones iniciales (figura D.19).

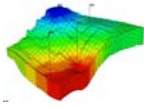


Figura D. 18. Menú para seleccionar los valores de las condiciones iniciales.



Fuente: Simulador CMG.

D.3.5.1 Vertical equilibrium calculation methods (Métodos de calculo del equilibrio vertical). Seleccione la opción **Depth average capillary-gravity method**. De esta forma se activara el cálculo automático de la distribución de saturaciones iniciales en la región de inicio, con base a la profundidad de los contactos, la presión capilar y el gradiente de presión de cada una de las fases. Para guardar los cambios, haga clic en **OK**.

D.3.5.2 Init. Region parameters. En el cuadro de texto ingrese los valores para la profundidad y la presión de referencia, la profundidad del contacto agua–aceite y el valor de la saturación de agua bajo el contacto agua–aceite (SWOC), cada uno de los cuales se describe a continuación.

D.3.5.2.1 Presión inicial. Ingrese la presión de referencia o presión inicial de su yacimiento y la profundidad a la que esta dada esa presión. Este punto de inicio (presión, profundidad) puede estar ubicado en cualquier punto de la zona productora.

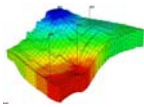
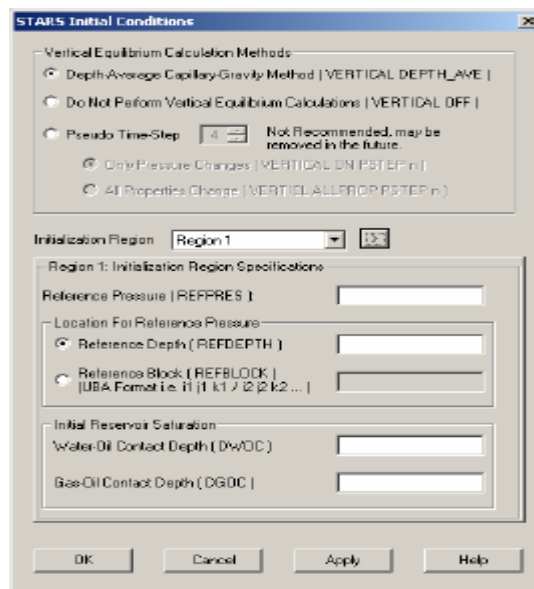


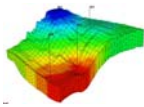
Figura D.19. Ventana de ingreso de las condiciones iniciales.



Fuente: Simulador CMG.

D.3.5.2.2 Contactos agua-petróleo y petróleo-gas. Ingrese las profundidades a las que se encuentran los contactos agua/petróleo y petróleo/gas. Estos valores son necesarios solo si una capa de gas o una zona de agua se encuentran dentro de la región de inicio. Las saturaciones iniciales de agua y gas en la región de inicio son asignadas de acuerdo a la profundidad de los contactos.

D.3.6 Numerical (métodos numéricos). Se definen los parámetros que controlan las actividades numéricas del simulador, tales como los intervalos de tiempo, la solución iterativa de ecuaciones de flujo no lineales y la solución del sistema de ecuaciones lineales que se produce. Este ítem es opcional, pero se modificó para el diseño del modelo de inyección de vapor. Contiene tres subsecciones: **time step control, solution method control, and linear solver control**. Haga clic en **numerical**, se desplegará una ventana similar a la figura D. 20. Ingrese un valor de 0.144 min en DTWELL, esto le indica al simulador que



cambie el valor por defecto que el usa y lo reemplace por 0.144 min, este es el Tamaño del intervalo de tiempo inmediatamente después de un tiempo de referencia, puede ser el de inicio de la simulación. Después ingresar un valor 100 Kpa, esto es para que el simulador realice un cambio normal de presión (kPa). El rango sugerido es de 100 kPa a 2000 kPa.

Figura D 20. Ventana de ingreso de las condiciones iniciales.

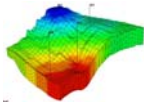
Keyword Description	Default Value	Dataset Value	Set At Time
Timestep Control Keywords			
Maximum Number of Timestep (MAXSTEPS)			
Maximum Time Step Size (DTMAX)	365 day	32 day	
Minimum Time Step Size (DTMIN)	0.001 day		
Maximum CPU Seconds (MAXCPU)			
Normal Variation per Timestep (NORM)			
Pressure (PRESS)	435.113 psi		
Saturation (SATUR)	0.1		
Bubble Point Pressure (PBUB)	435.113 psi		
Dew Point Pressure (PDW)	1450.38 psi		
Maximum Changes per Timestep (MAXCHANGE)			
Pressure (PRESS)	126.216 psi		
Saturation (SATUR)	0.2		
Bubble Point Pressure (PBUB)	126.216 psi		
Dew Point Pressure (PDW)	420.719 psi		

Comments

OK Cancel Apply Help

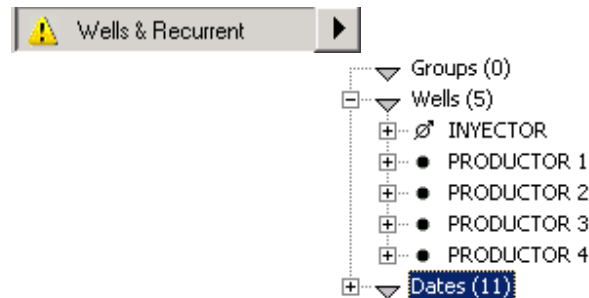
Fuente: Simulador CMG.

D.3.7 Well & recurrent (Datos de pozo y datos recurrentes). Desde esta sección se pueden crear o editar los pozos y sus correspondientes perforaciones.



Haga clic en **Well & recurrent**, se despliega un menú de opciones, como se observa en la figura D. 21.

Figura D. 21. Creación o edición de pozos



Fuente: Simulador CMG.

D.3.7.1 Wells (Pozos). Haga doble clic sobre **wells** y aparecerá una ventana para crear o para editar los pozos existentes, aquí se muestra una lista de los pozos involucrados en la simulación, para nuestro caso aparecerán el pozo inyector y el productor. Haga clic en **constrains**. Introduzca las restricciones primaria y secundaria de operación para su pozo ya sea inyector o productor. Es útil usar dos restricciones de operación con el fin de evitar al máximo cualquier error de convergencia. En la figura D. 22 se muestra la ventana de restricciones para el caso de un pozo productor.

Para el caso de los pozos inyectores creados, pulse **injected fluid** para definir el tipo de fluido que se esta inyectando y sus propiedades, en este caso la calidad del vapor y la temperatura de inyección de vapor. En la figura D.23 se muestra la ventana para de finir el o los fluidos que se están inyectando.

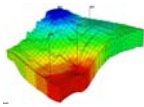
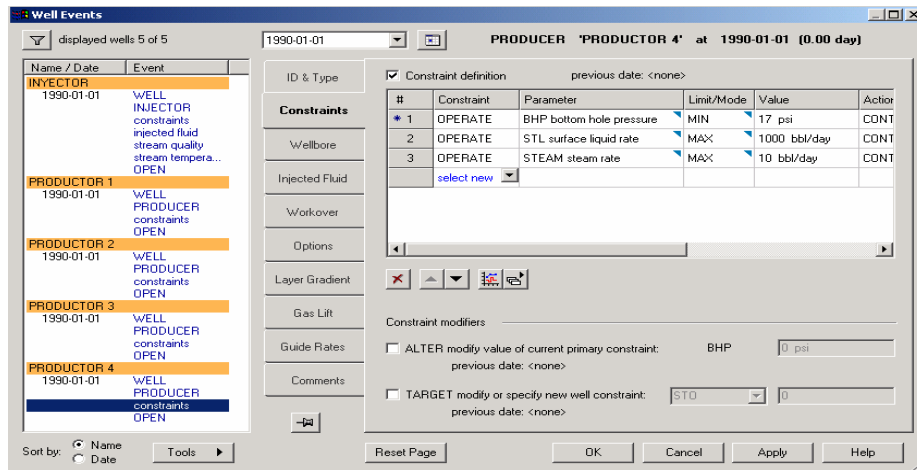
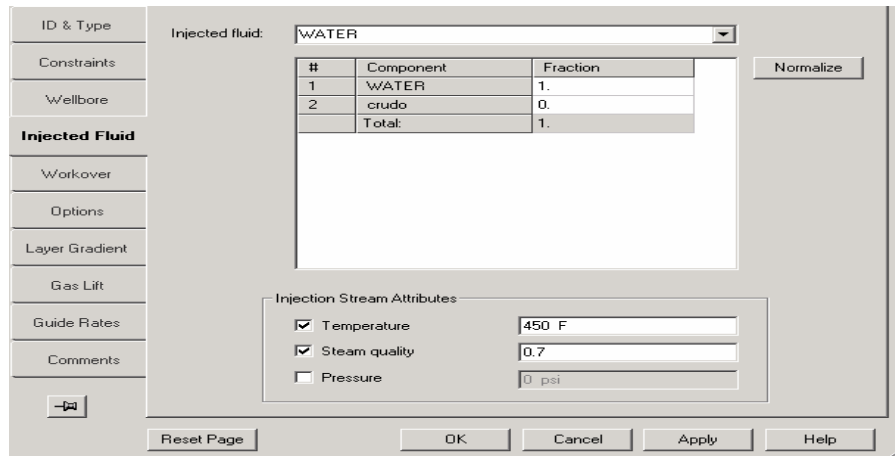


Figura D. 22. Ventana de control de pozos.



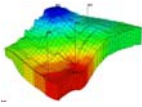
Fuente: Simulador CMG.

Figura D. 23. Propiedades del fluido de inyección.



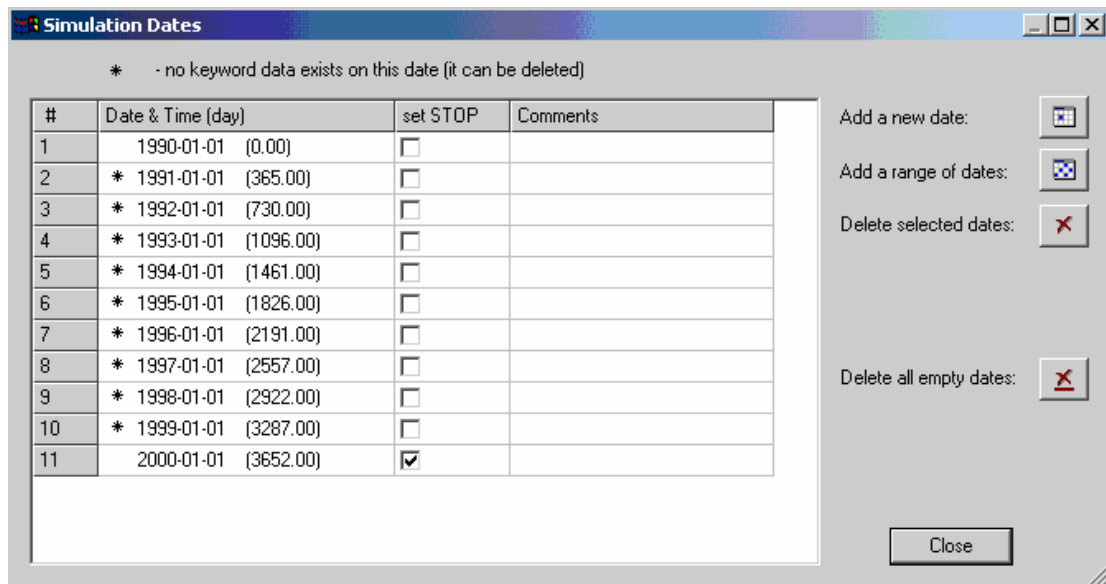
Fuente: Simulador CMG.

Después de todos los arreglos hechos haga clic en **OK**, para que el simulador guarde los cambios realizados.






D.3.7.2 Dates. Luego haga doble clic sobre **dates**, para crear el cronograma de actividades para el proceso de inyección de vapor, y seleccionar la fecha de inicio y de terminación de la simulación, figura D. 24.

Figura D. 24. Cronograma de actividades.



Fuente: Simulador CMG.

Para crear las nuevas fechas haga clic sobre , o una serie de fechas pulse sobre . Se desplegara una ventana (ver figura D. 25), en la cual se ingresa la fecha de inicio y la fecha de terminación de la simulación, y especifique si el intervalo deseado es diario, mensual o anual, luego pulse **OK**. Aparecerán todas las opciones del menú en , indicando que todas las secciones se han completado correctamente.

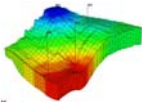
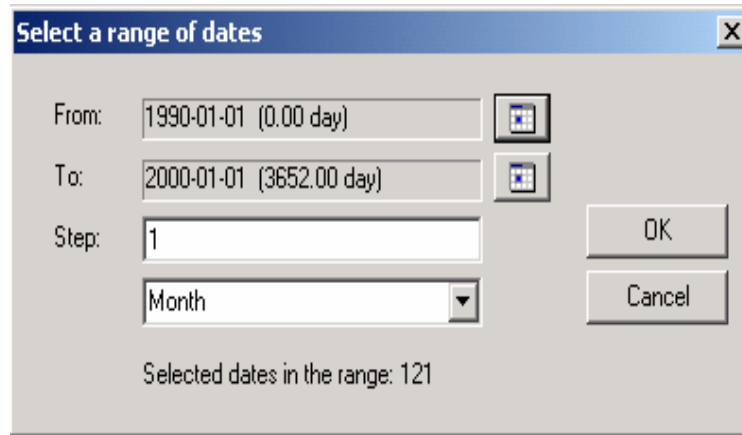


Figura D. 25. Creación de una serie de fechas.



Fuente: Simulador CMG.

D.4 VALIDATE DATASET (VALIDAR LA SIMULACIÓN)

Para asegurarnos que estos datos se encuentran en un rango valido, es necesario validar los datos. Para ello, haga clic en **Validate with Stars** (ver figura D. 26), después de hacer clic, aparecerá una ventana similar a la figura D. 27, partir de esta figura se pueden observar tres opciones las cuales son: **validate**, **run to view initialization**, **run to normal immediately**.

D.4.1 Validate. Seleccione **validate** y haga clic en **run simulator** (ver figura D. 27), con esto STARS iniciara la lectura del archivo de simulación y validara cada sección. Los mensajes se imprimirán en un cuadro de texto, donde aparecerán los errores y mensajes de alerta. Cierre la ventana una vez terminada la validación. Revise los errores encontrados. Diríjase a la sección indicada y trate de solucionar el error. En caso de encontrar errores graves en los datos, consulte a *Software Support Team* de *Computer Modeling Group Ltda*. Guarde los cambios en **File / Save dataset**.

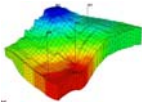
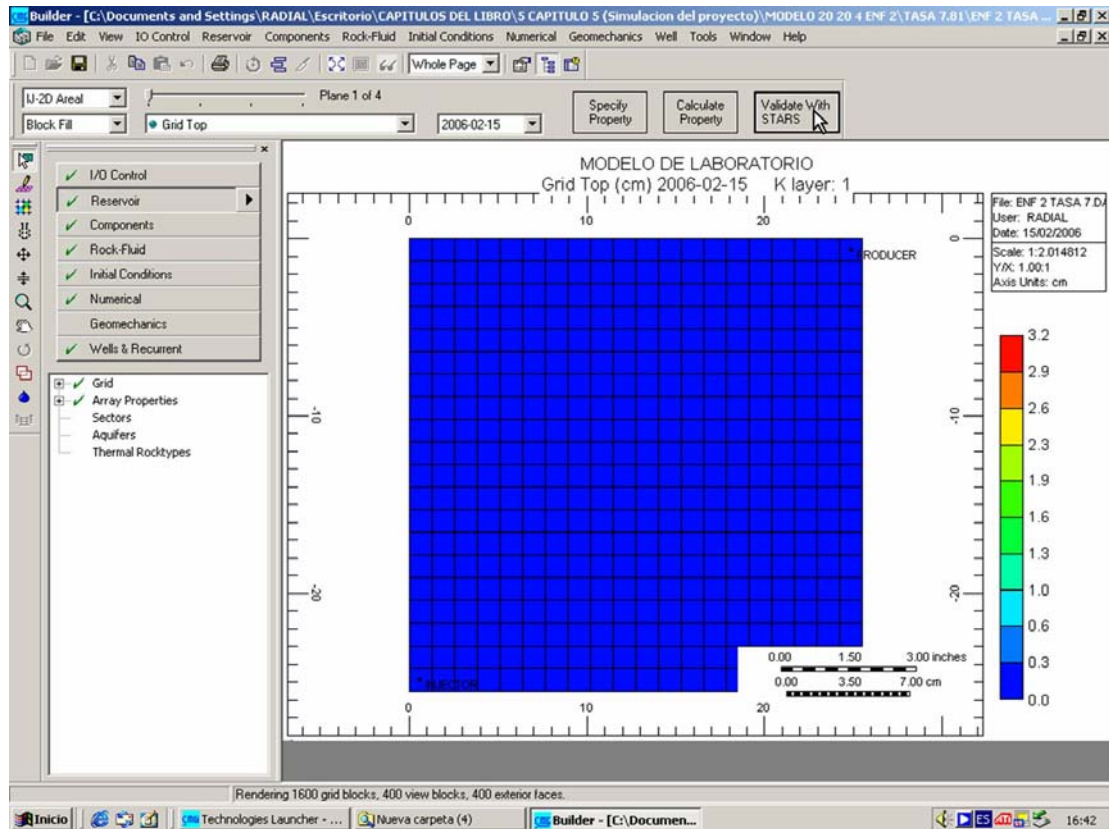


Figura D. 26. Validación de los datos del modelo.



Fuente: Simulador CMG.

D.4.2 Run to view initialization. Seleccione *Run to view initialization* y haga clic en *run simulator* (ver figura D. 27), con esto STARS iniciara una corrida de inicialización.

D.4.3 Run to normal immediately. Seleccione *Run to normal immediately* y haga clic en *run simulator* (ver figura D. 27), con esto STARS iniciara una corrida inmediatamente.

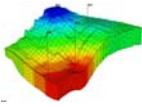
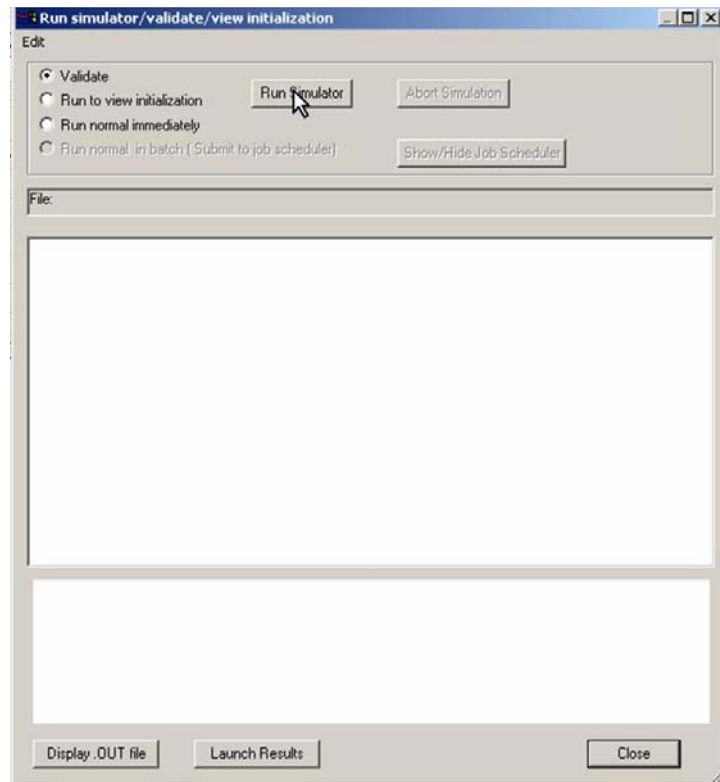


Figura D. 27. Validación de los datos del modelo.

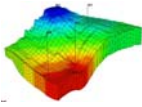


Fuente: Simulador CMG.

Una vez terminado el proceso de simulación, el software imprime en esta misma venta los resultados de la simulación y genera unos archivos de salida, **output file (*.out)**, **index-results file (*.irf)** y **main-results file (*.mrf)**. Haga clic en **display .OUT file** para ver el contenido del archivo .out generado o en **Launch results** para lanzar el **Results 3D** y el **Results graph**, para iniciar el análisis de los resultados de la simulación.

D.5 PROCESO DE LA SIMULACIÓN*

Ahora esta el modelo completo para llevarlo al simulador STARS y comenzar la simulación. Lo primero que se debe realizar es guardar el modelo, para lo cual




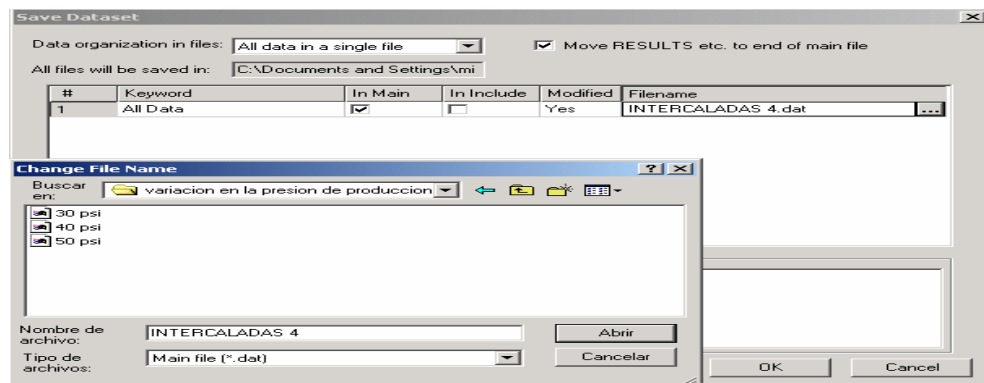

pulse **file / save as**, se abre la ventana **save dataset as**, en **filename** pulse , se abre la ventana **change file name** desde la que se ubica el directorio en el lugar donde se quiere guardar el archivo, y el nombre que se le asigno, como se observa en la figura.

Figura D. 28. Ventana para guardar el dataset creado.



Fuente: Simulador CMG.

Cierre el **modelbuilder**, guarde los cambios realizados y vaya al **Technologies Launcher**, ubique el directorio en el que se guardo el modelo, selecciónelo y

arrástrelo sobre el icono del simulador que desea utilizar, en este caso , aparece una ventana **Schedule a simulation job**, esta ventana (Figura D. 29) corresponde a la programación de su simulación. Usted puede programar el horario en el cual desea realizar la corrida o iniciarla inmediatamente pulsando **run immediately**.

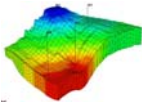
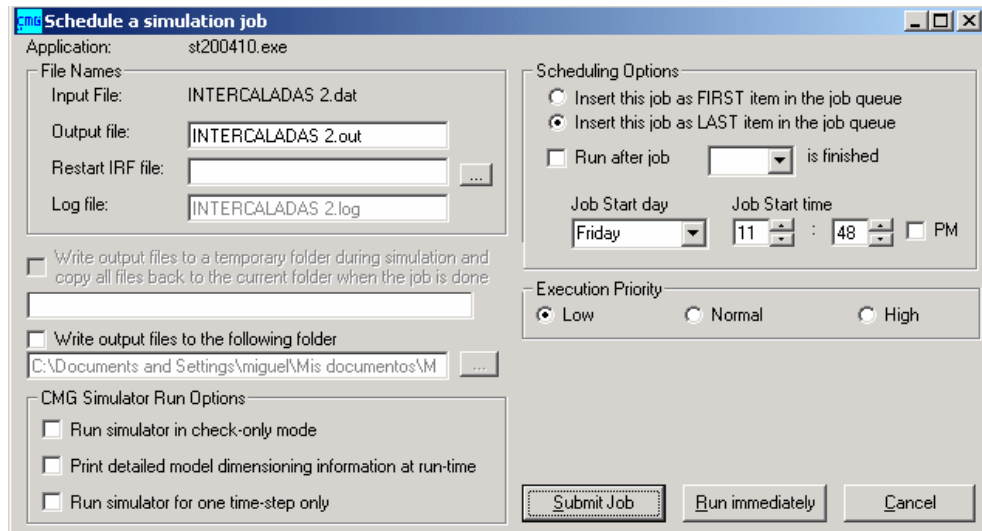


Figura D. 29. Programación de la simulación.



Fuente: Simulador CMG.

Una vez terminado el proceso de simulación, el software genera unos archivos de salida, **output file (*.out)**, **index-results file (*.irf)** y **main-results file (*.mrf)**.

Además de los resultados usuales de simulación que se escriben a los archivos de salida, un resumen de cada intervalo de tiempo de la simulación, llamado diario, se escribe a la pantalla, (o bien se escribe a un archivo en caso de haber sido redirigido). A continuación se presenta un ejemplo de la salida de diario, figura D. 30.

La sección de intervalos de tiempo cuenta con cuatro columnas: número del intervalo de tiempo, tamaño del intervalo de tiempo en días, número de iteraciones de Newton que se requieren para resolver el problema de intervalos de tiempo no lineales y el número de veces que el intervalo de tiempo no logró converger (cortes).

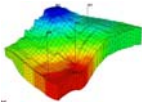


Figura D.30. Resultados del proceso de simulación.

C:\WINNT\system32\cmd.exe

S T A R S T I M E S T E P S U M M A R Y
 MODELO DE 5 PUNTOS DE INYECCION CONTINUA
 CAPAS IMPERMEABLES INTERCALADAS (7 CAPAS)
 PERFORACION EN LAS CAPAS 5 Y 7

Time Step		Time		Production			Injection		Mat		Maximum Changes				
No.	Size days	IT	T days	yy/mm/dd	Oil bbl/d	Gas ft3/d	Water bbl/d	GOR ft3/bbl	Wat. Cut %	Gas ft3/d	Water bbl/d	Bal Err %	Pres psi	Sat w/o/g	Temp deg F
61	76.02	2	1172	1993/03/18	62.89		222.2		77.94	199.9	23e-3	-11.3	0.1724g	53.53	
62	76.39	4	1248	1993/06/02	78.54		224.1		74.05	200.0	23e-3	-9.30	0.2486g	72.72	
63	63.76	3	1312	1993/08/05	79.60		220.0		73.43	200.0	23e-3	-16.9	0.1843g	44.82	
64	66.76	3	1379	1993/10/10	75.18		222.4		74.74	200.0	20e-3	-11.1	0.1809g	46.38	
65	70.62	5	1450	1993/12/20	90.76		207.8		69.60	200.0	19e-3	9.314	0.1842g	39.83	
66	11.44	1	1461	1994/01/01	61.84		166.2		72.89	200.0	23e-3	11.44	0.0129g	5.603	
67	62.53	2	1524	1994/03/04	86.91		173.3		78.69	200.0	23e-3	8.543	-0.056a	12.32	
68	106.5	2	1630	1994/06/18	31.32		181.0		85.25	200.1	23e-3	10.67	-0.0477a	15.42	
69	196.0	2	1826	1995/01/01	18.61		185.9		90.90	200.0	22e-3	18.00	-0.0483a	19.98	
70	306.3	3	2132	1995/11/03	10.70		187.6		94.61	200.0	22e-3	26.40	-0.0455a	22.95	
71	58.75	2	2191	1996/01/01	7.350		153.6		95.43	200.0	22e-3	6.682	0.0344w	4.182	
72	366.0	3	2557	1997/01/01	3.558		172.6		97.98	200.0	22e-3	31.52	0.0702w	21.55	
73	365.0	3	2922	1998/01/01	1.949		186.1		98.96	200.0	22e-3	31.53	0.0638w	18.42	
74	365.0	3	3287	1999/01/01	1.655		190.7		99.14	200.0	22e-3	32.32	0.0136w	16.20	
75	365.0	2	3652	2000/01/01	1.283		191.3		99.33	200.0	22e-3	32.98	-0.0098a	14.55	

Stopping end time reached time = 3652.00000 days 1 Jan 2000

it, it_min, icytot, nrep2, mtfail, IMPES: 75 75 168 0 0 0%

iter_sol_tot: 1541

Date and Time of End of Run: Feb 25, 2005 12:06:19

Elapsed Time to End of Run: 0 hr, 0 min, 54 sec

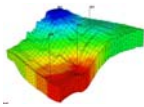
¿Desea terminar el trabajo por lotes (S/N)?

Fuente: Simulador CMG.

La sección de tiempo cuenta con la hora y la fecha del intervalo de tiempo. La sección de producción muestra el total de tasas de producción de Petróleo, Gas y Agua, junto con el GOR (relación gas-petróleo) y el corte de agua. La sección de inyección muestra el total de tasas de inyección de Gas y Agua (estas fases pueden ser diferentes, según lo que se esté inyectando). Luego se muestra el error en el equilibrio de materiales, en porcentajes. Finalmente, se muestra el máximo de cambios de presión, saturación (con indicador de fase) y temperatura.

Terminada la simulación, el simulador reporta la duración de la simulación, la hora y fecha de finalización y ubicación de los archivos de salida (por defecto estos se guardan en la misma carpeta donde se encuentra el archivo de datos). Pulse **S** para finalizar el proceso de simulación.

D.5.1 Análisis de los resultados obtenidos del simulador. Terminada la corrida, el simulador genera un archivo de salida, **output file (*.out)**, el cual se



abre arrastrándolo sobre el icono del block de notas o sobre el icono de Word, en el cual se pueden observar los siguientes parámetros.

- Datos ingresados al simulador por el usuario.
- Datos arrojados por el simulador.
- Procesos realizados durante el proceso de simulación.
- Datos de la duración del tiempo de la corrida.

D.5.2 Análisis de los resultados en forma grafica (2D). Para la generación de los resultados obtenidos en graficas 2D, se debe seleccionar el archivo ***index-results file (*.irf)*** en el ***Technologies Launcher***, hacer clic sobre el y arrastrarlo



hasta el icono de ***results graph***, se abre una ventana de resultados (figura D.31). Para generar una nueva grafica, seleccione ***Edit / Curve / Add***, luego seleccione los parámetros que desea analizar (figura D.32), en este caso todos los parámetros son graficados contra el tiempo. En ***file*** seleccione el archivo, en ***origin type***, el tipo de parámetro (de pozo, de campo, por sector, etc), luego pulse ***OK***. Si desea abrir una nueva grafica en una ventana diferente pulse ***Edit / Plot / Add***.

Para generar graficas especiales, como perfiles de propiedades, abra una grafica nueva (***Edit / Plot / Add***) y haga clic en ***Edit / Curve / Add property vs distance***. En la nueva ventana seleccione ***Linear Path*** e ingrese la distancia inicial (***From UBA***) y la distancia final (***To UBA***). Escoja la propiedad deseada y la fecha en que aplica, adicione la curva con ***Add Curve*** y haga clic en ***OK***.

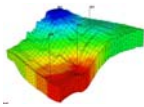
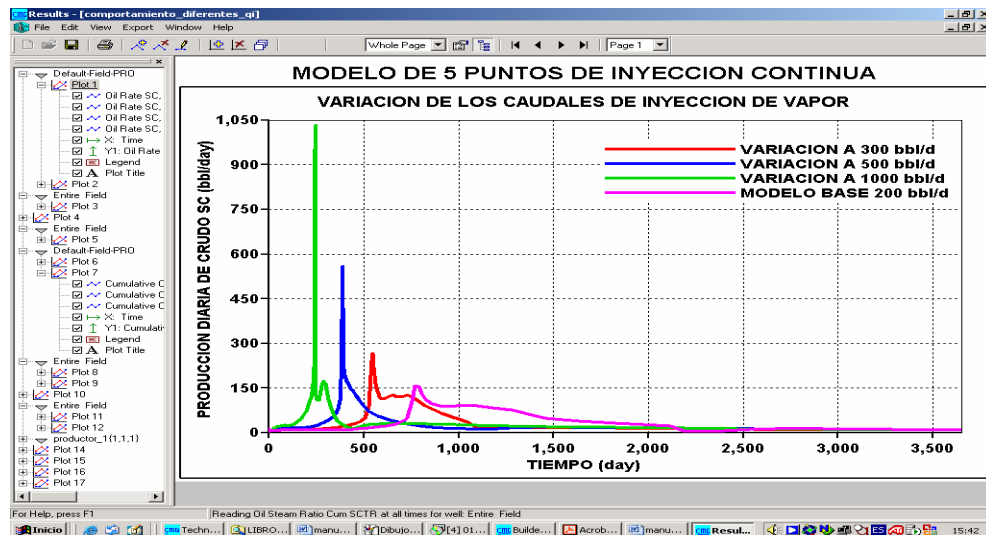
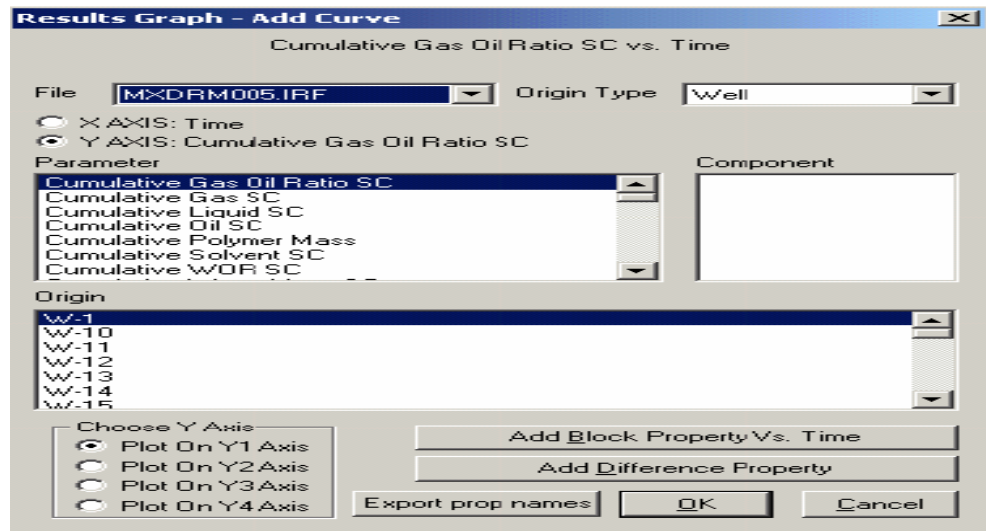


Figura D. 31. Adición de curvas para resultados gráficos (2D).

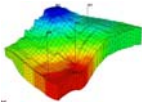


Fuente: Simulador CMG.

Figura D. 32. Resultados gráficos (2D).



Fuente: Simulador CMG.



D.5.3 Análisis de los resultados en forma grafica (3D). Esta opción permite ver el comportamiento de varias propiedades dentro del yacimiento, como:

- Perfiles de temperatura dentro del yacimiento a medida que se inyectan fluidos calientes.
- Saturación de los fluidos de yacimiento, a medida que se producen.
- Comportamiento del fluido inyectado dentro del yacimiento.


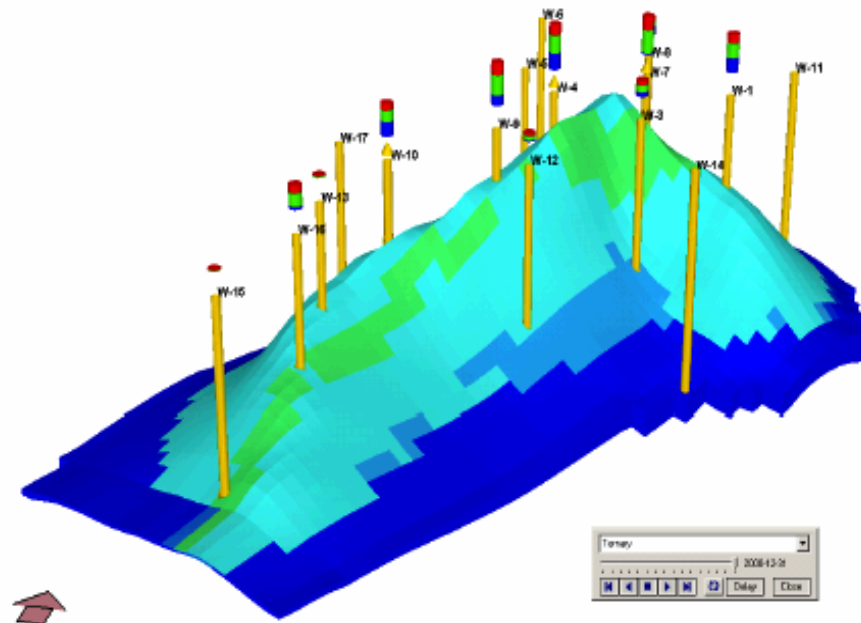
Para generar una grafica de resultados en 3D se debe seleccionar el archivo *index-results file (*.irf)* en el **Technologies Launcher**, hacer clic sobre el y arrastrarlo hasta el icono de **results 3D** , se abre la ventana de **results**, seleccione la propiedad deseada para observar su comportamiento.

Figura D.33. Esquema en 3D del comportamiento de una propiedad específica.



Fuente: Simulador CMG.

ANEXO E. ARCHIVO DE DATOS ENTRADA

A continuación se presenta el archivo de datos de entrada realizado para simular numéricamente el comportamiento del prototipo de campo.

```
INUNIT FIELD
TITLE1 'SIMULACION PROTOTIPO DE CAMPO'
TITLE2 'INYECCION DE VAPOR'
TITLE3 'FERNANDO WILSON LONDOÑO GALVIS'
WRST TIME
WSRF WELL 1
WSRF GRID TIME
WSRF SECTOR TIME
OUTSRF GRID PRES SG SO SW TEMP
OUTSRF WELL LAYER NONE
WPRN GRID 0
OUTPRN GRID NONE
OUTPRN RES NONE
**$ Distance units: ft
RESULTS XOFFSET      0.0000
RESULTS YOFFSET      0.0000
RESULTS ROTATION      0.0000 **$ (DEGREES)
RESULTS AXES-DIRECTIONS 1.0 -1.0 1.0
**$ *****
**$ Definition of fundamental cartesian grid
**$ *****
GRID VARI 20 20 3
KDIR DOWN
DI IVAR
  20*14.7
DJ JVAR
  20*14.7
DK ALL
  1200*16.67
DTOP
  400*1800
**$ Property: NULL Blocks Max: 1 Min: 1
**$ 0 = null block, 1 = active block
NULL CON      1
**$ Property: Porosity Max: 0.28 Min: 0.28
POR CON      0.28
```

```

**$ Property: Permeability I (md) Max: 600 Min: 600
PERMI CON      600
PERMJ EQUALSI
PERMK EQUALSI
**$ Property: Pinchout Array Max: 1 Min: 1
**$ 0 = pinched block, 1 = active block
PINCHOUTARRAY CON      1
END-GRID
ROCKTYPE 1
PRPOR 860
CPOR 2.e-6
ROCKCP 35.758
THCONR 38.208
THCONW 38.208
THCONO 38.208
THCONG 38.208
THCONMIX SIMPLE
HLOSSPROP OVERBUR 31.753 23.4
      UNDERBUR 31.753 23.4
**$ Model and number of components
MODEL 2 2 2 1
COMPNAME 'Water' 'OIL'
CMM
18.02 525.37
PCRIT
3206.2 0
TCRIT
705.4 0
MASSDEN
0 53.3548
CP
0 4.056e-6
CT1
0 0.000216657
VISCTABLE
**$  temp
      41      0  13209.2
      59      0  2140.61
      77      0  565.384
      95      0  197.778
     116      0   72.863
     134      0   35.422
     179      0   8.32783
     224      0   2.71367
     269      0   1.08651
     314      0  0.501359
     359      0  0.25664
     404      0  0.142197
     449      0  0.083862

```

494	0	0.052019
539	0	0.0336398
584	0	0.0225285
629	0	0.0155433
674	0	0.0110027

ROCKFLUID
RPT 1 WATWET
SWT

**\$	Sw	krw	krow
	0.2	0.0	0.9
	0.262	0.006	0.85000
	0.276	0.010	0.79102
	0.300	0.014	0.68906
	0.325	0.019	0.59414
	0.350	0.023	0.50625
	0.375	0.025	0.42539
	0.400	0.030	0.35156
	0.425	0.036	0.28477
	0.450	0.045	0.22500
	0.475	0.055	0.17227
	0.500	0.071	0.12656
	0.525	0.088	0.08789
	0.556	0.139	0.05625
	0.581	0.168	0.03164
	0.600	0.191	0.01406
	0.625	0.240	0.00400
	0.65	0.278	0.0

SLT

**\$	Sl	krp	krog
	0.4137931	0.38	0.0
	0.4827586	0.28000	0.000333
	0.6551724	0.08667	0.005249
	0.6637931	0.07667	0.006667
	0.6689655	0.07000	0.007874
	0.6913793	0.05333	0.010499
	0.7224138	0.03412	0.013123
	0.7396552	0.02362	0.018373
	0.7672414	0.01667	0.026247
	0.7775862	0.01340	0.039370
	0.7844828	0.01050	0.047244
	0.7965517	0.01000	0.070866
	0.95	0.0	0.9

INITIAL
VERTICAL DEPTH_AVE

INITREGION 1
REFPRES 860
REFDEPTH 1800

**\$ Property: Temperature (F) Max: 110 Min: 110

TEMP CON 110
 **\$ Property: Water Saturation Max: 0.2 Min: 0.2
 SW CON 0.2
 **\$ Property: Oil Saturation Max: 0.8 Min: 0.8
 SO CON 0.8
 NUMERICAL
 RUN
 DATE 2006 1 7
 DTWELL 45
 **\$
 WELL 'INJECTOR'
 INJECTOR MOBWEIGHT EXPLICIT 'INJECTOR'
 INCOMP WATER 1. 0.
 TINJW 560.
 QUAL 0.65
 OPERATE MAX BHP 1100. CONT REPEAT
 OPERATE MAX STW 40. CONT REPEAT
 **\$ rad geofac wfrac skin
 GEOMETRY K 0.28 0.249 1. 0.
 PERF GEO 'INJECTOR'
 **\$ UBA ff Status Connection
 1 20 1 1. OPEN FLOW-FROM 'SURFACE' REFLAYER
 1 20 2 1. OPEN FLOW-FROM 1
 1 20 3 1. OPEN FLOW-FROM 2
 **\$
 WELL 'PRODUCER'
 PRODUCER 'PRODUCER'
 OPERATE MIN BHP 50. CONT REPEAT
 OPERATE MAX STL 100. CONT REPEAT
 OPERATE MAX STEAM 20. CONT REPEAT
 **\$ rad geofac wfrac skin
 GEOMETRY K 0.28 0.249 1. 0.
 PERF GEO 'PRODUCER'
 **\$ UBA ff Status Connection
 20 1 1 1. OPEN FLOW-TO 'SURFACE' REFLAYER
 20 1 2 1. OPEN FLOW-TO 1
 20 1 3 1. OPEN FLOW-TO 2
 DATE 2007 1 7
 DATE 2008 1 7
 DATE 2009 1 7
 DATE 2010 1 7
 DATE 2011 1 7
 DATE 2012 1 7
 DATE 2013 1 7
 DATE 2014 1 7
 DATE 2015 1 7
 DATE 2016 1 7
 STOP

RESULTS SPEC 'Permeability K'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL -9999
RESULTS SPEC REGION 'All Layers (Whole Grid)'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 0
RESULTS SPEC LAYERNUMB 0
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC EQUALSI 0 1
RESULTS SPEC STOP

RESULTS SPEC 'Permeability J'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL -9999
RESULTS SPEC REGION 'All Layers (Whole Grid)'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 0
RESULTS SPEC LAYERNUMB 0
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC EQUALSI 0 1
RESULTS SPEC STOP

RESULTS SPEC 'Permeability I'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL -9999
RESULTS SPEC REGION 'Layer 1 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 1
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 600
RESULTS SPEC REGION 'Layer 2 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 2
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 600
RESULTS SPEC REGION 'Layer 3 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 3
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 600
RESULTS SPEC STOP

RESULTS SPEC 'Porosity'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL -9999
RESULTS SPEC REGION 'Layer 1 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 1
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 0.28
RESULTS SPEC REGION 'Layer 2 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 2
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 0.28

RESULTS SPEC REGION 'Layer 3 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 3
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 0.28
RESULTS SPEC STOP

RESULTS SPEC 'Oil Saturation'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL -9999
RESULTS SPEC REGION 'Layer 1 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 1
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 0.8
RESULTS SPEC REGION 'Layer 2 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 2
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 0.8
RESULTS SPEC REGION 'Layer 3 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 3
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 0.8
RESULTS SPEC STOP

RESULTS SPEC 'Water Saturation'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL -9999
RESULTS SPEC REGION 'Layer 1 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 1
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 0.2
RESULTS SPEC REGION 'Layer 2 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 2
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 0.2
RESULTS SPEC REGION 'Layer 3 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 3
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 0.2
RESULTS SPEC STOP

RESULTS SPEC 'Temperature'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL -9999
RESULTS SPEC REGION 'Layer 1 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1

RESULTS SPEC LAYERNUMB 1
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 110
RESULTS SPEC REGION 'Layer 2 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 2
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 110
RESULTS SPEC REGION 'Layer 3 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 3
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 110
RESULTS SPEC STOP

RESULTS SPEC 'Grid Top'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL -99999
RESULTS SPEC REGION 'Layer 1 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 1
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 1800
RESULTS SPEC STOP

RESULTS SPEC 'Grid Thickness'
RESULTS SPEC SPECNOTCALCVAL -99999
RESULTS SPEC REGION 'Layer 1 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 1
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 16.67
RESULTS SPEC REGION 'Layer 2 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 2
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 16.67
RESULTS SPEC REGION 'Layer 3 - Whole layer'
RESULTS SPEC REGIONTYPE 1
RESULTS SPEC LAYERNUMB 3
RESULTS SPEC PORTYPE 1
RESULTS SPEC CON 16.67
RESULTS SPEC STOP

ANEXO F. PLANOS