

**“ESTUDIO DE MALLAS DINÁMICAS EMPLEADAS EN LA SIMULACIÓN DE
YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS”**

**RONALD DAVID BERRIO ATENCIO 2010030
MARLON ANDRÉS SANTOS ARDILA 2000887**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2007

**“ESTUDIO DE MALLAS DINÁMICAS EMPLEADAS EN LA SIMULACIÓN DE
YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS”**

**RONALD DAVID BERRIO ATENCIO 2010030
MARLON ANDRÉS SANTOS ARDILA 2000887**

Trabajo de grado para optar al título de ingeniero de Petróleos

Directores

**LUIS ENELSO SIERRA SUÁREZ,
Ing. de Petróleos**

**OLGA PATRCIA ORTIZ
MSc. Ing. Química UIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUIMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BUCARAMANGA**

2007

A Dios.

A mi mami Ame.

A mi hermano Cristian.

A mi apa' Rafa.

Y en memoria de mi mami Elena.

Por que son la vida de mi vida, los amo.

Ronald

A ti Dios que me diste la oportunidad de vivir y tener una
familia tan maravillosa como la que tengo
A mi papá y mamá por ser los mejores y estar conmigo
incondicionalmente, gracias porque sin sus enseñanzas
no estaría aquí ni sería quien soy ahora, los adoro
y estoy muy orgulloso de su labor como padres
A mis hermanos Gustavo y Johanna Gracias por
compartir parte de sus vidas conmigo, por permitirme
aprender de sus experiencias y por darme aliento para
la ardua tarea de caminar hacia la perspectiva de un nuevo día
espero recorrer junto a ustedes el camino al éxito
Y a ti, por acompañarme durante toda mi carrera universitaria
por ser mi refugio y mi aliento, por ser mi esperanza aquí y allá
por ser mi rumbo y mi felicidad
y porque aun después de mucho tiempo
puedo cerrar mis ojos y contemplar una ilusión
, te quiero mucho y siempre lo haré!!!
“¿quien dice que aunque no estés cada minuto junto a mi
no existe un hilo súper especial que nos une?”

Marlon

AGRADECIMIENTOS

A ti Dios por ser nuestro mejor amigo, por enseñarnos el camino correcto de la vida, por no dejarnos caer nunca guiándonos y fortaleciéndonos cada día de trabajo con tu Santo Espíritu.

A todos aquellas amigos que compartieron con nosotros los momentos de alegría y desilusión durante nuestro desarrollo universitario, a los que nos acompañaron en nuestras clases y en nuestras parrandas.

A los miembros de bienestar universitario por el apoyo brindado durante nuestra carrera y por el compromiso con cada uno de los estudiantes.

A macondo por regalarnos muchas alegrías y fortalecer nuestro orgullo e identidad cultural.

Y sin lugar a duda este trabajo no pudo haberse realizado sin la formación que recibimos en la escuela de ingeniería de petróleos (UIS.). Gracias a todos los maestros que contribuyeron realmente en nuestra formación, en especial a Luis E. Sierra director del proyecto por todos sus consejos, su paciencia y su amistad como persona y a Olga P. Ortiz co-directora de tesis por sus formidables clases y por escuchar atentamente los problemas que a lo largo de esta tesis surgieron.

Gracias a todos!!
Gracias por ayudarnos a lograrlo.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	17
1. ESTADO DEL ARTE DE LA SIMULACIÓN DE YACIMIENTOS UTILIZANDO MALLAS DINÁMICAS	20
2. REFINAMIENTO LOCAL	25
2.1 GENERALIDADES DEL REFINAMIENTO LOCAL.	26
2.2 SISTEMA DE BLOQUES.	28
2.2.1 Reglas para la determinación de las subdivisiones.	29
2.3 ERROR DE DISCRETIZACIÓN	33
2.4 ESQUEMAS DE REFINAMIENTO DE MALLA ADAPTATIVA.	37
2.4.1 Interacciones de mallas.	39
2.4.2 Modelo de Refinamiento Local	40
2.4.3 Estrategias de Refinamiento	42
2.4.4 Manejo del refinamiento local de la malla en los bloques de frontera	44
2.4.5 Refinamiento local en los bloques de pozo	46
2.4.6 Asignación de las condiciones inicial y de frontera	47
3. CRITERIOS PARA EL REFINAMIENTO LOCAL DINÁMICO	51
3.1 MALLAS DINÁMICAS	52
3.1.1 Características de las mallas dinámicas	52
3.1.2 Subdivisión de bloques	54
3.1.3 Esquema de ordenamiento de mallas	56
3.2 CRITERIOS DE ADAPTACIÓN E IMPLEMENTACIÓN	58
3.2.1 Valores umbrales	59
3.2.2 Función de adaptación	60

3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL REFINAMIENTO LOCAL DINÁMICO DE LA MALLA.	63
4. PLANTEAMIENTO DEL MODELO NUMÉRICO	66
4.1 METODOLOGÍA Y DESARROLLO	66
4.1.1 Refinamiento de Malla Local estático	66
4.1.2 Refinamiento de malla dinámica.	73
4.1.3 Procedimiento de adaptación.	74
4.2 MANEJO DE DATOS	77
4.2.1 Estructura de datos	78
4.2.2 Manejo de la malla (GRID)	80
4.3 SOLUCIÓN DEL SISTEMA DE ECUACIONES	82
5. ANÁLISIS DE SOFTWARE COMERCIAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN MALLAS DINÁMICAS	85
5.1 ANÁLISIS DE IMPLEMENTACIONES DE MALLAS DINÁMICAS	85
5.2 ANÁLISIS DE SOFTWARE DISPONIBLE	87
6. EJEMPLOS DE IMPLEMENTACIÓN DE MALLAS DINÁMICAS	95
6.1 MALLAS DINÁMICAS PARA LA SIMULACION DE MODELOS DE INYECCIÓN DE AGUA.	96
6.1.1 Evaluación del comportamiento del refinamiento dinámico en la simulación de nueve casos de inyección de agua	96
6.1.2 Evaluación del comportamiento del refinamiento dinámico en la simulación de tres modelos de inyección.	102
6.1.3 Evaluación del comportamiento del refinamiento dinámico en la simulación de fenómenos de conificación de agua en dos sistemas de yacimiento	109
6.2 SIMULACIÓN DE YACIMIENTOS COMPOSICIONALES	116
6.2.1 Simulación con mallas dinámicas en un proceso con VAPEX.	117
6.2.2 Simulación con mallas dinámicas en un proceso con combustión in situ (ISC)	128
6.2.3 Simulación con mallas dinámicas en un proceso con SAGD.	134
CONCLUSIONES	141

RECOMENDACIONES	144
BIBLIOGRAFÍA	145
ANEXO	147

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Refinamiento local dinámico.	20
Figura 2. Malla fina encajada en un modelo de malla gruesa para simular un yacimiento en comunicación con un acuífero que mantenía la presión	22
Figura 3. Malla gruesa (a); Malla fina (b).	26
Figura 4. Malla refinada convencionalmente	28
Figura 5. Refinación local dinámica de la malla.	28
Figura 6. Reglas para el refinamiento local	30
Figura 7. Cálculo de la superficie de comunicación	31
Figura 8. Significado de las distancias	32
Figura 9. Elementos considerados en la formula de discretización.	33
Figura 10. Representación de los múltiples niveles de refinamiento.	35
Figura 11. Ilustración de la interacción entre la malla gruesa y la malla refinada localmente	39
Figura 12. Modelo de refinamiento local.	41
Figura 13. Técnica de interpolación usada en el refinamiento local	43
Figura 14. Tratamiento de los bloques de frontera para el refinamiento local	45
Figura 15. Comportamiento de la presión en un bloque de frontera que contiene un pozo inyector	47
Figura 16. Esquema de ordenamiento natural para un refinamiento local sucesivo de tres niveles	55
Figura 17. Matriz de coeficientes para el sistema de enmallado	58
Figura 18. Aplicación de la función de adaptación para un caso en 2D	62
Para el bloque # 13	62
Figura 19. Malla gruesa y refinamientos sobre la malla gruesa: (a) grueso, (b) fino, (c) refinamiento convencional, (d) refinamiento local	69

Figura 20. Interfase entre dos bloques	71
Figura 21. Nodos de frontera para la sección refinada	72
Figura 22. Limite de refinación posible ubicado en la malla gruesa	76
Figura 23. Modelos de malla.	79
Figura 24. Punteros para el manejo de la malla	80
Figura 25. ECLIPSE OFFICE; Case definition.	89
Figura 26. ECLIPSE OFFICE; Case definition, LGR.	90
Figura 27. ECLIPSE OFFICE; Case definition, Auto refinement.	90
Figura 28. Malla gruesa.	90
Figura 29. Malla fina	91
Figura 30. Sistemas de refinamiento local dinámico	98
Figura 31. Distribución de presión entre el productor y el inyector	101
Figura 32. Distribución de la saturación de agua entre el productor y el inyector	102
Figura 33. Tablero ajedrezado	103
Figura 34. Contornos de saturación para el tablero ajedrezado	104
Figura 35. RAP para el tablero ajedrezado	105
Figura 36. Evaluación de la malla para el tablero ajedrezado	105
Figura 37. Sección transversal	106
Figura 38. RAP para la sección transversal	106
Figura 39. Factor de recobro para la sección transversal	107
Figura 40. Modelo en 3-D	108
Figura 41. RAP para modelo 3-D	108
Figura 42. Factor de recobro para modelo 3-D	109
Figura 43. Modelos de malla para el yacimiento:(a) Malla gruesa, (b) Malla fina, (c) Malla refinada convencionalmente, (d) Malla refinada localmente	111
Figura 44. RAP para los cinco modelos, pozo horizontal	111
Figura 45. Tendencias de la tasa de aceite para los cinco modelos, pozo horizontal	112

Figura 46. Modelos de malla para yacimiento anticlinal, sección transversal: (a) Malla gruesa, (b) Malla fina, (c) Malla refinada convencionalmente, (d) Malla refinada localmente	113
Figura 47. RAP para los cinco modelos, pozo vertical	114
Figura 48. Tendencias de la tasa de aceite para los cinco modelos, pozo vertical	115
Figura 49. Tendencias de la tasa de agua para los cinco modelos, pozo vertical	115
Figura 50. Enmallado para la simulación del proceso de VAPEX	118
Figura 51. Comparación de la corrida 1 y el caso base	119
Figura 52. Comparación de la corrida 2 y el caso base	120
Figura 53. (a) Fracción molar global de propano para el caso base, (b) Saturación de gas para el caso base, (c) Fracción molar global de propano para la corrida 1, (d) Saturación de gas para la corrida	121
Figura 54. (a) desviación de la fracción molar global para la corrida 1, (b) desviación de la saturación de gas ²⁸ para la corrida 1.	122
Figura 55. Zona gruesa de interés y posición de los pozos	124
Figura 56. Saturación de aceite para el agrupamiento inicial de malla	125
Figura 57. Comparación de la producción	126
Figura 58. Saturación de gas para el caso base	127
Figura 59. Saturación de gas para el caso dinámico	127
Figura 60. Presiones caso base ²⁸ .	128
Figura 61. Presiones caso dinámico ²⁸ .	128
Figura 62. Vista X-Z de la malla dinámica inicial para una simulación ISC en 3 dimensiones	130
Figura 63. Producción de aceite acumulativa en una malla gruesa, fina y dinámica para una simulación ISC en 3 dimensiones	131
Figura 64. Inyección de gas comulativa en una malla gruesa, fina y dinámica para una simulación ISC en 3 dimensiones	131

Figura 65. Simulación ISC 3D: Saturación de aceite después de 500 días de simulación	132
Figura 66. Simulación ISC 3D: Saturación de aceite después de 1500 días de simulación ²⁹	133
Figura 67. Relación CPU entre malla fina y dinámica	134
Figura 68. Primer plano de porosidades horizontales en la malla fina en el modelo de referencia 3D	136
Figura 69. Simulación SAGD en 3 dimensiones de las tasas de producción e inyección para el enmallado fino de referencia del modelo de campo después de 3 años para la malla fina	136
Figura 70. Simulación SAGD en 3 dimensiones de la temperatura del yacimiento después de 3 años para la malla fina	137
Figura 71. Resultados de la simulación SAGD en 3 dimensiones para la malla fina y dinámica a 20° C después de 3 años	138
Figura 72. Resultados de la simulación ²⁵ con malla fina y dinámica 20 °C	138
Figura 73. Incremento de la CPU en función del tiempo de simulación en una simulación SAGD en 3 dimensiones	139

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de condiciones de frontera	48
Tabla 2. Comparación de los resultados de cómputo para el tiempo de ruptura.	100
Tabla 3. Comparación de los resultados para cortes de agua de 75% y 95 % ⁸ .	101
Tabla 4. Comparación de los tiempos de cómputo	109
Tabla 5. Comparaciones de tiempos de ejecución.	114
Tabla 6. Estadísticas de tiempo de cómputo.	118
Tabla 7. Otras estadísticas de cómputo.	119
Tabla 8. Tiempo de cómputo estimado.	123
Tabla 9. Estadísticas de tiempo de cómputo	125
Tabla 10. Otras estadísticas de corrida	126

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES KEYWORDS PARA EL REFINAMIENTO LOCAL EN ECLIPSE 100	147

RESUMEN

TITULO: ESTUDIO DE MALLAS DINÁMICAS EMPLEADAS EN LA SIMULACIÓN DE YACIMIENTOS DE HIDROCARBUROS.*

AUTORES: BERRIO ATENCIO, Ronald D., SANTOS ARDILA, Marlon A**.

PALABRAS CLAVE: Malla, enmallado, celda, nodo, discretización, refinamiento, refinamiento local dinámico, agrupamiento, geometría de punto esquina, diferencias finitas, señalador, iniciador, umbral, función adaptación, paso de tiempo, solucionador sparse

DESCRIPCION: Investigaciones recientes han mostrado que los errores más significativos en la simulación de yacimientos son el resultado de la dispersión numérica de las concentraciones y las saturaciones. Diferentes métodos se han investigado sin grandes éxitos.

La dispersión numérica ha sido nefasta para los métodos numéricos de solución de ecuaciones diferenciales parciales desde sus inicios. Mucho trabajo ha sido realizado dentro de la industria del petróleo y en otras partes para solucionar este problema. La solución más viable a la fecha parece ser la reducción del tamaño de celdas o bloques de malla. Sin embargo, celdas más pequeñas reducen la dispersión numérica pero también aumentan los tiempos de cómputo. Para minimizar el incremento en el número de bloques y sus costos inherentes, muchos investigadores han considerado un enmallado dinámico en el cual solo son refinadas las áreas en donde la dispersión es severa. Celdas son constantemente introducidas dentro de la simulación y removidas a medida que la dispersión cambia de localización.

En este trabajo se describirán los principios del método de enmallado dinámico para mantener una representación fina sobre el área de interés (frentes de desplazamiento entre otros, los cuales serán identificados mediante el movimiento de grandes gradientes de propiedades específicas como temperaturas, composiciones y saturaciones de fluido) y un enmallado grueso en las regiones alejadas de ésta, logrando así un ahorro en los tiempos de cómputo.

Se mostrará la técnica de enmallado dinámico mediante ejemplos de simulación así como su exitosa implementación en un simulador térmico, (STARS, un producto de CMG, mediante la modificación de su código fuente). Usando ejemplos de combustión y SAGD, mostraremos que el tiempo de CPU se puede reducir en un factor de 2 a 3 sin perder la exactitud de la simulación.

Esta técnica es muy efectiva y reduce sustancialmente la dispersión numérica. El método también puede incluir otros fenómenos físicos para los cuales aplican las ecuaciones de diferencias finitas.

* Tesis de grado

** Ingenierías Físicoquímicas, Ingeniería de Petróleos, SIERRA, Luis E., ORTIZ, Olga P.

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF DYNAMICAL MESHES USED IN HYDROCARBONS RESERVOIR SIMULATIONS*.

AUTHORS: BERRIO ATENCIO, Ronald D., SANTOS ARDILA, Marlon A.**

KEY WORDS: Mesh, Gridding, Grid block, Grid point, Discretization, Refinement, Dynamic Local Grid Refinement, Amalgamation, Corner Point Geometry, Finite Differences, flag, trigger, threshold, adaptation function, time step, sparse solver.

DESCRIPTION: Recent researches have shown that the most significant reservoir simulation errors are the result of numerical dispersion of the saturations and concentrations. Several approaches have been investigated without great success.

Numerical dispersion has been the bane of numerical methods for solving partial differential equations since their beginning. Much work has been done within the Petroleum Industry and elsewhere to overcome the problem. The most viable solution to date seems to be simply the reduction of grid block sizes. Although smaller grid blocks do reduce numerical dispersion, they also result in increased computation times. To minimize the increased number of blocks, and their inherent cost, many investigators have considered a dynamic grid in which the grid is refined only in the areas where dispersion is severe. Grid blocks are constantly being introduced into the simulation and removed as the dispersion locations change. In this work, we will describe the principles of this dynamic gridding approach in order to keep a fine scale representation around the given section (the front will be identify by the moving through large gradients of specific properties like temperatures, fluid saturations and compositions), and a coarser grid away from this, thus leading to cheaper computations.

We will illustrate this dynamic gridding technique with simulation examples, as it has been successfully implemented in a thermal simulator (STARS, a product of Computer Modeling Group Ltd CMG). Using examples on combustion and SAGD simulations, we will show that it can divide the CPU time of thermal simulations by a factor of 2 to 3, without loss of accuracy.

This method is very effective and substantially reduces numerical dispersion. The new method can also include others physical phenomena for which finite difference equations can be written.

* Thesis

** Physicochemical Engineering, Petroleum Engineering, SIERRA, Luis E., ORTIZ, Olga P.

INTRODUCCIÓN

Generalmente, los modelos matemáticos de fenómenos físicos implican ecuaciones diferenciales parciales (EDP) de segundo orden no lineales, como es el caso del flujo de fluidos en medios porosos. Su solución práctica se desarrolla de forma numérica, realizando una discretización del espacio y del tiempo, dependiendo de esta discretización y de la interacción de las celdas que componen la malla se obtienen resultados óptimos y confiables para un tiempo determinado. Para el modelamiento numérico de un yacimiento es necesario seleccionar un enmallado que permita realizar ajustes históricos y predecir su comportamiento frente a los esquemas de desarrollo del yacimiento; por ello es importante analizar el papel que desempeña el tipo de malla en la evaluación de cada uno de los términos en las ecuaciones de flujo.

El sistema de malla fino conlleva a menos errores de truncamiento y consecuentemente resulta en una solución más exacta, además el refinamiento de la malla también es un método efectivo para reducir la dispersión numérica; sin embargo, el refinamiento global requiere mucha memoria y largos tiempos de cómputo. Recientemente ha habido gran interés en las técnicas de refinamiento local de malla. En comparación con el sistema de refinamiento global estas técnicas reducen considerablemente el número de bloques y ahorran tiempo de cómputo sin sacrificar la exactitud.

Existen dos tipos de refinamiento local de malla: estático y dinámico. En general para problemas de fallas, pinchamientos, fracturas y simulación en las cercanías del pozo, el método de refinamiento local estático es satisfactorio. Por otro lado, las mallas dinámicas permiten llevar a cabo refinamientos con un modelamiento más preciso y rápido de las zonas que presentan altos gradientes de presión y

saturación, en donde cambios de enmallado respecto al tiempo y al espacio tienen lugar para lograr definir de forma clara, el comportamiento dinámico del yacimiento, como lo son el movimiento de un frente de desplazamiento y los pequeños baches que ocurren en procesos de recobro.

Métodos de refinamiento estático han sido estudiados por muchos autores a lo largo del tiempo con muy buenos resultados, hecho que contrasta con el muy poco trabajo que ha sido desarrollado en relación al método de refinamiento dinámico, debido a su complejidad.

La técnica presentada en este libro sugiere el uso del refinamiento dinámico y el agrupamiento de bloques para elegir un tamaño de celda apropiado cerca de regiones importantes, mientras se usan celdas más grandes en las otras zonas. La simulación en curso se revisa periódicamente y las celdas se vuelven a redimensionar dependiendo de la distribución actual del fluido. La técnica es aplicable a simuladores de aceite negro y composicionales, usando solucionadores de matriz dispersa e implica solamente la reestructuración de indicadores y propiedades, en los tiempos seleccionados durante la simulación. El refinamiento y la agrupación dinámica de la malla, puede dar lugar a disminuir el tiempo de corrida sin alterar los resultados. Los umbrales especificados por el usuario se utilizan para controlar cuándo hacer agrupamiento o refinamiento de la malla. Los métodos aquí descritos se basan en las diferencias de valores de las propiedades entre las celdas y sus vecinos, o diferencias de valores en una región finamente dividida. Las propiedades elegidas son diseñadas para encontrar frentes, e incluyen saturaciones y varias composiciones.

Este trabajo muestra una recopilación de los estudios realizados en la simulación de yacimientos donde se han implementado mallas dinámicas, presenta un análisis definiendo características, ventajas, desventajas, funcionalidad,

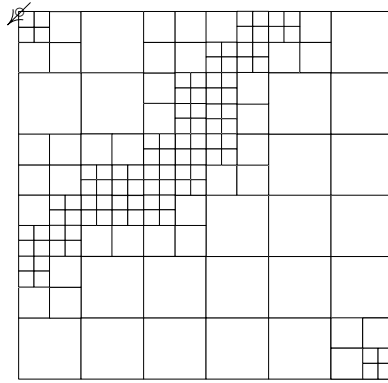
aplicabilidad y en general el papel que desempeñan este tipo de mallas dentro de la simulación de yacimientos.

Con el fin de precisar las características del refinamiento local dinámico, inicialmente se presenta un estado del arte sobre la simulación de yacimientos con mallas dinámicas (capítulo 1). Luego se revisan los aspectos concernientes al refinamiento local (capítulo 2) y se estudian los criterios a tener en cuenta para la selección del refinamiento local dinámico de la malla y los parámetros de control en la dinámica de la misma (capítulo 3). Posteriormente se presentan los planteamientos matemáticos y numéricos de las mallas dinámicas (capítulo 4). A continuación se evalúa la capacidad para implementar refinamientos dinámicos en los softwares comerciales disponibles para la simulación de yacimientos de hidrocarburos (capítulo 5). Por último se exponen algunos ejemplos de implementación de mallas dinámicas en diferentes aplicaciones y un análisis de los resultados obtenidos (capítulo 6).

1. ESTADO DEL ARTE DE LA SIMULACIÓN DE YACIMIENTOS UTILIZANDO MALLAS DINÁMICAS

La primera técnica de refinamiento¹, en la cual cualquier nivel arbitrario de refinamiento se puede aplicar en cualquier región o punto en el espacio y tiempo ha sido estudiada extensivamente por los investigadores usando modelos totalmente implícitos Fig.1. (Heinemann et al. en 1983, Biterge en 1989, Manik en 1994).

Figura 1. Refinamiento local dinámico.



Esta técnica requiere una estructura de datos especial para establecer una matriz eficiente, así como algoritmos especiales para la solución. La complejidad en la generación de las estructuras de datos especializados y los correspondientes algoritmos lineales para la solución, dan lugar indirectamente a mayores requerimientos de memoria para aplicaciones a escala de campo debido al número de inserción y/o supresión de elementos para diferentes tiempos. Puesto

¹ Heinemann, I.E., Gerken, G., and von Hantelmann, G.: "Using Local Grid Refinement in a Multiple-application Reservoir Simulator," paper SPE 12235 presented at the 1983 SPE Reservoir Simulation Symposium, San Francisco, Nov. 15-18.

que en las localizaciones donde ocurren los cambios agudos el yacimiento cambia con el tiempo, la estructura de las mallas locales también lo hace. Una porción significativa del código de cómputo es dedicada a abordar la estructura de datos que cambia en cada paso de tiempo, lo que hace difícil practicar tal técnica en los simuladores existentes, desperdiciando tiempo para la solución. La complejidad de la estructura de datos y el proceso asociado a la solución, hace que estos procedimientos de refinamiento resulten ineficaces para problemas a gran escala dependientes del tiempo. Si diversas mallas locales se utilizan en diversos tiempos de cómputo en un problema grande, el tiempo tomado en crear la estructura de datos y la generación de la malla puede dominar fácilmente el tiempo de cómputo total. Por esta razón, es altamente deseable una técnica que no requiera una compleja estructura de datos o la regeneración de la malla en cada paso de tiempo.

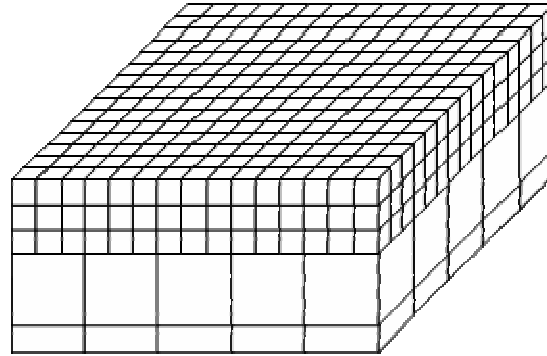
Estudios de refinamiento estático de malla se enfocaron en desarrollar técnicas para la interacción de mallas en la periferia de la malla gruesa y la malla fina². Lam y Simpson³ desarrollaron una técnica de refinamiento local para la solución numérica de ecuaciones de transporte advección-difusión. Graham y Smart⁴ describieron un simulador que usa un modelo de malla fina encajada en un modelo de malla gruesa para simular un yacimiento en comunicación con un acuífero que mantenía la presión Fig.2.

² Allen, D. N.: Relaxation Methods in Engineering and Science, New York City(1954).

³ Lam, D.C.L. and Simpson, R. B., "Modeling Coastal Effluent Transport Using a Variable Finite Difference Grid" advances in Computer Methods for Partial Differential Equations II, IMACS (AICA), New Brunswick, NJ

⁴ Graham, M.F. and Smart, G.T.; "Reservoir Simulator Employing a Fine-Grid Model Nested in a Coarse-Grid Model," paper SPE 9372 presented at the 1980 SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, Sept 21-24

Figura 2. Malla fina encajada en un modelo de malla gruesa para simular un yacimiento en comunicación con un acuífero que mantenía la presión.



En 1982, Rosenberg⁵ desarrolló una estrategia de refinamiento de malla similar a la técnica Lam y Simpson. Quandalle y Besse⁶ estudiaron la eficiencia de la técnica de refinamiento de malla descrita por Rosenberg para simular desplazamiento de aceite por agua en un patrón de cinco puntos. En 1983, Heinemann¹ desarrollo un procedimiento para refinamiento local dinámico acorde con muchas aplicaciones en la simulación de yacimientos. Forsyth y Sammon⁷ generalizaron la técnica de Heinemann para modelar fallas y pinchamientos.

Heinemann describió un método de refinamiento local dinámico como una adición para los esquemas de refinamiento estático, la interacción de mallas gruesas y finas en la periferia de los dos sistemas es similar en ello a la técnica de refinamiento local estático.

⁵ Rosenberg, D.J.: "Local Mesh Refinement for Finite Difference Methods", paper SPE 10974 presented at the 1982 SPE Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Sept 26-29

⁶ Quanddle, P. and Besset, P.: "The Use of Fiexible Gridding for improved Reservoir Modeling," paper SPE 12239 Presented at the 1983 Reservoir Simulation Symposium, San Francisco. Nov 15-18

⁷ Forsyth, P.A. and Sammon, P.H.: 'Local Mesh Refinement and Modeling of Faults and Pinchouts,' SPEFE (june 1986) 275-85.

Han D⁸. modificó y mejoro la técnica Heinemann de refinamiento dinámico y Aziz y Pedrosa⁹ desarrollaron un procedimiento para mejorar los cálculos en el bloque de pozo combinando mallas curvilíneas ortogonales con una malla rectangular en las vecindades del pozo, ellos compararon el comportamiento de las mallas híbridas contra modelos de malla gruesa usando inyección de agua y problemas de conificación notando que estos tipo de malla permiten describir mejor el flujo de fluidos cuando existen aspectos estructurales como fallas y discordancias.

Brand's¹⁰ ha usado técnicas de multimalla para un amplio rango de problemas, los métodos de multimalla usan dos patrones de malla, uno fina y una ordinaria o gruesa, estas cubren secuencialmente toda la región, básicamente en la técnica Brand's primero se obtiene una solución en el dominio de la malla gruesa con la ayuda de un criterio de interacción predeterminado, entonces la información es transferida de la malla gruesa a la malla fina por interpolación de esta solución, la interacción es continua con la malla fina, después que la interacción es satisfactoria, la solución mejora y el resto de la malla fina se incorpora a la malla base.

Beige, Forsyth y Scout¹¹ aplicaron la técnica Brandt's para solucionar ecuaciones de flujo tipo Poisson. McCormick, Thomas, Phillips y Schmidt¹² aplicaron el método de Brandt's con ligeras modificaciones para la solución de ecuaciones Poisson.

⁸ Han, D.K., Han, D. L., and Peng, L.T.: "A More Flexible Approach of Dynamic Local grid Refinement for Reservoir Modeling," SPE 16014 presented at the 1987 SPE Reservoir Simulation Symposium, San Antonio, Feb 1- 4.

⁹ Pedrosa, O.A. Jr. and .Aziz, K.: "Use of a Hybrid Grid in Reservoir Simulation", SPERE, (Nov 1986)611-21

¹⁰ Brandt, A.: "Multi-Level Adaptive Solutions to Boundary Value Problems," Math. Comp. (April 1977) 31, N 138, 333-90

¹¹ Behie, A. and Forsyth, P. A.: "Multigrid Solution of the Pressure Equation in Reservoir Simulation," SPEJ (Aug. 1983)623-32. Scott, T.: "Multi-Grid Methods for oil Reservoir Simulation in two and Three Dimensions, J. Computational Physics (June 1985)59, N 2,290-307

¹² McCormick, S, and Thomas, J.: "The Fast Adaptive Composite Grid (FAC) Method for Elliptic Equations," Mathematics of Computation. (April 1986) 439-56. Phillips, R.E. and Schmidt, F.W.: "Multigrid Techniques or the Numerical Solution of the Diffusion Equation", Numerical Heat Transfer (July 1984) 7, No. 3, 251-68.

Actualmente una técnica llamada refinamiento tipo parche, es una de las alternativas mas atractivas. La idea de un refinamiento tipo parche es escoger un remiendo que incluya la mayoría de comportamientos críticos que requieran una mejor resolución, y utilizar un refinamiento uniforme dentro de este remiendo. Las soluciones rápidas pueden ser aplicadas localmente en esta región usando datos de frontera de la malla gruesa original. Esta técnica reduce en gran medida los gastos indirectos puesto que las estructuras de datos especializadas no se generan, y el tamaño de la matriz es pequeño e igual en cada timestep para el remiendo, reduciendo a casi una centésima parte el tiempo de cómputo de la primera simulación completa y obteniendo resultados precisos para la determinación de fenómenos móviles y exactos a los de simulaciones corridas sobre las mallas mas finas.

Con el paso del tiempo las limitaciones que hacían un modelo más difícil de implementar y utilizar como consecuencia de los notables requerimientos con que se trabajaba, están siendo superadas con la ayuda de la tecnología de procesamiento paralelo y algoritmos programables, mediante los cuales se están planteando modelos cada vez más potentes y efectivos,

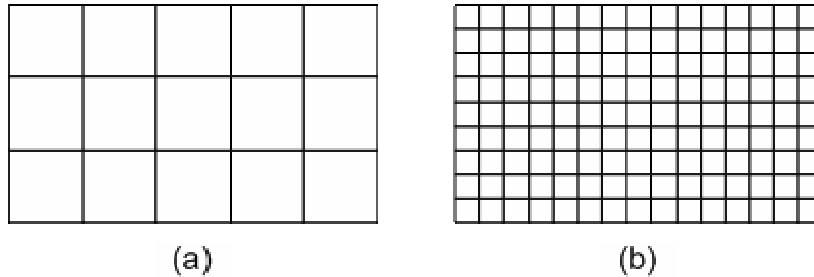
Combinaciones de enmallado dinámico con métodos para escalamiento y de orden más alto también han aparecido, donde en simulaciones de alta resolución, se han venido estudiando fenómenos de convección.

2. REFINAMIENTO LOCAL

Ha sido de gran interés reducir los tiempos de cómputo en el modelamiento numérico sin sacrificar el grado de exactitud. Para lograr esto, varios métodos de refinamiento de malla han sido desarrollados que usan densos enmallados localizados sólo en regiones de altos gradientes donde se requiere una mejor descripción de la distribución del fluido y de los parámetros de interés.

La técnica de diferencias finitas es el método numérico aplicado desde los inicios del modelamiento de flujo de fluidos en medios porosos. Para aproximar las ecuaciones de flujo es necesaria la discretización de las ecuaciones diferenciales parciales en el dominio de interés. El dominio físico de interés es subdividido para crear una malla, ya sea uniforme o no uniformemente espaciada y obtener el dominio computacional, por esto las mallas son líneas abstractas que se trazan sobre el dominio de la función a resolver (yacimientos) para subdividir el espacio en puntos discretos sobre los cuales se va a obtener la solución. Un modelo de malla ordinaria representa la subdivisión preliminar del dominio físico con un espacio de malla determinado (Δ) (Fig. 3a). Este primer nivel de discretización del dominio espacial produce un sistema de malla base el cual suele ser relativamente tosco por lo que es designado como el sistema ordinario o malla gruesa. La malla base puede ser refinada por reducción del Δ , subdividiendo las celdas de la malla gruesa en celdas más pequeñas en todo el dominio (segundo nivel de discretización), produciendo de esta manera, un sistema de malla fino (Fig. 3b). En general, las soluciones obtenidas con un sistema de malla fino serán más exactas que las soluciones generadas de un sistema de malla grueso.

Figura 3. Malla gruesa (a); Malla fina (b).



2.1 GENERALIDADES DEL REFINAMIENTO LOCAL.

El refinamiento local consiste en la subdivisión de la malla gruesa u ordinaria, solamente en ciertas regiones del dominio computacional. Las técnicas de refinación local de mallas pueden ser categorizadas en general bajo tres tipos: la refinación global convencional, la refinación local estática y la refinación local dinámica.

En el caso de refinación convencional de la malla (Fig.4a) las celdas de la malla ordinaria son subdivididas en ciertas regiones y las líneas de la malla fina son extendidas a través de todo el yacimiento. La refinación local estática es similar a la refinación convencional de la malla, pero las líneas de la malla fina no son prolongadas a los límites externos del sistema (Fig.4b). En la refinación local dinámica de la malla, la extensión, la ubicación y el número de las regiones refinadas variarán con el tiempo de acuerdo con los diferentes criterios que están vinculados al movimiento de una interfaz (Fig.5). Mallas compuestas (también conocidas como mallas híbridas) combinan modelos cilíndricos (o elípticos) y modelos de mallas rectangulares; estas han sido usadas en problemas numéricos de transferencia de calor y mecánica de fluidos.

En la simulación de procesos de recuperación de hidrocarburo, la malla fina se requiere solamente en ciertas regiones del yacimiento donde las saturaciones y/o

presiones están cambiando rápidamente. El método más simple para refinar esas regiones localizadas es a través del procedimiento de refinación convencional de malla. Este método es relativamente fácil de incorporar y no varía el procedimiento computacional, conservando el patrón estándar de cinco puntos (o cualquier otro esquema de diferencias finitas) usado en la aproximación.

El refinamiento hecho es a nivel de construcción de la malla no a nivel de cálculo numérico. Sin embargo, la implementación de la refinación convencional para regiones localizadas, resultará en una malla fina innecesaria en ciertas regiones donde la malla ordinaria habría sido suficiente. Por ejemplo en la Fig.4a, el refinamiento es necesario solamente en las celdas con pozo, pero debido a la extensión de las líneas de la malla fina, varias celdas diferentes de estas tuvieron que ser refinadas. Estas celdas adicionales incrementan la sobrecarga computacional que puede extenderse y convertirse en un gran problema. Esta sobrecarga puede ser reducida usando una técnica de refinación local de malla. Sin embargo, la implementación de la refinación local incrementa la complejidad del problema de flujo en las conexiones entre las celdas.

En una aproximación por diferencias finitas bidimensional (aproximación de cinco puntos), cada bloque tiene un máximo de cuatro bloques vecinos con los que puede tener intercambio de masa (Fig.3a). Si la malla base es refinada solamente sobre la región localizada (Fig. 4b), una celda ordinaria podría tener más de cuatro celdas cercanas con las que está en comunicación.

El acoplamiento entre celdas ordinarias y finas requiere la inclusión de varios controles para el manejo de las interacciones y la obtención de resultados apropiados.

Figura 4. Malla refinada convencionalmente (a); Malla refinada localmente.

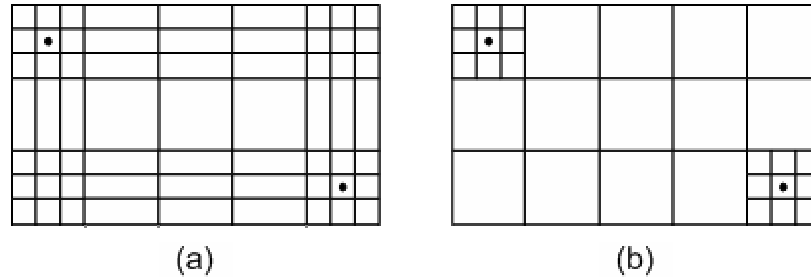
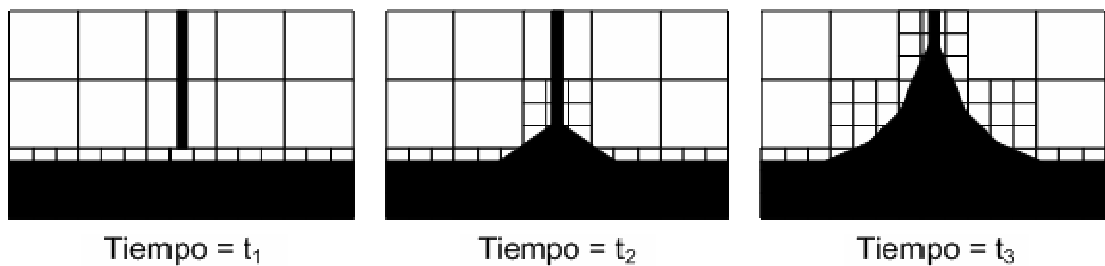


Figura 5. Refinación local dinámica de la malla¹³.



2.2 SISTEMA DE BLOQUES.

Las ventajas y desventajas de los tipos de enmallados fueron analizadas por Settari y Aziz¹⁴ quienes para la simulación de yacimientos utilizaron un sistema de bloques, representados por un sistema cartesiano de dos dimensiones con ejes I_2 e I_3 , en donde el plano coordenado está proyectado en la superficie tope del yacimiento y el eje I_1 está dirigido hacia abajo perpendicularmente al plano Fig.6. Cuando un nodo está asociado a cada bloque y los puntos nodales están

¹³ J. Manik, and T. Ertekin, *Development and Application of Dynamic and Static Local Grid Refinement Algorithms for Coning Studies*. SPE, the Pennsylvania State University 1997

¹⁴ Settari, A., and Aziz K. "Use of Irregular Grid in Reservoir Simulation", Soc. Petr. Eng. J., p. 103 (Dec. 1972).

centrados en los bloques, se forma una malla de bloques centrados, pero si la frontera del bloque divide en dos la distancia entre puntos nodales se forma una malla de punto distribuido.

En este sistema, se definen primero las posiciones de los nodos y después los límites del bloque, utilizando para la definición de los puntos nodales el segundo procedimiento debido a que la malla de punto distribuido asegura un método de solución consistente incluso con anchos de bloques no equidistantes. Esos bloques son denominados “bloques fundamentales o bases”.

A cada bloque base se le pueden asignar tres números los cuales determinan el número de subbloques en que está dividido el bloque base en dirección de las coordenadas. La partición está formado de tal modo que el punto nodal del bloque base, está situado en la superficie de comunicación de los subbloques. Los puntos nodales de los subbloques son seleccionados por el método de bloque centrado; las subcoordenadas son definidas por cada bloque principal alineado con la coordenada principal; Por lo tanto cada subbloque puede ser definido por el listado de coordenadas ($I1, I2, I3$) del bloque principal y las subcoordenadas ($I1T, I2T, I3T$) dentro del bloque base o fundamental Fig.6. Los parámetros de los subbloques son determinados por la interpolación de los parámetros de los bloques principales circundantes.

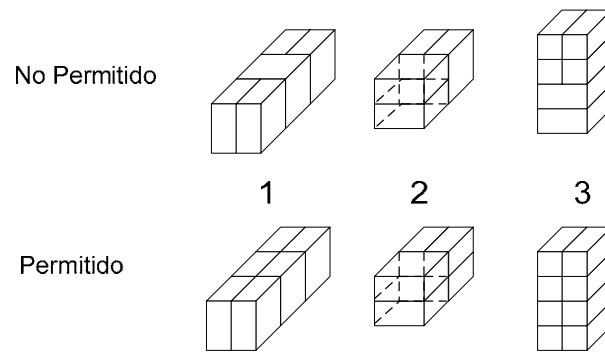
Según Heineman para determinar las subdivisiones de los bloques de deben tener en cuenta las siguientes reglas:

2.2.1 Reglas para la determinación de las subdivisiones.

1. El número de particiones, de dos bloques fundamentales vecinos en dirección $I2$ o $I3$, puede ser dividido solamente en esa dirección coordenada.
2. El número de particiones de cualquier bloque principal en comparación con el número de particiones de los bloques vecinos puede aumentar en una dirección solamente.

3. La subdivisión debe ser continua en la dirección $I1$.

Figura 6. Reglas para el refinamiento local¹.



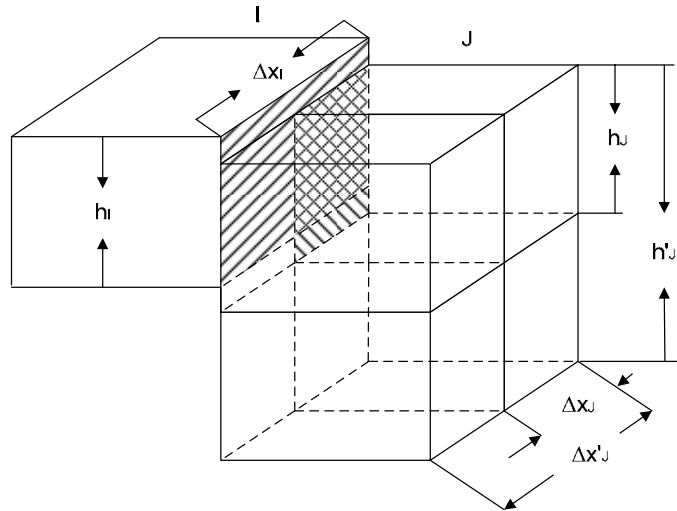
Los bloques principales no divididos y los subbloques que no han sido inactivados se llaman elementos; dos elementos con una superficie permeable en común se denominan vecinos.

Sin subdivisión, un elemento puede tener un máximo de seis vecinos, en un modelo en tres dimensiones; Los elementos son numerados continuamente ($I = 1, \dots, L$), si los elementos I y J son vecinos, entonces la superficie de comunicación A_{IJ} entre los elementos puede ser calculada por el plano de sección (Ec.2.1):

$$A_{IJ} = \frac{1}{2} \Delta x_J h_J \left(1 + \frac{\Delta x_I h_I}{\Delta x'_J h'_J} \right) \quad (2.1)$$

La Fig. 7 Muestra una representación diagramática de este cálculo.

Figura 7. Cálculo de la superficie de comunicación¹.



La distancia L_{IJ} entre los puntos nodales de los elementos I y J es la distancia coordenada proyectada perpendicularmente a la superficie de comunicación. Cada elemento está espacialmente definido por el índice I , las coordenadas por los índices $(I1, I2, I3)$, las subcoordenadas por $(I1T, I2T, I3T)$, la profundidad del tope por D_I , volumen poroso V_I , el índice J de los vecinos, la superficie de comunicación A_{IJ} , y las distancias L_{IJ} .

Si hay una diferencia de potencial entre elementos vecinos I y J , entonces la fase r ($r = o, w, g$) fluye de acuerdo con la ley de Darcy a la tasa:

$$q_{rIJ} = \tau_{rIJ} (\Phi_{rJ} - \Phi_{rI}) \quad (2.2)$$

Donde

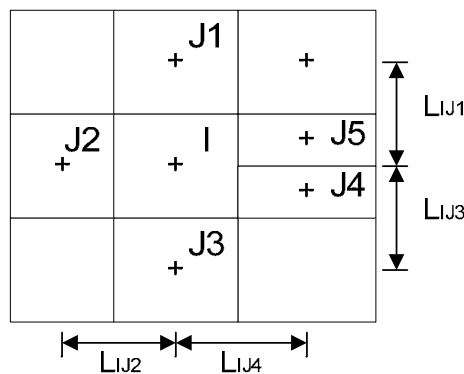
$$\Phi_{rI} = p_{rI} - \rho_{rI} g D_I \quad (2.3)$$

Φ_r Es el potencial, p_r la presión, ρ_r la densidad de la fase r , g es la aceleración gravitacional y D es la profundidad del tope del elemento.

2.3 ERROR DE DISCRETIZACIÓN.

El objetivo principal de la discretización de las ecuaciones diferenciales es la descripción práctica de los procesos de flujo en el yacimiento, sin embargo el análisis del error de discretización es necesario en la medida de asegurar que el error causado por la mala selección del sistema de enmallado no sea predominante, esto es particularmente cierto en la aplicación de refinamiento local dinámico ya que variaciones del número de vecinos distorsiona la simetría de la matriz de coeficientes.

Figura 9. Elementos considerados en la fórmula de discretización.



Por ejemplo, el error de discretización para el punto nodal en el bloque I ; en el caso de dos dimensiones Fig.9, el operador de Laplace para este elemento es aproximado por la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} = \Lambda[\Phi_I] + e[\Phi_I]$$

Con:

$$\Lambda[\Phi_I] = \frac{2}{L_{IJ2} + L_{IJ4}} \left[\frac{L_{IJ4}}{L_{IJ1} + L_{IJ3}} \frac{\Phi_{J4} - \Phi_I}{L_{IJ4}} + \frac{L_{IJ1}}{L_{IJ1} + L_{IJ3}} \frac{\Phi_{J5} - \Phi_I}{L_{IJ5}} + \frac{\Phi_{J2} - \Phi_I}{L_{IJ2}} \right]$$

$$+ \frac{2}{L_{IJ1} + L_{IJ3}} \left[\frac{\Phi_{J1} - \Phi_I}{L_{IJ1}} + \frac{\Phi_{J3} - \Phi_I}{L_{IJ3}} \right] \quad (2.6)$$

En este caso el error de discretización es dado de la siguiente manera:

$$e[\Phi_I] = \frac{L_{IJ3} - L_{IJ1}}{2(L_{IJ2} + L_{IJ4})} \left[\frac{1}{L_{IJ4}} \frac{\partial \Phi}{\partial y} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x \partial y} \right] + \frac{L_{IJ1}^2 - L_{IJ1}L_{IJ3} + L_{IJ3}^2}{16L_{IJ4}(L_{IJ2} + L_{IJ4})} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + O(\sigma) \quad (2.7)$$

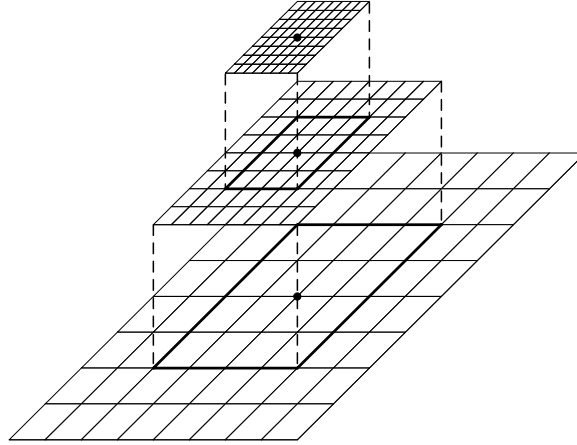
Donde:

$$O(\sigma) = O(L_{IJ1}) = O(L_{IJ2}) = O(L_{IJ3}) = O(L_{IJ4}) = O(L_{IJ5}) \quad (2.8)$$

Ecuación 2.7 muestra que la consistencia del procedimiento seleccionado en el refinamiento local concuerda con la consistencia del procedimiento de bloque-centrado si son elegidos anchos de bloque equidistantes para el área de la subdivisión. Una mejora del grado de consistencia puede ser posible teniendo en cuenta elementos cercanos adicionales en la fórmula de discretización.

El refinamiento adicional en el dominio de cómputo es válido y alcanzado generando modelos de malla más finos dentro de una serie de malla fina previamente establecida. La Fig.10, muestra los múltiples niveles del refinamiento.

Figura 10. Representación de los múltiples niveles de refinamiento¹⁵.



El manejo de los modelos de mallas, con múltiples niveles de refinamiento se lleva a cabo en cada paso de tiempo de la siguiente manera:

1. Solución de las ecuaciones de simulación del yacimiento en todo el dominio con un modelo de malla razonablemente grueso.
2. Generación del primer nivel refinado de la serie, en las regiones de altos gradientes.
3. Definición de la condición de frontera del tipo Dirichlet no homogénea para la solución de la malla gruesa a la malla fina en las interfaces de la malla gruesa-fina.
4. Solución de las ecuaciones de simulación del yacimiento solamente dentro de los límites del modelo de la malla fina.
5. Generación de un segundo nivel de refinado de malla fina, en las regiones donde el espaciamiento del refinado del primer nivel de malla no pueda manejar adecuadamente altos gradientes.
6. Hacer el paso tres para este segundo nivel de malla fina.
7. Solución de las ecuaciones de diferencia finitas dentro del dominio del modelo del segundo nivel de la malla fina.

¹⁵ Mustafa B. Blterge and Turgay Ertekin, *Development and testing of a Static/Dynamic Local Grid refinement Technique*. Middle East Technical U, and, Pennsylvania State U. SPE 19803

8. En caso necesario, continuar con un refinamiento adicional de manera similar.

Como caso de limitación, el tamaño de la malla podría ser reducido sucesivamente hasta que el tamaño de una celda sea aproximadamente igual al tamaño de un pozo. La técnica propuesta conserva el esquema estándar de cinco puntos (o siete puntos) en diferencias finitas. Esto es ventajoso porque no introduce “alas” en la estructura congregada de la matriz de coeficientes causada por interacciones de la malla fina y gruesa. El vector desconocido de cada matriz de coeficiente se soluciona por separado. Esto proporciona una relajación significativa en las rutinas directas de la solución, y rápidamente, se alcanza un uso eficaz de computadora.

Una potencial desventaja del uso del enmallado en diversas escalas para el mismo yacimiento es la creación de interfaces artificiales que pueden existir cuando se juntan las mallas que incorporan las celdas de variados tamaños. Tales interfaces se presentan en el mallas CP (Corner point) e implican varias celdas de una cierta clase de refinamiento que entra en contacto con una sola cara de una celda (más grande) de otra malla. El efecto de estas interfaces disminuye si hay poca variación de la corriente de flujo paralela a la interfaz, porque si hay poca variación paralela, el flujo casi perpendicular desde la celda grande a las más pequeñas apenas causa una división en el flujo y una pequeña pérdida en la exactitud. Sin embargo, un gradiente paralelo a la interfaz sería representado mejor por celdas más pequeñas en un lado que por celdas más gruesas en el otro, pues esto representa una potencial pérdida de la exactitud en un interfaz si existen tales gradientes paralelos.

Un ejemplo de la pérdida potencial de la exactitud en un interfaz ocurre cuando se refinan pocas capas gruesas en la parte superior en un modelo de yacimiento y no las capas más bajas. Las celdas más gruesas en las capas más bajas pueden

afectar el flujo en las celdas finas que reposan justo encima de ellas puesto que actúan como un acuífero de presión relativamente uniforme.

2.4 ESQUEMAS DE REFINAMIENTO DE MALLA ADAPTATIVA.

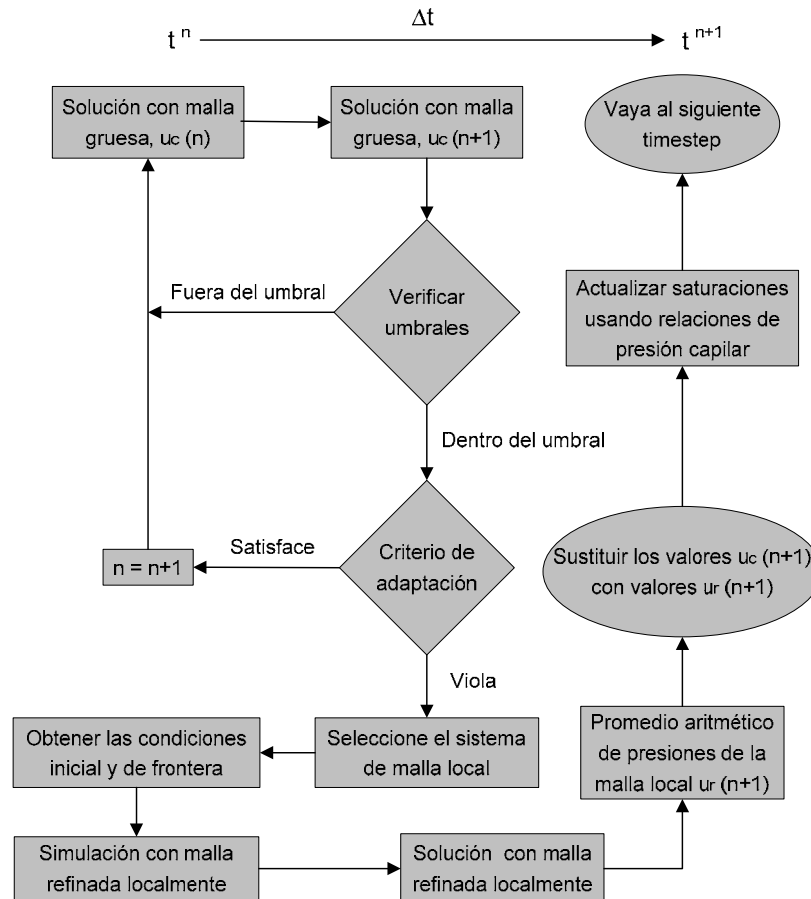
En este estudio, la técnica más eficiente y novedosa similar al refinamiento de múltiples niveles es desarrollada para el refinamiento local de malla. Esta técnica no requiere una estructura de datos compleja sino requiere que la información sea transferida de una malla a otra. La idea de esta técnica es escoger un parche (cada sector corresponde a una celda gruesa) que incluye la mayoría de los comportamientos críticos que requieren una mejor resolución, y aplicar un refinamiento uniforme de malla fina sobre este parche. Puesto que en este parche se utiliza un refinamiento uniforme predeterminado, la solución se obtiene en una forma rápida. Las condiciones iniciales para este parche se obtienen de la malla gruesa original, y las condiciones de frontera se derivan de los bloques gruesos circundantes. Una vez que se solucione un sector, el siguiente puede ser solucionado y así sucesivamente. Las decisiones sobre cuántos parches deben ser solucionados en un determinado paso de tiempo se estipula antes de que se realicen las iteraciones locales reales de la malla; tal técnica se puede implementar en máquinas que tienen procesadores paralelos. Esta técnica trabaja conceptualmente de la manera siguiente.

1. Se consideran dos sistemas de malla separados, una malla gruesa (o base) y una malla refinada. Primero, se solucionan las ecuaciones de diferencias finitas para obtener las distribuciones de presión y saturación en el sistema malla grueso.
2. Estas soluciones entonces son utilizadas para localizar los parches (regiones) de los altos gradientes de saturación, examinando las distribuciones de la misma. Las celdas gruesas dentro de estos parches se

subdividen en varios bloques más pequeños (en el estudio *A Patch-Type Adaptive Local Grid Refinement Technique and Its Application to Horizontal Wells* SPE 37352 se refinaron 27 bloques por malla gruesa) para formar un sistema de malla uniforme 3x3x3 para este caso que se tomó como ejemplo. Las presiones y las saturaciones de los bloques gruesos se distribuyen a los bloques refinados para establecer las condiciones iniciales, y se especifican las condiciones de frontera tipo Dirichlet no homogénea para los bloques fronterizos. Lo que se busca en esto es mejorar continuamente la solución esperada más allá del interfaz grueso-fino de la malla, en las regiones gruesas del enmallado si continuaran las iteraciones.

3. Se solucionan los parches locales y los valores refinados de la presión son promediados aritméticamente y transferidos a la malla gruesa correspondiente. Los valores actualizados de saturación y tasa de flujo para la malla gruesa también son obtenidos de las mallas locales implicadas en la simulación.
4. Una vez completados todos los parches, se llevan a cabo los cálculos para el siguiente paso de tiempo con las presiones, saturaciones y tasa de flujo actualizadas para los bloques que fueron refinados en el paso de tiempo anterior. La Fig.11, resume los pasos del cálculo para el desarrollo de la solución desde el paso de tiempo (n) al paso de tiempo (n+1).

Figura 11. Ilustración de la interacción entre la malla gruesa y la malla refinada localmente¹⁶.



2.4.1 Interacciones de mallas. Basados en cómo es manejada la interacción de la malla ordinaria, las técnicas de refinación local pueden ser agrupadas bajo dos categorías principales. Las técnicas de refinación en que las celdas de las mallas ordinarias y finas son solucionadas simultáneamente (*simultaneous coarse-fine grid interaction*) constituye la primera categoría. El segundo grupo involucra las

¹⁶Shree Vikas and Turgay Ertekin, *A Patch-Type Adaptive Local Grid Refinement Technique and Its Application to Horizontal Wells.*, SPE 37352, ICF Resources Inc., and, Pennsylvania State University. 23-25 October 1996.

técnicas refinación en las que las mallas ordinaria y fina son solucionadas secuencialmente (*sequential coarse-fine grids interactions*).

La interacción simultánea de la malla ordinaria-fina usa una aproximación de diferencias finitas poco convencional en dos dimensiones que admite más de cuatro acoplamientos para la transferencia de masa entre celdas. Por otro lado, la interacción secuencial de la malla ordinaria-fina conserva las formulaciones de cinco puntos usuales en las representaciones bidimensionales.

La interacción entre la malla (base) gruesa y la malla local se hace con un método especialmente desarrollado para la transferencia de datos. Esta transferencia de datos es un paso clave en el refinamiento tipo parche porque las mejoras son capturadas y transmitidas a las mallas gruesas a través de esta transferencia. Se ha desarrollado una media aritmética AACP con la presión capilar, como método para la transferencia de datos (*Arithmetic Average with Capillary Pressure*) y se ha utilizado en simulaciones con mallas locales. En este método de transferencia, las presiones de las celdas se promedian aritméticamente para obtener las presiones de la fase.

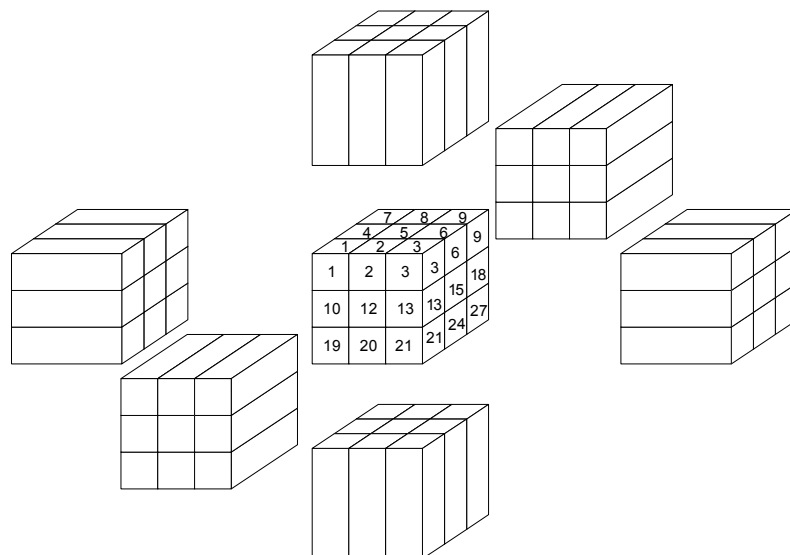
Entonces las características de la presión capilar se utilizan para generar los valores actualizados de la saturación para todas las fases presentes en el sistema. Por lo tanto, este método captura los cambios locales en la presión por el método de la media aritmética y después computa las saturaciones de fase, relacionándolas con la presión capilar para mantener el equilibrio de la fase.

2.4.2 Modelo de Refinamiento Local. En los ejercicios numéricos conducidos, el bloque de pozo (*wellblock*) se refina siempre usando algoritmos de refinamiento locales estáticos de malla (*Static Local Grid Refinement*), y los otros bloques o celdas son refinados o agrupados en las varias etapas de la simulación usando procedimientos de refinamiento locales dinámicos de la malla (*Dynamic Local grid Refinement*).

El modelo propuesto de refinamiento local se desarrolla para flujo trifásico en un sistema tridimensional. Se utiliza una configuración de malla cuerpo-centrado

(*body-centered*) en coordenadas rectangulares. Para propósitos de simplicidad, el refinamiento local será discutido solamente en un bloque grueso de la malla. La Fig.12, muestra una celda central gruesa subdividida en 27 bloques iguales; los bloques que lo rodean (6 en conjunto para el caso tridimensional) están cada uno subdividido en 9 bloques. Estos bloques proporcionan las condiciones de frontera para las mallas locales. La subdivisión (3x3x3) del bloque grueso en mallas locales, es conveniente para la configuración cuerpo-centrado, porque el pozo se puede poner en el centro de la celda. El modelo se desarrolla de una manera tal que sea capaz de tomar pozos horizontales así como pozos verticales. Para los pozos verticales, los bloques 5, 14 y 23 se convierten en los bloques de pozo de la simulación, mientras que los bloques 13, 14, 15 o los bloques 11, 14 y 17 son los bloques de pozo para los pozos horizontales colocados paralelamente a las direcciones x y y respectivamente. El esquema de refinamiento local es capaz de refinar más de un bloque grueso en un solo paso de tiempo y luego solucionarlos consecuentemente con la transferencia de datos de una celda a otra.

Figura 12. Modelo de refinamiento local¹⁶.



2.4.3 Estrategias de Refinamiento. Los sistemas de malla local y gruesa se consideran dos sistemas de malla separados. Las mallas refinadas localmente son construidas subdividiendo la malla gruesa y ubicándolas en la malla gruesa origen. Las características de la roca, tales como porosidad y permeabilidad de todos los bloques subdivididos son iguales a las del bloque grueso correspondiente. Sin embargo, los valores de presión del bloque refinado y de la saturación para las condiciones iniciales y las condiciones de frontera del sistema refinado, si no están disponibles, tienen que ser asignadas para asegurar que el sistema de malla local refinado se convierta en un problema bien planteado que pueda ser resuelto.

Cuando la distribución de presión en este tipo de aplicaciones es una función que varía suavemente, las presiones de la malla gruesa se pueden interpolar linealmente para obtener las presiones inicial y de frontera de la malla refinada.

En este trabajo se recomienda utilizar el esquema de interpolación lineal de nueve puntos desarrollado por Quandalle y Basset (1985). Esta técnica considera efectos areales así como variaciones verticales en la interpolación que se computa, por lo tanto es mucho más realista que otras técnicas simples. Según lo demostrado en la Fig.13, la presión es calculada en el punto "f" de la malla local; la presión local de la malla " p^f " se calcula de los puntos circundantes. Las presiones en los nodos de la malla gruesa tales como p_1^c, p_2^c , etc. se utilizan para calcular p^f como sigue:

$$p^f = \frac{(\Delta x_2 \Delta y_2 \Delta z_2) p_1^c}{(\Delta x_1 + \Delta x_2)(\Delta y_1 + \Delta y_2)(\Delta z_1 \Delta z_2)} + \frac{(\Delta x_2 \Delta y_1 \Delta z_1) p_2^c}{(\Delta x_1 + \Delta x_2)(\Delta y_1 + \Delta y_2)(\Delta z_1 \Delta z_2)} +$$

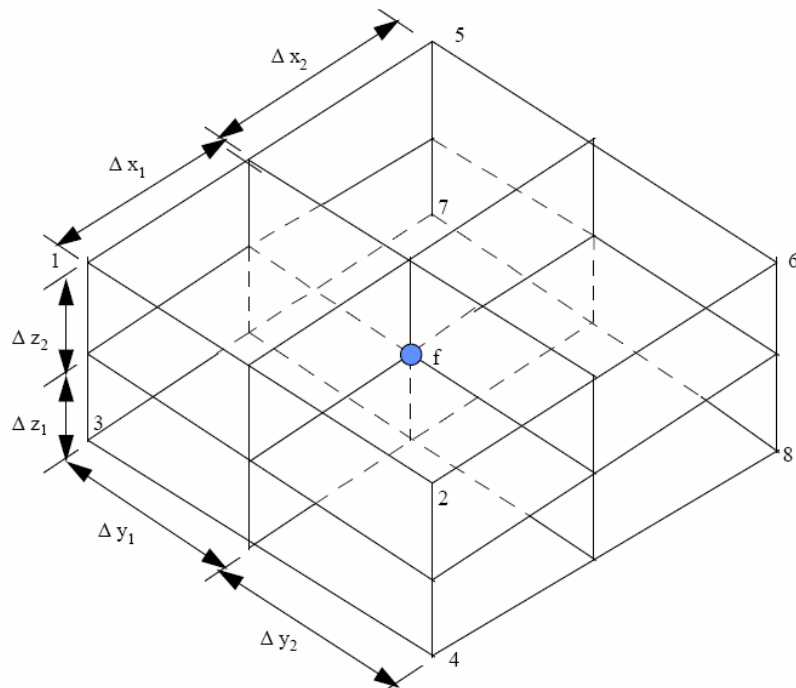
$$\frac{(\Delta x_2 \Delta y_2 \Delta z_2) p_3^c}{(\Delta x_1 + \Delta x_2)(\Delta y_1 + \Delta y_2)(\Delta z_1 \Delta z_2)} + \frac{(\Delta x_2 \Delta y_1 \Delta z_2) p_4^c}{(\Delta x_1 + \Delta x_2)(\Delta y_1 + \Delta y_2)(\Delta z_1 \Delta z_2)} +$$

$$\frac{(\Delta x_1 \Delta y_2 \Delta z_1) p_5^c}{(\Delta x_1 + \Delta x_2)(\Delta y_1 + \Delta y_2)(\Delta z_1 \Delta z_2)} + \frac{(\Delta x_1 \Delta y_1 \Delta z_1) p_6^c}{(\Delta x_1 + \Delta x_2)(\Delta y_1 + \Delta y_2)(\Delta z_1 \Delta z_2)} +$$

$$\frac{(\Delta x_1 \Delta y_2 \Delta z_2) p_7^c}{(\Delta x_1 + \Delta x_2)(\Delta y_1 + \Delta y_2)(\Delta z_1 \Delta z_2)} + \frac{(\Delta x_1 \Delta y_1 \Delta z_2) p_8^c}{(\Delta x_1 + \Delta x_2)(\Delta y_1 + \Delta y_2)(\Delta z_1 \Delta z_2)} \quad (2.9)$$

Los valores de la saturación no se pueden interpolar debido a la presencia de los frentes de desplazamiento. Predicciones de la interpolación pueden contradecir el sentido físico del problema. Por lo tanto, en vez de interpolar las saturaciones, el valor de la saturación gruesa correspondiente, se asigna a cada bloque refinado que resida dentro de ese bloque grueso en particular.

Figura 13. Técnica de interpolación usada en el refinamiento local¹⁶.



2.4.4 Manejo del refinamiento local de la malla en los bloques de frontera.

Según lo discutido anteriormente, las condiciones iniciales y de frontera para las mallas refinadas se calculan de las celdas gruesas correspondientes que la rodean, sin embargo, cuando no hay interpolación disponible para un bloque grueso, como es el caso de refinar una malla gruesa al lado de un límite externo cerrado, las condiciones inicial y de frontera para la malla local no pueden ser calculadas, por lo que, en tales casos se introduce un bloque grueso hipotético adyacente al bloque grueso existente (el que se necesita refinar) y se asignan las características a estos bloques dependiendo de los siguientes casos. Tal conexión se puede hacer en un plano horizontal o en un plano vertical.

2.4.4.1 Bloque grueso hipotético en plano horizontal.

CASO 1: Según la Fig.14a, los bloques gruesos 1 y 2 del yacimiento están disponibles. El bloque 2 necesita ser refinado y por lo tanto se ha construido un bloque hipotético 3 (indicado por la línea discontinua). La extrapolación lineal utilizada para obtener la presión, p_3^f , en el bloque 3 es:

$$p_3^f = \frac{d_1}{d_2} (p_2^f - p_1^f) + p_2^f \quad (2.10)$$

d_1 es el tamaño de del bloque 1, y d_2 es el tamaño de del bloque 2. Puesto que la saturación no es una cantidad interpolable, la saturación en el bloque 2, S_2^f , se asigna al bloque hipotético 3.

CASO 2: En este caso, los bloques vecinos no existen en la dirección x o en y Fig.14b, Tales casos se presentan cuando la simulación se realiza para un sistema con límites irregulares, puesto que no hay bloque disponible a ningún

lado para realizar la interpolación; las condiciones existentes del bloque grueso se utilizan para asignar valores a los bloques hipotéticos.

$$p_2^f = p_1^f \quad y \quad p_3^f = p_1^f \quad (2.11)$$

$$S_2^f = S_1^f \quad y \quad S_3^f = S_1^f \quad (2.12)$$

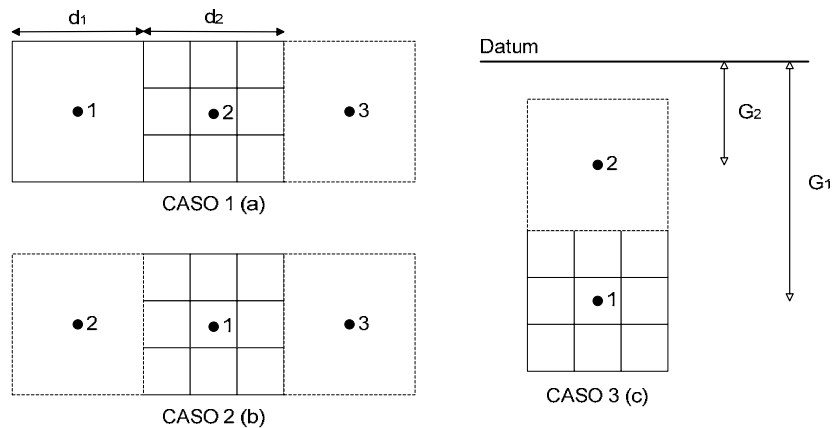
2.4.4.2 Bloque grueso hipotético en plano vertical.

CASO 3: La construcción de un bloque grueso hipotético se requiere para el caso de un sistema de dos dimensiones o en un sistema tridimensional cuando el refinamiento es implementado en la capa del tope o del fondo Fig.14c, En estos casos, se tiene que aplicar la corrección por gravedad a las presiones de los bloques gruesos hipotéticos como sigue:

$$p_2^f = p_1^f - \rho_f \frac{1}{144} \frac{g}{g_c} (G_1 - G_2) \quad (2.13)$$

La saturación del bloque grueso hipotético se fija igual a la saturación del bloque existente 1.

Figura 14. Tratamiento de los bloques de frontera para el refinamiento local¹⁶.



2.4.5 Refinamiento local en los bloques de pozo. La discusión anterior sobre calcular las presiones hipotéticas del bloque para el caso 1 es aplicable solamente si el bloque 2 no contiene pozo. Consideremos el refinamiento local de la malla en el bloque 2 (que contiene un pozo inyector). Según la Fig.15, el bloque grueso 2, situado al lado del límite sellado ha sido refinado; un bloque hipotético 3 se construye y la estimación inicial para la presión se obtiene usando la extrapolación lineal entre las presiones de los bloques 1 y 2. La presión en el bloque refinado 2a se obtiene inicialmente usando la interpolación lineal entre la presión del bloque 2 y la presión extrapolada en el bloque hipotético.

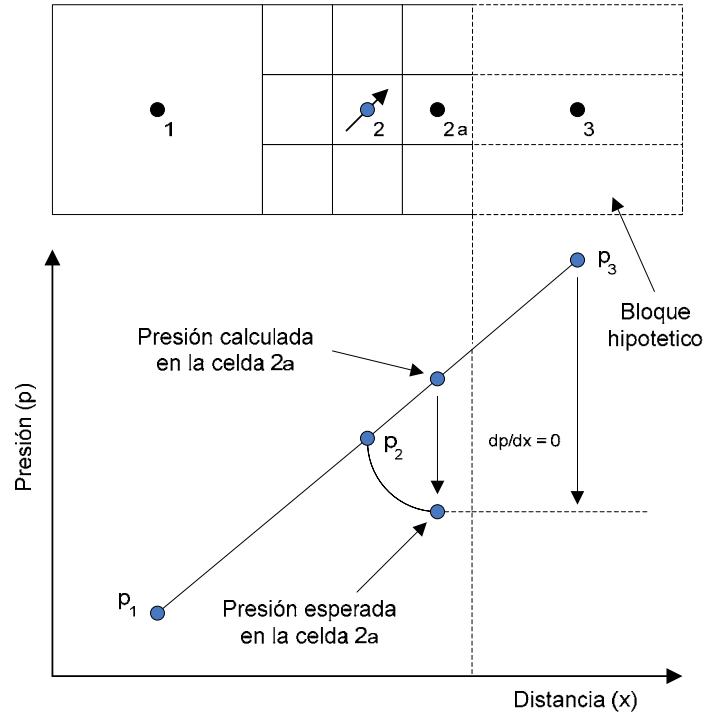
La Fig.15, también muestra el perfil de la presión, la interpolación proporciona una presión inicial (indicada por el término " presión calculada ") en el bloque refinado 2a.

Está claro de la figura 15 que la diferencia entre la presión calculada y la presión prevista es grande en el bloque refinado 2a. Esto es debido al hecho que en vez de un aumento monótono según lo modelado en este estudio, la presión aumenta del punto 1 al punto 2 y luego disminuye del punto 2 al valor en el límite externo del sistema.

Una vez obtenidas las condiciones inicial y de frontera para todas las mallas locales, las iteraciones locales de la malla mejoran la solución esperada o deseada de la presión según lo muestra la Fig.15, Así pues, si un pozo está situado en una celda que necesita de ser refinada, entonces se pueden anticipar grandes diferencias entre las presiones calculadas y las presiones esperadas, y muchas iteraciones serán requeridas en estas celdas para alcanzar la solución. Este problema es solucionado en el modelo utilizando un refinamiento local estático en estos bloques de pozo.

El refinamiento local de la malla en los wellblocks se realiza al comienzo de la simulación y no se quita hasta la terminación del ejercicio de la simulación.

Figura 15. Comportamiento de la presión en un bloque de frontera que contiene un pozo inyector¹⁶.



2.4.6 Asignación de las condiciones inicial y de frontera. Las condiciones iniciales y de frontera asociadas con una EDP deben de especificarse con el fin de obtener una solución única, sí se considera que el problema está bien determinado, es decir, sí la solución existe y depende continuamente de sus condiciones de entorno. Las condiciones iniciales se requieren como especificación de arranque en la solución de problemas dinámicos, mientras que las condiciones de frontera acotan el dominio de valores de la variable dependiente en la región de análisis, por lo que se requieren dos condiciones de frontera por cada coordenada espacial. Desde el punto de vista de los procesos de transferencia; como el flujo de fluidos en medios porosos, se tienen tres tipos clásicos de condiciones de frontera, los cuales se describen en la Tabla 1.

Tabla 1. Tipos de condiciones de frontera

Nombre	Ecuación para u	Significado físico
Dirichlet	$u = f(n)$	Frontera definida con valores fijos
Neumann	$du / dn = f(n)$	Frontera definida con un flux
Robbins	$a(du / dn) + bu = f(n)$	Ecuación de transferencia en una interfase

La asignación de las condiciones inicial y de frontera para las simulaciones con mallas locales es el paso más crítico del uso de refinamiento local dinámico de la malla. En tal refinamiento, el número de la región refinada y su localización son dependientes del tiempo. Un bloque grueso particular pudo necesitar el refinamiento en un paso de tiempo en particular pero pudo no necesitar ser refinado en el siguiente paso de tiempo y viceversa. Esto depende de la localización de los frentes de saturación y de la magnitud de los cambios que un bloque grueso particular experimenta en un paso de tiempo específico. En general, la técnica de refinamiento local dinámico de la malla permite que el refinamiento sea iniciado o terminado en cualquier paso de tiempo. En el refinamiento local estático, una región fija del sistema grueso de la malla se refina continuamente desde el principio hasta el final del ejercicio de la simulación. En los wellblocks donde se utiliza el refinamiento local, las condiciones iniciales del sistema refinado se asignan solamente una vez al principio de la simulación. Sin embargo, para el refinamiento local dinámico, las condiciones iniciales se calculan siempre de los valores de la malla gruesa del último paso de tiempo. Para las mallas gruesas que fueron refinadas en el timestep anterior, las condiciones iniciales de celda local se toman de las simulaciones de malla local del paso de tiempo anterior.

Las condiciones de frontera para las regiones refinadas también se computan de las soluciones de la malla gruesa. En este estudio, se especifican condiciones de

frontera tipo Dirichlet no homogéneo en los bloques de la región refinada. Este tipo de condición de frontera mantiene constantes los valores de la presión y la saturación para los bloques refinados en la frontera dentro del timestep. Estos valores son computados mediante una adecuada interpolación (según se discutió anteriormente) de los valores de la malla gruesa para actual paso de tiempo.

Las condiciones inicial y de frontera son actualizadas en cada timestep mientras que la solución de la malla gruesa alimenta al esquema de la interpolación en cada paso de tiempo para su cálculo.

Dependiendo de las condiciones de las mallas locales (nuevas o antiguas) el cálculo de la condición inicial difiere. En el caso de una malla local que también fue refinada durante el paso de tiempo anterior, las condiciones iniciales se toman de la solución del paso de tiempo previo (que se almacena en arreglos) para esa malla local en particular. Para una malla local que no fue refinada durante el paso de tiempo anterior, se utiliza la técnica de interpolación para computar las condiciones iniciales. El cálculo de las condiciones de frontera (presión y saturación) para cada paso de tiempo se hace de los correspondientes valores de las celdas gruesas del actual paso de tiempo. Es muy importante observar que la comunicación entre el sistema grueso y el sistema de malla local ocurre en el límite externo y debido a que las condiciones de frontera externas del sistema de malla local son funciones de las condiciones de malla gruesa, estas tienen que ser computadas en cada paso de tiempo antes de que se lleve a cabo la simulación con la malla local.

En el refinamiento local, cada parche que contiene mallas locales es simulado por separado, y una vez es alcanzada la convergencia, el control se mueve al siguiente parche. Cuando se complete la simulación de la malla local en todos los diversos parches, en un paso de tiempo particular, los valores del bloque grueso son actualizados con valores mejorados de la presión y de la saturación. Los

valores actualizados de la tasa de flujo también se transfieren al correspondiente gridblock grueso. Una vez que esto se complete, se asume que la mejora necesaria se logró para los bloques que experimenten cambios significativos en ese paso de tiempo. Entonces los cálculos continúan para el siguiente paso de tiempo donde la simulación con malla gruesa se lleva a cabo con éstos valores actualizados que sirven como condición inicial.

3. CRITERIOS PARA EL REFINAMIENTO LOCAL DINÁMICO

La técnica de diferencias finitas ha sido la principal herramienta numérica empleada en la simulación de yacimientos. Las ecuaciones de diferencias finitas substituyen el continuo problema descrito por ecuaciones diferenciales, y aproximan la solución a un sistema finito de puntos discretos dentro del dominio de interés. Estos puntos discretos se deben seleccionar muy cuidadosamente para que concuerden con la geometría del yacimiento. Sobre decir, que la exactitud, el tiempo y el costo que implica un estudio de simulación dependen del número de estos puntos de malla y de las dimensiones espaciales.

Para problemas de simulación en grandes yacimientos, las mallas finas se necesitan únicamente en partes del yacimiento donde las saturaciones o las presiones están cambiando rápidamente. El empleo del refinamiento global conduce a muchos bloques pequeños indeseados en algunas partes del yacimiento donde los cambios no son drásticos. Puesto que estas regiones a menudo son de naturaleza dinámica, la eficiente aplicación de la simulación requiere la capacidad de desarrollar una malla dinámica AUTO-adaptativa para el refinamiento local.

Muchos trabajos de la ingeniería de yacimientos implican procesos a gran escala y fenómenos altamente localizados que a menudo son muy críticos para el funcionamiento total del yacimiento. Una dificultad asociada a modelar procesos especiales de interfaces es cómo escalar las características de la roca. Es muy posible que la presencia de un interfaz pudiera afectar la selección del procedimiento de escalamiento que debe ser utilizado.

Las características del interfaz, por ejemplo si es predominantemente horizontal cercano al tope de un compartimiento de vapor, o vertical cercano a los lados del compartimiento, podrían introducir una variable importante en el escalamiento. El escalamiento puede ser bastante complicado sin introducir límites móviles y una reevaluación periódica asociada de las características de la roca, en el problema. Para las aplicaciones a gran escala, es virtualmente imposible utilizar un sistema de malla que sea suficientemente fina para resolver los fenómenos locales debido a las razones descritas anteriormente.

La motivación para este estudio, es por lo tanto, mostrar una técnica de refinamiento local dinámico eficiente para los modelos numéricos multifásicos, y multidimensionales, válida para pozos horizontales y verticales. Esta técnica se aplica a los modelos numéricos que incorporan el método IMPES (presión implícita, saturación explícita).

3.1 MALLAS DINÁMICAS

Se han hecho extensos trabajos conducidos a reducir los tiempos de cómputo sin sacrificar el grado de exactitud. Diversos esquemas de refinamiento de malla se han desarrollado para alcanzar este objetivo, dedicándose gran interés en una reciente técnica llamada refinamiento local de mallas dinámicas. En comparación con el sistema convencional de enmallado fino, esta técnica puede reducir considerablemente la cantidad de celdas y ahorrar tiempo de computo sin sacrificar exactitud.

3.1.1 Características de las mallas dinámicas. En la práctica se debe tener en cuenta que para llevar a cabo un refinamiento local dinámico de malla, deben ser resueltos una serie de problemas.

Desde los movimientos del frente de desplazamiento con el tiempo, la localización de la malla refinada, el tamaño de los bloques, el orden y la formulación de los coeficientes en la matriz, todos dependen del tiempo y necesitan ser tratados acordemente. Por eso es necesario designar un completo set de sofisticados y flexibles programas para solucionar esos problemas satisfactoriamente.

A continuación se presentan las características y aspectos en general que encierran la implementación de mallas dinámicas:

1. Puede ser usada para los refinamientos locales dinámicos y estáticos.
2. La posición del frente de desplazamiento puede ser automáticamente identificada en cada paso de tiempo. Los correspondientes bloques pueden ser subdivididos paso a paso arbitrariamente en subbloques y almacenados en el computador. En caso de ser necesario o deseable, varios pasos de tiempo pueden ser saltados u omitidos.
3. En la metodología propuesta, todos los bloques refinados en el dominio de la malla fina se reordenan automáticamente para eliminar las celdas inactivas, por lo tanto, la matriz de coeficientes correspondiente es simple y relativamente regular.
4. El método acomoda cualquier número de regiones localmente refinadas sin imponer restricciones de localización.
5. Si todo el dominio físico requiere el refinamiento, el algoritmo evoca al usuario para redefinir el tamaño fundamental de la malla para una óptima exactitud.
6. El método de solución propuesto es el adecuado para la ecuación matricial con caracteres dinámicos, tales como el tiempo, dependiente del orden y estructura de la matriz.
7. Cuenta con un sistema diseñado para el manejo de datos el cual incluye funciones tan complejas como el arrastre, control, memorización,

ordenamiento y transformación; además este sistema es simple y suficientemente flexible.

8. El refinamiento se puede dar por terminado o reiniciarse arbitrariamente en cualquier paso de tiempo.

Las formulaciones que determinan la naturaleza y el grado de implicitud de las variables por elemento, son construidas paso a paso; el usuario define el paso realizable más alto para cada elemento. Independientemente de esto, al principio de cada procedimiento de cálculo, es válida la formulación más simple tanto como sea posible.

La formulación semi-implícita es valida para los elementos donde están definidos los pozos activos, mientras que la formulación IMPES es válida para todos los otros elementos.

Este proceso dinámico de formulación cambia el número total de variables implícitamente calculadas por paso de tiempo. Como una regla, el tamaño de los paso de tiempo cambiará con el incremento en el numero de variables implícitas.

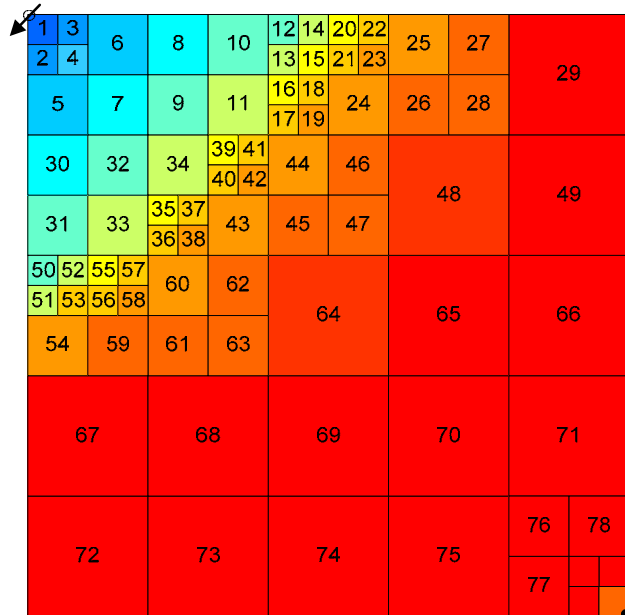
3.1.2 Subdivisión de bloques

Después que el yacimiento ha sido dividido en N_{x1} y N_{y1} bloques fundamentales o primer nivel de bloques, cualquiera de ese nivel puede ser subdividido en un segundo nivel de subbloques N_{x2} y N_{y2} si se necesita un estudio más detallado. Además, cualquier de los subbloques de segundo nivel puede ser dividido en un tercer nivel de bloques N_{x3} y N_{y3} . En donde N_{xi} y N_{yi} ($i=1, 2, 3$) denota el número de segmentos en que se divide el nivel i a lo largo de las direcciones X y Y respectivamente y ellos pueden ser determinados arbitrariamente según como sea requerido Fig.10.

Este procedimiento puede ser llamado refinamiento de 3 niveles consecutivos. El refinamiento de tres niveles parece ser suficiente para la mayoría de los casos en la simulación de yacimientos. La figura 16 muestra un ejemplo de este tipo de refinamiento.

Este procedimiento combina las ventajas de la exactitud de estudio de la región de interés y la minimización del número de bloques y subbloques.

Figura 16. Esquema de ordenamiento natural para un refinamiento local sucesivo de tres niveles⁸.



Es necesario enfatizar que el método descrito aquí puede ser implementado casi sin ninguna restricción. Es decir no hay restricciones sobre la relación del número de subdivisiones de bloques vecinos y las direcciones de las subdivisiones.

El método de subdivisiones mencionado puede ser empleado en refinaciones locales de mallas estáticas o dinámicas. Esto permite en cualquier paso de tiempo, subdividir o agrupar bloques de cualquier nivel o mantener la subdivisión fija a través de un cierto número de bloques del enmallado. También permite a cualquiera de los bloques ser subdivididos de una manera fija, de acuerdo a como se necesite en la cercanía de los pozos, en el modelamiento de fallas y pinchamientos; así como hacer en el resto del yacimiento una subdivisión dinámica de acuerdo con el movimiento del frente.

En este método se usa el sistema de mallas de bloques centrados y la versión actual está solo en dos dimensiones, aunque este método puede también ser aplicado en problemas tridimensionales, simplemente extendiéndolo a una tercera dimensión.

3.1.3 Esquema de ordenamiento de mallas. Un paso importante para llevar a cabo el refinamiento local dinámico es un adecuado ordenamiento de la malla. En este libro, se aplica un esquema de ordenamiento natural directamente a todos los bloques activos y subbloques el cual ha sido seleccionado como el más favorable después de una comparación de varios métodos, la Fig.16 muestra el esquema de ordenamiento natural para un refinamiento local sucesivo de tres niveles.

Si durante el proceso de ordenamiento son involucradas muchas celdas inactivas, que no necesitan ser calculadas, se aumentara el uso de memoria.

En el esquema de ordenamiento natural, sólo las celdas activas en cada etapa de tiempo son ordenadas directamente. Por lo tanto, ninguna celda inactiva estará implicada en el proceso de cómputo y este será tan eficiente de acuerdo al número de celdas reducidas.

Debido a que el ordenamiento natural de todos los bloques activos, el estado del sistema de enmallado y el numero de celdas envueltas en la refinación dinámica dependen del tiempo, todos los bloques en una cierta región tendrán que ser renumerados para un paso de tiempo diferente como consecuencia de la variación de los bloques precedentes aun cuando estos bloques permanezcan inalterados.

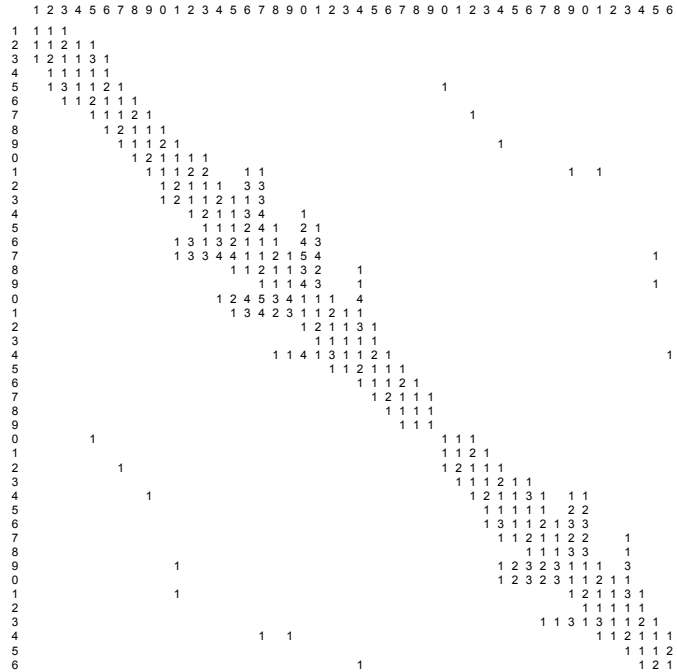
Desde luego, el número del bloque en cierta ubicación deberá ser cambiado si éste es subdividido o combinado, y si algún número de bloque adyacente necesita

ser identificado en el proceso del cálculo de transmisibilidad éste será cambiado al mismo tiempo.

La matriz de coeficientes resultante del refinamiento local de la malla es más compleja en comparación con el sistema de enmallado convencional. Para el sistema de malla convencional, debido a que el número de los bloques vecinos para un bloque dado es fijo, la estructura y orden de la matriz correspondiente no variarán para un esquema de ordenamiento dado. Esta estructura resulta en una matriz de banda dispersa generalmente simple; pero la matriz que proviene del refinamiento local, incluyendo el estático y dinámico, es bastante diferente de esto, porque para un bloque el número de bloques vecinos están sujetos al cambio, luego la estructura de matriz de coeficientes puede tener una forma más complicada y a veces dispersa.

En el caso de refinamiento local dinámico, a medida que el frente se mueve, el número y las posiciones de los elementos no nulos son variadas con el tiempo, por lo que en el proceso de selección del esquema de ordenamiento, es importante hacer la matriz de coeficientes tan regular como sea posible para facilitar la solución. El esquema de ordenamiento natural, descrito anteriormente asegura que para lograr una estructura relativamente regular en la matriz dinámica, los elementos no nulos estarán concentrados principalmente en una estrecha banda diagonal de rangos de valores dentro de esta matriz y sólo algunos de ellos se dispersarán fuera de esta banda Fig.17. Además, cuando se cambia el esquema de subdivisión, sólo el ancho de la banda central en la matriz será cambiada; por lo tanto no hay mucha dificultad en resolver las ecuaciones de matriz para el método de refinación local dinámico.

Figura 17. Matriz de coeficientes para el sistema de enmallado⁸.



3.2 CRITERIOS DE ADAPTACIÓN E IMPLEMENTACIÓN.

El refinamiento local de la malla ha sido aplicado para regiones de altos gradientes como por ejemplo en el frente de desplazamiento para mejorar la exactitud de la solución. Puesto que la localización del frente de desplazamiento cambia con el tiempo, la localización de las mallas locales también cambia con el tiempo. Para los estudios de simulación con mallas dinámicas se desarrolla una función denominada "*función de adaptación*" que es una medida de los cambios locales que ocurren en el sistema. Otro criterio usado para la localización del frente de desplazamiento se conoce como "*valor umbral*" y se utiliza conjuntamente con la *función de adaptación* para determinar si en una simulación se necesita o no el refinamiento local dinámico de la malla. Los refinamientos y agrupamientos dinámicos están generalmente condicionados, basados en los valores de

umbrales proporcionados por el usuario para cualquiera de las siguientes propiedades:

- Saturaciones (aceite, gas, agua)
- Fracción Molar Global
- Fracción molar de la fase de Gas
- Fracción molar de la fase del Aceite
- Fracción molar de la fase del Agua
- Temperatura

Los umbrales relacionados a la temperatura son utilizados generalmente para dar "una detección temprana" del borde principal de un frente en simulaciones composicionales.

Los umbrales deben ser relativamente pequeños de tal manera, que una zona amortiguadora de celdas más finas, se mantenga alrededor de las regiones de alta actividad. Esta opción sacrifica cierta velocidad, pero mantiene la exactitud.

En una misma malla, a diferentes regiones se le pueden asignar valores propios de umbrales. De esta manera, el umbral de saturación se utiliza para localizar el frente de desplazamiento, mientras que su gradiente en el espacio (definido por la función de la adaptación) se utiliza para determinar la región donde existen los altos gradientes.

3.2.1 Valores umbrales. En este estudio, la localización de la zona del frente de desplazamiento es localizada examinando la saturación del fluido de interés. Un valor mayor que el predeterminado de saturación (S_{fth1}) indica la llegada del frente de desplazamiento. Este frente continuará moviéndose dentro del bloque por cierto período de tiempo. Una vez que la saturación en las celdas gruesas aumenta a otro umbral predeterminado (S_{fth2}), se asume que el frente ya se ha movido al bloque siguiente. Dependiendo de la naturaleza del problema, el umbral

de saturación se define en términos de saturaciones de las diferentes fases (aceite, agua, o gas). La fase del fluido de interés y sus valores de umbral son valores proporcionados por el usuario.

3.2.2 Función de adaptación. Una vez que la zona delantera sea ubicada examinando los umbrales de saturación, es necesario encontrar las celdas con altos gradientes de saturación. La función de adaptación es una cantidad que indica el cambio de la saturación con respecto al espacio. Esta medida de los cambios locales que ocurren en el sistema se utiliza para determinar si un bloque grueso particular necesita ser o no refinado.

Hay dos clases de función de adaptación, la primera función de adaptación se llama *función de adaptación lateral*, $F(d)$, (Ec.3.1) donde los gradientes en el plano lateral se calculan y se comparan con un valor ζ_h especificado. Un valor calculado que de por encima de ζ_h indica la violación de la función de adaptación y por consiguiente que la malla necesita ser refinada. La segunda clase de función de adaptación es la *función de adaptación vertical*, $F_z(d)$, (Ec.3.2) y considera los efectos de la gravedad en los cálculos. $F_z(d)$ se compara con un valor específico ζ_v para medir cambios con respecto a la dirección vertical. Un valor calculado más alto que ζ_v indica otra vez la violación del criterio, por lo cual la malla necesita ser refinada.

Matemáticamente la función adaptación está definida así:

$$F(d) = \frac{dS_f}{ds} = \zeta_h \quad (3.1)$$

Donde la dirección del vector, S , puede ser x o y .

$$F_z(d) = F(d) * Fac \quad (3.2)$$

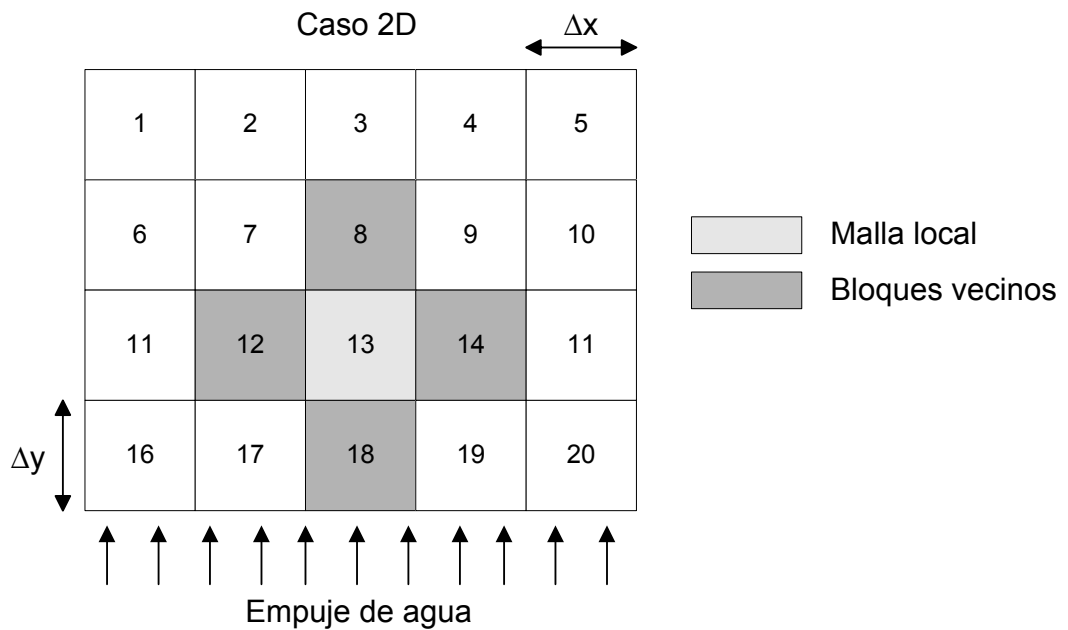
$$Fac = \frac{[(Z * S)_{i,j,k}]^{1/2}}{[(B * H * D * F)_{i,j,k}]^{1/4}} \quad (3.3)$$

El factor " Fac " se calcula de tal manera que la relación de transmisibilidades verticales y horizontales pueda ser capturado (Ecs. 4.17 y 4.18). Esta relación indica la cantidad de flujo en una dirección comparada con la otra. De acuerdo con ensayos de diversas técnicas que hacían un promedio, se ha encontrado que el promedio geométrico capta las características de heterogeneidad y de anisotropía del yacimiento lo más exactamente posible.

En estudios tridimensionales, para cada celda gruesa son computadas seis funciones de adaptación porque cada bloque está rodeado por otras seis celdas. Si alguna de estas seis funciones es violada, el bloque grueso se refina y la simulación local de la malla se lleva a cabo sobre mallas refinadas. La Fig.18, ejemplifica el uso de la función de adaptación en un caso de dos dimensiones. Aquí, al principio el yacimiento se divide razonablemente en 20 celdas gruesas y la solución gruesa se obtiene para un paso de tiempo en particular. Esta solución se indicada por una forma de "+" o cruz, según se muestra. Para ese paso de tiempo, el umbral de saturación se comprueba para cada bloque y se encuentra que la celda 13 tiene una saturación de agua (el agua es la fase del interés debido al empuje de agua) en el rango entre S_{wth1} y S_{wth2} . Por lo tanto, la función de adaptación es revisada para la celda 13. Según lo demostrado, la función de adaptación horizontal es violada, por lo cual la celda 13 es refinada en 9 celdas (o 27 gridblocks en caso de un estudio tridimensional) y la simulación local de la

La malla es realizada. Puesto que esto es un caso de dos dimensiones las cuatro funciones en conjunto fueron calculadas. En el caso de tres dimensiones dos cálculos más tienen que ser realizados para considerar la tercera dimensión.

Figura 18. Aplicación de la función de adaptación para un caso en 2D¹⁶.



Para el bloque # 13

$$F(d)_{13-14} = \frac{S_{13} - S_{14}}{\Delta_{13-14}} < \zeta_h ; F(d)_{13-12} = \frac{S_{13} - S_{12}}{\Delta_{13-12}} < \zeta_h$$

$$F(d)_{13-8} = \frac{S_{13} - S_8}{\Delta_{13-8}} < \zeta_h ; F(d)_{13-18} = \frac{S_{13} - S_{18}}{\Delta_{13-18}} > \zeta_h$$

→ Refine el bloque # 13

3.3 IMPLEMENTACIÓN DEL REFINAMIENTO LOCAL DINÁMICO DE LA MALLA.

La Implementación del refinamiento local dinámico de la malla se puede resumir en nueve pasos principales (véase Fig. 11) en la cual la solución se desarrolla del paso de tiempo (n) al (n+1):

1. Subdivida el bloques donde el pozo está ubicado en un segundo nivel de subbloques, además cualquiera de estos subbloques pueden ser subdivididos en un tercer nivel de subbloques según los requerimientos; Generalmente para reducir el número de bloques, las cercanías del pozo pueden ser subdivididas.
2. Enumere todos los niveles de bloques, primero, segundo y tercero por medio del esquema natural de ordenamiento y construya la matriz de coeficientes de las ecuaciones según el caso, tal como la cantidad y el nivel de subdivisión y el número de bloques de los bloques vecinos.
3. Una vez asignado al yacimiento el sistema de malla relativamente grueso como un primer nivel de bloques o nivel fundamental por el método convencional, la solución de la malla gruesa ($p^c(n)$) se obtiene para todas las celdas disponibles en el sistema en el paso de tiempo (n).
4. Asigne todos los parámetros relacionados con cada bloque. La solución de la malla gruesa ($p^c(n+1)$) también se obtiene para todas las celdas disponibles del sistema en el paso de tiempo (n+1).
5. La función de adaptación se computa para todas las celdas gruesas con saturaciones dentro del rango del umbral de saturación. Si la función de adaptación es satisfecha para todos los gridblocks, entonces ninguna región que experimente cambios significativos en el sistema será identificada; de esta manera no se refina ningún gridblock y la simulación se realiza en el siguiente paso de tiempo asumiendo que los resultados de la malla gruesa son acertados.

6. De acuerdo con los resultados del cálculo, si la función de adaptación es violada cuando la saturación de agua para un bloque grueso en particular es más grande que el valor del umbral predeterminado (indicando la llegada del frente de desplazamiento), el bloque es subdividido sucesivamente en el tercer nivel de subbloques, por ejemplo para este caso se refinan en 27 celdas locales (3x3x3) sobre las cuales se realizará la simulación para un caso 3D; para cualquier otro caso el número de celdas locales variara según las divisiones que se impongan; similarmente los subbloques detrás del frente deberán ser combinados con el segundo nivel de subbloques cuando las saturaciones de estos sea incrementada a un valor de umbral $S_{-,}$; y los del segundo deben ser combinados con los del primer nivel tan pronto como la saturación esté incrementada en relación con otro valor de umbral ($S_{-,}$). Para un problema en dos dimensiones se construirán 9 bloques locales (3x3).
7. Una vez hecha la simulación con la malla local entonces los valores de la presión para todos los 27 bloques (o 9 bloques de acuerdo con las circunstancias) son promediados aritméticamente para conseguir los valores actualizados correspondientes a los bloques gruesos. Las condiciones iniciales para la simulación con la malla local en el paso de tiempo (n+1), se obtienen de la solución de la malla gruesa en el paso de tiempo (n) para captar el proceso de la formación del frente. La relación de la presión capilar se utiliza para actualizar los valores de la saturación para la malla gruesa. Además, los valores de la tasa de flujo de los bloques refinados son reunidos para conseguir el valor actualizado de la tasa de flujo del bloque grueso correspondiente. Las condiciones de frontera se obtienen de la solución de la malla gruesa en el paso de tiempo actual
8. (n+1). De esta manera es constituido un nuevo esquema de refinamiento.
9. Los pasos 6 y 7 se repiten para todas las celdas en las cuales se viola el criterio de adaptación (véase Fig.11).

10. Todos los valores actualizados de presión, saturación, y tasa de flujo conforman las condiciones iniciales para la simulación con la malla gruesa para el tiempo $(n+2)$. Es importante observar que estos valores actualizados nunca son utilizados en las simulaciones con la malla local en el paso de tiempo $(n+1)$. Por lo tanto, este esquema preserva la simetría del problema puesto que la solución es actualizada solamente una vez al final de todas las simulaciones con la malla local.

En síntesis cualquier criterio de selección para decidir en donde refinar o no refinar debe tener completamente presente los gradientes de flujo paralelos en las interfases de malla gruesa y fina. La necesidad de tal cuidado se reduce si la interfase fina gruesa se mueve bien lejos de cualquier gradiente; usar un área más grande de refinamiento ofrece una zona de amortiguación que reduce los problemas de inexactitud. Usualmente esto significa seleccionar tolerancias para los métodos que fallan en lados pequeños, favoreciendo en cierto grado la exactitud sobre la velocidad, además, usar varios niveles de refinamiento también ayuda, puesto que los interfaces grueso fino pueden ser 1:2 o 1:3 en lugar de relaciones más distorsionadas tales como 1:5. Así, un acercamiento algo conservador se prevé con respecto al número de celdas refinadas que son utilizadas, lo que significa que siempre debe haber un número adecuado de celdas para establecer zonas de amortiguación, y que los niveles vecinos de refinamiento deben ser elegidos para reducir al mínimo los efectos internos de interfaces tanto como sea posible. Esta técnica puede afectar la eficacia en un cierto grado, pero favorecerá la exactitud, lo que se puede reflejar en una buena representación del fluido físico en el yacimiento.

4. PLANTEAMIENTO DEL MODELO NUMÉRICO

4.1 METODOLOGÍA Y DESARROLLO

La motivación para presentar este trabajo fue presentar un procedimiento general de refinamiento simple, eficiente, estable para problemas parabólicos no lineales, multidimensionales. La técnica propuesta usa la metodología de Brandt's con algunas modificaciones y simplificaciones.

4.1.1 Refinamiento de Malla Local estático. Para entender el proceso numérico de la técnica presentada, se consideró en un dominio cuadrado la siguiente ecuación diferencial parcial parabólica.

$$\nabla \cdot \left[\tau(\vec{U}) \vec{U}(\vec{d}, t) \right]_{\Delta} + q - \partial / \partial t \left[\gamma(\vec{U}) \vec{U}(\vec{d}, t) \right] = 0 \quad (4.1)$$

La Ec.4.1 esta sujeta a la condición inicial

$$\vec{U}(\vec{d}, t) = \Omega(\vec{d}), \vec{d} \in E, \quad (4.2)$$

y las condiciones de fronteras

$$B \left[\vec{U}(\vec{d}_s, t) \right] = \alpha(\vec{d}_s, t), \vec{d}_s \in E \text{ y } t \geq 0 \quad (4.3)$$

Las Ecs de la 4.1 a la 4.3 fueron discretizadas para una malla uniforme, G^g , con un tamaño Δ^g , el resultado son ecuaciones de diferencias finitas:

$$\vec{U}^g(\Delta^g, t) = 0, \Delta^g \in G^g \text{ y } t \geq 0 \quad (4.4)$$

$$\vec{U}^g(\Delta^g, 0) = f(\Delta^g), \Delta^g \in G^g \quad (4.5)$$

y

$$B[\vec{U}^g(\Delta_s^g, t)] = \alpha(\Delta_s^g, t), \Delta_s^g \in G^g \text{ y } t \geq 0 \quad (4.6)$$

Donde la solución exacta analítica,

$$\vec{U} = (U_1, U_2, \dots, U_m), \quad (4.7)$$

Y su aproximación discreta,

$$\vec{u}^g = (u_1, u_2, \dots, u_m), \quad (4.8)$$

Son vectores desconocidos de m dimensiones. El error de truncamiento de la aproximación de la diferencia finita sobre en el punto i es

$$\epsilon_i^g = D\vec{U}_i - L\vec{u}_i^g, \quad (4.9)$$

y el error local de la solución resultando de este error de truncamiento en $t = (n+1)\Delta t$ es

$$(e_i^g)^{n+1} = (\vec{U}_i)^{n+1} - (\vec{u}_i^g)^{n+1} \quad (4.10)$$

El error de truncamiento local impuesto por las ecuaciones de diferencia finitas puede llegar a ser perjudicial para la solución en regiones de alta curvatura. Los errores locales de la solución se pueden acumular, dando por resultado soluciones numéricas inexactas localizadas en estas regiones de altas curvatura.

Este fenómeno se puede observar en la solución de la Ec. 4.1, el dominio físico se puede representar por un modelo de malla gruesa (Fig.19a.), el alto gradiente sombreado, región de alta curvatura; puede ocurrir tempranamente en función de

una fuerza continua producto de una fuerte tasa q que se aplique. Los errores locales absolutos de la solución en los puntos 1 a 3 en magnitud descendente se pueden escribir como:

$$|e_1^c| > |e_2^c| > |e_3^c|, \quad (4.11)$$

En regiones de bajo gradiente, sin embargo, los errores locales de la solución puede que no afecten tanto la solución.

$$|e_3^c| \approx |e_4^c| \approx |e_5^c| \approx 0, \quad (4.12)$$

Este problema también se puede solucionar por medio de una malla totalmente fina, G^f , o refinada convencionalmente, G^{cr} , estos modelos de malla se muestran en las Figs.19b y 19c, respectivamente. Observe que los tamaños de malla fina y refinada, Δ^f y Δ^{cr} , son la mitad del tamaño de la malla base, Δ^c . Para la solución de la malla fina, los errores locales de la solución en los puntos 1 a 5 pueden ser comparados:

$$|e_1^f| > |e_2^f| > |e_3^f| \geq |e_4^f| \geq |e_5^f| \quad (4.13)$$

para la malla refinada convencionalmente,

$$|e_1^{cr}| > |e_2^{cr}| > |e_3^{cr}| \geq |e_4^{cr}| \geq |e_5^{cr}| \quad (4.14)$$

Los errores de truncamiento locales que resultan del modelo de la malla fina son menores que los de refinado convencionalmente y el modelo grueso.

Por ejemplo, para los puntos 1 y 2,

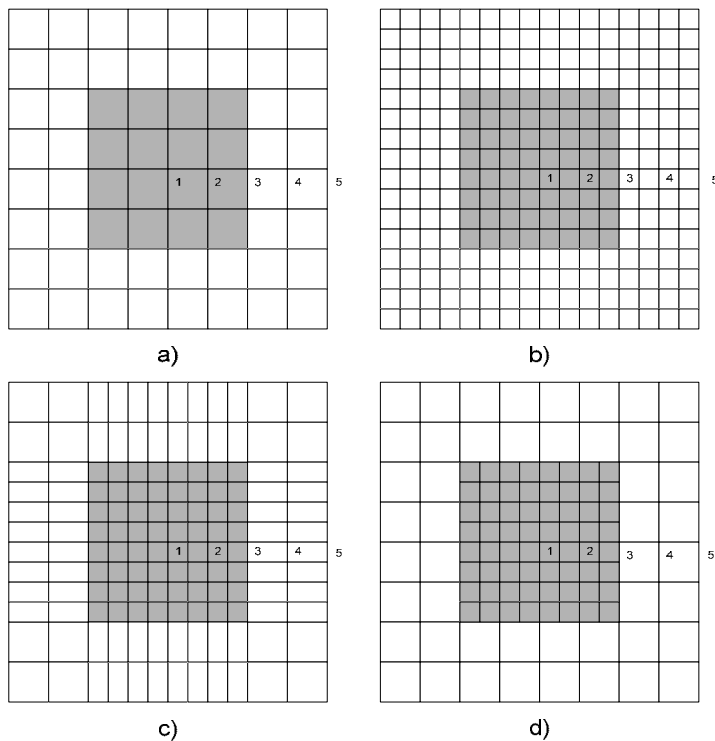
$$|e_i^c| > |e_i^{cr}| \geq |e_i^f|, \quad i = 1, 2, \dots \quad (4.15)$$

Las mejoras en las soluciones con refinado convencional y fino resultan de las reducciones en errores de truncamiento dados por los tamaños más pequeños de la celda. Según lo mencionado anteriormente, estas técnicas no son atractivas por los volúmenes grandes del trabajo de cómputo innecesariamente conducidos para regiones de bajo gradiente. En estas regiones de bajo gradiente, las comparaciones del error local de la solución en los puntos 3 a 5 están dadas por:

$$|e_i^c| \geq |e_i^{cr}| \geq |e_i^f|, \quad i = 3, 4, 5 \dots \quad (4.16)$$

Una forma alternativa y eficaz es encajar un espaciamiento fino, dentro del acoplamiento de la malla base uniforme localizada solamente en las regiones de altos gradientes (Fig.19d).

Figura 19. Malla gruesa y refinamientos sobre la malla gruesa: (a) grueso, (b) fino, (c) refinamiento convencional, (d) refinamiento local¹⁴.



La metodología propuesta requiere la implementación de una técnica especial a través de la cual la información de la malla gruesa se transfiera a la malla fina y viceversa. Para la discretización espacial se hace necesario el cálculo de flujo en la interfase. Para la interfase Γ entre la celda A y B (Fig. 20), el flujo puede ser aproximado por una simple formula:

$$\int_{\Gamma} (K \lambda \overrightarrow{\text{grad}} \Phi) d\sigma = T_{A,B} \lambda_{A,B} (\Phi_B - \Phi_A) \quad (4.17)$$

Donde $\lambda_{A,B}$ es evaluada en contra corriente y $T_{A,B}$ es la transmisibilidad:

$$T_{A,B} = \frac{S_{A,B}}{0.5(h_A + h_B)} K_{A,B} \quad (4.18)$$

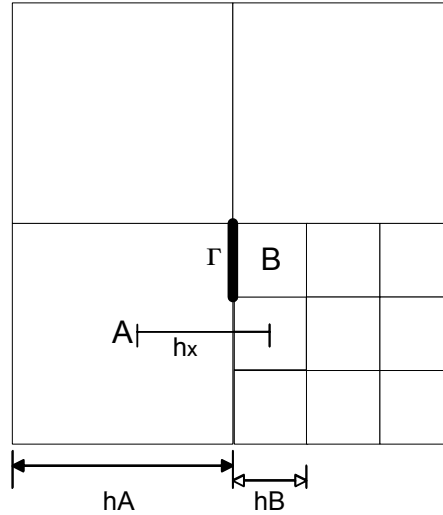
Donde $S_{A,B}$ es la sección entre las celdas A y B; h_A , h_B son el tamaño de las celdas. Para $K_{A,B}$ se usa la media armónica.

$$K_{A,B} = \frac{(h_A + h_B) K_A K_B}{h_B K_A + h_A K_B} \quad (4.19)$$

Esta formula es usada comúnmente en la simulación de yacimientos. Aunque la discretización del espacio no es consistente, la solución numérica es convergente para problemas elípticos. Hermitte, T. y Guérillot, D¹⁷., presentaron una comparación de métodos numéricos para el refinamiento local. Pocas diferencias se observaron entre los diferentes métodos para casos homogéneos.

¹⁷ Hermitte T, and Guérillot, D, "A More Accurate Numerical Scheme for Locally Refined Meshes in Heterogeneous Reservoirs," SPE 25261 presented at the 12th SPE Symposium on Reservoir Simulation, New Orleans, Feb. 28-March 3, 1993.

Figura 20. Interfase entre dos bloques.



Una vez discretizada las ecuaciones, las formulaciones pueden diferir de un elemento a otro, por lo tanto es posible simular simultáneamente diferentes procesos en algunos bloques del sistema.

Para alcanzar esta transmisión informativa, la simulación se inicia en todo el dominio con una malla gruesa. La siguiente solución de la malla gruesa se obtiene sobre la satisfacción de un criterio de convergencia especificado:

$$u^c(\Delta^c, n+1) \forall \Delta^c \in G^c \quad (4.20)$$

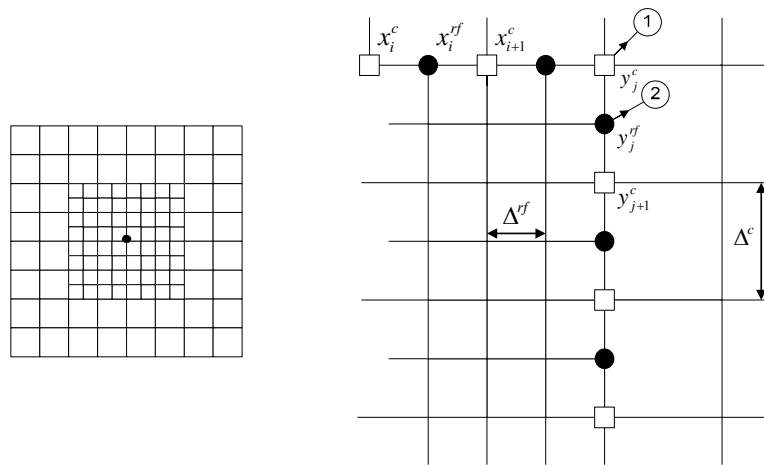
La información de la solución de la malla gruesa se introduce en el modelo de la malla fina en los nodos comunes situados en el interfaz de los sistemas de la malla:

$$u^f(\Delta^f, n+1) = u^c(\Delta^c, n+1) \quad (4.21)$$

Esta información se trata como una condición de frontera no homogénea de tipo Dirichlet para el refinamiento local de la malla, G^{rf} , en la serie de nodos señalados en la Fig. 21.

$$B_u [u_1(\Delta^{rf}, n+1)] = u_1^c(\Delta^c, n+1) \quad (4.22)$$

Figura 21. Nodos de frontera para la sección refinada¹⁵.



Esta aproximación es razonablemente buena porque la distribución de una variable dependiente en regiones de bajo gradiente es casi lineal. Por consiguiente en estas regiones, la malla gruesa y fina arroja resultados similares:

$$u_i^f(\Delta^f, n+1) \approx u_i^c(\Delta^c, n+1) \quad (4.23)$$

y

$$\|e_i^f\| \approx \|e_i^c\| \quad (4.24)$$

Para los puntos $i=3,4,5$ en la Figs. 19a. y 19b.

Por el perfil lineal que se conserva a lo largo de la periferia entre los gridpoints adyacentes en la malla gruesa, el valor de la variable dependiente en los

gridpoints finos intermedios se determinara por interpolación lineal de los nodos de la malla gruesa, estos dos nodos se señalan en la Fig. 21.

$$u_i^f(\Delta^{rf}, n+1) = I[u_i^c(\Delta^c, n+1)] \quad (4.25)$$

La condición de tipo Dirichelet es:

$$B_u[u(\Delta_s^{rf}, n+1)] = I[u^c(\Delta^c, n+1)] \quad (4.26)$$

De este modo la región de la malla fina, G^{rf} , esta limitada por una condición de frontera del tipo Dirichlet continua no homogénea, las Ecs. 4.25 y 4.26 representan la operación de interpolación para de u^c a u^{rf} de los gridpoints no cubiertos en la periferia de la malla fina-gruesa.

4.1.2 Refinamiento de malla dinámica. La refinación local dinámica de una malla tiene algunas ventajas sobre redistribución nodal (nodos móviles). Por ejemplo la refinación local evita solucionar un sistema acoplado de ecuaciones diferencial parciales para determinar las coordenadas de la malla, los elementos nunca son distorsionado, evitando los errores de malla inducidos, mallas enredadas, y los elementos son de un tamaño predeterminado en cada nivel de malla, lo que permite especificar la exactitud local. Aunque la eficiencia de un esquema limitado puede ser mejorada con una malla adaptable, todavía se requiere una densidad alta de elementos a nivel de las regiones refinadas. Mientras algunos métodos adaptables han sido desarrollados para modelamiento de yacimientos de petróleo^{1,8}, no ha habido mucho interés en unir esquemas avanzados adaptables con los métodos exactos de espacio - tiempo en este campo.

Los esquemas avanzados que pueden brindar soluciones exactas sin falsas oscilaciones han sido desarrollados para solucionar las leyes de conservación

hiperbólicas¹⁸. B Leer ha desarrollado una versión del esquema Godunov avanzado¹⁹ para comprender las ecuaciones de flujo. Estos esquemas producen resultados exactos libres de falsas oscilaciones debido a el uso de datos abreviados, Bell los ha adaptado a las ecuaciones más sencillas en un medio poroso incluyendo aplicación para aceite negro y sistemas de flujo composicional . Un nuevo método desarrollado por Michael G. Edwards²⁰ une el esquema Godunov avanzado con las mallas locales dinámicas adaptables. Este método produce los mejor de ambos trabajos ya que el esquema avanzado requiere unos pocos bloques de malla para conseguir algo de exactitud y dada la densidad de una malla refinada dinámicamente también se requieren pocos bloques para mejorar la exactitud como una malla refinada globalmente de la misma densidad.

4.1.3 Procedimiento de adaptación. El desarrollo de adaptar mallas finas dependientes del tiempo en una malla base se discute en un espacio 2D. La técnica se puede ampliar a tres dimensiones.

La función $f(d)$ será llamada función de adaptación a la malla base principal G^g . La opción del $f(d)$ describirá el espacio físico de mallas finas en acoplamientos gruesos. Como se mencionó, un tamaño de malla óptimo rinde mejores resultados en las zonas en donde la variable dependiente o su gradiente exhiben cambios repentinos.

Las opciones lógicas para $f(d)$ son por lo tanto el gradiente $(\partial u / \partial d)$ o la curvatura $(\partial^2 u / \partial d^2)$ de una variable dependiente. El valor numérico del $f(d)$ se puede calcular por cualquier procedimiento racional. Para propósitos de la

¹⁸ P.K Sweby, High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws. SIAM J. 95-1011.

¹⁹ S.K. Godunov. Finite difference methods for numerical computation of discontinuous solutions of the equations of fluid dynamics, Mat. Shornik 47 271-306.

²⁰ M.G Edwards. A higher-order Godunov scheme coupled with dynamic local grid refinement for flow in a porous medium.

adaptación, las derivadas se pueden verificar a lo largo de la dirección perpendicular a la frontera de la malla.

4.1.3.1 Implementación del proceso de adaptación. La implementación del procedimiento de adaptación requiere una técnica especial para la determinación de la localización y extensión de la malla fina encajada.

Para lograr esto, dos sistemas de arreglos, uno de malla gruesa y un arreglo de malla más fino son asignados para cada variable primaria. Entonces la simulación se comienza en todo el dominio con una malla gruesa. La siguiente solución de la malla gruesa se obtiene sobre la satisfacción de un criterio de convergencia especificado:

$$\vec{u}^c(\Delta^c, n+1) \forall \Delta^c \in G^c \quad (4.27)$$

La solución de la malla gruesa proporciona la entrada para $f(d)$ de la cual se determinen la localización y el extensión de la malla más fina. La solución $f(d)$ se comprueba continuamente en cada malla sobre todo el dominio del yacimiento. Por ejemplo, $f(d)$ se calculó en el punto 40 Fig.25, entre los puntos 40 y 41 como sigue:

$$f(d)_{40-41} = [(u_{40} - u_{41}) / \Delta_{40-41}] \quad (4.28)$$

De igual modo se pueden hacer chequeos entre los puntos 40 y 39, 40 y 49, y los puntos 40 y 31. Para determinar la generación de una malla más fina dentro de una malla gruesa es necesario un criterio predefinido de adaptación, ξ_a . Si $|f(d)_{40-41}| \geq \xi_a$ entonces es necesaria una malla fina entre los puntos 40 y 41, igualmente si $|f(d)_{39-40}| \leq \xi_a$, entonces no es necesario refinar entre los puntos 40 y 39. Por ejemplo una posible situación es:

$$|f(d)_{40-41}| \geq \xi_a$$

$$|f(d)_{40-49}| \geq \xi_a$$

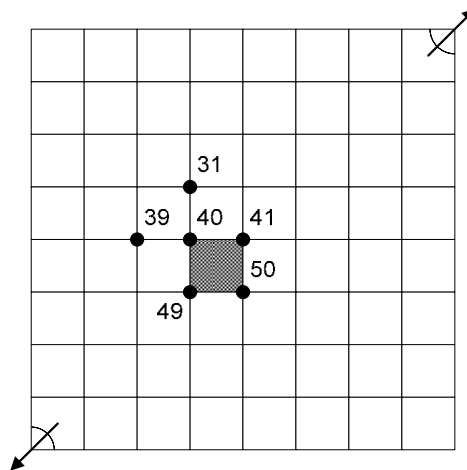
$$|f(d)_{40-39}| \leq \xi_a$$

y

$$|f(d)_{40-31}| \leq \xi_a$$

La situación descrita requiere el refinamiento entre los puntos 40 y 41 y entre los puntos 40 y 49. Para terminar el refinamiento, el punto 50 en la frontera de la malla se incluye automáticamente. El refinamiento completo se muestra en la Fig. 22, como el área sombreada. Estos nodos del refinamiento son incluidos para el arreglo de la malla fina y representan el límite físico del refinamiento y el área de trabajo en el nivel fino. La función de adaptación, $f(d)$, se comprueba continuamente en cada malla gruesa sobre todo el dominio del yacimiento en cada timestep. Las condiciones de frontera se asignan al modelo de malla refinado como en el refinamiento estático de malla.

Figura 22. Limite de refinación posible ubicado en la malla gruesa¹⁵.



4.2 MANEJO DE DATOS

Debido a la variabilidad del sistema de malla en tal refinamiento, el punto clave es formular todo un completo sistema de manejo de datos simple y flexible, incluyendo seguimiento, control, refinamiento, almacenamiento de datos, ordenamiento e identificación del estado de los bloques adyacentes para llevar a cabo el procedimiento de refinamiento local dinámico.

Para llevar a cabo tales operaciones, se usa una clase de subrutina denominada sistema controlador de refinamiento del primer nivel o segundo nivel para controlar el estado de refinamiento del respectivo nivel del bloque. La función de este sistema controlador del refinamiento es:

1. Identificar la necesidad de subdividir o combinar algún bloque con cierto nivel, de acuerdo al valor umbral de saturación establecido.
2. Determinar el nivel deseado y el estado de la subdivisión o la combinación para cualquier bloque identificado anteriormente según lo requiera esta operación.
3. Subdividir ciertos bloques fijos en el nivel deseado de subbloques si es necesario.
4. Guardar todo el estado de subdivisión o combinación y los de la información nombrada arriba.

Otra subrutina llamada sistema controlador de ordenamiento desarrollado para ordenar, guardar e identificar mallas adyacentes, tiene como funciones:

1. Enumerar los bloques refinados y no refinados como lo muestra la Fig.16.
2. Guardar el nivel subdividido y el número de bloques correspondientes.
3. Identificar el nivel de subdivisión de los bloques adyacentes y el número de cada bloque.

Se debe prestar mucha atención a los resultados, debido a que la ubicación exacta de un número particular de grid, cambiará con el tiempo. Obviamente si los resultados de la presión y saturación calculada son solamente obtenidas para cada número de bloque, la distribución de presión y saturación del yacimiento continuará desconocida; esto se puede arreglar revelando la lista sobre el estado del enmallado después de la refinación junto con los resultados del calculo, esto permite que la distribución de presión y saturación del yacimiento sea claramente definida.

4.2.1 Estructura de datos. Para explotar la máxima velocidad de cálculo de los computadores modernos, un programa debería incluir un mínimo de comandos de escritura o lectura para el disco, por otro lado los modelos grandes deben ser procesados con los requerimientos de memoria más pequeños posible, ambas obligaciones pueden ser realizados solamente con un manejo de datos cuidadosamente concebidos.

Por lo tanto, los elementos y los pozos son numerados y ordenados en dos niveles. En el Nivel natural, Los elementos son especificados con seis coordenadas, tres para el bloque base y tres para la subdivisión, los pozos están designados por un índice; en el nivel computacional, Los elementos y los pozos son numerados en la secuencia de ordenamiento de las ecuaciones, esta secuencia está determinada por el método de solución elegido.

4.2.1.1 Nivel natural. La definición de la estructura de datos y el manejo de la malla fueron hechos apuntados a facilitar su implementación en los simuladores existentes. Para simplificar la presentación de la estructura de datos un caso en 2-D (Fig.24) será considerado; el número total de celdas es **NBM**, mientras **NBMO** denota el número de celdas en la malla base y **NREF** el número de celdas refinadas. Nosotros necesitamos una malla global enumerada que incluya todas las celdas desde 1 a NBM y una malla refinada también enumerada que incluya solamente las celdas refinadas desde 1 hasta NREF.

Los índices en las celdas de la malla base no se cambian y los índices de las nuevas celdas siguen los índices de la malla base (Fig.23). Por ejemplo, si nosotros refinamos una celda, las sub-celdas deben ser enumeradas desde NBM +1 hasta NBM +9, con el mismo sistema de ordenamiento de la malla base (primero en dirección x; después en dirección y). La nueva numeración base y refinada sería entonces $NBM' = NBM + 9$ y $NREF' = NREF + 1$. Para el refinamiento en 2-D (Fig.23). Primero se refino la celda 2, luego la celda 1, luego la celda 21 y finalmente la celda 5.

Figura 23. Modelos de malla²¹.

4			40	41	42	6
			37	38	39	
			34	35	36	
22	23	24	13	14	15	3
19	20	31 32 33	10	11	12	
		28 29 30				
		25 26 27				
16	17	18	7	8	9	

Refinamiento 2-D

7			8			9		
4			5			5		
16	13	25	26	27	2	3		
		22	23	24				
		34	31	19			20	21
		43	40	28			29	30
		52	49	37			38	39
		61	58	46			47	48
		70	67	55			56	57
		64	65	66			11	12

Refinamiento 3-D

²¹ Yu Ding and P,A, Lemonnier, *Development of Dynamic Local Grid Refinement in Reservoir Simulation*. Inst. Francais du Pétrole, SPE 1993.

4.2.2 Manejo de la malla (GRID). El manejo de la malla refinada y no refinada requiere la selección de algunos punteros, ver Fig. 24:

LEV: Nivel de refinamiento (malla base = nivel 1).

NSON: Estado de la celda en la malla.

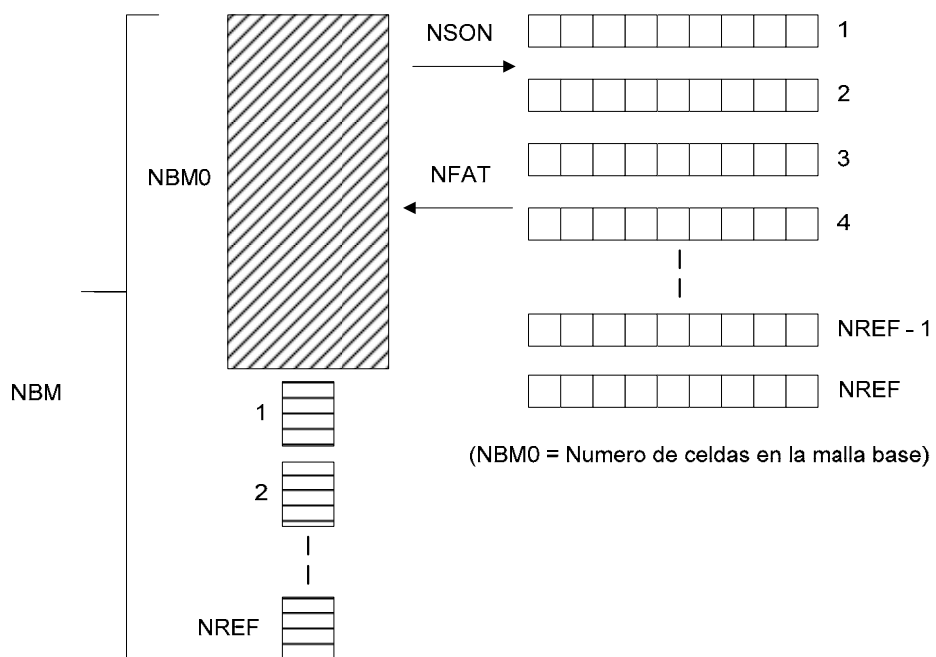
Si la celda I no está refinada, $NSON(I) = 0$.

Si la celda está refinada, $NSON(I) =$ al índice en numeración del refinado (de 1 hasta NREF).

NFAT: Índice en la numeración global de una celda refinada.

Estos grupos de punteros son actualizados fácilmente en cada refinado o no refinado.

Figura 24. Punteros para el manejo de la malla²¹.



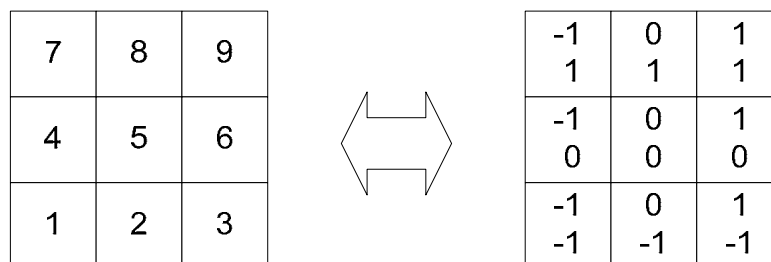
Valores numéricos de parámetros físicos tales como presión y saturación son obtenidos en la nueva malla;

- ❖ Con el valor de la celda madre para celdas creadas durante la refinación, con respecto a la gravedad.
- ❖ Promediando los valores de las sub-celdas a través de la media aritmética de las celdas no refinadas.

La minimización de almacenamiento en memoria es obtenida cuidadosamente eliminando la información relacionada con la celda no refinada.

Los valores almacenados al final del arreglo de variables definidas en la celda (presión, saturación, permeabilidad, porosidad, etc.) son cambiados de lugar a los espacios liberados.

Las celdas vecinas pueden ser fácilmente encontradas usando estructura de árbol y ordenando las celdas rectangulares en cada nivel de refinación. En 2-D la enumeración de las sub-celdas esta definida por el vector $v = \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix}$ para facilitar la búsqueda de la sub-celda vecina. La equivalencia entre ambas numeraciones es la siguiente:



Si por ejemplo se quiere encontrar el vecino derecho de la celda 18 en la malla de la Fig. 23. se tiene que:

1. Mirar el nivel de la celda 18 (seleccionar LEV): este es igual a 2
2. Buscar la celda madre 18 tal como este nivel es mayor que 1 y su representación vectorial es (1,-1), esta es la celda 1.
3. Encontrar vecino derecho de celda 1 en el orden usual, como el nivel es 1: esta celda es la 2.
4. Mirar el estado de la celda 2 (seleccionar NSON); esta no igual a 0, la celda 2 se refino con 9 sub-celdas, numeradas del 7 al 15.
5. Usar la numeración vectorial local: la celda 18 es la tercera de las 9 sub-celdas de la celda 1 y su representación vectorial es (1,-1). Por lo tanto su vecino derecho es (-1,-1) correspondiendo a la primera de las 9 sub-celdas de la celda 2;(celda 7).
6. Mirar el estado de la celda 7; este valor es 0, la celda no se refino, por lo tanto el procedimiento termino y la celda 18 tiene por vecino la celda

4.3 SOLUCIÓN DEL SISTEMA DE ECUACIONES.

La velocidad y la exactitud de la solución del sistema de las ecuaciones para cada problema dependen de manera no-uniforme del método de solución seleccionado y del orden de los elementos en el sistema de las ecuaciones; no es posible hacer una generalización sobre el mejor método de solución o el mejor procedimiento para seleccionar los elementos a los que se le aplicará refinamiento local. En general se puede decir que como la matriz de coeficientes formulada por este método es relativamente simple, se puede resolver por el método de sobrerelajación de bloques sucesivos (*Block Successive Overrelaxation Method*

BSOR) o por el método de comparación de pendientes equivalentes (*Conjugate-Gradient-Like CGL*).

El método CGL propuesto aquí es una factorización incompleta de LU unido con la aceleración de ORTHOMIN. Los elementos en la diagonal de la matriz U son iguales a la unidad.

Teniendo en cuenta las características del refinamiento local dinámico de la malla en consideración, la forma de factorización LU incompleta recomendada en este trabajo es ligeramente diferente a la utilizada en estudios de referencia²²⁻²³⁻²⁴; en esos estudios, en general, el orden en que se llena la matriz L+U se determina primero y luego se lleva a cabo una factorización simbólica y se calcula el grado de ocupación de cada posición en la matriz L+U. Las posiciones con el grado más bajo que el grado preasignado son tomadas como la actual posición a reemplazar o a llenar. En este caso (Refinamiento local dinámico) como la estructura de la matriz varía en cada paso de tiempo, también debe llevarse a cabo la factorización simbólica en cada paso de tiempo, y por consiguiente se incrementará en tiempo de cómputo, además este método propuesto es uno en el cual el grado y las posiciones a llenar no son fijos, por ejemplo, todos los puestos en la diagonal central se consideran como puestos “posibles a ser ocupados” no importa en que grado estarán esas posiciones, mientras se lleve a cabo que solo las del primer grado sean llenadas en las dos bandas laterales ubicadas a cada lado de la diagonal. Por todo ello el grado de factorización será mayor que uno.

Tomando como ejemplo la matriz de la Fig.17, en la factorización LU de esta matriz el primer grado de elementos puestos en las bandas laterales tendrán mayor influencia sobre los elementos diagonales de L, pero menor o ninguno en

²²Forsyth, P.A. and Sammon, P.H.“Local Mesh Refinement and Modelling of Faults and Pinchouts” paper SPE 13524 presented at the Eighth SPE Symposium on Reservoir Simulation, Dallas, Texas, Feb.10-13, 1985.

²³Watts, J.W., “A Conjugate Gradient-Truncated Direct Method for the Solution of the Reservoir Simulation Pressure Equation”, *Sot. Pet. Eng.J*, Vol 21, 1981, 345-353.

²⁴ Simon, H.D., “Incomplete LU Preconditioners for Conjugate-Gradient-Type Iterative Methods” paper SPE 13533 presented at the Eighth SPE Symposium on Reservoir Simulation, Dallas, Texas, Feb.10-13, 1985.

los otros elementos (Esto será más pronunciado para matrices de mayor orden), por lo tanto para reducir el tiempo de búsqueda solamente se consideran en los cálculos los efectos de estos elementos sobre los elementos diagonales en L. El primer orden de elementos de "llenado" en la banda lateral de la matriz L+U es procesado por la formula usada en el primer grado de factorización; en la Fig.17, todos los numerales denotan el grado colocación de los elementos, y solamente los puestos mostrados con "1" son también los puestos de los elementos diferentes a cero en la matriz original.

5. ANÁLISIS DE SOFTWARE COMERCIAL PARA LA IMPLEMENTACIÓN MALLAS DINÁMICAS

5.1 ANÁLISIS DE IMPLEMENTACIONES DE MALLAS DINÁMICAS.

La adición de un refinamiento local controlado por el usuario se ha venido haciendo ya desde algún tiempo, lo que representó la aparición de los primeros refinamientos dinámicos, junto con el desarrollo de ciertos trabajos sobre el movimiento del frente de desplazamiento.

En esta parte del trabajo un análisis de las capacidades de los softwares disponibles nos permitió saber si estos están o no habilitados para la implementación de un refinamiento local dinámico en la simulación de un modelo, para lo cual se examinaron a fondo los manuales, específicamente toda la parte relacionada con el LGR o refinamiento local.

En 1981 la sociedad de investigación Joanneum empezó a trabajar para el laboratorio de recobro de petróleo en el desarrollo de un nuevo simulador usando la refinación en la simulación de yacimientos. Este programa de simulación tenía las siguientes características:

1. Combinación de gas/agua, aceite negro, composicional, flujo de vapor y de polímeros en un solo programa.
2. Implementación de todas las formulaciones con una malla de simulación
3. Selección automática o manual de la formulación, selección manual automática por bloque y paso de tiempo de las variables computadas implícitamente.
4. Implementación de tiempos de refinamiento local variable.

Acs Doleschall S²⁵, Farkas y Kendall²⁶ han investigado sobre la combinación de diferentes formulaciones en un programa, y se ha reconocido que para un tiempo es posible variar las formulaciones de las variables computadas implícitamente²⁷.

Actualmente la disponibilidad de softwares con que se cuenta para desarrollar este tipo de estudios es muy limitada, debido a los altos costos de implementación, equipos y licencias de funcionamiento, sin embargo y de acuerdo con las facilidades que ofrece la universidad es posible contar con algunos cuantos tales como *ECLIPSE 100 (ECLIPSE OFFICE)* y *GEM de CMG*.

ECLIPSE 100: es un simulador para propósitos generales, completamente implícito, trifásico, 3D con opción de gas condensado; el programa está escrito en FORTRAN 77 y opera en cualquier computador con compilador ANSI-standard FORTRAN77 y suficiente memoria, *ECLIPSE 100* puede ser usado para simular sistemas de 1, 2 o 3 fases. Tiene opción bifásica (aceite/agua, aceite/gas, gas/agua), los cuales son resueltos como sistemas de componentes, disminuyendo la capacidad requerida de almacenamiento así como el tiempo de simulación en el computador. Por otra parte, para gas disuelto en aceite maneja la variable de presión de burbuja o GOR. Además de esto, maneja tanto geometrías de nodo distribuido como de nodo centrado. ECLIPSE tiene disponibles geometrías de nodo centrado radial y cartesiano en 1, 2, o 3 dimensiones. Una opción Radial 3D completa el grupo, permitiendo que el flujo tenga lugar de 0/360 grados en la interfase.

²⁵ Acs, G., Doleschall, S., and Farkas, E., "General Purpose Compositional Model" paper SPE 10515 presented at the sixth SPE Symposium on Reservoir Simulation New Orleans, LA, Jan. 31 - Feb. 3, 1982.

²⁶ Kendall, R. P., Morrell, G.O., Peaceman, D.W., Silliman, W. J. and Watts, J. W. Development of a Multiple Application Reservoir Simulator for Use on a Vector Computer, paper SPE 11483 presented at the Middle East Oil Technical Conference of the SPE Manama Bahrain March 14-17 1983.

²⁷ Bansal, P. P., Harper, J. L., MacDonald, A. E. Moreland, E. E, Odeht, A. S., and Trimble, R. H., "A Strongly Coupled Fully Implicit, Three-Dimensional, Three-Phase Reservoir Simulator", paper SPE 8329 presented at the SPE 54th Annual Technical Conference and Exhibition, Las Vegas, Sept. 23-26, 1979.

ECLIPSE OFFICE: no es propiamente un simulador sino una herramienta de ECLIPSE que ayuda en el manejo de las simulaciones, permitiendo con un modo de interfaz más amigable al usuario la carga de la información. Sus principales características son:

- Se enlaza y maneja algunas de las aplicaciones de ECLIPSE.
- Permite chequear los resultados durante las corridas de simulación.
- Permite revisar y editar resultados de simulación y generar reportes.
- Corre una simulación animada rápidamente desde el principio hasta el final.

GEM de CMG: es un simulador composicional de ecuación avanzada desarrollado por la compañía CMG (Computing Modeling Group), el cual incluye opciones tales como la ecuación de estado, doble porosidad, CO₂, gases miscibles, petróleo volátil, condensado de gas, pozos horizontales, administración de pozos y el comportamiento de fases complejas entre muchas otras. GEM fue desarrollado con el fin de simular los efectos de la composición de fluidos del yacimiento durante los procesos de recuperación primaria y mejorada de petróleo.

5.2 ANÁLISIS DE SOFTWARE DISPONIBLE.

Gran parte de los estudios que se presentan en la escuela de ingeniería de petróleos, dentro del área de la simulación de yacimientos, son desarrollados en software no muy avanzados y ni potentes, ni tampoco son los mayormente usados por las compañías petroleras actualmente, pero son con los que la mayoría de estudiantes de últimos semestres se encuentran familiarizados y los que prestan mayor aplicabilidad en cuanto al desarrollo de sencillas simulaciones académicas, razón por la cual se ha decidido enfocar este análisis al estudio de las capacidades del simulador comercial ECLIPSE 100.

Para el inicio de este proyecto se tuvo en cuenta el trabajo desarrollado por J. Manik, y T. Ertekin en 1997, denominado “Desarrollo y aplicación de los algoritmos de refinación local estática y dinámica para estudios de conificación”, publicado en el artículo 39228 de la SPE, en el cual se usó dicho software y un simulador “privado” denominado Benchmark, en la validación un modelo diseñado para un estudio de conificación de agua en un yacimiento de geometría simple.

A pesar de la clara referencia que hacen los autores sobre el uso de ECLIPSE 100, al momento de comparar los resultados obtenidos entre ambos simuladores nunca se especifica claramente cual de estos programas fué el utilizado para realizar la corrida dinámica, razón por la cual se hizo necesaria una revisión minuciosa de la correspondiente literatura y un examen específico sobre los alcances del simulador comercial como uno de los objetivos de este proyecto.

Inicialmente y después de una investigación exhaustiva de los manuales del software ECLIPSE 100 (para las versiones de software 2003 y 2005 con que se cuenta en la universidad) se concluye que la implementación de un refinamiento local dinámico no está definida en los manuales correspondientes a dichas versiones, pues no existe una keyword clara y específica para el comportamiento dinámico de las mallas, además, estos solamente brindan al usuario soporte en el manejo del refinamiento local estático y sin darle relevancia a algún proceso dinámico.

De igual modo se revisaron las opciones de ECLIPSE OFFICE, pues en esta herramienta de ECLIPSE existe una opción llamada *case definition* (Fig.29) la cual permite como su nombre lo indica definir variables de tipo general del caso a simular. En esta opción se pueden manipular variables del yacimiento en una etiqueta llamada *reservoir* (Fig.30), aquí en la parte referente al refinamiento existe una aplicación denominada *auto refinement* (Fig.31), la cual se pensaba antes de

realizar este estudio, era la forma de manejar un auto refinamiento de tipo dinámico para una simulación.

Al remitirse a los manuales y aplicar esta opción sobre un modelo de prueba muy simple (modelo de inyección de gas con un pozo productor y uno inyector) según lo anteriormente descrito, el usuario advierte que en realidad la aplicación está dirigida a construir a partir de una malla base Fig.32 (hecha aplicando el paso de la Fig.30), una malla fina global y estática Fig.33, (aplicado el paso de la Fig.32); es decir permite refinar la malla una vez se ingresa el número de bloques en X, Y y Z, admitiendo aumentar el número máximo de bloques y adicionalmente a utilizar multiplicadores de permeabilidad, pero en ninguna parte de esta aplicación del OFFICE se define este refinamiento como dependiente del tiempo ni tampoco se muestra la forma de ubicarlo según los gradientes o regiones de interés.

Figura 25. ECLIPSE OFFICE; Case definition.

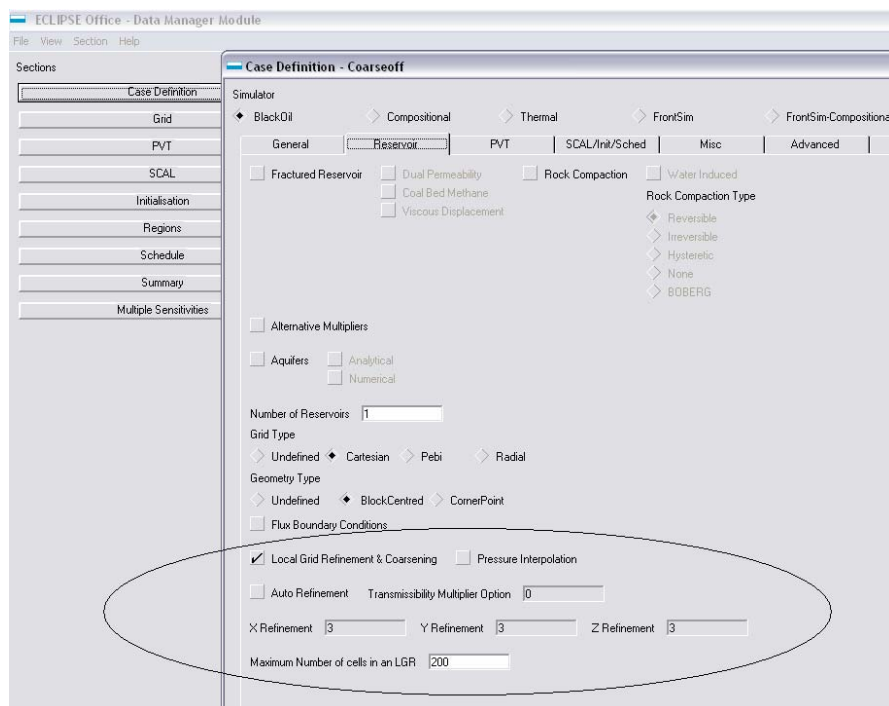


Figura 26. ECLIPSE OFFICE; Case definition, LGR.

Local Grid Refinement & Coarsening Pressure Interpolation

Auto Refinement Transmissibility Multiplier Option

X Refinement Y Refinement Z Refinement

Maximum Number of cells in an LGR

Figura 27. ECLIPSE OFFICE; Case definition, Auto refinement.

Local Grid Refinement & Coarsening Pressure Interpolation

Auto Refinement Transmissibility Multiplier Option

X Refinement Y Refinement Z Refinement

Maximum Number of cells in an LGR

Figura 28. Malla gruesa.

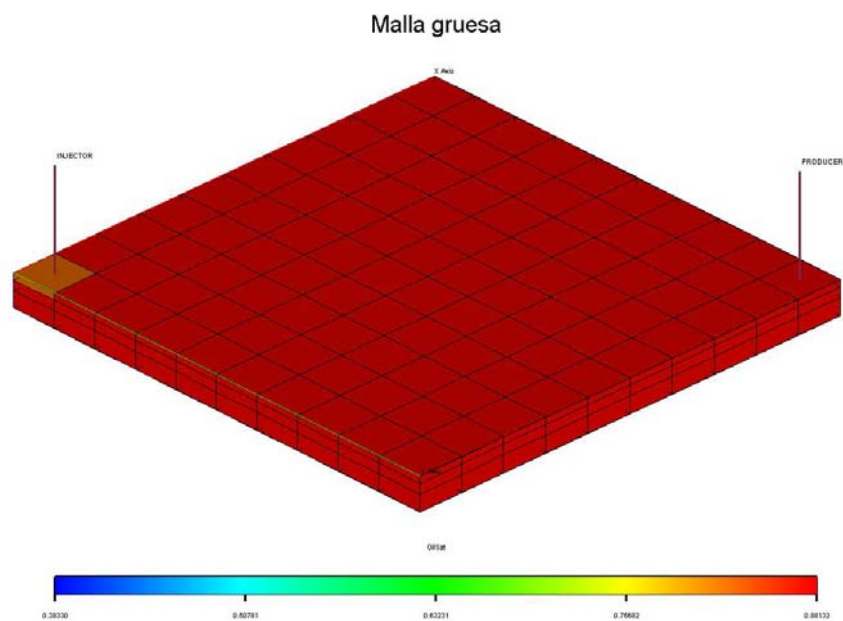
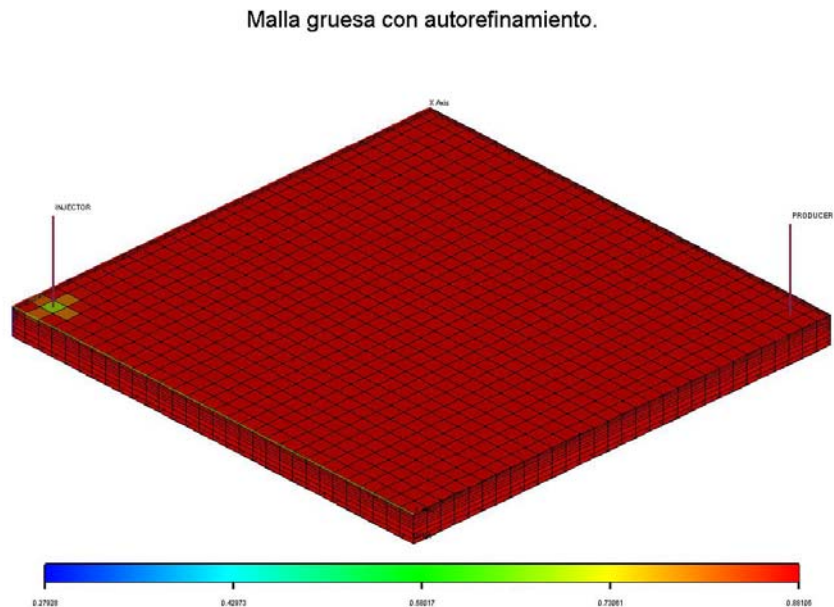


Figura 29. Malla fina.



Para efectos de corroborar la ausencia de un aparte dinámico en el software estudiado, también se revisó el manejo de esta opción a partir de las principales keywords que regulan el refinamiento local del archivo de entrada al momento de definir el enmallado, las cuales se describen en el Anexo A, en donde se explica el significado y la aplicabilidad que cada una de ellas tiene en la simulación.

Además de lo antes mencionado se consultó con varios expertos en el área de la simulación si se tenía algún conocimiento sobre los alcances de estos software comerciales, y específicamente sobre ECLIPSE 100, tema sobre el cual fueron muy claros, al asegurar que este simulador no es muy conocido por sus características dinámicas y en expresar grandes dudas sobre la posibilidad de conseguir una corrida exitosa con mallas dinámicas utilizando este programa.

- *The International Reservoir Simulation Research Institute is a research group at Brigham Young University. We study the mathematics of reservoir simulation. We do not make field studies. Therefore I am not intimately*

familiar with the capabilities of Eclipse. However, dynamic gridding is not one of it's more well known features. I suspect that it will be too difficult to do a dynamically changing grid simulation with Eclipse.

Professor Hugh Hales,

Head, IRSRI

Hugh Hales

hbhales@et.byu.edu

Por último y para reafirmar las anteriores declaraciones, se contactó directamente a un miembro de la compañía (schlumberger S.A) el cual expresó no tener un claro conocimiento sobre las capacidades dinámicas del simulador debido a los pocos estudios que se han hecho sobre el tema en particular; sin embargo aseguró que existen ciertas keywords, las cuales podrían aparentan un comportamiento dinámico de malla en una simulación de yacimientos de hidrocarburos (keywords, mostradas en el apéndice A, que para este punto del estudio ya habían sido analizadas y no agregaban ningún aporte dinámico a nuestra investigación).

Finalmente y para concluir, es válido decir que ninguna de las opciones antes mencionadas mostró en Eclipse un comportamiento dinámico, ni siquiera cercano a lo que se buscaba incluso simulando un modelo tan simple como el que se planteó, por lo cual, y debido al objetivo principal del proyecto, se considera irrelevante mostrar los resultados de una simulación que no concluyó en mas que en una serie de simples simulaciones estáticas, correspondientes a temas de tesis ya mostrados y aplicados, los cuales poco valor le agregan a la conclusión que Eclipse 100, versión 2003 y 2005 como paquete comercial, es incapaz del seguimiento y rastreo de fenómenos móviles altamente localizados y que la aplicación de algunas de sus keywords podría disfrazar un comportamiento

estático para dar una sensación dinámica solo si se conociera cuando y donde va a ocurrir exactamente un fenómeno de esta naturaleza.

- *According to your requirements about dynamic LGR, we have in E100, refinements may be switched on or off at any time during a simulation using keywords LGRON and LGROFF in the SCHEDULE data section. In E300 flexible restarts can be used to add LGRs on a restart run, given that no LGRs existed in the base run. But this is not a dynamic LGR. In E300, however, cells of cartesian refinements may be further refined. The simulator treats global and refined cells together in the solution steps. In the AIM mode, local grids are made implicit unless otherwise requested. A dynamic LGR implies quite computational effort and it is desirable just in specific cases.*

Please, no hesitate contact us for further questions about this or another topic.

Regards,

YANURY BENAVIDES B.
SIS SP Reservoir Engineer
SCHLUMBERGER SURENCO S.A

YBello2@bogota.oilfield.slb.com

Otro de los software mencionados en la literatura que describe aplicaciones de mallas dinámicas y con el que se cuenta como opción de trabajo en la universidad, es el simulador GEM de CMG (Cumputer Modeling Group), el cual como se dijo anteriormente fue desarrollado con el fin de simular los efectos de la composición de fluidos del yacimiento durante los procesos de recuperación primaria y mejorada de petróleo.

En un estudio realizado por Peter H. Sammon por CMG denominado *Dynamic Grid Refinement and Amalgamation for Compositional Simulation SPE 79683, 2003* (Refinamiento y Combinación de Mallas Dinámicas para Simulaciones

Composicionales) el código fuente de la versión disponible para esa fecha, fue modificado para incluir la funcionalidad del refinamiento dinámico. En el estudio se hizo énfasis en que las modificaciones requeridas para utilizar enmallado dinámico deben solamente aumentar y no interferir con las capacidades existentes del simulador, y que el código adicional requerido para poner en ejecución las características debe ser utilizable en la implementación de características similares de agrupación en la ejecución de otros simuladores. En ese estudio se describen importantes características del refinamiento dinámico mostrando su aplicación a procesos de recobro como VAPEX.

Después de revisar los manuales correspondientes a la versión de GEM instalada en la sala de simulación (software del año 2005) a la que se tiene acceso en la escuela y la que cuenta solo con la licencia de funcionamiento para la versión de hace dos años, se concluye que al igual que ECLIPSE 100, este software no dispone de un módulo específico que permita la implementación de un refinamiento dinámico, y que ello solo es posible modificando el código fuente de la versión del paquete comercial con el que se trabajó hasta la fecha de este proyecto. Por tal motivo y con el fin de demostrar la implementación de esta opción en un software comercial tradicional (GEM) una vez hechas las respectivas modificaciones según los requerimientos, y para efectos del capítulo 6, se describe la aplicación y las características principales del simulador modificado, exponiéndolo mediante ejemplos de aplicación.

6. EJEMPLOS DE IMPLEMENTACIÓN DE MALLAS DINÁMICAS

El interés en la simulación de yacimientos ha estado aumentando rápidamente debido a las mejoras en la tecnología, y la creciente eficacia de las operaciones de recobro de aceite mediante procesos de EOR. Las altas tasas de producción hacen pronosticar grandes caídas de presión y enormes cambios en las propiedades del yacimiento. Para capturar adecuadamente estas características dinámicas, la simulación de yacimientos de hidrocarburos permite el uso de las técnicas adaptables especializadas en refinamiento dinámico de la malla. La simulación exacta de los fenómenos en las cercanías del pozo así como el análisis del movimiento de los fluidos dentro del yacimiento, nos permite estudiar el efecto que tienen las técnicas de recobro mejorado en el incremento de la productividad y validar la efectividad del tipo enmallado.

A continuación se presenta una recopilación de diferentes ejemplos encontrados en la literatura en donde se muestra la implementación de la técnica de enmallado dinámico para diferentes tipos de aplicaciones. Los ejemplos aquí señalados describen brevemente el modelo a simular, los criterios utilizados para la adaptación del grid dinámico y los resultados obtenidos junto con una pequeña discusión de los mismos, los cuales son presentados siguiendo el orden cronológico en que fueron desarrollados, de modo que se haga evidente la evolución de estos procesos a medida que se mejoran los software, se desarrollan nuevas técnicas de escalamiento y se incrementa la capacidad de los ordenadores, permitiendo de esta manera realizar algoritmos más complejos en tiempos de calculo mas razonables.

Los procedimientos de refinamiento local dinámico fueron implementados en la mayoría de los casos en una serie de programas de computadora codificados en FORTRAN 77. Esta serie de programas incluyen:

- Fase individual de aceite
- Fase individual de gas
- Dos fases (agua /aceite)
- Tres fases (agua /aceite / gas)

Casos mas avanzados también incluyen simulaciones composicionales, modelos en una, dos y/o tres dimensiones con la opción de refinamiento estático y dinámico.

6.1 MALLAS DINÁMICAS PARA LA SIMULACION DE MODELOS DE INYECCIÓN DE AGUA.

La inyección de agua es el método de recobro mas usado y el análisis exacto de su comportamiento es una de las aplicaciones mas interesantes en la simulación numérica puesto que involucra fenómenos altamente localizados que son de naturaleza dinámica; Por todo ello se presenta a continuación una recopilación de algunos estudios que implementan mallas dinámicas para la simulación de modelos de inyección de agua.

6.1.1 Evaluación del comportamiento del refinamiento dinámico en la simulación de nueve casos de inyección de agua. En 1987 D.K. Han, D.L. Han y C.Z. Yan⁸ presentaron un técnica flexible del refinamiento local dinámico en el modelamiento de yacimientos. Para la validación de la técnica modelaron un cuarto de un esquema de inyección de agua de cinco puntos en un yacimiento homogéneo, bifásico, en dos dimensiones; En la evaluación del comportamiento del refinamiento dinámico simularon nueve casos descritos a continuación usando como patrón de comparación un sistema de malla fina convencional (Caso 1). Los parámetros del yacimiento y de los pozos son descritos en el estudio de referencia.

Caso número 1.

El yacimiento fue dividido con un sistema de malla fina convencional 20x20.

Caso número 2.

El yacimiento fue dividido con un sistema de malla gruesa convencional 5x5.

Caso número 3.

Se usó el método de tres niveles de refinamiento local dinámico con un sistema de malla base de 5x5, los bloques donde están ubicados los pozos se subdividieron en un segundo nivel de bloques fijos 2x2, y el bloque que contiene el pozo de este segundo nivel se subdividió en un tercer nivel adicional de bloques fijos 2x2. Este esquema se puede denominar subdivisión local sucesiva fija en el bloque de pozo de 5x2x2. En el proceso de refinamiento local dinámico para subdividir sucesivamente los subbloques en el tercer nivel, el valor umbral de saturación de agua está precisado como $S_{wth} = 0.197$. En este caso los subbloques del tercer nivel y los bloques base no deberían hacer contacto directamente y los bloques base contiguos a los subbloques del tercer nivel estarán divididos en el segundo nivel de subbloques Fig.30.

Los valores umbrales de saturación para combinar los subbloques del tercer nivel con los del segundo nivel y estos a su vez con los bloques base o del primer nivel son $S_{wth\ 3-2} = 0.40$ y $S_{wth\ 2-1} = 0.55$ respectivamente.

Caso número 4.

Es el mismo Caso 3 pero el valor umbral de saturación para combinar subbloques del tercer nivel con los del segundo es $S_{wth\ 3-2} = 0.45$.

Caso número 5.

El esquema de refinamiento local dinámico es el mismo que en el Caso 4 pero se cancelo el segundo nivel de subbloques, los subbloques del tercer nivel pueden colindar directamente con los bloques base, en este caso los bloques base están divididos en 4x4 para el tercer nivel de subbloques, y el valor umbral de saturación es $S_{wth\ 3-1} = 0.40$; Fig.30.

Caso número 6.

Es el mismo Caso 5 pero el valor umbral de saturación es $S_{wth\ 3-1} = 0.45$; Fig.30.

Los anteriores seis casos fueron calculados con el método CGL, paralelamente llevaron a cabo una serie de cálculos usando el método BSOR para evaluar la flexibilidad del esquema de refinamiento dinámico sucesivo, estos casos son:

Caso número 7.

El yacimiento fue dividido con un sistema de malla fina convencional 24x24.

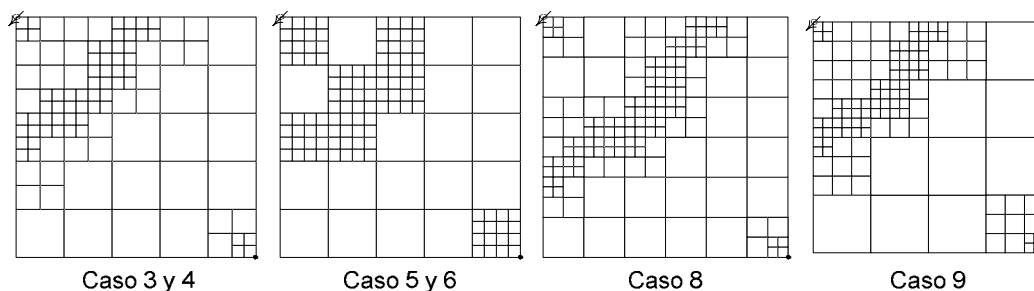
Caso número 8.

En este caso usaron tres niveles de refinamiento local dinámico con un sistema de malla base de 6x6 y tanto el segundo nivel de subbloques como el tercero es de 2x2, este se denomina refinamiento dinámico sucesivo de tres niveles en 6x2x2 y se implementó para los bloques de pozo. Los valores umbrales de saturación de agua son $S_{wth\ 3-2} = 0.45$ y $S_{wth\ 2-1} = 0.55$.

Caso número 9.

Este caso usó tres niveles de refinamiento local dinámico con un sistema de malla base de 4x4, el segundo nivel de 3x3 y el tercero de 2x2, denominado refinamiento sucesivo 4x3x2, el cual también se utilizó de modo estático para el refinamiento del bloque de pozo Fig.30.

Figura 30. Sistemas de refinamiento local dinámico⁸.



Los resultados obtenidos por medio del refinamiento local dinámico tuvieron un buen ajuste con el sistema de malla fina en cuanto a la distribución de presión, saturación y tiempo de ruptura (*Breakthrough time*) del agua en el Caso 6. Como puede verse en la Tabla 2, y en las Figs.31 y 32, el error es pequeño. Tomando el

tiempo de ruptura, como parámetro de ejemplo, los errores son solamente 0.64 % y 0.84 %, lo cuál indica que la dispersión numérica que resulta del error de truncamiento incluso en el frente de desplazamiento donde su valor es máximo, puede ser reducido al mismo orden del sistema de malla fina convencional que tenga un tamaño de bloque igual al de los subbloques mas pequeños del tercer nivel del sistema dinámico; por otro lado, el frente de desplazamiento no puede ser siquiera identificado en el caso del sistema de malla gruesa convencional 5x5, en donde el tamaño de los bloques es igual al de los bloques mas gruesos de los sistemas dinámicos, debido a ello es la alta dispersión numérica, y el error de tiempo de ruptura, el cual comparado con la malla fina 20x20 es un valor inaceptablemente alto de 12,3%.

En general estos resultados muestran que el proceso de seguir el frente de desplazamiento es satisfactorio.

Para confirmar la aplicabilidad y la confiabilidad de los métodos BSOR y CGL, el caso 4 también fue calculado por BSOR, en donde se encontró que la diferencia del tiempo de avance entre estos métodos es solamente de 0.2% lo que indica que ambos métodos de solución son apropiados para el refinamiento local dinámico.

Reducir el umbral de saturación para la combinación de bloques produjo una reducción del número de bloques y el tiempo de ejecución, pero en los casos 3, 4, 5 y 6 se puede observar que al disminuir el umbral de saturación los resultados se vuelven menos exactos mientras el tiempo de cómputo disminuye. Como muestra la Tabla 2 y 3, cuando el valor umbral $S_{wth\ 3-2}$ se redujo de 0.45 a 0.40 la diferencia en el tiempo de ruptura fue de 1.5%; Desde un punto de vista práctico, se puede ver que el efecto de cambiar el valor umbral no es tan relevante dentro de los cálculos.

En estudios previos a este, Rosenberg y Heineman¹ mencionaron algunas restricciones en el proceso de subdivisión; una de estas restricciones es que el número de subdivisiones de bloques vecinos solo puede ser 1:2. Para estimar la necesidad de esta restricción, Han D. L evaluó dos esquemas de subdivisión con un tercer nivel de bloques directamente adyacentes a un bloque base; El primero consistió en que este bloque base es subdividido inmediatamente en un segundo nivel de subbloques (como en los casos 3 y 4) y el segundo es para mantener el contacto directo entre el tercer nivel y el bloque base (como en los casos 5 y 6). En este caso el esquema la relación del numero de subdivisiones es 1:4, vale la pena resaltar que la diferencia para el tiempo de avance de estos dos tipos de subdivisión de bloques es solamente 0.2 %, por lo tanto, esta clase de la restricción no es necesaria.

Esta simplificación lograría reducir el número de bloques de malla y ahorrar tiempo de cómputo especialmente para simulaciones con múltiples pozos.

Tabla 2. Comparación de los resultados de cómputo para el tiempo de ruptura⁸.

Caso.	Nº de pasos	Nº promedio de celdas	Tiempo de cómputo normalizado	Tiempo de avance (días)	Diferencia (%)
1	83	400	1.00	4827	0.00
2	25	25	0.0083	4297	12.30
3	87	128.1	0.268	4723	2.20
4	85	135.3	0.266	4796	0.65
5	90	150.0	0.420	4716	2.40
6	89	177.7	0.44	4787	0.84

*Comparados con el Caso 1.

Tabla 3. Comparación de los resultados para cortes de agua de 75% y 95 %⁸.

Corte de agua del 75%				Corte de agua del 95%		
Caso.	Nº de pasos	Tiempo de computo normalizado	Nº promedio de celdas	Nº de pasos	Tiempo de computo normalizado	Nº promedio de celdas
1	254	1.00	400	844	1.00	400
2	212	0.0237	25	835	0.348	25
3	259	0.269	127.9	871	0.139	6807
4	231	0.300	148.4	865	0.154	75.0
5	269	0.334	146.0	877	0.209	82.9
6	257	0.352	177.2	871	0.219	93.9

Figura 31. Distribución de presión entre el productor y el inyector⁸

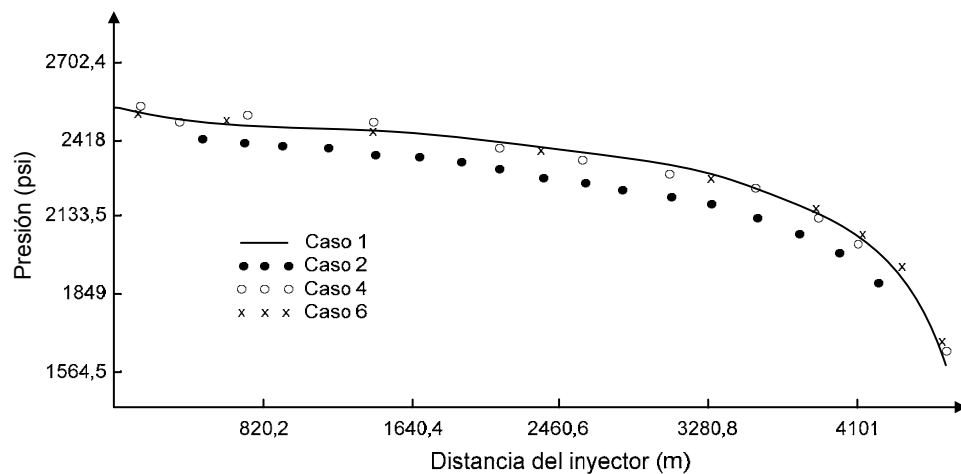
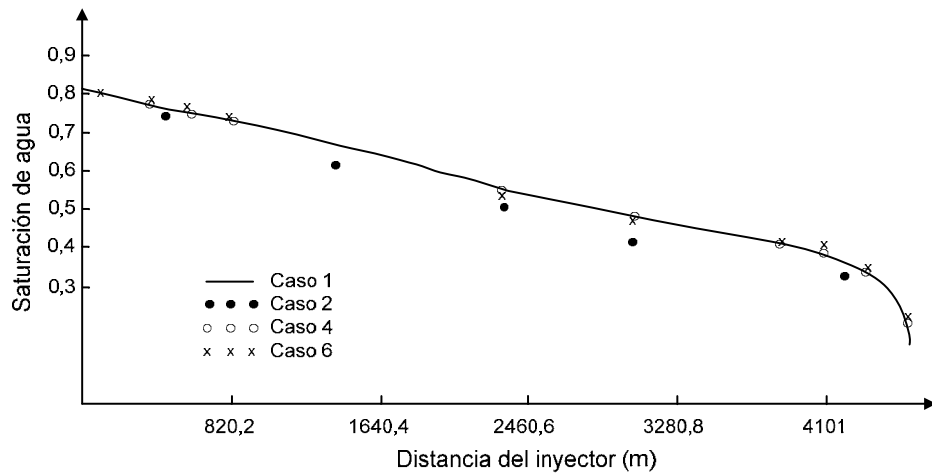


Figura 32. Distribución de la saturación de agua entre el productor y el inyector⁸.



6.1.2 Evaluación del comportamiento del refinamiento dinámico en la simulación de tres modelos de inyección.

Después del trabajo desarrollado por D.K. Han, D.L. Han y C.Z. Yan, en 1993 Yu Ding y P,A, Lemonnier¹⁷ realizaron un estudio en el que implementaron la técnica de refinamiento local dinámico para hallar la posición del frente de desplazamiento determinada a partir de la saturación máxima, mientras que las regiones de altos gradientes eran determinadas examinando los valores de flujo para así simular varios modelos que evaluaban procesos de inyección.

Para desplazamiento inmisible, el flujo fraccional determina la forma del perfil de saturación. La saturación en el frente S_{wF} se puede hallar por la pendiente de Welge, luego se puede encontrar el frente de desplazamiento situando la celda con la saturación que está entre la saturación irreducible S_{wir} y la saturación del frente S_{wF} . En la práctica los autores introdujeron los parámetros $[S_{r1}, S_{r2}]$ y $[S_{u1}, S_{u2}]$, para refinar y agrupar respectivamente.

Una vez la zona del frente era situada, se buscaba la celda dentro de la zona con el gradiente más alto. Primero calcularon el flujo $F = K\nabla P$ en todas las interfases en la celda, y encontraron el flujo máximo F_{max} y el mínimo F_{min} . Se computaron las tolerancias de flujo $F_{\alpha1} = F_{max} - \alpha_1(F_{max} - F_{min})$ y $F_{\alpha2} = F_{max} - \alpha_2(F_{max} - F_{min})$ con

$\alpha_1, \alpha_2 \in [0,1]$. Pruebas numéricas mostraron que los valores α_1 y α_2 tienen que estar cerca de 1.

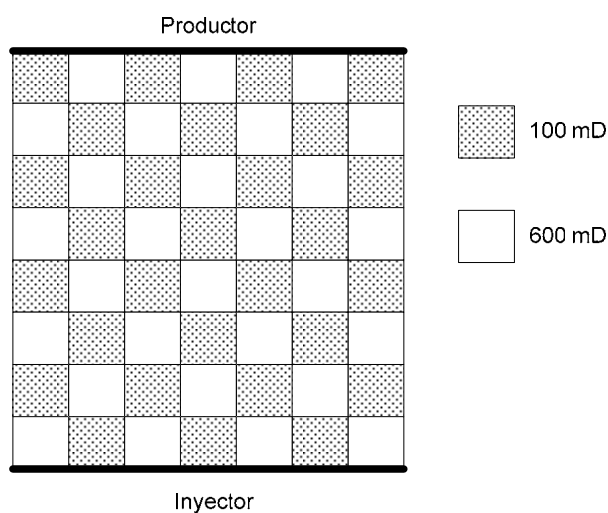
Entonces se tuvo que:

- ❖ Refine la celda i si $S_i \in [S_{r1}, S_{r2}]$ y el flujo en una de estas fases es mas grande que F_{α_1} .
- ❖ No refine la celda i si $S_i \notin [S_{u1}, S_{u2}]$ y todo el flujo en esta celda es mas pequeño que F_{α_2} .

De acuerdo a las anteriores consideraciones hechas por Han D.L, se exponen algunos de sus ejemplos para mostrar la eficiente adaptación del refinamiento local en yacimientos heterogéneos.

6.1.2.1 Tablero ajedrezado. La adaptación de la refinación de la malla es una manera eficiente de describir con exactitud en un modelo el desplazamiento inestable en medios porosos homogéneos o heterogéneos. El modelo en la Fig.33, consiste en una línea fuente como inyector y en otra como productor;

Figura 33. Tablero ajedrezado²¹.



Primero se saturó completamente con agua, después se inyectó un trazador. Las simulaciones fueron llevadas a cabo para flujo bi-fásico con iguales viscosidades y curvas de permeabilidades relativas. Una malla base de 14x14 celdas y una malla fina de 42x42 celdas fueron comparadas para dos niveles de refinación local dinámica aplicados en la malla base; para el criterio de flujo $\alpha_1 = 0.85$, y $\alpha_2 = 0.95$. Como S_{wir} y S_{wF} son iguales a 0 y 1 respectivamente, se definió $[S_{r1}, S_{r2}] = [0.005, 0.8]$ y $[S_{u1}, S_{u2}] = [0.005, 0.9]$ para el criterio de localización del frente. Los criterios fueron verificados cada 5 u 8 pasos de tiempo (0.013 VP de fluido se inyectaron por día). La Fig. 34. muestra los contornos de saturación para las tres discretizaciones (gruesa, fina y dinámica). Los resultados de la malla dinámica son similares a los de la malla fina, mientras los contornos de saturación de la malla gruesa presentan dispersión numérica. La Fig.35, muestra la curva de RAP relación agua-petróleo contra VP inyectados. Los resultados de la adaptación y la malla fina son muy parecidos pero el tiempo de computo se dividió entre 1.6 como lo muestra la Tabla 4; además se ocupó menos memoria con la malla dinámica. La Fig. 36, presenta la malla en diferentes tiempos durante la simulación, 25 días (0.325 VP), 50 días (0.65 VP), y 75 días (0.975) para ilustrar el comportamiento dinámico del método.

Figura 34. Contornos de saturación para el tablero ajedrezado²¹.

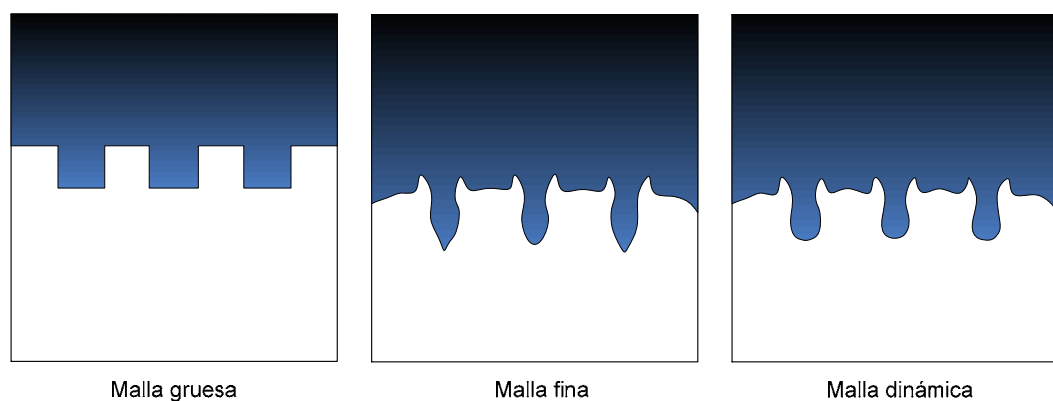


Figura 35. RAP para el tablero ajedrezado²¹.

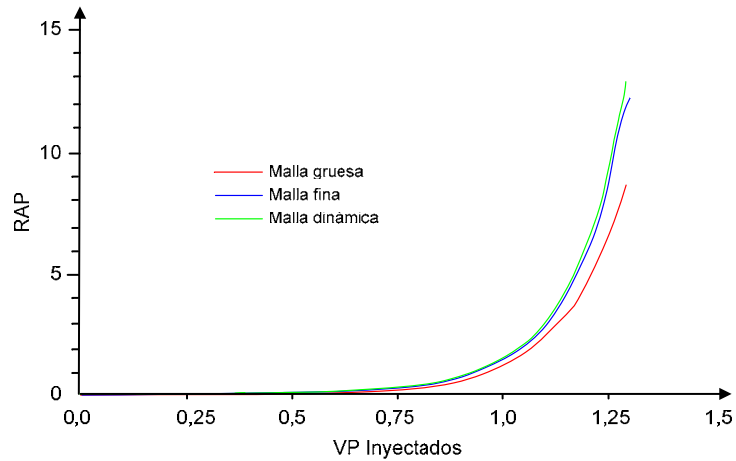
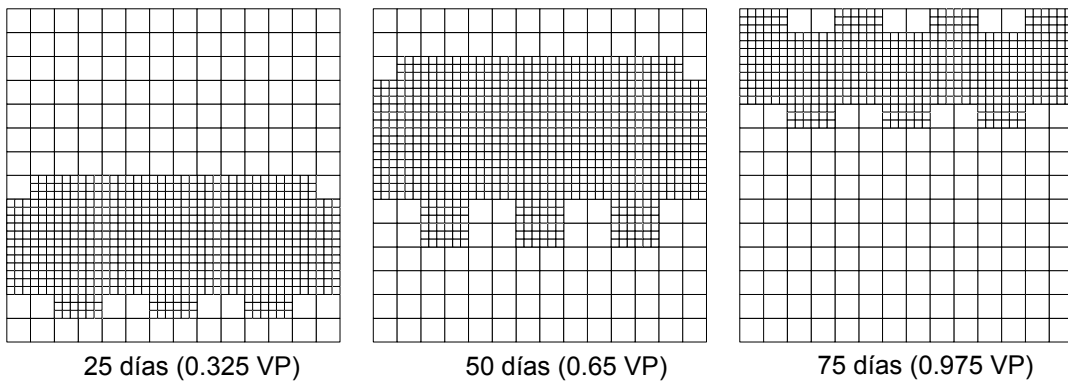


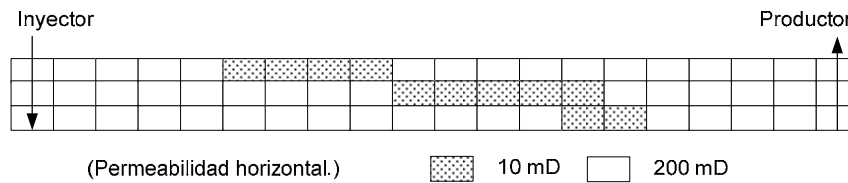
Figura 36. Evaluación de la malla para el tablero ajedrezado²¹.



6.1.2.2 Sección transversal. La Fig. 37, presenta una sección transversal de permeabilidades heterogéneas, con un pozo inyector y uno pozo productor. El yacimiento está saturado de un crudo con viscosidad de 4 *cP* y agua con viscosidad de 0.4 *cP* que se inyectó a un tasa de 5.5×10^{-4} VP por día. El flujo fraccional es cóncavo, lo que constituye un problema desfavorable para el desplazamiento tipo pistón. Una malla tosca de 20x3 celdas y una malla fina de 60x9 celdas fueron comparadas para dos niveles de refinación local dinámica

aplicados en la malla tosca. La S_{wir} y S_{wF} son iguales a 0 y 1 respectivamente; Se utilizó $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.96$ y $[S_{r1}, S_{r2}] = [0.03, 0.7]$, $[S_{u1}, S_{u2}] = [0.03, 0.7]$ para el criterio de refinamiento y desrefinamiento o agrupamiento.

Figura 37. Sección transversal²¹.



La Fig. 38, muestra las curvas de RAP y la Fig. 39, las de recobro. Como en el ejemplo anterior los resultados de la malla dinámica y la malla fina son muy parecidos, la mejora en el tiempo de cómputo es del mismo orden que en el modelo del tablero ajedrezado.

Figura 38. RAP para la sección transversal²¹.

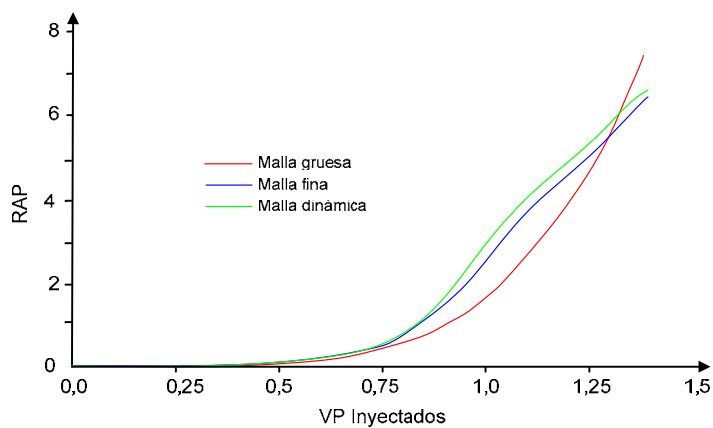
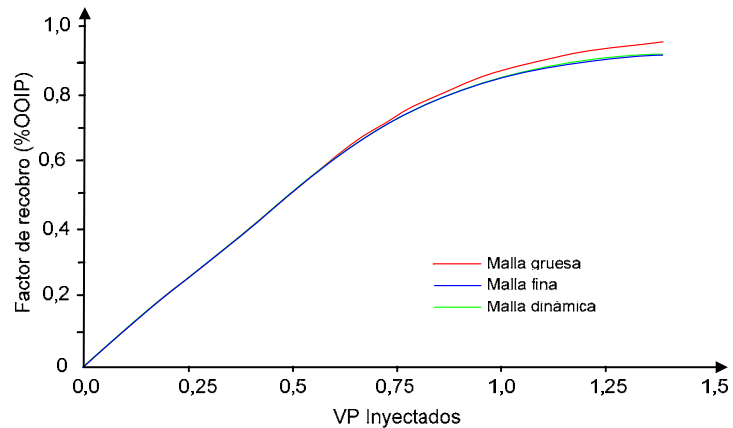


Figura 39. Factor de recobro para la sección transversal²¹.



6.1.2.3 Modelo en 3-D. La Fig. 40, presenta un yacimiento heterogéneo con dos estratos, las propiedades físicas son iguales a las de la sección transversal del modelo anterior. El espesor de las capas es 4 m (13 ft), y 9 m (30 ft) respectivamente, la permeabilidad vertical es 1 mD y la horizontal se muestra en la Fig. 40. Este caso fue simulado con una malla tosca de 5x5x2, una malla fina de 15x15x6 y dos niveles de refinamiento local que fueron aplicados en la malla gruesa. Para este ejemplo los parámetros como criterios para refinamiento y agrupamiento fueron; $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.96$ y $[S_{r1}, S_{r2}] = [0.01, 0.92]$, $[S_{u1}, S_{u2}] = [0.01, 0.95]$. Los criterios fueron verificados cada 4 pasos de tiempo; el RAP y el recobro se presentan en las Fig. 41, y Fig. 42, respectivamente. Los resultados son buenos como en el caso 2-D. Debido al número de celdas reducidas las mejoras en el tiempo de cómputo son mayores; la malla dinámica es 4 tiempos mas rápido que la malla fina con el mismo nivel de exactitud (Tabla 4). Durante la simulación con la malla adaptable el número de celdas varía de 50 a 800 con un valor promedio de 550, comparado con las 1350 celdas para la malla fina.

Figura 40. Modelo en 3-D²¹.

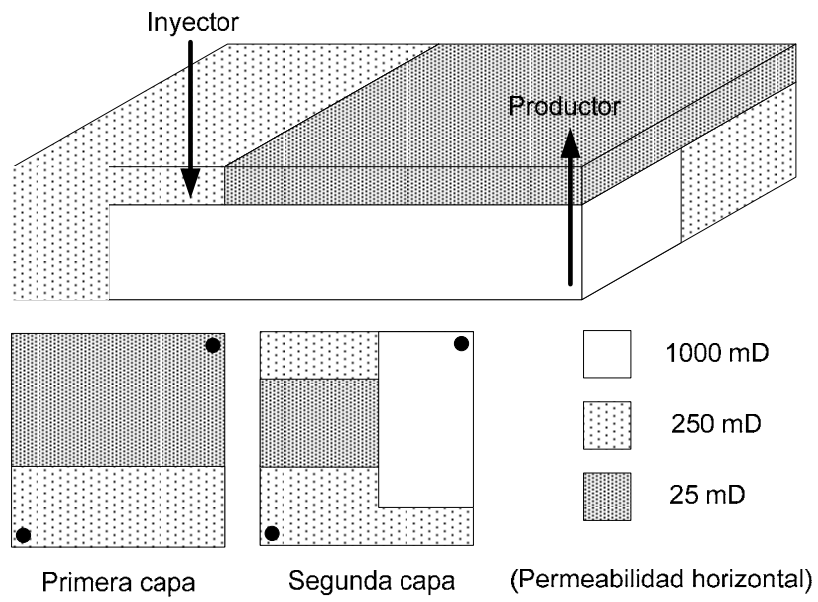


Figura 41. RAP para modelo 3-D²¹.

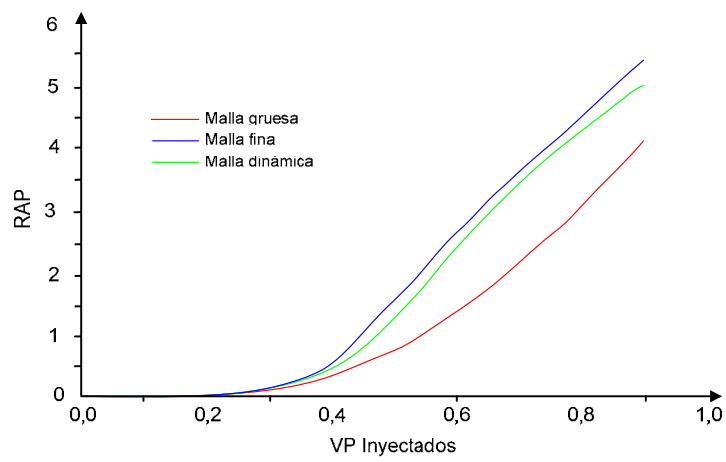


Figura 42. Factor de recobro para modelo 3-D²¹.

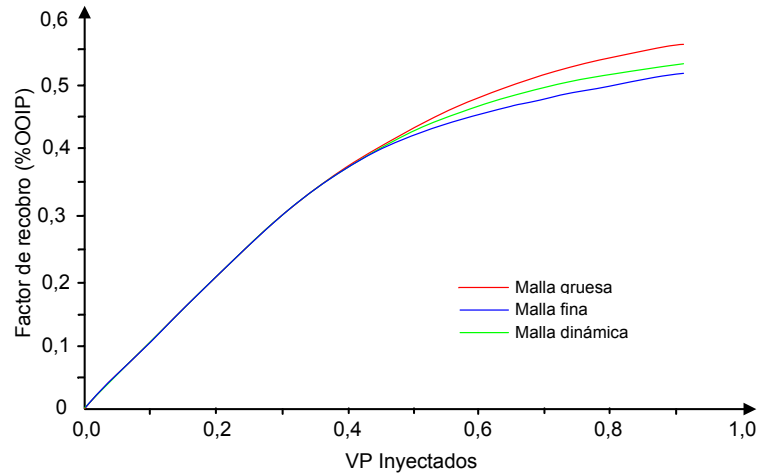


Tabla 4. Comparación de los tiempos de cómputo²¹.

Tipo de malla	M. Tablero ajedrezado	Sección transversal	Modelo en 3-D
Malla tosca.	76 s	26 s	6.2 s
Malla fina.	965 s	421 s	763 s
Malla dinámica.	596 s	262 s	190 s

6.1.3 Evaluación del comportamiento del refinamiento dinámico en la simulación de fenómenos de conificación de agua en dos sistemas de yacimiento. Este estudio fue realizado por J. Manik y T. Ertekin y publicado en el artículo 39228 de la SPE en 1997, para estudiar la conificación de agua en un yacimiento de geometría simple.

6.1.3.1 Conificación de agua en un sistema de yacimiento acuífero-anticlinal.

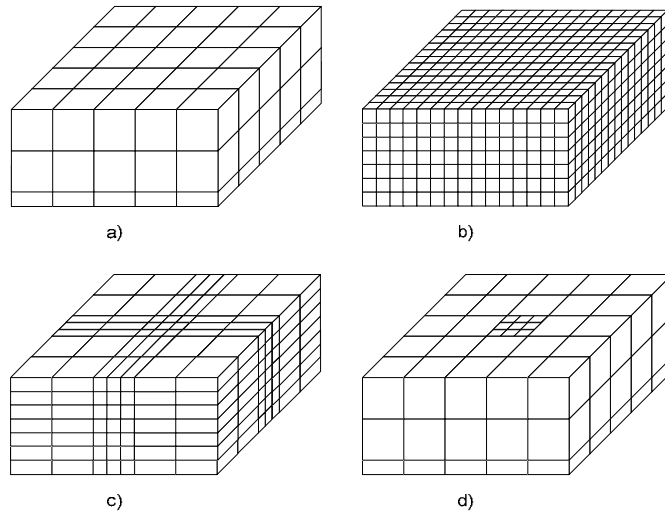
El sistema presentado considera un yacimiento rectangular conectado con un acuífero activo. Las dimensiones del yacimiento son 7500x7500x350 ft, los datos PVT, permeabilidades relativas, presiones capilares y propiedades de la roca, son mostrados en el artículo de referencia. La presión inicial del yacimiento es 3600

psi y las saturaciones iniciales de petróleo, agua y gas son 55%, 25% y 20% respectivamente; el acuífero (con 100% de saturación de agua) se mantiene a una presión constante de 3600 psi.

J. Manik implementó cinco modelos de malla para el estudio de este sistema. El primer modelo discretiza el sistema con una malla ordinaria de 5x5x3 (Fig. 43a) y el segundo modelo consiste en un sistema de celdas pequeñas que forman una malla fina de 15x15x7 (Fig. 43b). En el tercer modelo la parte central de la malla ordinaria se refinó convencionalmente en las direcciones x y y , también se refinaron en dirección z la primera y segunda capa (Fig. 43c), este refinamiento convencional (CGR) genera un sistema de 7x7x7. En el cuarto modelo, las celdas de pozo son refinadas usando la técnica de refinación (SLGR) local estática mientras las otras celdas permanecen como celdas ordinarias (Fig. 43d). El quinto modelo usa la técnica de refinación local dinámica (DLGR), en donde las celdas de pozo están siempre refinadas durante la simulación y las celdas ordinarias a lo largo de la interfaz agua-aceite son refinadas dinámicamente. Los criterios de adaptación usados para el refinamiento local dinámico fueron $S_{w1} = 0.257$, $S_{w2} = 0.4$, $\zeta_h = 1 \cdot 10^{-3} \text{ ft}^{-1}$ y $\zeta_v = 1 \cdot 10^{-3} \text{ ft}^{-1}$; estos criterios de adaptación son calculados de la distribución de saturaciones de la malla ordinaria.

El comportamiento del acuífero numérico es una función de la dimensión de la capa inferior. Para igualar los efectos del acuífero con los del yacimiento tanto en el sistema fino como en el ordinario, los espesores de ambas mallas tienen que ser iguales. Por lo tanto, la capa inferior del sistema de la malla ordinaria tiene que ser fino y por ello no necesita ser refinada durante la simulación.

Figura 43. Modelos de malla para el yacimiento:(a) Malla gruesa, (b) Malla fina, (c) Malla refinada convencionalmente, (d) Malla refinada localmente¹³.



Pozo horizontal. En este ejercicio un pozo horizontal de 0.25 ft de diámetro se encuentra en el centro de un sistema de malla grueso (3,3,2). La Fig.44, muestra que el RAP obtenido para el modelo DLGR está más cercano del resultado de la malla fina que los otros modelos de refinamiento. La tendencia de la tasa de aceite se ve en la Fig.45, los resultados se comparan con los de la malla fina y muestran que en la técnica DLGR estos están más cercanos que los obtenidos con el modelo grueso.

Figura 44. RAP para los cinco modelos, pozo horizontal¹³.

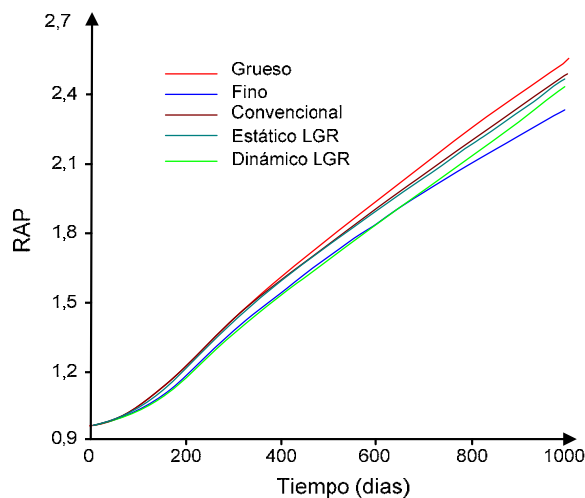
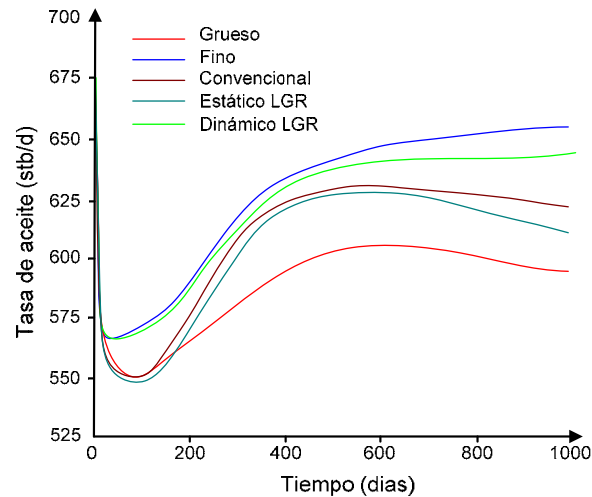


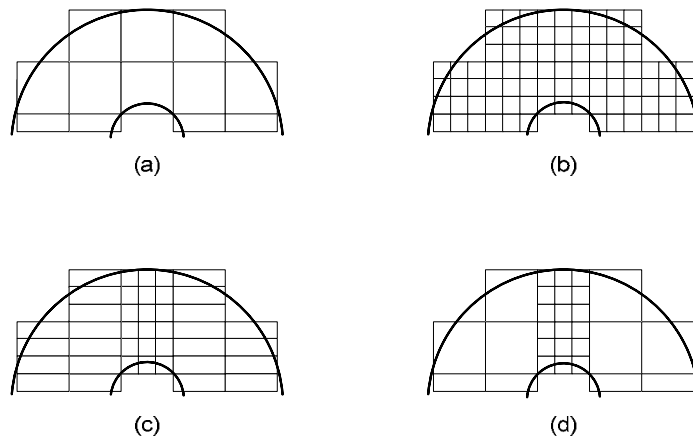
Figura 45. Tendencias de la tasa de aceite para los cinco modelos, pozo horizontal¹³.



6.1.3.2 Conificación de agua en un sistema de yacimiento acuífero anticlinal.

J. Manik y T. Ertekin también estudiaron el fenómeno de la conificación de agua en una estructura donde los gradientes son importantes. En este sistema, las secciones del límite inferior alrededor del eje principal de un anticlinal se sellan totalmente. Por lo tanto, se espera que el efecto de la afluencia del agua en las direcciones laterales sea pronunciado. Las propiedades del fluido, las características de la roca, los datos de permeabilidad relativa y de presión capilar, las condiciones inicial y de frontera son similares a las del sistema de yacimiento combinado acuífero-arena. Aquí también se implementaron los cinco modelos de malla con discretizaciones iguales al del sistema combinado acuífero-arena del caso anterior; ver Fig.46.

Figura 46. Modelos de malla para yacimiento anticlinal, sección transversal: (a) Malla gruesa, (b) Malla fina, (c) Malla refinada convencionalmente, (d) Malla refinada localmente¹³.



Pozo vertical. Como se muestra en la Fig.47, el RAP obtenido del modelo de refinamiento estático está cerca del resultado pronosticado por el modelo de malla gruesa, y tanto el modelo grueso como el refinado estáticamente muestran retrasos en el avance del frente; los modelos de refinamiento fino y dinámico exhiben similares avances de este. Los resultados del RAP obtenidos de estos modelos son paralelos sin embargo después de 600 días la tasa de incremento del RAP del modelo de malla refinada dinámicamente es más alta que la tasa del modelo de malla fina.

Debido a que el RAP describe la relación entre las tasas de flujo de agua y de aceite, altos valores del RAP no necesariamente implican que la tasa de agua esté sobrestimada.

La Tabla 5 resume los tiempos de cómputo normalizados para los diferentes modelos de malla.

Tabla 5. Comparaciones de tiempos de ejecución¹³.

Comparaciones de tiempos de ejecución					
Ejercicio	Ordinaria	Fina	CGR	SLGR	DLGR
Pozo horizontal	1	961	44	1.2	163
Pozo vertical	1	705	40	1.4	555

Figura 47. RAP para los cinco modelos, pozo vertical¹³.

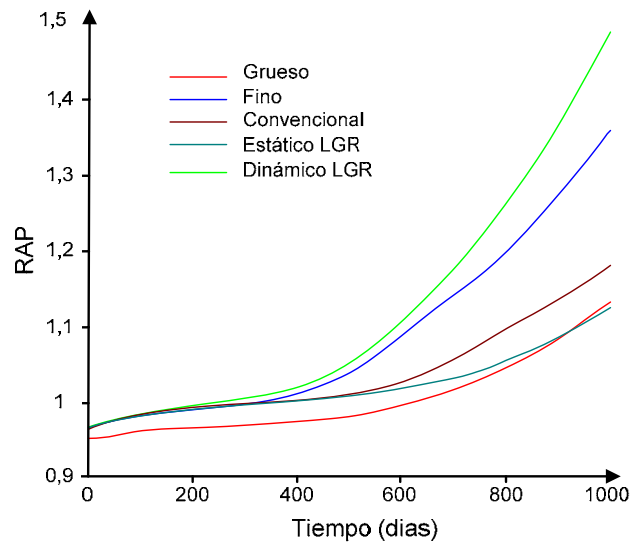


Figura 48. Tendencias de la tasa de aceite para los cinco modelos, pozo vertical¹³.

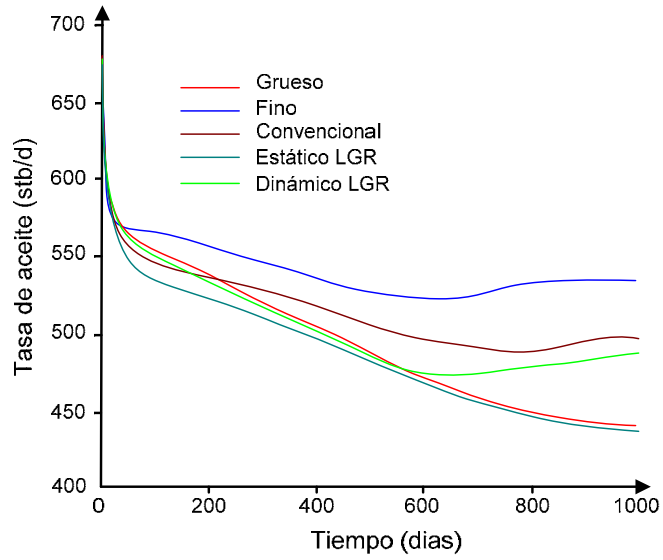
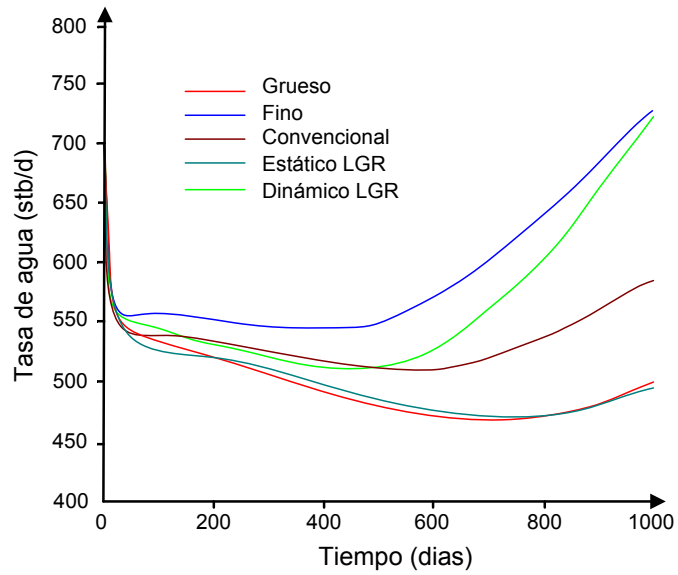


Figura 49. Tendencias de la tasa de agua para los cinco modelos, pozo vertical¹³.



En la Fig.48, y Fig.49, puede observarse que después de 600 días tanto las tasas de aceite como de agua encontradas están entre el rango de las generadas por los modelos de malla fina y gruesa.

6.2 SIMULACIÓN DE YACIMIENTOS COMPOSICIONALES

Para evaluar las ventajas de procesos especiales tales como SAGD (steam-assisted gravity drainage), VAPEX (vapour extraction of oils using a solvent) o ISC (In Situ Combustión) se requiere una representación muy exacta del flujo de los fluidos en situaciones reales de yacimiento. Los procesos de EOR tales como éstos son controlados por el transporte de fluidos y/o del calor debido a los flujos difusivos y/o dispersivos que ocurren en los límites internos, los cuales se están moviendo dentro del yacimiento. Estos límites, o regiones de interfaz, reposan entre el aceite movilizado por el proceso y el aceite a menudo más viscoso, que aun tiene que ser puesto en contacto con el calor o los solventes. Otros frentes ocurren entre las fases, en donde un borde principal del gas caliente de combustión se mueve dentro del aceite aun no contactado. Estas regiones de interfaz son relativamente delgadamente comparadas a los tamaños de celda típicos utilizados para modelar tales procesos de EOR en un simulador. Por esta razón existen problemas obvios en la correcta representación de los fluidos físicos en las interfaces en tales modelos cuando las características están siendo promediadas sobre celdas que son mucho más grandes que la región del interfaz. Y, desafortunadamente, cuando las interacciones físicas de los fluidos en el interfaz no son bien representadas, las estimaciones de producción generadas por la simulación pueden ser pobres.

El refinamiento dinámico de la malla ofrece posibles soluciones a muchos de los problemas de exactitud y de escalamiento en la simulación de EOR arrojando resultados asombrosos.

6.2.1 Simulación con mallas dinámicas en un proceso con VAPEX. El simulador modificado por P. Sammon y el grupo de modelamiento composicional y utilizado en este ejemplo, tiene la capacidad para definir refinamientos anidados de niveles múltiples, además de ciertas capacidades como la opción de alterar refinamientos bajo el control del usuario en datos recurrentes (pozos). Este simulador ya había sido utilizado por el científico con éxito para simular varios procesos especiales, incluyendo VAPEX, así que era un buen candidato para el enmallado dinámico. El estudio "Dynamic Grid Refinement and Amalgamation for Compositional Simulation" desarrollado por Peter H. Sammon²⁸ nace con el objeto de proveer capacidad adicional al simulador, para de esta manera redefinir su enmallado bajo control interno. Antes de describir los detalles dinámicos de su puesta en práctica, algunas cuestiones con respecto a propiedades PVT del modelo a simular y a las mallas de Corner Point deben ser tenidas en cuenta, por lo cual recomendamos al lector remitirse al estudio de referencia.

El modelo es una sección transversal discretizada que representa un elemento de simetría el cual se describe a continuación.

El caso base usa un sistema de 75×50 mostrado en la Fig. 50 con tamaños de celda de $0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ en sus direcciones. Los pozos fueron colocados según se muestra (separado por 5.2 m), y el yacimiento fue inicializado en una presión del 835.6 kPa en el productor, a una temperatura de 21 grados C.

Los pozos fueron operados a BHPs constantes con el inyector de propano ("INJ") operando a 800 kPa y el productor al 790 kPa. Las propiedades del aceite (aceite de Lindbergh) fueron tomadas del paper 66361 de la SPE, con una saturación inicial de 85 %. La difusión molecular fue modelada pero no se permitió ninguna precipitación de asfáltenos.

Dos diferentes métodos fueron utilizados para modelar este problema con mallas dinámicas. En el primer caso, corrida 1, se conservó la malla original cerca de los pozos, como lo muestra la región coloreada combinada (rojo + verde) en la Fig.

²⁸Peter H. Sammon, *Dynamic Grid Refinement and Amalgamation for Compositional Simulation*, SPE 79683, Computer Modelling Group, Ltd. 2003

50. En el segundo caso, corrida 2, redujeron el tamaño de la región fija a las ultimas 10 columnas de celdas de la malla (solo verde). Los agrupamientos condicionales de la celda fueron definidos usando parches de 5×5 sobre el resto del modelo para cada caso, lo cual se demuestra en la Fig. 50. (De esta manera, para la corrida 2, los agrupamientos condicionales también fueron permitidos sobre la región roja).

Los niveles de activación para los agrupamientos y/o refinamientos condicionales fueron del 2 % de la desviación para las fracciones molares globales de todos los componentes y para todas las saturaciones.

Tabla 6. Estadísticas de tiempo de cómputo²⁸.

Ejemplo	Columnas estáticas	Tiempo de corrida	Incremento Vel.
Caso base	Todas	7.2 hr	1
Corrida 1	50:75	3.7 hr	1.9
Corrida 2	65:75	2.5 hr	2.9

Figura 50. Enmallado para la simulación del proceso de VAPEX²⁸.

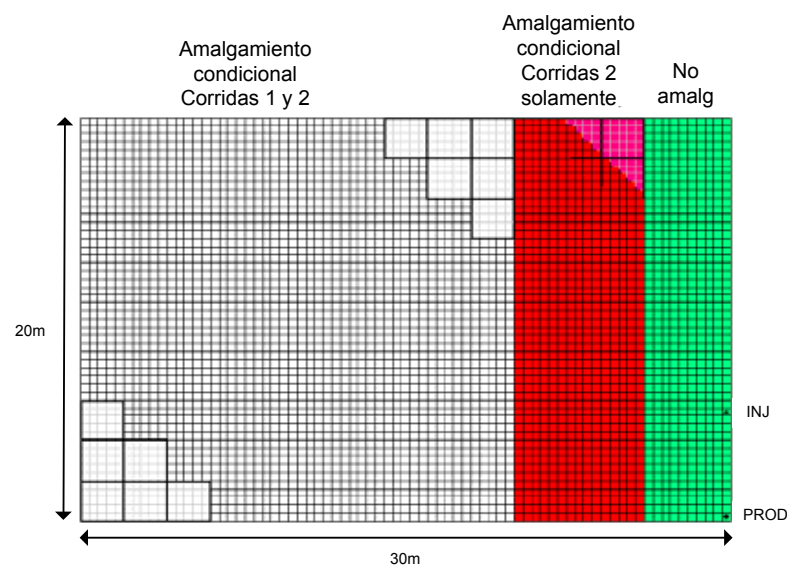


Tabla 7. Otras estadísticas de cómputo²⁸.

Ejemplo	Pasos de tiempo	Iteraciones Newton	Iteraciones solución
Caso base	7199	24968	158040
Corrida 1	7181	24432	156394
Corrida 2	7150	23846	152764

La estadística de tiempo de corrida mostrada en la Tabla 8 demuestra excelentes mejoras en los tiempos de corrida, mientras que la Tabla 9 muestra otros tipos de estadísticas para los tiempos de cómputo; la corrida 1 trabajó dos veces más rápida que el caso base, mientras que la corrida 2 lo hizo tres veces más rápidamente que el mismo. La Fig. 51 compara la producción de aceite y gas para la corrida 1 con el caso base, en donde casi ninguna diferencia se hace evidente entre las curvas de la producción.

La Fig. 52 muestra que la corrida 2 ha comenzado a desviarse levemente del caso base, sin embargo la mejora en el tiempo de cómputo (3 veces menor) podría hacer de la desviación algo tolerable, especialmente cuando se usan las mallas dinámicas para hacer estudios de screening.

Figura 51. Comparación de la corrida 1 y el caso base²⁸.

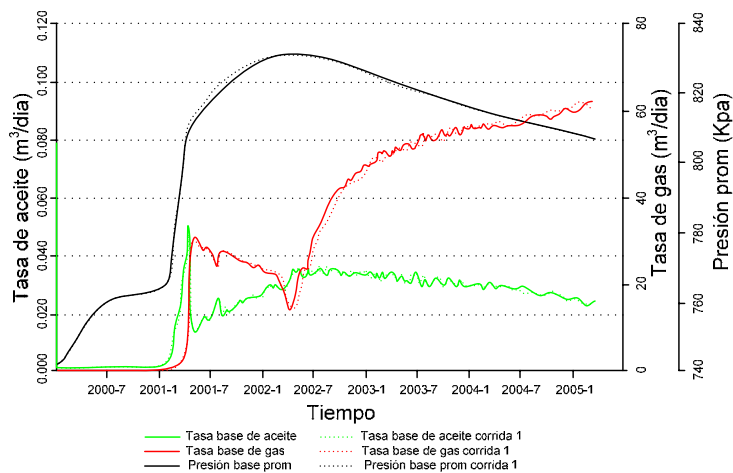
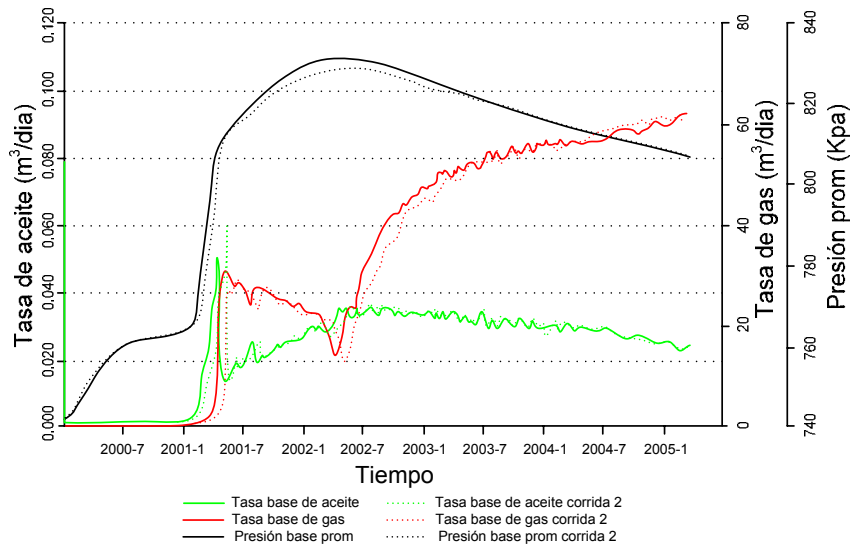
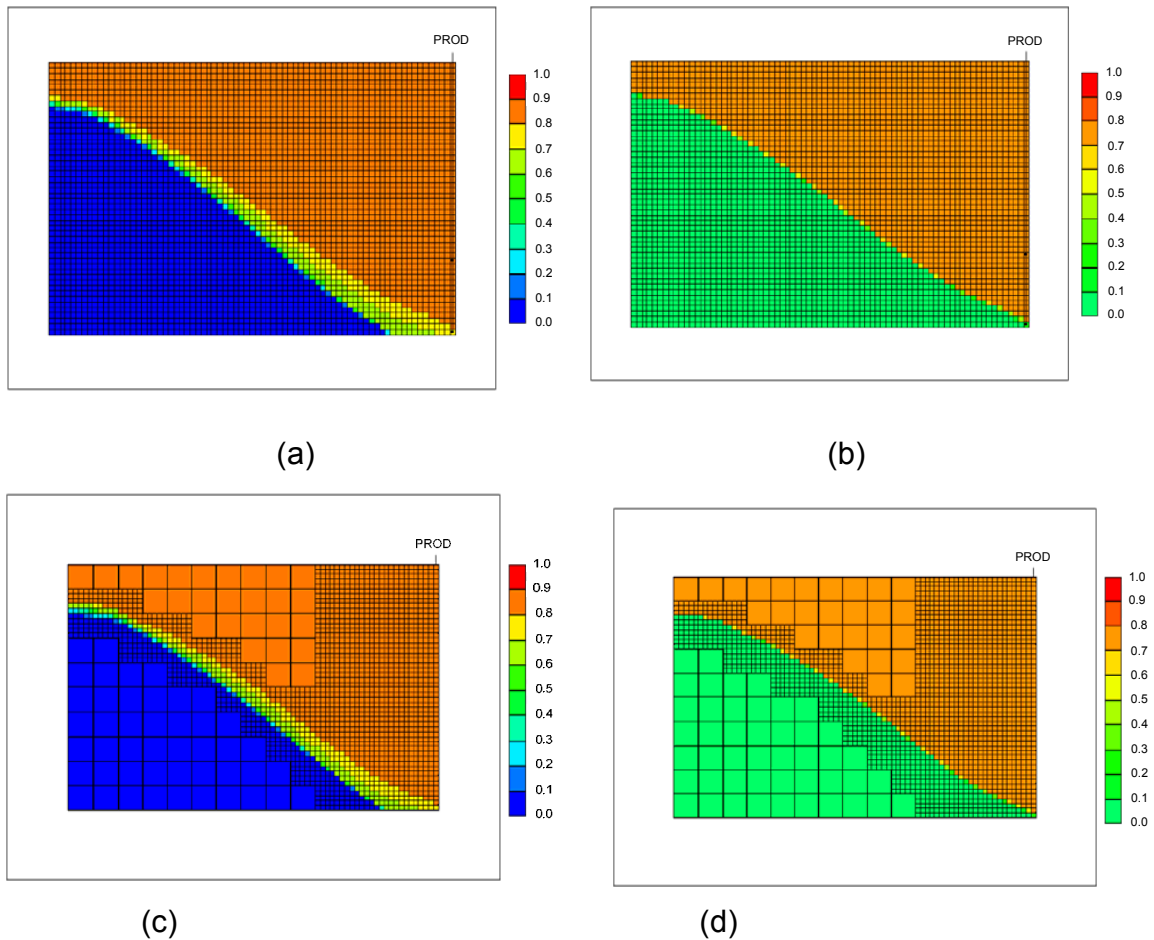


Figura 52. Comparación de la corrida 2 y el caso base²⁸.



Las Figs. 53a y 53b muestran la fracción molar global y la saturación de gas en un tiempo intermedio para el caso base, y las Figs. 53c y 53d muestran los mismos arreglos en los mismos tiempos para la corrida 1. Pocas diferencias se pueden considerar entre esas propiedades. Para las corridas dinámicas, se puede observar que las celdas agrupadas están siendo utilizadas delante del frente, y también siendo reorganizadas detrás de él. En el frente, las celdas refinadas se hacen presentes permitiendo una representación apropiada de la difusión.

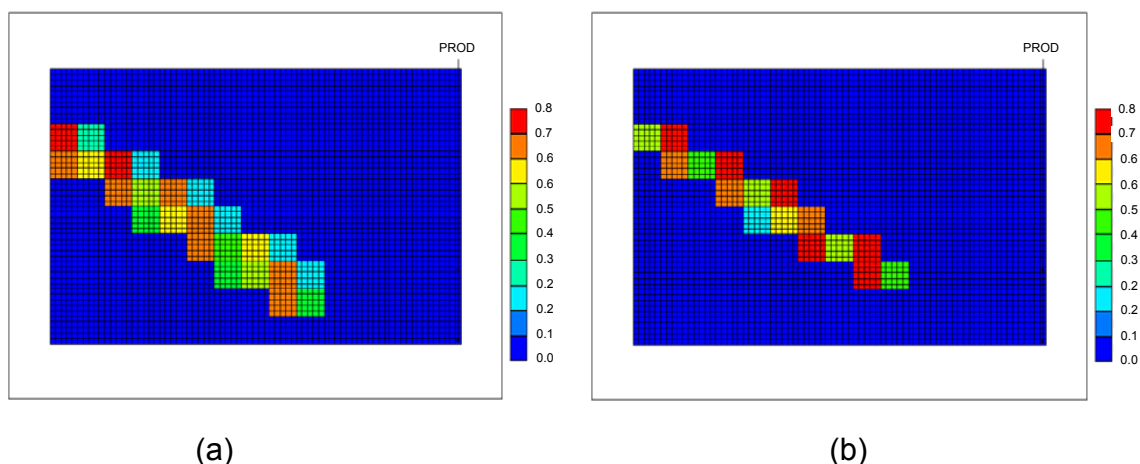
Figura 53. (a) Fracción molar global de propano para el caso base, (b) Saturación de gas para el caso base, (c) Fracción molar global de propano para la corrida 1, (d) Saturación de gas para la corrida 1²⁸.



La fracción molar global del propano fue el verdadero “iniciador” (trigger), como se puede observar en la Fig. 54 (que se tomaron a diferentes tiempos en anteriores observaciones). Estas panorámicas fueron producidas haciendo un barrido sobre todas las posibles agrupaciones y calculando las desviaciones, sin tener en cuenta los agrupamientos existentes. La porción de panorama que muestra los altos valores para la desviación de la fracción molar global no solo comprende los altos valores de las desviaciones de saturación, sino que también refleja la migración del propano dentro del aceite y el desarrollo de una región de infiltración de

solvente en el borde de la cámara de vapor. Observe que el chequeo de desviación se realiza solamente en direcciones areales (en la dirección I en este arreglo de sección transversal), lo cual parece trabajar bien para este problema.

Figura 54. (a) desviación de la fracción molar global para la corrida 1, (b) desviación de la saturación de gas²⁸ para la corrida 1.



Algunas apreciaciones directas sobre el funcionamiento del simulador se pueden hacer para estimar qué tan eficiente es el comportamiento del mismo. Como se puede observar de las figuras, el simulador está intentando atrapar el frente entre una celda desagrupada superior y una inferior en cada columna de celda durante la simulación. Para la corrida 1, hay 10 columnas cada una formada por 5 celdas de escala fina, a lo largo de casi todo el alto, las cuales exhiben el comportamiento del agrupamiento, y 25 celdas de escala fina de ancho en la región estática cerca de los pozos. En cada una de esas primeras 10 columnas, hay generalmente solo dos celdas desagrupadas, donde cada desagrupamiento aporta 5×5 celdas a la simulación.

Así, el número total de las celdas que fueron simuladas para la corrida 1 es cercano a:

$$\text{Corrida 1: } 10 \times (8 + 2 \times (5 \times 5)) + 25 \times 50 = 1\,830 \text{ celdas.}$$

Para la corrida 2, hay 13 columnas de escala gruesa y 10 columnas de escala fina cerca de los pozos. Así, el número total de las celdas que fueron simuladas es cercano a:

$$\text{Corrida 2: } 13 \times (8 + 2 \times (5 \times 5)) + 10 \times 50 = 1\,254 \text{ celdas.}$$

El número de celdas finas es:

$$\text{Caso base: } 75 \times 50 = 3\,750 \text{ celdas.}$$

Dado que el número de celdas simuladas debe ser un buen indicador para el tiempo decorrida, los incrementos de velocidad que se esperaron para las dos corridas son como se muestra en la Tabla 9: incremento de 2.0 para la corrida 1 y de 3.0 para la corrida 2. Comparando la Tabla 7 con la Tabla 9 se demuestra que el aumento de velocidad es casi exactamente la predicha mediante el conteo de las celdas de la malla. Así, si la diferencia descrita entre el caso base y el algoritmo del enmallado dinámico es apenas observable, el funcionamiento de simulador será muy eficiente. De esta manera, se puede decir que los diversos usos de los conceptos de mallas dinámicas produjeron reducciones excelentes en los tiempos de cómputo.

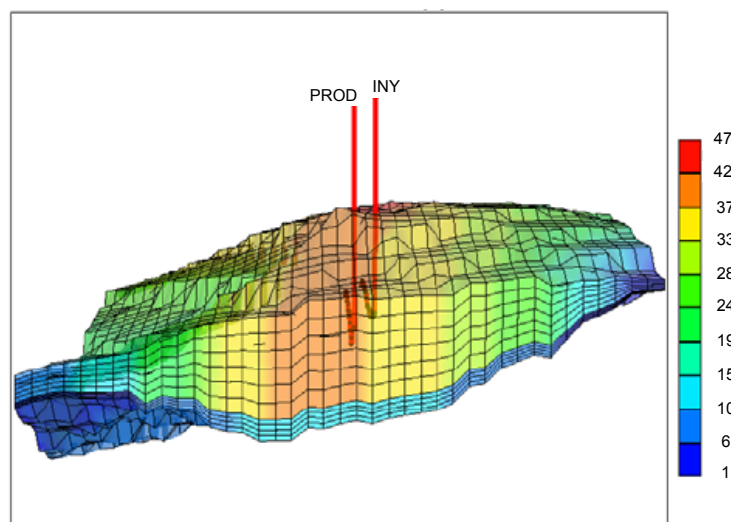
Tabla 8. Tiempo de cómputo estimado²⁸.

EJEMPLO	Incremento de Vel. estimando
Caso base	1
Corrida 1	2.0
Corrida 2	3.0

Este otro ejemplo de VAPEX también propuesto en estudio antes referenciado, utilizó un aceite similar al del ejemplo anterior con propano como el solvente inyectado. Dos pozos horizontales fueron implicados. El pozo más bajo es un productor horizontal, y el pozo de arriba es un inyector horizontal que esta

levemente desplazado. La Fig.55 muestra el espesor bruto del mapa del modelo de la simulación para el caso base en el cual se muestra las localizaciones de los pozos y también la estructura. Las permeabilidades del yacimiento están por el orden de 100mD con una relación de Kv/Kh cercana a 2. Las porosidades son cercanas de 20 %.

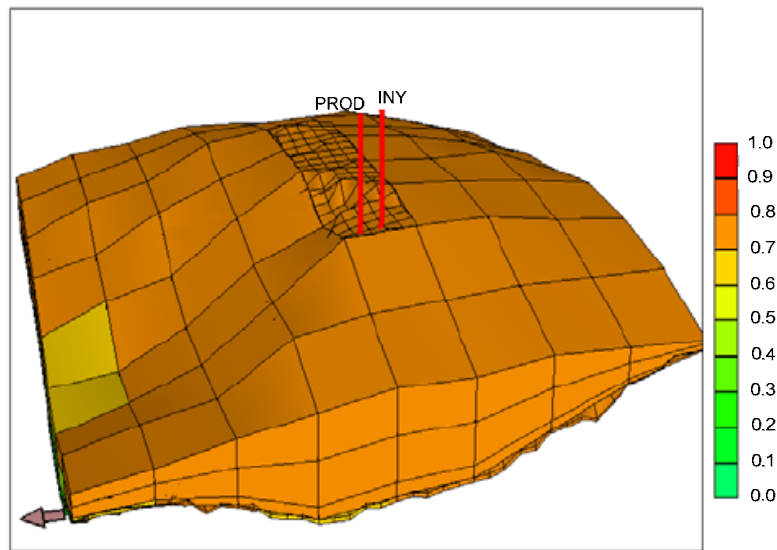
Figura 55. Zona gruesa de interés y posición de los pozos²⁸.



El caso base utilizó una malla estática de $40 \times 40 \times 10$ con refinamientos adicionales de $1 \times 2 \times 3$ para la sección de celdas de $10 \times 5 \times 10$ situadas en la región central que reposa sobre y alrededor de los pozos. Estos refinamientos fueron marcados como condicionales en el caso dinámico, además, permitieron agrupamientos de $5 \times 5 \times 3$ en la zona exterior de la región central. La Fig.56 muestra la saturación inicial de aceite de la malla dinámica, con todas sus órdenes condicionales activas. Observe que hay un contacto agua/aceite afectando la porción más profunda del yacimiento en un flanco. Esto realmente no tiene mucho interés en la simulación, pero indica que una desviación en los cálculos correspondientes a un lado del yacimiento se hará evidente en el cómputo de las desviaciones. Si se revisaran todas las direcciones, las celdas no serían refinadas

en el flanco del contacto del agua-aceite. Este yacimiento fue inicializado en una presión más alta que la primera (alrededor 20 000kPa), a una temperatura de 65 grados C, y experimentó una inyección continua de propano a un tasa de $500 \times 10^3 \text{m}^3$ por un lapso de 10 años.

Figura 56. Saturación de aceite para el agrupamiento inicial de malla²⁸.



La estadística tiempo de corrida se muestra en la Tabla 10. en donde una mejora de 1.5 en el tiempo de pasada es evidente. El resto de estadísticas mostradas en la Tabla 11, son muy similares entre corridas. La Fig.57 compara la producción de aceite y de gas para este ejemplo. Una vez más solo hay una muy pequeña diferencia entre las curvas de producción obtenidas.

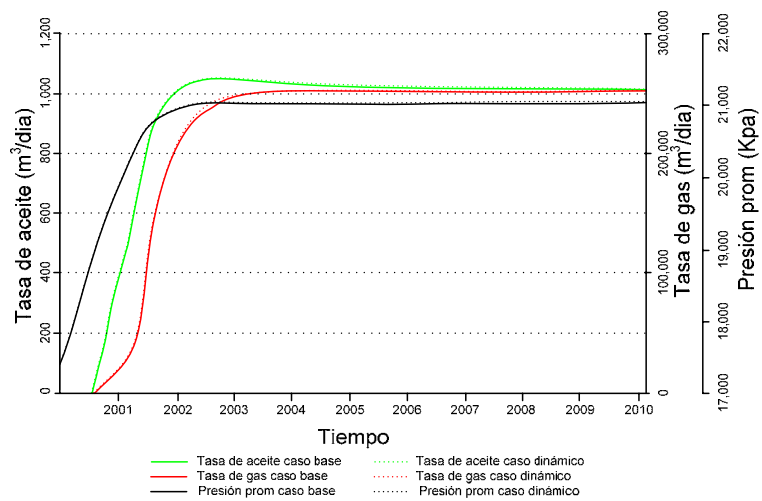
Tabla 9. Estadísticas de tiempo de cómputo.

EJEMPLO	Tiempo de corrida	Incremento Vel.
Caso base	5.4 hr	1
Corrida 1	3.6 hr	1.5

Tabla 10. Otras estadísticas de corrida.

EJEMPLO	Pasos de tiempo	Iteraciones Newton	Iteraciones solución
Caso base	599	4071	28310
Corrida 1	632	4008	30401

Figura 57. Comparación de la producción²⁸.



Las saturaciones de gas son mostradas en las Figs. 58 y 59 para el caso base y la corrida dinámica, respectivamente, donde las celdas sin gas no se colorean pero se pueden observar en el contorno. De igual manera la forma total de los compartimientos se puede ver, aunque el funcionamiento dinámico muestra saturaciones algo más altas en el tope del compartimiento. La estructura regular de la malla se puede observar en los diagramas de presión en la Fig.60 para la corrida estática, mientras que para el mismo tiempo diversos agrupamientos todavía se encuentran activos en la Fig.61 para el caso dinámico.

Figura 58. Saturación de gas para el caso base²⁸.

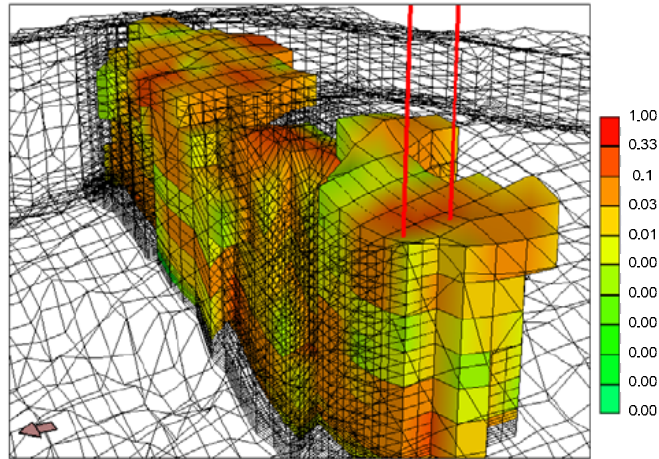
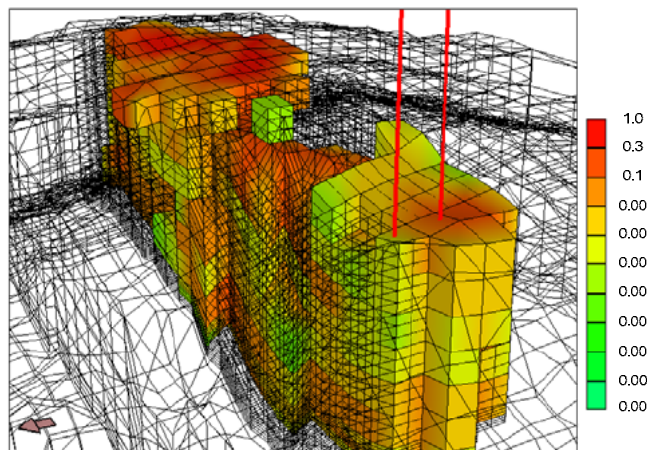


Figura 59. Saturación de gas para el caso dinámico²⁸.



De esta manera, un uso bastante directo de conceptos gridding dinámico produjo una buena reducción en el tiempo de corrida. Sin embargo, este problema permitió que se formara una buena cantidad de gas que causó mayores agrupamientos que en el primer ejemplo, y un pequeño incremento en la aceleración.

Figura 60. Presiones caso base²⁸.

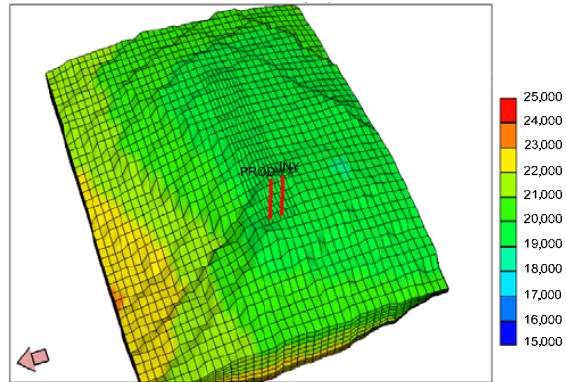
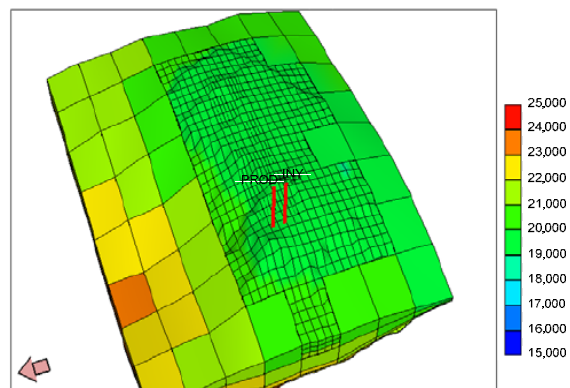


Figura 61. Presiones caso dinámico²⁸.



6.2.2 Simulación con mallas dinámicas en un proceso con combustión in situ (ISC). La combustión In-Situ (ISC) es un proceso donde la inyección del aire crea un frente de combustión, calentando y desplazando el aceite mientras se mueve a través del yacimiento. El interfaz entre el gas y la fase de aceite es algo estrecho y debería por lo tanto beneficiar el uso del refinamiento local dinámico de la malla durante las simulaciones. Además, el gridding dinámico puede tratar el conocido problema de usar una descripción cinética (determinada generalmente en escala

de laboratorio) para diferentes escalas. A continuación se presenta otro ejemplo de una simulación realizada por P. H. Sammon y el grupo de modelamiento computacional²⁹ en el cual se evidencia la bondad y exactitud del método de enmallado dinámico estudiado.

6.2.2.1 Simulación en 3D. La simulación ISC en 1D para el enmallado dinámico se plantea como una opción muy simple y práctica, sin embargo cuando se refiere a simulaciones a grandes escalas en 3D puede tener limitaciones, pues no solo el desplazamiento es diferente al de 1D sino que el tamaño de los bloques usados en la simulación en 3D son de magnitudes mucho más grandes.

A continuación se presenta un modelo homogéneo en 3 dimensiones mediante un refinamiento dinámico, cuyas características principales son las siguientes:

El Tamaño del modelo en X : 100 metros, 27 celdas; tamaño en Y : 45 metros, 9 celdas tamaño en Z: 28 metros, 28 celdas.

La porosidad y la permeabilidad (i,j) son 30% y 5 D, respectivamente; Kv/Kh :1/10 Las Condiciones iniciales son: T = 46 °C, Presión 4600 kPa y Viscosidad inicial de 7700 cP.

Generalidades de los Pozos:

- Inyector Vertical en los bloques 14,9,2:4, BHP restringido a 8000 kPa, inyección de aire a 25000 m³/día a (44 oC)
- Productor Horizontal en los bloques 14,1:9,27, BHP restringida a 3000 kPa
- Inyección de calor por los primeros 5 días para la ignición del aceite.

Incluso sobre este relativamente pequeño enmallado, se tiene un significativo efecto positivo cuando se permite que partes de la malla funcionen como celdas gruesas.

El criterio de selección dispuesto por Sammon fue:

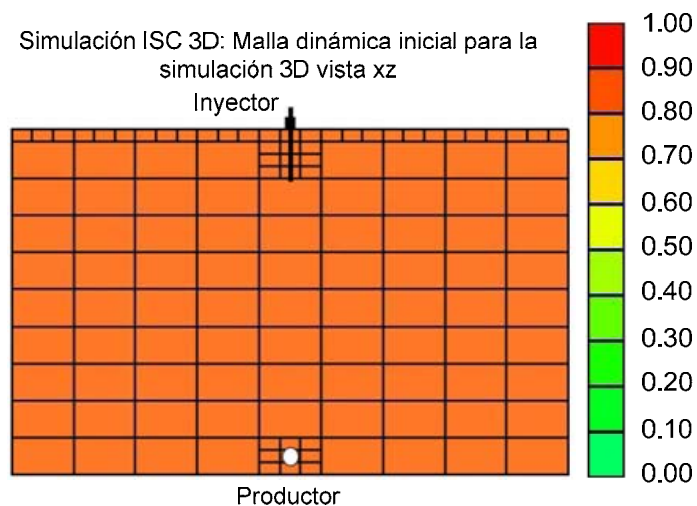
- Umbral del gradiente de temperatura: 20 °C

²⁹J. R. Christensen, Darce; B. Déchelette, P. H. Sammon, *Applications of dynamic gridding to thermal simulations* SPE 86969, TOTAL E&P UK PLC; G. TOTAL H. Ma; Computer Modelling Group, Ltd. 2004

- Los bloques finos alrededor de los pozos nunca son amalgamados.
- La relación de agrupamiento es: 3*2*3 en X-Y-Z excepto sobre las zonas cercanas a los pozos.
- Se prueban los valores del gradiente cada 50 pasos de tiempo.

La Fig.62, muestra el primer plano del modelo inicial de la simulación dinámica. Las celdas son agrupadas en todas las regiones excepto en las áreas cercanas a los pozos donde el agrupamiento no se permite.

Figura 62. Vista X-Z de la malla dinámica inicial para una simulación ISC en 3 dimensiones²⁹.



La opción de refinamiento dinámico disminuyó el tiempo de CPU de 10 horas (simulación de malla fina) a casi 5 horas, sin una pérdida significativa en la exactitud del comportamiento del proceso predicho. (Figs. 63 y 64. producción de aceite acumulativa e inyección de gas acumulativa en una malla gruesa, fina y dinámica para una simulación ISC en 3 dimensiones, respectivamente). Es también importante observar que si una simulación de malla gruesa (malla igual al del estado inicial de la malla dinámica) fuera corrida para este caso, sus resultados serían perceptiblemente diferentes a la de la simulación de malla fina.

Figura 63. Producción de aceite acumulativa en una malla gruesa, fina y dinámica para una simulación ISC en 3 dimensiones²⁹.

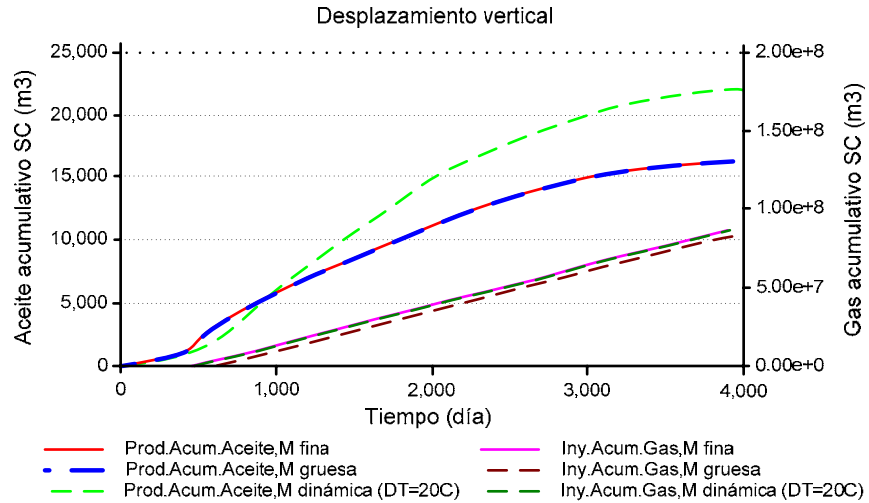
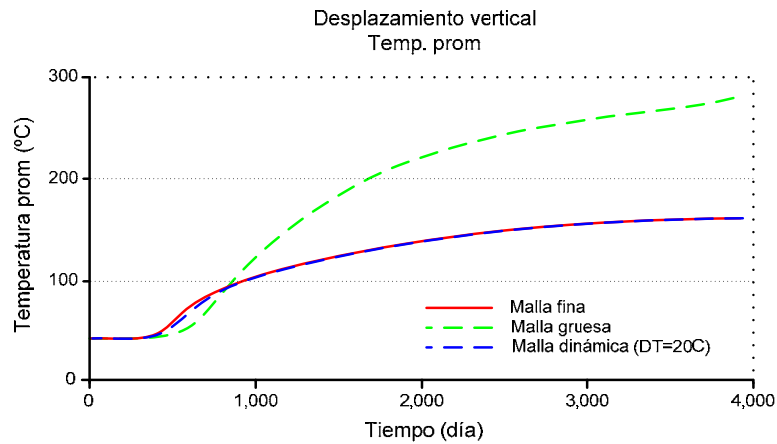


Figura 64. Inyección de gas comulativa en una malla gruesa, fina y dinámica para una simulación ISC en 3 dimensiones²⁹.



Si se examina la forma del frente de combustión en un momento dado durante la simulación, se encuentra que hay una buena concordancia entre la simulación de la malla fina y la simulación de la malla dinámica. Las Figs.65 y 66 comparan en 3D las saturaciones de aceite después de 500 y 1500 días de la inyección del aire respectivamente, para simulaciones de malla fina y de malla dinámicas; aquí

también, el gridding dinámico mostró una buena concordancia en relación con la simulación de la malla fina.

Figura 65. Simulación ISC 3D: Saturación de aceite después de 500 días de simulación²⁹.

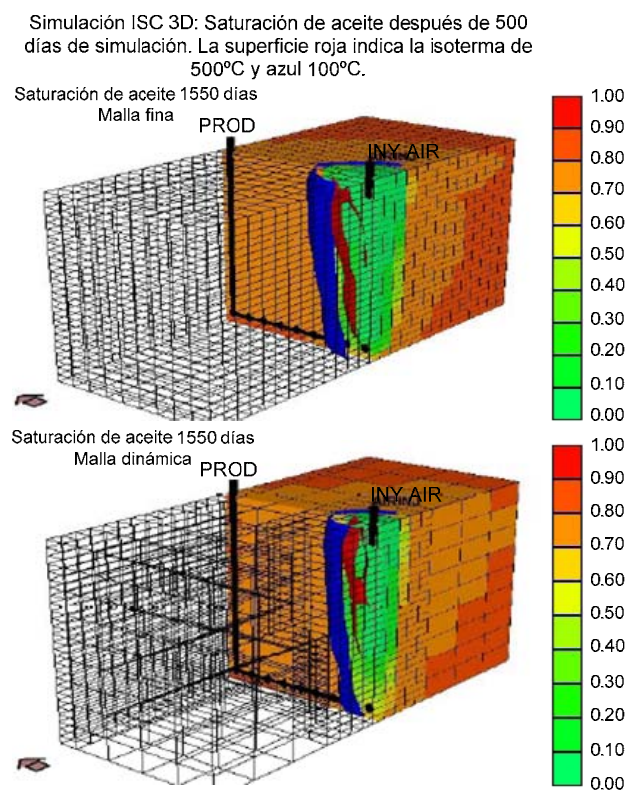
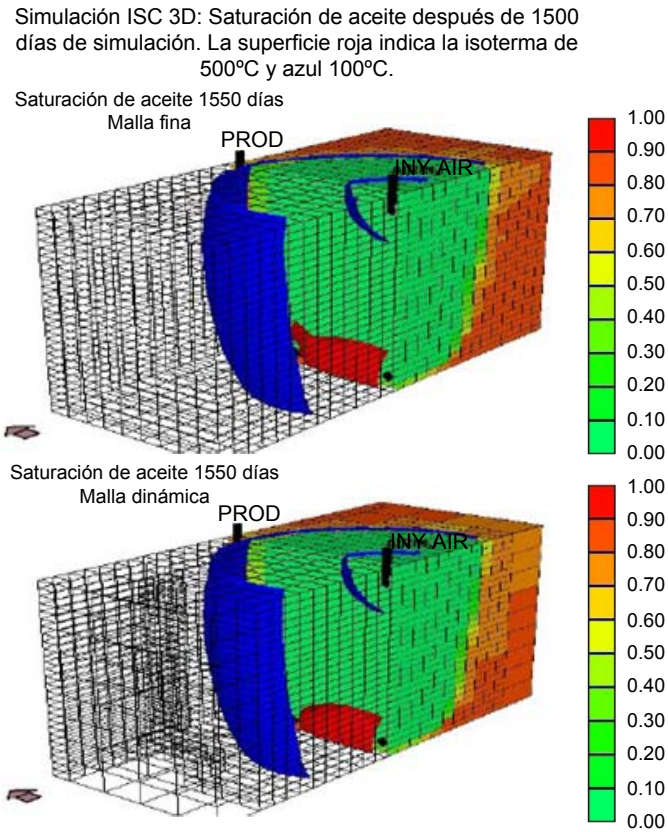
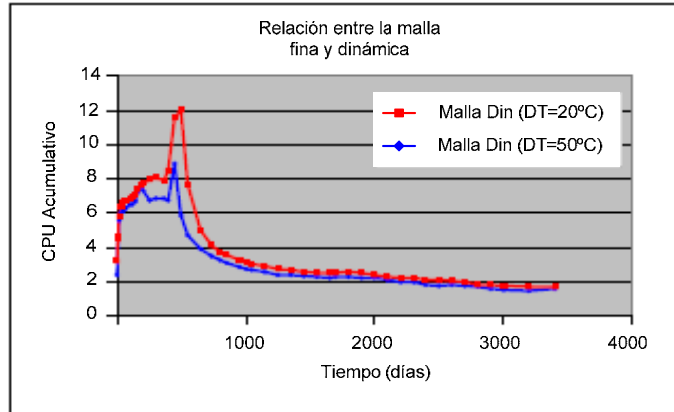


Figura 66. Simulación ISC 3D: Saturación de aceite después de 1500 días de simulación²⁹.



Finalmente, la Fig.67 muestra la relación de tiempos de CPU entre la malla fina y la malla dinámica en función del tiempo de simulación. En el principio de la simulación, donde la malla dinámica está principalmente agrupada hay un ahorro grande de la CPU (hasta 8 veces). En el final de la simulación, donde la mayoría de la malla dinámica es representada por las celdas finas (debido a la no reagrupación detrás del frente) el ahorro es menor pero aún cercana a un factor de 2. Otra simulación también realizada por parte de estos autores utilizó un umbral de temperatura de 50°C, que mejoró el aumento de la CPU (Fig.67), con resultados muy similares a los obtenidos con un umbral 20°C.

Figura 67. Relación CPU entre malla fina y dinámica²⁹.



Este ejemplo demuestra que el enmallado dinámico se puede aplicar con éxito en simulaciones de combustión In Situ a gran escala, con una reducción significativa en los tiempos de CPU para llevar a cabo la simulación. Sin embargo, se debe tener especial cuidado al aplicar los criterios de selección. En este ejemplo no se agrupa significativamente detrás del frente de combustión debido al fuerte gradiente de temperatura en esta área (800 °C en el frente y el °C 44 en el inyector). Es posible forzar un agrupamiento aumentando el umbral de la temperatura en esta región, pero los resultados no serán más aproximados que con una malla fina o con las simulaciones de la malla dinámicas aplicada aquí.

6.2.3 Simulación con mallas dinámicas en un proceso con SAGD. La técnica de enmallado dinámico se aplica también para las simulaciones de los procesos de SAGD (drenaje gravitacional asistido por vapor) en presencia de aceite pesado. Una técnica vecina ya se había aplicado a simulaciones de SAGD, pero la implementada en STARS por J. R. Christensen, Darche B. Déchelette, P. H. Sammon²⁹ presenta la ventaja de ser completamente automática e integrada.

El ejemplo mostrado a continuación es una simulación realizada en el estudio antes referenciado en un modelo de campo en 3D, con un par de los pozos de

SAGD (un inyector, un productor). Los autores primero realizaron una simulación estándar de SAGD en una malla fina usando STARS. Entonces, aplicaron la misma simulación a un enmallado dinámico, usando valores de umbrales apropiados para parámetros específicos. La descripción del modelo de referencia 3D fue la siguiente:

El Tamaño en X (// a los pozos) es 375 m, $DX = 75$ m (5 celda); tamaño en Y (seccionada transversal): 100m, $DY =$ variable (49 celdas); tamaño en Z: 120 m, $DZ =$ variable (88 celdas). La Permeabilidad y la porosidad es heterogénea (Fig.68) Las condiciones iniciales son: $T^\circ: 12^\circ\text{C}$; presión: 12 bares. La fracción molar del gas disuelto (CH_4) en fase aceite es 4%. La viscosidad inicial del aceite es aproximadamente 900000 cP.

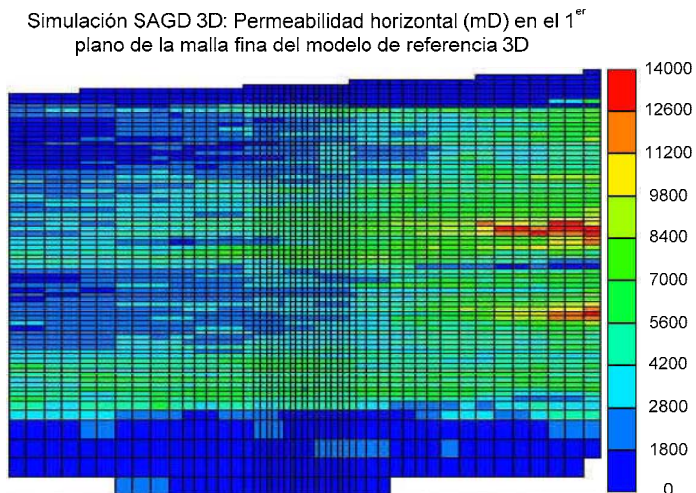
Las restricciones de pozo fueron:

Un par de pozos SAGD en el centro del modelo (inyector: $Z = 24$, productor: $Z = 29$), las restricciones de producción e inyección es impuesta por la producción histórica, cuando la variable se pronostica durante el proceso. Pozos ficticios son ubicados en las zona ladronas para minimizar que estas se comporten como "infinitas". La simulación funcionó por 13 años (5 años para el ajuste histórico y 8 para el pronóstico).

El algoritmo del enmallado dinámico fue definido de la siguiente manera:

- El umbral del gradiente de la temperatura fue de 20°C
- El umbral del gradiente de la fracción molar global molar fue 0.05
- La región de los pozos (pozos SAGD y ficticios) fue mantenida siempre fina
- La relación de agrupamiento fue $1*4*1$ en X-Y-Z excepto en los bordes ($1*2*1$ para las columnas 1-2, $1*3*1$ para las columnas 47-49)
- los valores del gradiente fueron probados cada 40 pasos de tiempo.

Figura 68. Primer plano de porosidades horizontales en la malla fina en el modelo de referencia 3D²⁹.



Los resultados de la simulación con referencia a la malla fina son mostrados en las figuras 69 y 70. La simulación corrió en 4 horas 41 minutos en un PC Pentium 4 de 2 Ghz.

Figura 69. Simulación SAGD en 3 dimensiones de las tasas de producción e inyección para el enmallado fino de referencia del modelo de campo después de 3 años para la malla fina²⁹.

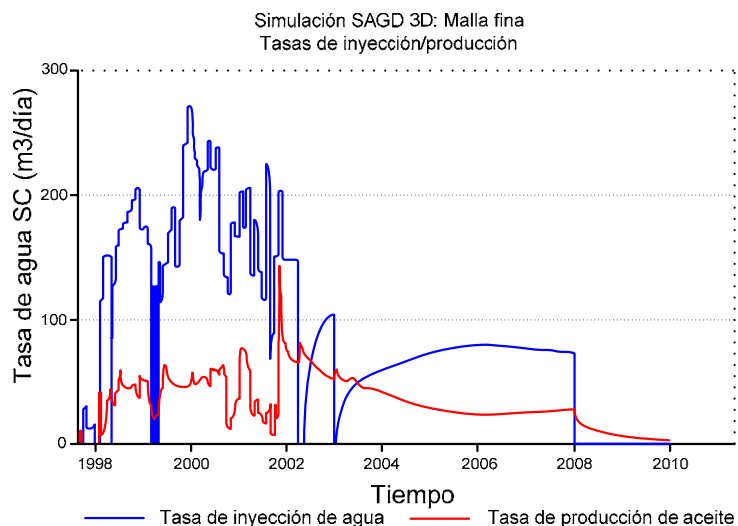
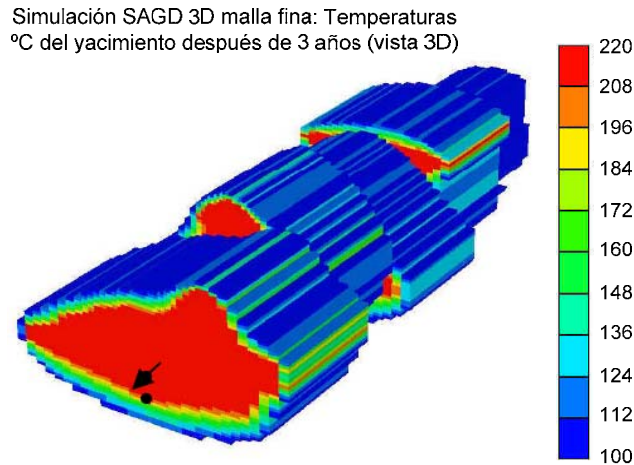


Figura 70. Simulación SAGD en 3 dimensiones de la temperatura del yacimiento después de 3 años para la malla fina²⁹.



De hecho, para el propósito de la comparación, los investigadores decidieron correr un segundo gridding dinámico con un umbral del gradiente de temperatura de 30°C. Prefirieron no usar el agrupamiento en la dirección de X, debido a la heterogeneidad de los resultados de la simulación de la malla fina a lo largo de los pozos de SAGD (Fig.70). Por la misma razón, se prefirió mantener un enmallado fino en la dirección de Z, debido a la presencia de numerosas heterogeneidades delgadas verticales (barreras de shale, contrastes de permeabilidad). También requirieron computar solamente gradientes de Y-Z, para evitar tomar en cuenta en el cómputo del gradiente, las discontinuidades de la temperatura de X (Fig.89), que habría forzado el algoritmo a la desagrupación de demasiadas celdas.

Las simulaciones corrieron en 1 hora 48 minutos para el caso del umbral de 20°C, y 1 hora 25 para el caso del umbral de 30°C (comparado con las 4 horas 41 minutos de la simulación de la malla fina), conduciendo así a las respectivas ganancias de 2.6 y 3.3 de tiempo de cómputo. El número de pasos de tiempo fue aproximadamente igual en todas las simulaciones. Las Figs. 71 y 72 muestran una comparación de los resultados de todas las simulaciones. De nuevo, se agregó

otra simulación, donde se previó el agrupamiento de las celdas gruesas del modelo inicial: esta simulación fue en realidad una simulación de malla gruesa.

Figura 71. Resultados de la simulación SAGD en 3 dimensiones para la malla fina y dinámica a 20°C después de 3 años²⁹.

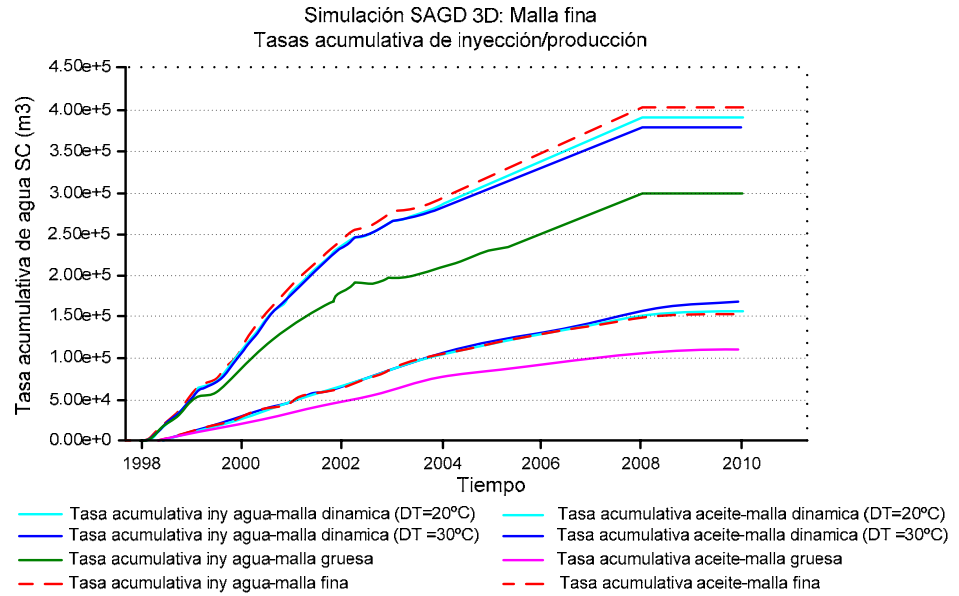
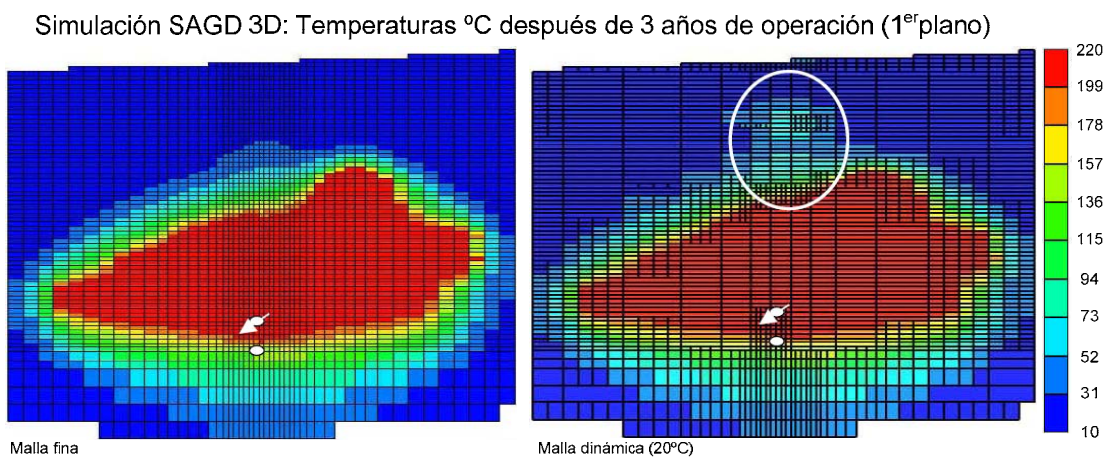
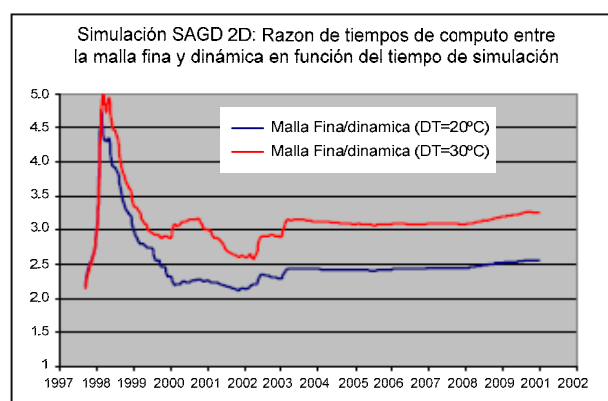


Figura 72. Resultados de la simulación²⁵ con malla fina y dinámica 20°C²⁹.



Estas figuras demuestran claramente que la simulación realizada con gridding dinámico dio resultados exactos para el umbral de 20°C, puesto que concuerdan muy bien con los resultados de la simulación de malla fina. Los resultados del umbral de 30°C son menos exactos. Por otra parte, la simulación de malla gruesa da resultados pobres, por supuesto con un tiempo de CPU más pequeño (56 minutos). También se puede observar en la Fig.72 que la simulación con enmallado dinámico introduce inexactitudes en la expansión vertical del compartimiento de vapor, aunque no afecta los totales acumulativos. Con el enmallado dinámico, el compartimiento del vapor alcanza la parte superior del acuífero antes que con el enmallado fino. Esto puede ser debido a las técnicas de escalamiento simples que fueron utilizadas aquí, y evoca a proponer la puesta en práctica de algoritmos de escalamiento más complejos en un futuro. De nuevo, se puede observar el comportamiento del tiempo de CPU en función de la fecha-tiempo de la simulación (Fig.73), en el cual el aumento de la CPU es mucho más grande en las etapas iniciales de la simulación (de 4 a 5) que en el final (2 a 3). Este comportamiento es interesante de analizar para el período comprendido durante los 5 primeros años.

Figura 73. Incremento de la CPU en función del tiempo de simulación en una simulación SAGD en 3 dimensiones²⁹.



Estos ejemplos prueban que las mallas dinámicas son eficientes, en términos de la calidad del resultado y de funcionamiento de la CPU. Por supuesto, se tiene que tener cuidado con los valores de los umbrales que se utilizan y en general con los parámetros de control de la malla. Como fue ilustrado por los autores, un umbral demasiado grande puede conducir a algunas aproximaciones; así que el usuario, tiene que hacer una cierta prueba preliminar para adaptar los parámetros más apropiados al enmallado dinámico.

CONCLUSIONES

Las mallas dinámicas permiten llevar a cabo refinamientos con un modelamiento más preciso y rápido de las zonas que presentan altos gradientes de presión, saturación y temperatura, en donde cambios de enmallado respecto al tiempo y al espacio, tienen lugar para lograr definir de forma clara el comportamiento dinámico del yacimiento, como lo son el movimiento de un frente de desplazamiento y los pequeños baches que ocurren en procesos de recobro, permitiendo mayor exactitud en la simulación de procesos de inyección de agua y gas entre otros, al igual que simulaciones de SAGD, combustión in-situ y VAPEX .

En el refinamiento local dinámico de la malla, en las regiones con altos gradientes previamente identificadas con un refinamiento local estático, se refinan automáticamente en cada paso de tiempo; los bloques refinados se activan en la malla fina encajada en un modelo de malla gruesa de acuerdo a los criterios de agrupación o refinamiento dispuestos por el usuario, así como por los umbrales establecidos para cada uno de los bloques del modelo, de acuerdo a las condiciones del fluido y del campo a simular, obtenidas a través de datos previamente adquiridos o en su defecto asumidos o promediados de simulaciones estáticas .

Cualquiera de los bloques puede ser subdividido arbitrariamente por un proceso gradual casi sin restricciones, pues no resultan celdas inactivas debido al uso del esquema de ordenamiento natural, por lo cual la matriz de coeficientes formulada es relativamente regular. Esto da lugar a una matriz de coeficientes simple, regular y proporciona un cierto grado de relajación a la solución. La matriz de ecuaciones puede ser resuelta por el método CGL o BSOR.

El error concerniente al método de refinamiento dinámico es insignificante comparado con el sistema de malla fina, esto confirma que el proceso de seguir paralelamente el frente de desplazamiento por este método es satisfactorio. El efecto de la inconsistencia local causada por la diferencia de tamaños de bloques vecinos en los resultados mostrados es relativamente pequeño y el sistema desarrollado para el manejo de datos es sencillo, flexible y efectivo.

Este trabajo ilustra el potencial de las mallas dinámicas como una muy buena opción para acelerar simulaciones térmicas. El enmallado dinámico, permite la agrupación de celdas finas muy lejos (combustión, o vapor) del frente térmico, por ende reduce el número de celdas usadas en la simulación, disminuyendo como ya se dijo el tiempo del cómputo.

Eclipse 100 (versión 2005 o anteriores) como simulador comercial no es conocido por sus características dinámicas, por lo cual no es un software apto para el seguimiento y rastreo de fenómenos móviles altamente localizados, además no presenta ni hace referencia en sus manuales de ningún ítem que pueda ayudar a llevar a cabo simulaciones de comportamiento dinámico en una, dos o tres dimensiones.

El software GEM del Computer Modeling Group versión 2005, no dispone de un módulo específico que permita la implementación de un refinamiento dinámico, y ello solo es posible, en la versión del paquete comercial con el que se trabajó hasta la fecha de este proyecto, modificando el código fuente; sin embargo la versión actual del software (2006) y posteriores ya cuentan con el módulo de dynagriding el cual permite gozar de las ventajas de este tipo de simulaciones.

Como conclusión final, se espera que el refinamiento local dinámico, conjuntamente con otras opciones del simulador como la “paralelización” (parallelisation) ayude a ingenieros de yacimientos a efectuar simulaciones más

exactas de campos enteros en tiempos de CPU aceptables, lo cual constituiría un progreso de vital importancia para los procesos de recobro, representado en un ahorro significativo de tiempo y dinero en el desarrollo de futuros proyectos por muchas compañías petroleras.

RECOMENDACIONES

Al aplicar un refinamiento local dinámico, se aconseja al usuario primero realizar una simulación empleando una malla fina de referencia, para estudiar el comportamiento de las variables específicas (presiones, saturaciones, temperatura,...). Este estudio ayudará en la determinación de la magnitud de los gradientes de estas variables, y así en definir los umbrales del gradiente que forzarán al enmallado dinámico a cambiar entre las celdas finas y gruesas, sin embargo hay que dejar claro que estos valores de umbral son un criterio propio del ingeniero de simulación. Una vez que los parámetros de umbral son adaptados, las simulaciones con enmallados dinámicos se pueden llevar a cabo en lugar de las simulaciones de la malla fina de referencia, cuando tienen que ser ejecutadas muchas simulaciones, por ejemplo durante el estudio del ajuste histórico. Por supuesto, pueden ser corridas (ejecutadas) algunas simulaciones con malla fina de vez en cuando para comprobar la consistencia entre el enmallado dinámico y enmallado fino.

Se recomienda hacer un buen trabajo de escalamiento, para mejorar la exactitud del enmallado dinámico incorporando técnicas de upscaling más complejas, y para simulaciones con mallas dinámicas de campos enteros se recomienda la paralelización de las corridas con el fin de agilizar los cálculos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aziz, Khalid., Settari, Antonin. *Petroleum reservoir simulation*, Elsevier, 1979.
- Aziz Khalid, *Reservoir Simulation Grids: Opportunities and Problems*, Stanford U, Journal of Petroleum Technology, Society of Petroleum Engineers 1993.
- D.K. Han, D.L. Han, C.Z. Yan, and LT. Peng, *A More Flexible Approach of Dynamic Local Grid Refinement for Reservoir Modeling*. Research Inst. of Petroleum Exploration & Development, SPE 1987.
- ECLIPSE 100 USER COURSE
- ECLIPSE OFFICE 2005 MANUAL
- Fanchi, John R. *Principles of applied reservoir simulation*. Houston: Gulf, 1997.
- GEN CMG USER COURSE, Version 2004
- GRID PRIMARY MENU STRUCTURE MANUAL, Version 2001A
- IMEX CMG USER COURSE, Version 2004
- J. Manik, and T. Ertekin, *Development and Application of Dynamic and Static Local Grid Refinement Algorithms for Coning Studies*. SPE, the Pennsylvania State University 1997.
- J. R. Christensen, Darche; B. Déchelette, P. H. Sammon, *Applications of dynamic gridding to thermal simulations* SPE, TOTAL E&P UK PLC; G. TOTAL H. Ma; Computer Modelling Group, Ltd. 2004.
- Knupp, Patrick Steinberg, Stanly, *Fundamentals of grid generation*. 1994.
- M.A. Dashash and R. Mahfoudhi, Saudi Aramco, *Energy Conservation through the Implementation of Co-Generation & Grid Interconnection*, SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, Kingdom of Bahrain, Mar 12 - 15, 2005.

- M.K. Abdou, H.D. Pham, A.S. Al-Aqeell, *Impact of Grid Selection on Reservoir Simulation*, ADCO Producing Co. Inc, Journal of Petroleum Technology, 1993.
- Mattax, Calvin C, Dalton, Robert L, *Reservoir simulation* SPE, 1990.
- Michael G. Edwards. *A higher-order Godunov scheme coupled with dynamic local grid refinement for flow in a porous medium*. Computer methods in applied mechanics and engineering, 131; 287-308. Center for Petroleum and Geosystems Engineering. The University of Texas at Austin, Austin 1992.
- Mustafa B. Blterge and Turgay Ertekin, *Development and testing of a Static/Dynamic Local Grid refinement Technique*. Middle East Technical U, and, Pennsylvania State U. SPE.
- Peter H. Sammon, *Dynamic Grid Refinement and Amalgamation for Compositional Simulation*, SPE, Computer Modelling Group, Ltd. 2003.
- Quandalle, Philippe, BEICIP-FRANLAB, *Eighth SPE Comparative Solution Project: Gridding Techniques in Reservoir Simulation*, Society of Petroleum Engineers, 1993.
- SGM – GRID interface, GRID receive
- Shree Vikas and Turgay Ertekin, *A Patch-Type Adaptive Local Grid Refinement Technique and Its Application to Horizontal Wells.*, SPE, ICF Resources Inc., and, Pennsylvania State University. 23-25 October 1996.
- STARS CMG USER COURSE, Version 2004
- Yu Ding and P,A, Lemonnier, *Development of Dynamic Local Grid Refinement in Reservoir Simulation*. Inst. Francais du Pétrole, SPE 1993.
- Z,E, Heinemaman, Günter Gerken, George von Hantelmann, *Using Local Grid Refinement in a Multiple-Application Reservoir Simulator* Montanuniversität Leoben, and and Preussag AG, Erdöl und Erdgas, SPE 1983.
- www.spe.org

ANEXO A. DESCRIPCIÓN DE LAS PRINCIPALES KEYWORDS PARA EL REFINAMIENTO LOCAL EN ECLIPSE 100

A.1 LGR: DETERMINACIÓN DE OPCIONES PARA REFINACIÓN LOCAL DE LA MALLA Y AGRUPAMIENTO.

Esta opción de keyword permite mejorar la definición de la malla en las cercanías de los pozos. Los modelos locales pueden ser radiales en 2D y 3D o cartesiano en 3D. Los modelos locales pueden tener más estratos que el modelo global. Las transmisibilidades entre los modelos locales y los modelos globales son computadas automáticamente por eclipse. Las propiedades de las celdas en el enmallado local pueden ser heredadas de la malla local o especificados explícitamente para las celdas refinadas.

El agrupamiento de la malla puede ser usado para reunir o formar conjuntos de celdas en regiones donde la exactitud es irrelevante. LGR no puede ser ubicado dentro o adyacente a un agrupamiento, debido a esto es que las mallas locales solo pueden aplicarse a celdas no agrupadas.

La data consiste en 8 ítems que especifican las dimensiones y cambios requeridos para cambiar las opciones de refinamiento local y agrupamiento. Los datos deben ser finalizados con un flash (/).

1. MAXLGR máximo numero de LGRs en el modelo
 - DEFAULT: 0
2. MAXCLS máximo numero de celdas en cada LGRs
 - DEFAULT: 0
3. MCOARS máximo numero de celdas gruesas en los agrupamientos
 - DEFAULT: 0
4. MAMALG máximo numero de agrupamientos LGR
 - DEFAULT: 0

5. `MXLALG` máximo numero de agrupaciones de LGRs
 • `DEFAULT: 0`
6. `LSTACK` cantidad acumulada de direcciones previamente reconocidas usadas para la solución lineal para las simulaciones LGR. Para los casos en donde `LSTACK` es cero o negativo, `NSTACK` toma el valor global por defecto.
 • `DEFAULT: NOINTERP`
7. interpolación de la presión para las corridas de LGR
- `INTERP` esto especifica la presión a ser interpolada espacialmente en las celdas globales vecinas a la malla cartesiana localmente refinada para mejorar la exactitud en los cálculos de flujo entre las celdas globales y locales.
 • `DEFAULT: 0`
- `NOINTERP` no se usa interpolación de la presión.
 • `DEFAULT: 0`
8. `NCHCOR` numero total de celdas de malla contenidas en los agrupamientos comprendidos entre los dominios de los límites en corridas paralelas.
 • `DEFAULT: 0`

EJEMPLO A.1 (sintaxis de la keyword)

```
LGR
--MAXLGR  MAXCLS  MCOARS  MAMALG  MXLALG  LSTACK  Pressure  NCHCOR
--
           2      400      0       1       2 /           Interpolation
```

A.2 AUTOREF: DETERMINACIÓN DE OPCIONES PARA EL AUTOREFINAMIENTO

La opción de refinamiento automático permite a la malla ser refinada como proceso inverso del agrupamiento, con un cambio mínimo en los datos de entrada. Esto es muy útil para el escalamiento automático de arreglos de datos existentes para computaciones paralelas masivas y para el desarrollo de estudios de sensibilidad de refinamientos de mallas. Existen varias advertencias sobre su uso. La opción no debe ser usada para crear LGRs "in place". Es posible agrupar un auto refinamiento así como hacerlo solo en una parte de la malla. Los datos base deben ser corridos en primer instancia sin la opción de autorefinamiento para verificar la ausencia de errores, después de esto cualquier error presente en los archivos de salida tales como GRID, RESTART o FLUX harán referencia a la malla autorefinada.

La data consiste en 4 ítems que especifican los factores a aplicarse en la malla en cada dirección. Los datos deben ser finalizados con un flash (/).

1. factor de refinamiento en la dirección X; Nx debe ser un numero impar.
 - DEFAULT: 1
2. factor de refinamiento en la dirección Y; Ny debe ser un numero impar.
 - DEFAULT: 1
3. factor de refinamiento en la dirección Z; Nz debe ser un numero impar.
 - DEFAULT: 1
4. opción para aplicar multiplicadores de transmisibilidad
 - 0 Ningún multiplicador de transmisibilidad (MULTX) es heredado de las celdas que los contienen (host cells) en la malla base.
 - 1 Los multiplicadores de transmisibilidad sobre la malla base son solo aplicados a la malla autorefinada en los limites de la malla base.

2 Se permiten adicionales multiplicadores de transmisibilidad (SMULTX etc.) los cuales son aplicados solo en los limites de la malla base al igual que en la opción 1 ningún multiplicador es heredado de las celdas huéspedes en la celda base, al igual que en la opción 0 antes señalada.

- DEFAULT: 0

EJEMPLO A.2 (Sintaxis de la keyword)

Refine cada celda dentro de un área de 3x3:

AUTOREF

```
--NRX NRY NRZ Option for MULTX/Y/Z  
  3   3   1   1 /
```

A.3 AUTOCOAR: ESPECIFICACIÓN DE UNA CAJA DE CELDAS PARA UNA MALLA AGRUPADA DENTRO DE UN AUTOREFINAMIENTO.

El agrupamiento de la malla es el complemento del refinamiento local de la misma. Las celdas pueden ser reunidas para reducir el número total de celdas activas en la malla global. Los agrupamientos son especificados en la sección GRID de la data mediante la keyword COARSEN.

La keyword AUTOCOAR es análoga a la keyword COARSEN y puede ser usada en el auto refinamiento de la malla (mediante la keyword AUTOREF especificada en RUNSPEC). Esta keyword tiene dos efectos. Primero que todo puede ser utilizada para agrupar celdas en una malla base, de manera similar a COARSEN, y en segunda instancia evita que ocurra un auto refinamiento en la caja de celdas especificada, en donde las celdas se mantendrán gruesas en el enmallado base.

La diferencia entre los efectos de las keywords COARSEN y AUTOCOAR es que algún conjunto o reunión de celdas agrupadas construidas con COARSEN es auto

refinado dentro de los numero de celdas especificadas en AUTOREF, mientras que las construidas con AUTOCOAR permanecen no refinadas. El efecto de la keyword AUTOCOAR es mantener inalterada las celdas por el proceso del auto refinamiento.

La keyword AUTOCOAR es seguida por cierto numero de datos, cado uno conteniendo 9 ítems terminado mediante un flash (/)

El arreglo de datos debe terminar con un dato en blanco o vació que solo contenga un slash. Cada dato define la caja de celdas para el agrupamiento.

- 1 I1 Coordenada más baja en I
- 2 I2 Coordenada más alta en I
- 3 J1 Coordenada más baja en J
- 4 J2 Coordenada más alta en J
- 5 K1 Coordenada más baja en K
- 6 K2 Coordenada más alta en K
- 7 NY Número de celdas agrupadas a lo largo de la dirección X. Nx debe ser un factor exacto de I2-I1+1
- 8 NY Número de celdas agrupadas a lo largo de la dirección Y. Ny debe ser un factor exacto de J2-J1+1

EJEMPLO A.3 (sintaxis de la keyword)

AUTOCOAR

```
-- I1-I2 J1-J2 K1-K2 NX NY NZ
   1 10  1  4  1  6  5  2  3 /
   1  4  5 10  1  6  2  3  3 /
/
```

EJEMPLO A.4 (sintaxis de la keyword)

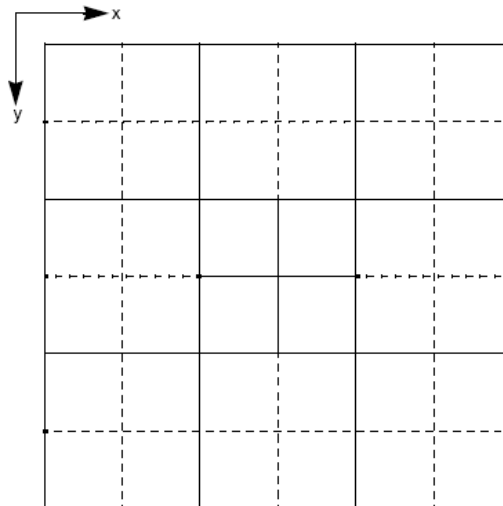
Considerando una malla de 6x6x1

COARSEN

```
-- I1 I2 J1 J2 K1 K2 NX NY NY
   1  6  1  2  1  1  3  1  1 /
   1  2  3  4  1  1  1  1  1 /
   5  6  3  4  1  1  1  1  1 /
   1  6  5  6  1  1  3  1  1 /
/
```

Con las celdas originales demarcadas con líneas punteadas, se representa en la siguiente figura la malla después de aplicarse la keyword.

Figura A.1. Efecto de la keyword COARSEN

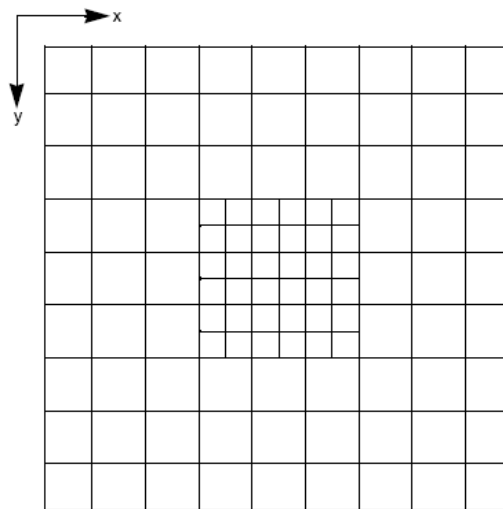


AUTOREF

3 3 1 /

La malla es refinada como se muestra en la figura A.2.

Figura A.2. Efecto de la keyword AUTOREF



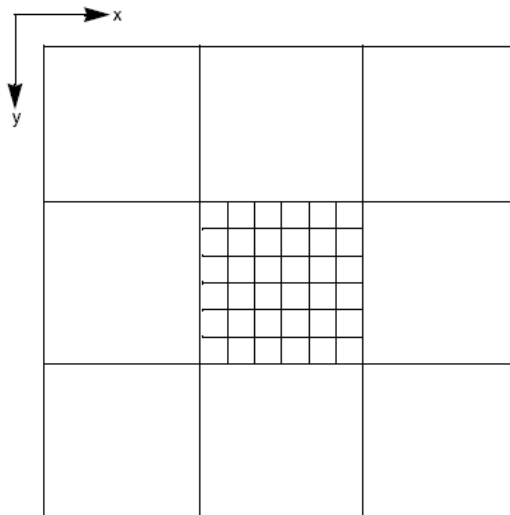
Pero si la keyword COARSEN es reemplazada por AUTOCOAR tal como

AUTOCOAR

```
- I1 I2 J1 J2 K1 K2 NX NY NY /  
  1  6  1  2  1  1  3  1  1 /  
  1  2  3  4  1  1  1  1  1 /  
  5  6  3  4  1  1  1  1  1 /  
  1  6  5  6  1  1  3  1  1 /  
/
```

Entonces las celdas agrupadas no son autorefinadas y la malla resultante será la que se muestra en la figura A.3.

Figura A.3. Efecto de la keyword AUTOCOAR



A.4 LGROFF: CAMBIAR A MODO APAGADO UN REFINAMIENTO LOCAL

LGROFF puede ser usado en cualquier momento durante la corrida de la simulación para desactivar un refinamiento local. Opcionalmente el refinamiento local de malla puede ser cambiado a encendido y apagado automáticamente dependiendo del número de pozos activos que contenga (un pozo se considera activo si se abre o se detiene, pero no si se cierra).

Esta keyword puede contener uno o dos ítems de datos, terminada con un slash(/).

1. nombre del refinamiento local de malla, máximo de 8 caracteres.
 2. número de pozos activos requeridos para mantener abierto el refinamiento.
- Si el arreglo > 0 , el refinamiento es encendido en cualquier momento en el que se alcance el número de pozos establecidos o más y es desactivado en el

momento en el momento que en numero de pozos caiga por debajo del numero establecido.

- DEFAULT: 0, el cual cambia y desactiva el refinamiento.

Si el LGR es parte de un agrupamiento especificado usando la keyword AMALGAM, entonces toda el grupo es desactivado (es decir, todas las mallas locales contenidas en la agrupación son desactivadas).

EJEMPLO A.5 (sintaxis de la keyword)

```
LGROFF  
SOUTH /
```

Desactive el refinamiento SOUTH.

```
LGROFF  
-- NAME      NWELLS  
   NORTH      2      /
```

El refinamiento NORTH es activado en el momento en que haya más de 2 pozos activos y desactivados cuando existan menos de 2.

A.5. LGRON: CAMBIAR A MODO ENCENDIDO UN REFINAMIENTO LOCAL

LGRON puede ser usado en cualquier momento durante la corrida de la simulación para activar un refinamiento local. Opcionalmente el refinamiento local de malla puede ser cambiado a encendido y apagado automáticamente dependiendo del numero de pozos activos que contenga (un pozo se considera activo si se abre o se detiene, pero no si se cierra).

Esta keyword puede contener uno o dos ítems de datos, terminada con un flash (/).

1. nombre del refinamiento local de malla, máximo de 8 caracteres.
2. numero de pozos activos requeridos para mantener abierto el refinamiento.

Si el arreglo > 0, el refinamiento es encendido en cualquier momento en el que se alcance el numero de pozos establecidos o mas y es desactivado en el momento en el momento que en numero de pozos caiga por debajo del numero establecido.

- DEFAULT: 0, el cual cambia y activa el refinamiento.

En el paso de tiempo inmediatamente siguiente a la keyword LGRON, todos los enmallados locales aparecen desactivados por un lapso de tiempo de un día.

Si el LGR es parte de un agrupamiento especificado usando la keyword AMALGAM, entonces toda el grupo es desactivado (es decir, todas las mallas locales contenidas en la agrupación son desactivadas).

EJEMPLO A.6 (sintaxis de la keyword)

```
LGRON  
'SOUTH' /
```

Active el refinamiento SOUTH.

```
LGRON  
-- NAME      NWELLS  
'NORTH'      2      /
```

El refinamiento NORTH es activado en el momento en que haya más de 2 pozos activos y desactivados cuando existan menos de 2.