



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# **Un modelo ejecutable para la simulación multi-física de procesos de recobro mejorado en yacimientos de petróleo basado en esquemas preconceptuales**

**Steven Velásquez Chancí**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión  
Medellín, Colombia



# Un modelo ejecutable para la simulación multi-física de procesos de recobro mejorado en yacimientos de petróleo basado en esquemas preconceptuales

**Steven Velásquez Chancí**

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería de Sistemas**

Director:

Ph.D. Juan Manuel Mejía Cárdenas

Co-Director:

Ph.D. Carlos Mario Zapata Jaramillo

Línea de Investigación:

Nombrar la línea de investigación en la que enmarca la tesis o trabajo de investigación

Grupo de Investigación:

Dinámicas de Flujo y Transporte en medios porosos

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y la Decisión

Medellín, Colombia

2019



(Dedicatoria o un lema)

Su uso es opcional y cada autor podrá determinar la distribución del texto en la página, se sugiere esta presentación. En ella el autor dedica su trabajo en forma especial a personas y/o entidades.

Por ejemplo:

A mis padres

o

La preocupación por el hombre y su destino siempre debe ser el interés primordial de todo esfuerzo técnico. Nunca olvides esto entre tus diagramas y ecuaciones.

Albert Einstein



# Agradecimientos

Agradecimientos eternos eternos eternos a Paola Andrea Noreña Cardona, por su constante fé, apoyo y asesoría durante el desarrollo de esta tesis, sin ella esto no sería posible.

Esta sección es opcional, en ella el autor agradece a las personas o instituciones que colaboraron en la realización de la tesis o trabajo de investigación. Si se incluye esta sección, deben aparecer los nombres completos, los cargos y su aporte al documento.

Finalmente agradezco a la alianza formada por el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación (COLCIENCIAS), la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) y la Universidad Nacional de Colombia por el financiamiento del "Plan Nacional para el Potenciamiento de la Tecnología CEOR con Gas Mejorado Químicamente" bajo el acuerdo 273-2017, dentro del cual se enmarca la investigación asociada a esta tesis de maestría.





## Resumen

El resumen es una presentación abreviada y precisa (la NTC 1486 de 2008 recomienda revisar la norma ISO 214 de 1976). Se debe usar una extensión máxima de 12 renglones. Se recomienda que este resumen sea analítico, es decir, que sea completo, con información cuantitativa y cualitativa, generalmente incluyendo los siguientes aspectos: objetivos, diseño, lugar y circunstancias, pacientes (u objetivo del estudio), intervención, mediciones y principales resultados, y conclusiones. Al final del resumen se deben usar palabras claves tomadas del texto (mínimo 3 y máximo 7 palabras), las cuales permiten la recuperación de la información.

**Palabras clave: (máximo 10 palabras, preferiblemente seleccionadas de las listas internacionales que permitan el indizado cruzado).**

A continuación se presentan algunos ejemplos de tesauros que se pueden consultar para asignar las palabras clave, según el área temática:

**Artes:** AAT: Art y Architecture Thesaurus.

**Ciencias agropecuarias:** 1) Agrovoc: Multilingual Agricultural Thesaurus - F.A.O. y 2) GEMET: General Multilingual Environmental Thesaurus.

**Ciencias sociales y humanas:** 1) Tesauro de la UNESCO y 2) Population Multilingual Thesaurus.

**Ciencia y tecnología:** 1) Astronomy Thesaurus Index. 2) Life Sciences Thesaurus, 3) Subject Vocabulary, Chemical Abstracts Service y 4) InterWATER: Tesauro de IRC - Centro Internacional de Agua Potable y Saneamiento.

**Tecnologías y ciencias médicas:** 1) MeSH: Medical Subject Headings (National Library of Medicine's USA) y 2) DECS: Descriptores en ciencias de la Salud (Biblioteca Regional de Medicina BIREME-OPS).

**Multidisciplinarias:** 1) LEMB - Listas de Encabezamientos de Materia y 2) LCSH- Library of Congress Subject Headings.

También se pueden encontrar listas de temas y palabras claves, consultando las distintas bases de datos disponibles a través del Portal del Sistema Nacional de Bibliotecas<sup>1</sup>, en la sección Recursos bibliográficos. opción "Bases de datos".

## Abstract

Es el mismo resumen pero traducido al inglés. Se debe usar una extensión máxima de 12 renglones. Al final del Abstract se deben traducir las anteriores palabras claves tomadas del

---

<sup>1</sup>ver: [www.sinab.unal.edu.co](http://www.sinab.unal.edu.co)

texto (mínimo 3 y máximo 7 palabras), llamadas keywords. Es posible incluir el resumen en otro idioma diferente al español o al inglés, si se considera como importante dentro del tema tratado en la investigación, por ejemplo: un trabajo dedicado a problemas lingüísticos del mandarín seguramente estaría mejor con un resumen en mandarín.

**Keywords: palabras clave en inglés(máximo 10 palabras, preferiblemente seleccionadas de las listas internacionales que permitan el indizado cruzado)**

# Lista de Figuras

4-1.	Representación en EP de la simulación de procesos EOR . . . . .	12
4-2.	Definición de la malla . . . . .	13
4-3.	Caracterización de la Roca. . . . .	14
4-4.	Caracterización del fluido. . . . .	15
4-5.	Adición de Relaciones de equilibrio. . . . .	16
4-6.	Adición de Interacción entre fluidos. . . . .	17
4-7.	Perforación de Pozos. . . . .	18



## **Lista de Tablas**

# 1. Introducción

Oil reservoir simulation has proven an useful tool for predicting reserves and production along the years. A large quantity of studies have demonstrated the capacity of oil reservoir simulation for predicting the production of multiple reservoirs around the world. The simulation of such a problem consists of solving a coupled set of mass balance equations across a domain (reservoir, geometry - geological model). Therefore, the creation of oil reservoir simulators is in the scientific software research area (Rewrite).

Oil reservoir simulation consists of solving a set of coupled mass or moles balance equations, these equations are non-linear and need adequate treatment in order to have a linear system that converges.

Since the natural production is no longer maintainable, techniques of enhanced oil recovery (EOR) have been developed in order to maintain or even improve the recovery factor. These techniques involve the injection of chemicals that affect the rock and fluids properties making feasible to change the oil mobility and residual saturations... The EOR processes add new equations to the system that make the problem even bigger. Many authors have addressed this problem by making general flow simulation frameworks. Those frameworks implement the general workflow of solving the coupled set of equations generated by the phenomena in the reservoir.

Some efforts have been done in the scientific software representation. Noreña et al. extend the preconceptual schema syntax defined by Zapata, 2007. for taking into account the elements needed in the scientific software context. Chaverra, 2011 includes cycles and conditional selection in the preconceptual schema. Calle, 2017 defines design patterns in the context of scientific software using preconceptual schemas also extending its syntax.

The existing frameworks vary in implementation, even though they apply the same techniques. This is due to the fact that design decisions are delegated to the programmer, which is an expert of flow in porous media simulation. Little effort has been done in representing the domain of reservoir simulation as is, including both dynamics and structure in the same representation. The existing studies in oil reservoir simulation domain representation lack of grouping the structural design with the dynamical behaviour. Others implement directly a solution of the set of differential equations for the specific study case. The problem knowledge is not shareable. The representations existing only account for the structural or, exclusively the dynamical behavior of the tool they developed. The use of the concepts lacks generality. Even though the formal definition of the differential equations, they lack information of constitutive equations.

In this thesis we propose an event based representation of the enhanced oil recovery simulation using preconceptual schemas. In order to do that, For this purpose. we describe the black oil simulation domain in the preconceptual schema syntax, later we define a generic component with both variable kinetical behavior and the capacity to change the flow properties in each phase. The developed model couples the models used for an enhanced oil recovery process in a preconceptual schema that represents adequately the oil reservoir simulation domain, the representation is validated with the SPE Comparative solution project having accordance with the reported results.

## 2. Marco teórico

### 2.1. Procesos de Recobro Mejorado

### 2.2. Simulación Multifísica

#### 2.2.1. Modelo Black Oil Extendido

El Black Oil es un modelo de transporte simultáneo de tres fluidos en el que se asume que los hidrocarburos están distribuidos en un gas y un aceite en barril a condiciones de presión y temperatura estándar [Chen 2007]. Este modelo considera que puede haber una transferencia de masa en equilibrio desde aceite al gas, lo que se denomina “Gas disuelto”. Adicionalmente, el modelo Black Oil extendido, considera una transferencia de masa desde el gas al aceite, lo que se denomina “aceite volatilizado”.

$$\text{aceite: } \frac{\partial}{\partial t} \left[ \phi \left( \frac{S_o}{B_o} + \frac{R_v S_g}{B_g} \right) \right] + \nabla \cdot \left( \frac{1}{B_o} \vec{v}_o + \frac{R_v}{B_g} \vec{v}_g \right) + Q_o = 0 \quad (2-1)$$

$$\text{gas: } \frac{\partial}{\partial t} \left[ \phi \left( \frac{S_g}{B_g} + \frac{R_s S_o}{B_o} \right) \right] + \nabla \cdot \left( \frac{1}{B_g} \vec{v}_g + \frac{R_s}{B_o} \vec{v}_o \right) + Q_g = 0 \quad (2-2)$$

$$\text{agua: } \frac{\partial}{\partial t} \left[ \phi \left( \frac{S_w}{B_w} \right) \right] + \nabla \cdot \left( \frac{1}{B_w} \vec{v}_w \right) + Q_w = 0 \quad (2-3)$$

donde  $\vec{v}_p$  corresponde la ley de Darcy para el fluido  $p = \{o : \text{aceite}, g : \text{gas}, w : \text{agua}\}$ :

$$\vec{v}_p = \frac{K_f k r_p}{\mu_p} \nabla \Phi_{p,f} \quad (2-4)$$



**2.2.2. Problema de Valores Iniciales**

**2.2.3. Modelamiento de Pozos**

**2.2.4. Modelamiento del Químico**

**2.2.5. Discretización**

**2.2.6. Método de Newton-Raphson**

**2.3. Esquemas Preconceptuales**

**2.3.1. Elementos Principales**

**2.3.2. Representación Basada en Eventos**

### **3. Antecedentes**

## 4. Propuesta de solución

En esta sección se propone una extensión para los EP que apoya el desarrollo de la representación del dominio de la simulación de procesos EOR. Adicionalmente, se conceptualizan los términos derivados de las ecuaciones presentadas en el marco teórico, a partir de los cuales se generan las relaciones estructurales. Posteriormente, se muestra el EP completo de la simulación y se explican por secciones los conceptos principales o clases y los eventos que ejecutan la simulación.

Esta sección se estructura así: en la sección 4.1 se presenta el elemento adicional para los EP que permite reutilizar una representación en múltiples secciones del EP y la regla para la obtención de código a partir del nuevo elemento. En la sección 4.2 se revisan los términos de cada ecuación y su traducción a los conceptos presentes en el EP. En la sección 4.3 se muestra el EP completo y se explican las relaciones dinámicas y eventuales por cada concepto principal.

### 4.1. Extensión al Esquema Preconceptual

#### 4.1.1. Subrutinas definidas por el analista

Las subrutinas definidas por el analista son funciones definidas tal como Calle (2016) propuso, pero carecen de un concepto retorno “return”. Estas utilizan elementos globales y también pueden recibir parámetros adicionales, su representación gráfica es igual a la de una función, pero en su uso no hay una asignación. En la figura ?? se presenta la representación gráfica y su traducción a código.

### 4.2. Conceptualización

En esta sección se traducen las ecuaciones algebraicas, resultantes de la discretización del modelo Black-Oil extendido y las ecuaciones constitutivas usando el método de los volúmenes finitos, a los conceptos principales y su respectiva categoría.

#### 4.2.1. Malla

Al resolver el dominio espacial continuo como un conjunto discreto de celdas (discretizar el espacio), aparecen propiedades tales como los volúmenes de las celdas y el área de las caras.

Este conjunto discreto de celdas es el que denominamos como “malla”. A su vez, la celda es vista como un conjunto discreto de caras que generan una superficie cerrada<sup>1</sup>. Cada celda cuenta con una numeración, esta sirve para identificar posiciones en el espacio y ubicar las vecindades correspondientes para el cálculo del flujo discretizado.

Luego:

#### **4.2.2. Roca**

#### **4.2.3. Fluido**

#### **4.2.4. Interacción Interfluido**

#### **4.2.5. Relación de Equilibrio**

#### **4.2.6. Pozo**

### **4.3. Representación en EP de la simulación de procesos EOR**

En esta sección proponemos una representación basada en un EP para procesos EOR de inyección de múltiples químicos. En el esquema **4-1** se evidencia la solución del modelo Black Oil discretizado usando volúmenes finitos en una malla cartesiana ortogonal. En el evento “Presión del fluido varía” se desarrollan las iteraciones del método de Newton-Raphson e internamente las iteraciones sobre las celdas requeridas para solucionar el sistema algebraico resultante de la discretización. En las secciones siguientes se explica el esquema preconceptual elaborado en las respectivas porciones correspondientes a los conceptos principales en la simulación de procesos EOR.

#### **4.3.1. Estructura**

##### **Malla**

De la conceptualización de los elementos relacionados con la discretización, se encontró que existe una malla la cuál contiene todas las propiedades necesarias para generar el conjunto de celdas. Además, existe un actor “Geomodelador” que se encarga de definir el número de celdas en cada eje, sus espesores y topes tal como se presenta en **4-2**.

Una vez definidas tales propiedades, la malla aparece en un proceso iterativo de creación de la cantidad de celdas definidas y el respectivo cálculo de volúmenes, profundidades y numeración. Posteriormente, las caras se crean en otro proceso iterativo, estas contienen

---

<sup>1</sup>En el caso tridimensional

la información sobre las vecindades de cada celda, donde cada celda tiene un conjunto de caras<sup>2</sup>.

## Roca

La especificación de la relación dinámica “Petrofísico caracteriza roca” consiste de insertar las condiciones iniciales de porosidad y permeabilidad absoluta para la roca asociada al yacimiento, es posible notar que estos atributos de la roca están representados como arreglos por la cantidad de términos, derivados de los pasos de tiempo (estos se verán más adelante), y la cantidad de celdas definidas en la malla.

Adicionalmente, el petrofísico define la compresibilidad de poro y la presión a la que esta se mide para el cálculo de la porosidad a los términos posteriores. El modelo considera la existencia de una única roca a la cual todas las propiedades por cada una de las celdas son asignadas. La caracterización de la roca se presenta en **4-3**.

## Fluido

Los fluidos tienen propiedades que son funciones de su presión y saturación, estas a su vez son función del tiempo y del espacio. Por lo que todas las propiedades que se proponen en la conceptualización se representan como arreglos dependientes de la cantidad de términos y de la cantidad de celdas. La representación del fluido, su relación dinámica “Ingeniero de fluidos caracteriza Fluido” y su respectiva especificación se presentan en la figura **4-4**.

En pos de la generalidad, definimos la viscosidad del fluido y su factor volumétrico como funciones directas de la presión. Con este fin, aparece el concepto de propiedad medida, el cuál tiene una medida de referencia y un valor medido a esa referencia. Ambos son arreglos de la cantidad de medidas. En la figura **4-4** también es posible ver que el fluido tiene una viscosidad medida y un factor volumétrico medido. Esto nos permite calcular de manera general estas propiedades del agua, gas y el aceite como una interpolación en el conjunto de medidas a una presión arbitraria. La viscosidad medida y el factor volumétrico medido los inserta el Ingeniero de fluidos al caracterizar el fluido.

Es importante notar también que el fluido tiene un tipo y un atributo de tipo lógico “Principal”. El tipo del fluido nos permite explicitar que este es Petróleo, Gas o Agua, pero el atributo de principalidad indica que es el fluido para el cuál la incógnita a resolver será la presión, en los demás la incógnita será la saturación.

---

<sup>2</sup>Es posible notar que la cara existente entre dos celdas vecinas se crea dos veces, una por cada celda.

## Relación de Equilibrio

Las ecuaciones del Black Oil relacionan la posible existencia de masa de gas en el aceite ( $R_s$  o gas disuelto), y, en el caso del Black Oil extendido, la de aceite en el gas ( $R_v$  o aceite volatilizado). En el concepto “Relación de equilibrio”, se generaliza la existencia de masa de un fluido dentro de otro fluido como un coeficiente de partición, tal como se vio en la conceptualización (ver 4.2). Se asume, también, que existe un fluido que aporta masa y otro que la recibe, tal como se ve en 4-5. El coeficiente de partición cumple las mismas condiciones de la viscosidad del fluido y a su vez, tiene un coeficiente de partición medido.

## Interacción entre fluidos

Las interacciones entre fluidos se proponen como una generalización de las relaciones binarias existentes. En ellas se especifican, un contacto entre dos fluidos. En el caso del modelo Black Oil, se deben especificar dos: los contactos gas-aceite y aceite-agua. En este concepto se relacionan directamente las dependencias de la permeabilidad relativa del fluido principal con su respectivo fluido de referencia en el contacto. Además, para el fluido cuya incógnita es la saturación, se relaciona la presión del fluido principal con su respectiva presión capilar, con el fin de calcular la presión faltante. Para esto, es necesario saber de antemano cuál fluido es el mojante y cuál es el no mojante. Adicionalmente, todas las propiedades dependientes son calculadas a la saturación del fluido de referencia. En la figura 4-6 se presenta la representación propuesta para las interacciones entre fluidos.

## Pozo

Se proponen los pozos, de manera análoga a la malla, como un conjunto de perforados que a su vez tienen atributos adicionales como lo son la presión de fondo y el caudal. Estos pozos, tienen una caracterización distinta según el tipo, sea productor o inyector. Además, es posible notar que el pozo es un concepto abstracto, de cuál se instancia uno de los dos tipos definidos. Más aún, los perforados dependerán del tipo de pozo, siendo estos también abstractos, con sus respectivos tipos “perforado inyector” o “perforado productor”. En la figura 4-7 se presenta la representación de los pozos.

La principal diferencia entre los pozos productores e inyectores radica en que el pozo inyector tiene un fluido de inyección. Además, la tasa y el acumulado del pozo inyector sólo dependen de este fluido, mientras que para el pozo productor dependerá de la cantidad de fluidos caracterizados. Estos pozos están sujetos a la restricción de no cambiar su tipo, además para un pozo productor, su conjunto de perforados corresponderá también a perforados productores. Así mismo para los pozos inyectores.

Los pozos funcionan bajo una condición operativa, que permite regular la presión o el caudal

al que estos inyectan o producen fluido. Estas condiciones definen si un pozo genera una ecuación (Peaceman) o si su caudal se puede resolver directamente usando la presión de fondo. Por otro lado, las condiciones operativas pueden variar en el tiempo, por lo que se requiere calcular o resolver el atributo que no está sujeto a la condición operativa cada que se establezca un cambio en esta.

### **Ecuación**

La ecuación es un concepto agrupador, tanto el fluido como el pozo son ecuaciones (Posteriormente los químicos). Sirve para iterar sobre todos los conceptos que generan un residual en el método de Newton. Tienen un índice y estado. Este último permite que todos los pozos generen ecuación pero no necesariamente se resuelva en el jacobiano. Sólo se resuelven las ecuaciones cuyo estado sea “activo”. (Se verá más adelante).

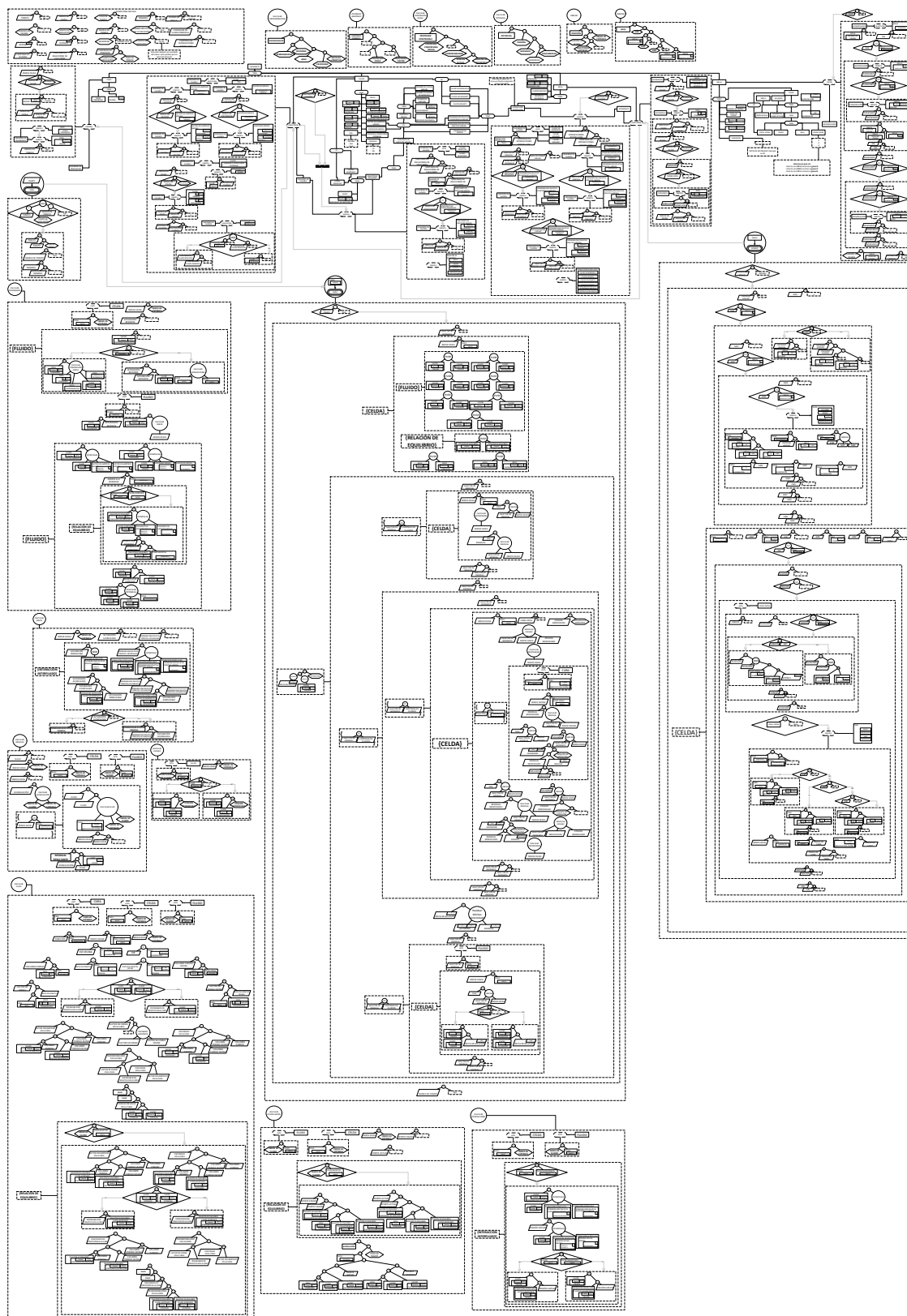


Figura 4-1.: Representación en EP de la simulación de procesos EOR



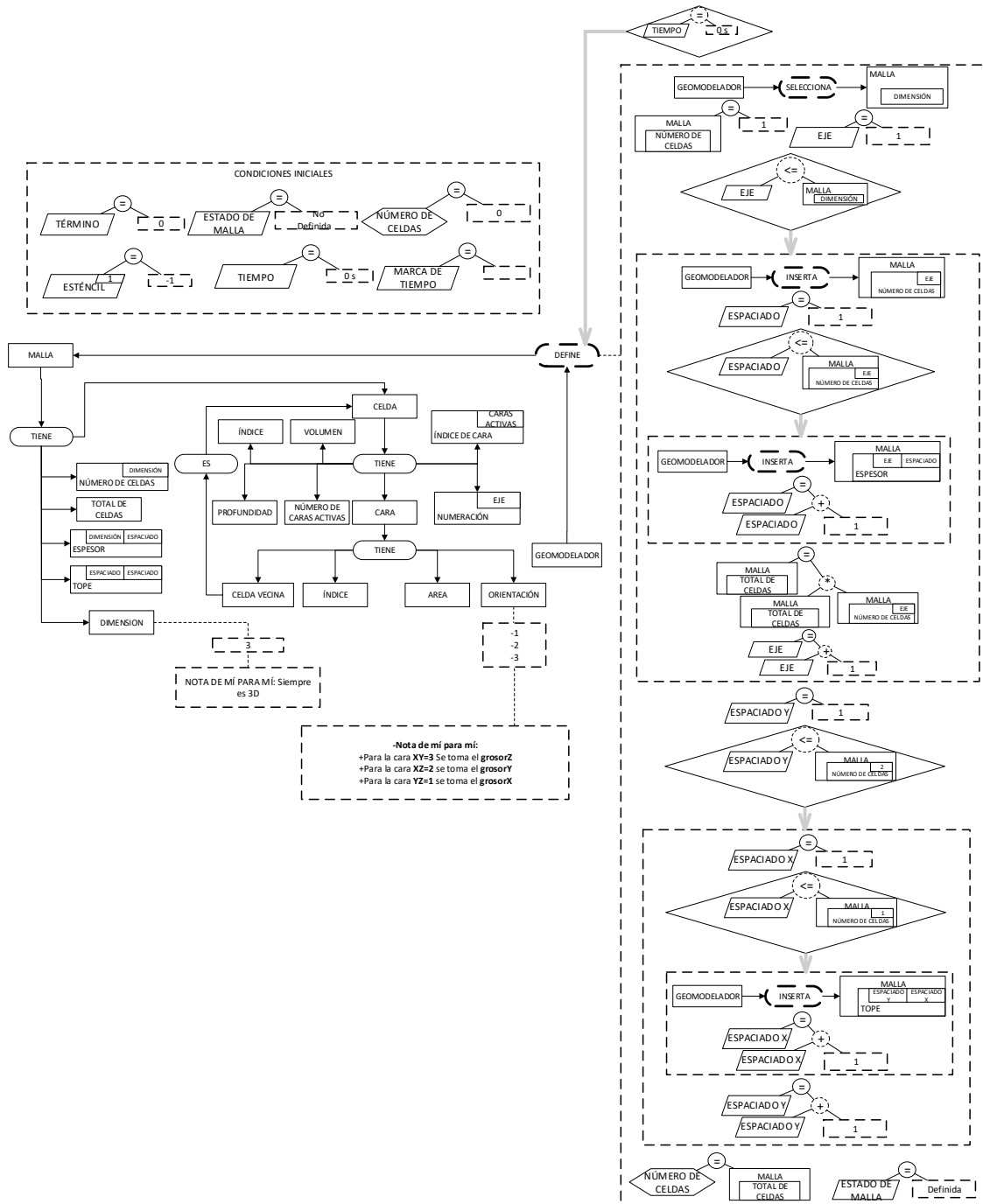


Figura 4-2.: Definición de la malla





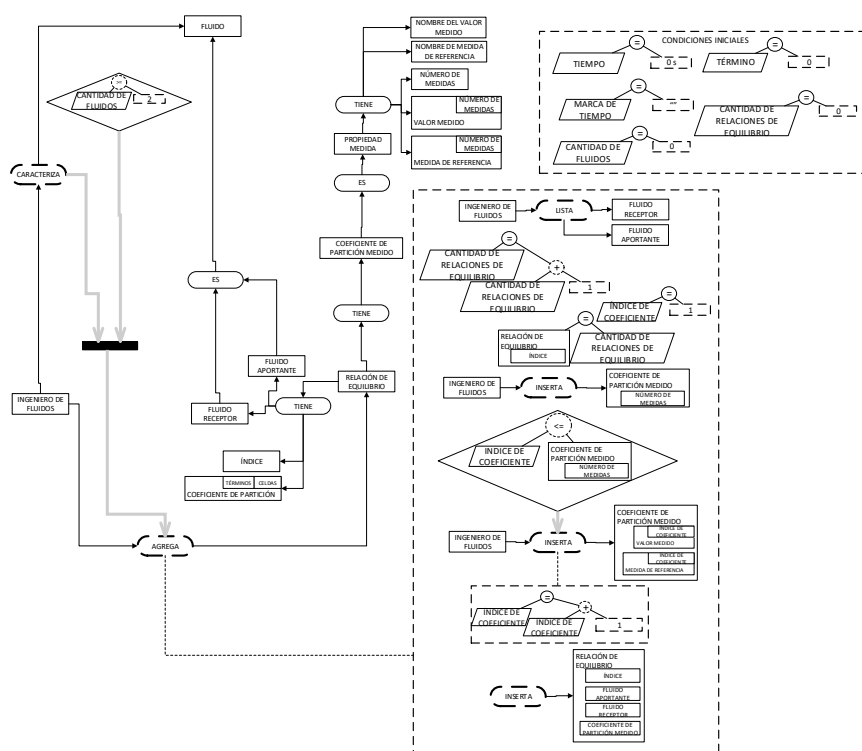


Figura 4-5.: Adición de Relaciones de equilibrio.





## 5. Validation

Se deben incluir tantos capítulos como se requieran; sin embargo, se recomienda que la tesis o trabajo de investigación tenga un mínimo 3 capítulos y máximo de 6 capítulos (incluyendo las conclusiones).

## **6. Conclusiones y recomendaciones**

### **6.1. Conclusiones**

Las conclusiones constituyen un capítulo independiente y presentan, en forma lógica, los resultados de la tesis o trabajo de investigación. Las conclusiones deben ser la respuesta a los objetivos o propósitos planteados. Se deben titular con la palabra conclusiones en el mismo formato de los títulos de los capítulos anteriores (Títulos primer nivel), precedida por el numeral correspondiente (según la presente plantilla).

### **6.2. Recomendaciones**

Se presentan como una serie de aspectos que se podrían realizar en un futuro para emprender investigaciones similares o fortalecer la investigación realizada. Deben contemplar las perspectivas de la investigación, las cuales son sugerencias, proyecciones o alternativas que se presentan para modificar, cambiar o incidir sobre una situación específica o una problemática encontrada. Pueden presentarse como un texto con características argumentativas, resultado de una reflexión acerca de la tesis o trabajo de investigación.



## **A. Anexo: Nombrar el anexo A de acuerdo con su contenido**

Los Anexos son documentos o elementos que complementan el cuerpo de la tesis o trabajo de investigación y que se relacionan, directa o indirectamente, con la investigación, tales como acetatos, cd, normas, etc.

## **B. Anexo: Nombrar el anexo B de acuerdo con su contenido**

A final del documento es opcional incluir índices o glosarios. Éstos son listas detalladas y especializadas de los términos, nombres, autores, temas, etc., que aparecen en el mismo. Sirven para facilitar su localización en el texto. Los índices pueden ser alfabéticos, cronológicos, numéricos, analíticos, entre otros. Luego de cada palabra, término, etc., se pone coma y el número de la página donde aparece esta información.

## C. Anexo: Nombrar el anexo C de acuerdo con su contenido

MANEJO DE LA BIBLIOGRAFÍA: la bibliografía es la relación de las fuentes documentales consultadas por el investigador para sustentar sus trabajos. Su inclusión es obligatoria en todo trabajo de investigación. Cada referencia bibliográfica se inicia contra el margen izquierdo.

La NTC 5613 establece los requisitos para la presentación de referencias bibliográficas citas y notas de pie de página. Sin embargo, se tiene la libertad de usar cualquier norma bibliográfica de acuerdo con lo acostumbrado por cada disciplina del conocimiento. En esta medida es necesario que la norma seleccionada se aplique con rigurosidad.

Es necesario tener en cuenta que la norma ISO 690:1987 (en España, UNE 50-104-94) es el marco internacional que da las pautas mínimas para las citas bibliográficas de documentos impresos y publicados. A continuación se lista algunas instituciones que brindan parámetros para el manejo de las referencias bibliográficas:

Institución	Disciplina de aplicación
Modern Language Association (MLA)	Literatura, artes y humanidades
American Psychological Association (APA)	Ambito de la salud (psicología, medicina) y en general en todas las ciencias sociales
Universidad de Chicago/Turabian	Periodismo, historia y humanidades.
AMA (Asociación Médica de los Estados Unidos)	Ambito de la salud (psicología, medicina)
Vancouver	Todas las disciplinas
Council of Science Editors (CSE)	En la actualidad abarca diversas ciencias
National Library of Medicine (NLM) (Biblioteca Nacional de Medicina)	En el ámbito médico y, por extensión, en ciencias.
Harvard System of Referencing Guide	Todas las disciplinas
JabRef y KBibTeX	Todas las disciplinas

Para incluir las referencias dentro del texto y realizar lista de la bibliografía en la respectiva sección, puede utilizar las herramientas que Latex suministra o, revisar el instructivo desa-

rrollado por el Sistema de Bibliotecas de la Universidad Nacional de Colombia<sup>1</sup>, disponible en la sección "Servicios", opción "Trámites" enlace ".Entrega de tesis".

---

<sup>1</sup>Ver: [www.sinab.unal.edu.co](http://www.sinab.unal.edu.co)

# Bibliografía

- J. Calle. Identificación de patrones de diseño para software científico a partir de esquemas preconceptuales. Master's thesis, Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, Noviembre 2016. URL <http://bdigital.unal.edu.co/56381/>. Línea de Investigación: Ingeniería de software.
- Z. Chen. *Reservoir simulation: mathematical techniques in oil recovery*, volume 77. Siam, 2007.