

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO DE CRUDO EN LÍNEAS DE
PRODUCCIÓN DE UN CAMPO COLOMBIANO.

EDUARDO ALFREDO GÓMEZ CEPEDA.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS.
BUCARAMANGA.

2016

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE FLUJO DE CRUDO EN LÍNEAS DE
PRODUCCIÓN DE UN CAMPO COLOMBIANO.

EDUARDO ALFREDO GÓMEZ CEPEDA.

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO DE
PÉTROLEOS.

DIRECTOR
GERMÁN GONZALES SILVA, PhD.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS.
BUCARAMANGA.

2016

Dedicatoria.

A mis padres, Milton y Margarita, quienes han entregado su vida a la felicidad de sus hijos.

A Dios por permitirme la vida.

“Dos cosas llenan el ánimo de admiración y respeto, siempre nuevas y crecientes, cuanto con más frecuencia y aplicación se ocupa de ellas la reflexión: el cielo estrellado sobre mí y la ley moral en mí.”

Immanuel Kant

Agradecimientos

Quiero dar las gracias a aquellos que aportaron a la realización de este proyecto

German Gonzales, director de proyecto.

Esteban Rincón, gran apoyo técnico y moral.

Rousseau y su estado natural.

Milton, Margarita y María José, a ellos todo mi amor.

Álvaro Ramírez, toda mi admiración y respeto

Nicolás Santos, por nunca despreciar lo que un servidor tuviera para proponer.

Hernán Porras, gran líder.

Profesores Fernando Calvete y Erik Montes, más que maestros, amigos.

TABLA DE CONTENIDO.

Tabla de contenido.	7
Introducción.	11
1. Generalidades.	12
1.1 Dinámica computacional de fluidos.	12
1.2 Aplicación de CFD para flujos en tuberías.	14
1.2 Campo escuela colorado.	15
2. Modelos matemáticos en dinámica de fluidos.	17
2.1 Ecuaciones de conservación.	17
2.2 Flujo viscoso incompresible.	20
2.3 Flujo viscoso compresible.	21
2.4 Turbulencia.	22
3. Discretización en CFD.	29
3.1 Tipos de mallas.	29
3.2 Método de los volúmenes finitos.	31
4. Metodología CFD.	34
5. Desarrollo de la simulación.	38
5.1 Adquisición y cálculo de datos.	38
5.1.1 Condiciones de operación.	39
5.1.2 Propiedades de los fluidos de yacimiento.	41
5.2 Generación de Geometría.	44
5.3 Creación del enmallado.	45
5.4 Establecimiento de las condiciones de frontera.	47
6. Simulación con software especializado.	50
6.1 Metodología de simulación.	50
6.2 Modelo de simulación.	51
6.3 Rendimiento del modelo de simulación.	53
7. Análisis de Resultados.	56

7.1 Resultados con 0 ensuciamiento.....	56
7.2 Resultados 10% de ensuciamiento.....	59
8. Conclusiones.	62
8. Recomendaciones.	63
9. Bibliografía.....	64

RESUMEN

TITULO: SIMULACIÓN NÚMERICA DE FLUJO DE CRUDO EN LINEAS DE PRODUCCIÓN DE UN CAMPO COLOMBIANO. *

AUTOR: EDUARDO ALFREDO GÓMEZ CEPEDA **

PALABRAS CLAVES: DINÁMICA, COMPUTACIONAL, LINEAS, PRODUCCIÓN, COLORADO, PRESIÓN, VELOCIDAD, FLUIDOS.

Para realizar la simulación numérica, inicialmente se revisan de forma general las ecuaciones de conservación que rigen el flujo de fluidos. Se enuncian los principios de conservación y luego se formulan las ecuaciones de la forma más general posible, con fin de recopilar información que puede ser importante para el desarrollo del proyecto. Esta información es recogida con datos de campo y calculada usando correlaciones típicas usadas con fluidos hidrocarburos. Se realiza una pequeña revisión bibliográfica sobre la dinámica computacional de fluidos, sus usos y fundamentos. Se establece la metodología a seguir para el desarrollo de la simulación, esta metodología es típica en el uso de CFD. Consta de construir la geometría, en este caso 3d, donde se va a realizar la simulación, discretizar espacialmente la geometría (Creación del enmallado), establecimiento de los parámetros de simulación, y análisis de resultados. En este trabajo la simulación es realizada con una licencia académica de ANSYS cfx para la línea de superficie, adicionalmente se simula el comportamiento en el subsuelo por medio de un software especializado. Así se comparan los perfiles de presión y se comparan las presiones en cabeza de pozo, se analizan las gráficas de velocidad contra distancia de las fases fluyentes (crudo y gas) y se hacen recomendaciones para el desarrollo de futuras simulaciones.

*Trabajo de grado

** Facultad de ingeniería de ingenierías físico químicas. Escuela de ingeniería de pertoleos. Director Germán Gonzalez Silva

ABSTRACT

TITLE: NUMERICAL SIMULATION OIL FLOW IN PIPELINES IN A COLOMBIAN FIELD.

AUTHOR: EDUARDO ALFREDO GÓMEZ CEPEDA **

KEYWORDS: DYNAMICS, COMPUTACIONAL, PIPELINES, PRODUCTION, COLORADO, PRESSURE, VELOCITY, FLUIDS.

To perform numerical simulation, initially they reviewed generally conservation equations governing fluid flow. conservation principles set out and then the equations of the most general possible way, to collect information that may be important for the project are made. This information is collected with field data and calculated using typical correlations used with fluid hydrocarbons. a small literature review on computational fluid dynamics, its uses and foundations is made. the methodology for the development of simulation is set, this methodology is typical in the use of CFD. It consists of building geometry, in this case 3d, where he will perform the simulation, spatially discretized geometry (Creation of enmallado), setting the simulation parameters, and results analysis. In this paper the simulation is performed with an academic license for ANSYS CFX surface line additionally underground behavior is simulated by using a dedicated software. And pressure profiles are compared and pressures are compared wellhead, graphics speed distance are analyzed against the flowing phases (oil and gas) and recommendations for the development of future simulations are made.

*Trabajo de grado

** Facultad de ingeniería de ingenierías físico químicas. Escuela de ingeniería de pertoleos. Director Germán Gonzalez Silva

INTRODUCCIÓN.

CFD es una rama de la ingeniería que utiliza métodos numéricos para modelar y simular problemas que involucran fluidos, mediante la solución de las ecuaciones de conservación de cantidad de movimiento, transferencia de calor y masa, y demás relaciones físico-químicas. CFD es útil para describir el comportamiento de fluidos en líneas de producción obteniendo, por ejemplo, los perfiles de velocidad, presión, composición, etc., además permite predecir las propiedades del fluido con detalle en todo el volumen de control, visualizar el proceso en tiempo real teniendo en cuenta las variables establecidas y de esta manera diseñar o establecer soluciones rápidas a distintos problemas evitando costos experimentales.

Para el caso de ingeniería de producción, podría ofrecer herramientas para el diseño de diferentes facilidades en comparación con otras metodologías como el análisis nodal. En este trabajo se busca modelar y simular el flujo de crudo en una línea de producción.

La dinámica computacional puede llegar a ser una herramienta muy útil para el diseño de sistemas de producción en superficie, este proyecto busca dar un paso en este sentido, simulando el flujo de aceite a través de líneas de producción. Permite estudiar las variaciones de flujo sin necesidad de realizar cambios en la tubería y demás partes del sistema.

En este trabajo, inicialmente se revisan de forma general las ecuaciones de conservación que rigen el flujo de fluidos. Se enuncian los principios de conservación y luego se formulan las ecuaciones de la forma más general posible, con fin de recopilar información que puede ser importante para el desarrollo del proyecto. Se realiza una pequeña revisión bibliográfica sobre la dinámica computacional de fluidos, sus usos y fundamentos. Se establece la metodología a seguir para el desarrollo de la simulación, se muestran los resultados y se analizan.

1. GENERALIDADES.

1.1 DINÁMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDOS.

En la actualidad la dinámica computacional es usada en diversas ramas de la ingeniería, por ejemplo, en la ingeniería mecánica es usada para el diseño de automóviles intercambiadores de calor y demás dispositivos, en la ingeniería química es útil para la simulación de procesos químicos como el mezclado y la separación, en la ingeniería biomédica es usado en el flujo a través de arterias y venas.

Las ecuaciones que rigen el flujo de fluidos son de tipo integro-diferencial y solo para casos especiales se pueden resolver de forma analítica. En este orden de ideas, para obtener soluciones aproximadas se deben usar métodos numéricos para discretizar las ecuaciones diferenciales y obtener sistemas de ecuaciones algebraicas que pueden ser solucionado por un ordenador. La dinámica computacional de fluidos o CFD es el análisis de sistemas que involucran flujo de fluidos, transferencia de calor y fenómenos asociados como reacciones químicas, por medio de simulación computacional.

En la ilustración 1.1 se muestra un separador geotérmico de vapor-agua el cual es usado en procesos de generación de energía geotérmica. Su función es separar las fases vapor y agua, para reinyectar el agua a un pozo geotérmico. En la ilustración se simula la separación y se compara respecto a tres diseños diferentes del separador.

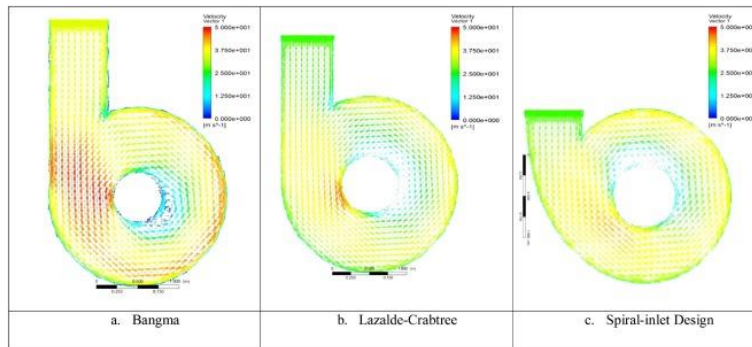


Ilustración 1.1. Separador geotérmico de vapor-agua. *Geothermics, Volume 53, January 2015*, Sadiq J. Zarrouk, Munggang H. Purnanto.

Todos los códigos CFD tienen una metodología que consta en 3 partes importantes: pre-procesador, solucionador, post-procesador.

Pre-procesador: En esta etapa se genera la geometría a partir de una herramienta CAD y se discretiza la misma. Luego se ingresan todos los datos que describen el problema, en este orden de idea primero se define la geometría de la región de interés, luego se discretiza en volumen de control, se define el fenómeno físico o químico que se necesita modelar, se ingresan las propiedades del fluido y finalmente se establecen las condiciones de frontera.

Solución numérica: Los métodos numéricos que básicamente forman el solucionador siguen los siguientes pasos:

- Aproximación de variables desconocidas por medio de funciones simples.
- Discretización.
- Solución de ecuaciones algebraicas.

Post-Procesador: Se obtienen perfiles de velocidad, presión temperatura, etc. Se puede también realizar un rastreo de las partículas fluidas teniendo en cuenta variables como presión, velocidad, concentración, temperatura, parámetros cinéticos, de turbulencia etc. obteniendo visualización de los mismos en todo el volumen de control en 2D y 3D, entre otras herramientas que nos permiten estudiar fácilmente los fenómenos que ocurren en el flujo de fluidos.

1.2 APLICACIÓN DE CFD PARA FLUJOS EN TUBERÍAS.

El transporte por tuberías segura y económicamente eficiente de dióxido de carbono es un tema crítico en el campo en desarrollo de la captura y la tecnología de almacenamiento. La presencia de estructuras de gran y pequeña escala y altos números de Reynolds en la tubería, llaman la atención sobre la simulación numérica del transporte de materiales. Este estudio del flujo turbulento e incompresible se ha realizado por OpenFoam, una herramienta de código abierto CFD. (Shairpor, 2013)

Flujo de la tubería a presión se produce a nivel urbano y sistemas de riego industriales, en los que fluido es típicamente agua, aunque también podría ser de aguas residuales o aceite. Este documento se centra sólo en los flujos de agua en conductos circulares (es decir, tubos); otros tipos de secciones transversales no se consideran en este documento. El flujo de fluido en estado estacionario en tuberías presurizadas es bien conocido, al no ser necesario el uso de técnicas computacionales avanzadas para describirla. (Martins, 2014).

Estos trabajos son un ejemplo de uso de cfd en el estudio de diferentes materiales en tuberías. En este caso estudiaremos el flujo estable de crudo y gas, aunque el

flujo estable es ampliamente estudiado, normalmente este estudio es por medio de correlaciones empíricas no de la solución de las ecuaciones constitutivas de flujo.

El CFD es aplicado en la industria del petróleo generalmente con fines académicos. Por ejemplo Mohammadzhed (2015) realizó un estudio de la viscosidad de los fluidos de perforación.

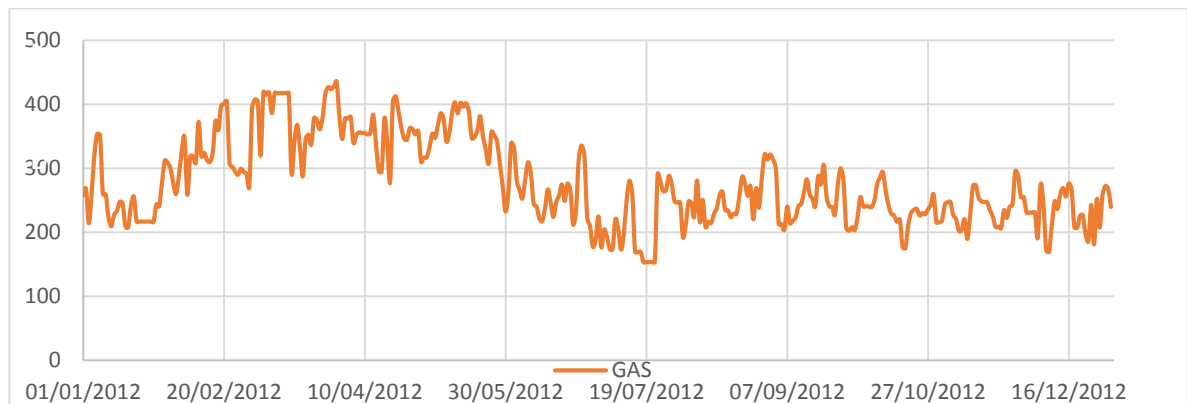
Este estudio busca simular el flujo de lodos de perforación base aceite con modificadores de viscosidad disueltos, mediante CFD. Los efectos de la viscosidad del fluido en la capacidad de transporte de partículas de líquido se estudiaron considerando varios parámetros de las partículas tales como la densidad, diámetro, forma, y la concentración inicial de partículas y la inclinación del pozo a través de empleo de la mezcla Slip Algebraico (ASM) modelo. Reología del fluido de perforación se expresó por Herschel-Bulkley modelo de fluido no newtoniano. La influencia de la concentración de agente de viscosidad en el programa de la reología del fluido que mejora la capacidad de carga de partículas, pero su efecto se atenúa en mayor concentración. Tiene un impacto adverso sobre la transmisión de partículas sólidas en el pozo. (Mohammadzhed, 2015)

1.2 CAMPO ESCUELA COLORADO.

Está localizado en la cuenca del valle medio del Magdalena, en el municipio de San Vicente del Chucurí. Actualmente el campo se encuentra cerrado por problemas jurídicos, sin embargo, se desarrollará a simulación para condiciones de operación anteriores al cierre.

El campo escuela colorado tiene un muy bajo corte del agua que históricamente nunca ha sido superior al 1%. Esto muestra la influencia nula de algún tipo de acuífero. La pérdida de presión del yacimiento es fuerte, esto se debe a que los mecanismos de empuje natural presentes en él son débiles, como el gas en solución. Además de esto el campo presenta un grave problema de precipitación de orgánicos, específicamente parafinas, lo que supone un grave problema operacional. Al precipitarse las parafinas, estas obstruyen las líneas de producción, limitando el flujo, aumentando la presión de fondo fluuyente, lo que limita fuertemente la producción del campo.

Sin embargo, el campo tiene una fuerte producción de gas. En el siguiente gráfico muestra el histórico de producción de gas, la cual está en el orden de los cientos de miles de pies cúbicos de gas por día.



De lo anterior se puede deducir que el flujo a simular en este trabajo será mayormente bifásico, de aceite y gas.

2. MODELOS MATEMÁTICOS EN DINÁMICA DE FLUIDOS.

2.1 ECUACIONES DE CONSERVACIÓN.

Para modelar el flujo de fluidos se parte de las leyes universales de conservación de masa, momento y energía, las cuales pueden ser descritas de la siguiente manera:

- La masa del fluido se conserva.
- El cambio del momento respecto al tiempo es igual a la suma de fuerzas en una partícula fluida¹. (Segunda ley de Newton)
- El cambio de la energía es igual a la suma de la transferencia de calor y la rata de trabajo realizada por una partícula fluida. (Primera ley de la termodinámica)

Se describe el comportamiento del fluido partiendo de sus propiedades macroscópicas, estas son función del espacio y el tiempo, así en sistema radial se tiene $\rho(x,y,z,t)$, $P(x,y,z,t)$, $T(x,y,z,t)$ y $V(x,y,z,t)$ para densidad, presión, temperatura y el vector de velocidad, respectivamente.

La ecuación de conservación de la masa puede ser escrita de forma diferencial, de la siguiente manera:

¹Partícula fluida es una masa suficientemente grande de fluido como para contener un gran número de moléculas, y tan pequeña como para que no haya variación en sus propiedades macroscópicas respecto al espacio.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

Esta ecuación implica que el cambio de la masa de un fluido al fluir dentro de un volumen de control en el cual no ocurre reacción química, es igual a la acumulación que ocurre en el mismo volumen de control.

La conservación de la cantidad de movimiento es descrita mediante la segunda ley de Newton como se enunció anteriormente. Las fuerzas que actúan sobre una partícula fluida pueden ser de dos tipos, fuerzas de superficie o fuerzas de masa. Las *fuerzas de masa* hacen referencia a aquellas que no son resultado del contacto con otros cuerpos (e.g. fuerza de gravedad, fuerza de coriolis). Mientras que las *fuerzas de superficie*, por el contrario, son resultado de la interacción directa con otros cuerpos (e.g. presión, fuerzas viscosas). Las fuerzas generan un cambio en la cantidad de movimiento del fluido y en consecuencia en su velocidad.

Cuando un fluido se encuentra estático la única fuerza de superficie presente es la presión (P), que actúa de la misma forma en todas las direcciones. Asumimos el tensor de esfuerzos (α) de la siguiente manera.

$$\alpha = \begin{pmatrix} -P & 0 & 0 \\ 0 & -P & 0 \\ 0 & 0 & -P \end{pmatrix} = -PI \quad (2)$$

Donde I es el tensor unitario. Para un fluido que se encuentra en movimiento, podemos escribir el tensor de esfuerzos (α) así:

$$\alpha = -PI + T \quad (3)$$

$$T = \begin{pmatrix} \tau_{XX} & \tau_{XY} & \tau_{XZ} \\ \tau_{YX} & \tau_{YY} & \tau_{YZ} \\ \tau_{ZX} & \tau_{ZY} & \tau_{ZZ} \end{pmatrix}$$

T es llamado el tensor de esfuerzos desviatorio. Su existencia es atribuida a la deformación causada por el movimiento de los fluidos.

Finalmente llamando f a las fuerzas de masa que actúan sobre el volumen de control, se escribe la forma diferencial de la ecuación de cantidad de movimiento. El primer término es la derivada material ² de la velocidad, y es igual a la suma de las fuerzas que actúan sobre una partícula fluida.

$$\rho \frac{DV}{Dt} = \rho f + \text{div}(\alpha) \tag{4}$$

La ecuación de conservación de la energía es, de manera general, la primera ley de la termodinámica. Se debe tener en cuenta que las fuerzas que actúan sobre el fluido son de dos tipos y que generan una cantidad de trabajo diferente, así como que el calor se transfiere a través de una superficie y que de esta forma se genera un cambio en la energía interna del fluido.

$$\iiint_D \frac{D}{Dt} \rho(e) d\tau = \iiint_D \rho(f \cdot V) d\tau + \iint_S P_n \cdot V ds + \iint_S k \nabla T \cdot n ds \tag{5}$$

El término del lado izquierdo de la ecuación es el cambio de la energía interna del fluido por unidad de masa, el primer término del lado derecho es el trabajo realizado

² La derivada material se define como el operador: $\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + v \cdot \nabla(F)$

El primer término representa la variación de la propiedad en un punto fijo del espacio y por ello se la denomina derivada local, mientras que el segundo representa la variación de la propiedad asociado al cambio de posición de la partícula fluida, y se la denomina derivada convectiva.

por las fuerzas de masas. El segundo, el trabajo realizado por las fuerzas de superficie. Finalmente, el tercero es la transferencia de calor del sistema. Esta misma ecuación se escribe de forma diferencial usando el teorema de la divergencia de Gauss.

$$\rho \frac{De}{Dt} = \rho(f \cdot V) + \text{div}(P_n \cdot V) + \text{div}(k\nabla T) \quad (6)$$

En los sistemas de recolección de campos petroleros se observa flujo multifásico. Esto significa que; en la mezcla de hidrocarburos, los componentes livianos fluyen en fase gaseosa y los pesados en fase líquida, de acuerdo a las condiciones de presión y temperatura a la que se encuentren en el sistema. Para este análisis se empezará describiendo los modelos matemáticos para flujo incompresible y compresible por separado, de acuerdo a las ecuaciones de Navier Stokes que gobiernan el flujo, además del modelo de flujo turbulento.

2.2 FLUJO VISCOSO INCOMPRESIBLE.

En un flujo incompresible la densidad es una propiedad constante, lo que permite reducir la ecuación de continuidad a una ecuación a divergente:

$$\text{div}(V) = 0 \quad (7)$$

Las simplificaciones que se puedan hacer a las ecuaciones de conservación son reducidas. De hecho, para el flujo viscoso incompresible existen grandes limitaciones en lo referente a las condiciones necesarias para observación en la realidad.

Jesús Manuel Fernández Oro agrega: “En condiciones de flujo isotérmico, la hipótesis de incompresibilidad implica que la solución de las variables primitivas del flujo (presión y velocidad) se haga independientemente del campo de temperatura.”³

De lo anterior podemos inferir que para calcular los campos de presión y velocidad en el flujo incompresible no son necesarias las ecuaciones de energía.

La ecuación de cantidad de movimiento para esta suposición se expresa:

$$\frac{DV}{Dt} = f - \frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 V \quad (8)$$

2.3 FLUJO VISCOSO COMPRESIBLE.

En un flujo compresible la densidad varía respecto al resto de variables. Generalmente los gases son tratados como fluidos compresibles, aquí las fuerzas de masa desempeñan un papel despreciable. En el CFD es común considerar el gas como ideal.

Si consideramos un volumen de fluido que se somete a cierto cambio de presión, el volumen cambia, así a la relación entre el cambio de presión y al cambio de volumen

³ *FERNANDEZ, ORO. Ecuaciones diferenciales de conservación. En: Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. Barcelona: Reverté 2012 p 64.*

se le llama *módulo de compresibilidad*. Un fluido poco compresible tiene alto módulo de compresibilidad y un fluido altamente compresible tiene uno bajo. Para poder evaluar los cambios de presión y volumen, es necesario tener en cuenta el tipo de proceso de compresión que se dará si es isotérmico o isoentrópico.

La relación de la velocidad de flujo y la velocidad del fluido, es llamada *Número de Mach* (Ma). Este número adimensional permite evaluar la compresibilidad de un fluido y además clasificar los tipos de flujo en sónico, subsónico y supersónico.

2.4 TURBULENCIA.

El flujo laminar es descrito correctamente con las ecuaciones de momento y conservación de la masa. Incluso, en casos simples se pueden solucionar estas ecuaciones de forma analítica, para flujos más complejos es necesaria una metodología CFD. Puede ser que las líneas de flujo en régimen laminar sufran distorsiones, por la rugosidad de la superficie o por una corriente libre del fluido en movimiento. Cuando estas distorsiones aumentan en dirección del flujo, se dice que está en régimen turbulento.

El inicio de la turbulencia es marcado por la relación entre la inercia y la fuerza viscosa. Esta relación es matemáticamente definida por el número de Reynolds, Eq (2.9). A un número de Reynolds bajo, las fuerzas viscosas son mayores que la inercia, tendremos un flujo laminar. En el caso contrario, la inercia será lo suficientemente grande para amplificar las distorsiones en el flujo y dar inicio a la turbulencia. En este punto el flujo se vuelve inestable, la velocidad y otras propiedades de flujo varían de forma aleatoria.

$$\text{Re} = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (9)$$

Donde, ρ es la densidad del fluido, v la magnitud de la velocidad, D diámetro de flujo y μ la viscosidad dinámica.

Hay una dificultad para predecir definir la turbulencia, las propiedades más destacadas de los movimientos turbulentos son:

Aleatoriedad. Es la característica más destacada de los flujos turbulentos. También definida como irregularidad, se manifiesta por la aparición de fluctuaciones de las variables fluido dinámicas con tamaños y tiempos muy dispares.

Vorticidad. Es imprescindible que exista vorticidad para que un flujo pueda ser turbulento. Todo flujo turbulento es rotacional ($\nabla \times V \neq 0$), con importantes niveles de vorticidad que fluctúan en el tiempo y en el espacio de forma coherente, y en los que la deformación de los vórtices supone la esencia de la dinámica turbulenta.

Disipación. Los flujos turbulentos son siempre disipativo. Necesariamente han de disipar energía en las escalas más pequeñas, energía que se obtiene del flujo principal y se va redistribuyendo en forma de cascada mediante proceso de deformación. Una vez desarrollado el flujo turbulento, la turbulencia tiende a mantenerse mediante un aporte continuo de energía. Si no existe ese suministro de energía, la turbulencia decae rápidamente.

Altos números de Reynolds. La turbulencia se origina por inestabilidades en el flujo laminar. A partir de ciertos números de Reynolds, dependientes del tipo de aplicación, las irregularidades en las capas de cortadura se vuelven inestables, amplificándose y activando los mecanismos turbulentos. El flujo se desordena y deja de ser laminar.

2.4.1 Modelo de turbulencia K-ε

Este modelo es el más usado en códigos CFD, muestra ser estable y numéricamente robusto. Este modelo expresa la viscosidad en función de la energía cinética turbulenta K y la tasa de disipación viscosa turbulenta (ϵ). El modelo está compuesto por dos ecuaciones (2.10 y 2.11),

La *energía cinética turbulenta* (K) es definida como la variación de las fluctuaciones en la velocidad. Y la *tasa de disipación viscosa turbulenta* (ϵ).

$$\frac{Dk}{Dt} = \text{div} \left[\left(\nu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + 2\mu_t D(V) \cdot \nabla(V) - \epsilon \quad (10)$$

$$\frac{D\epsilon}{Dt} = \text{div} \left[\left(\nu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \epsilon \right] + c_1 \frac{\epsilon}{k} \mu_t D(V) \cdot \nabla(V) - c_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (11)$$

Donde:

V , es el campo de velocidades

μ_t , es la viscosidad torbellino ⁴

2.5 Flujo Multifásico.

En la naturaleza la mayoría de flujos están compuestos macroscópicamente por una compleja mezcla de fases. Se define cada fase como aquel tipo de material identificable, con una frontera bien definida. Así, las fases también hacen referencia a materiales que, estando en el mismo estado de agregación, presentan diferentes propiedades fisicoquímicas.

En la selección de un modelo correcto para flujo multifásico debe tener en cuenta el régimen de flujo, la cantidad y dispersión las fases secundarias (Véase la tabla 2.1). Respecto a la cantidad de fase secundaria presente en el flujo multifásico, se utiliza la fracción de volumen de dicha fase como indicador de su importancia. Además, este valor se utiliza como referencia para establecer si las partículas de la fase dispersa interactúan entre sí o su efecto puede despreciarse. Normalmente, un valor menor al 10% de esta fracción permite obviar las interacciones entre las partículas.

Existen cuatro modelos fundamentales para la simulación numérica de flujos multifásicos:

- Modelo de fase dispersa (DPM).
- Modelo Euleriano.
- Modelo de mezcla.
- Modelo de volumen de fluido.

⁴ La viscosidad torbellino se expresa como: $\mu_t = \frac{c_\mu k^2}{\varepsilon}$

Modelo de fase dispersa. Se resuelven las ecuaciones de conservación de la fase continúa junto con la simulación de la fase discreta de forma Lagrangiana, esto quiere decir que la fase secundaria como un número finito y muy grande de partículas esféricas que se encuentran dispersas en la fase continua. Se debe calcular las trayectorias individuales de cada una de esas partículas, también la transferencia de calor y masa con la fase continua. La trayectoria de cada partícula se predice integrando el balance de fuerzas que existe sobre dicha partícula.

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_p^2 d_p^2} \frac{CdRe_p}{24} (u - u_p) + \frac{g(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_p \quad (12)$$

Donde,

u , u_p son la velocidad del medio primario y de la partícula respectivamente.

Re_p El número de Reynolds referido a las partículas.

Cd Es el coeficiente de arrastre sobre las partículas.

F_p fuerza adicional debido a grandes gradientes de presión.

Modelo euleriano. Es el más general entre los esquemas de flujo multifásico. Se emplea para modelare fases interpenetradas. A diferencia del anterior se usa un enfoque euleriano para todas las fases presentes en el flujo. Por esto, no se distingue entre flujos multifásicos con interacción entre fluidos o con transporte de sólidos en corrientes. El modelo resuelve ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía para cada fase, permitiendo el acoplamiento entre fases a partir del intercambio de información en las interfaces y tomando el campo de presiones único para todas.

La descripción euleriana de flujo multifásico incorpora la definición de fracción volumen para cada fase q-ésima, comúnmente denotada como α_q . La fracción de volumen representa el espacio ocupado por cada fase. Teniendo en cuenta que la suma de todas las fracciones volumétricas es igual a uno, para cada fase se definen una ecuación de continuidad y cantidad de movimiento de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \alpha_q \rho_q}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) = \sum (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (13)$$

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla(v) = \rho f + \text{div}(\alpha) \quad (14)$$

Modelo de mezcla. Es equivalente al modelo euleriano asumiendo que el número de Stokes es lo significativamente pequeño, de manera que la magnitud y dirección de la velocidad las partículas es prácticamente la misma que la del fluido. Aun así, permite considerar un movimiento relativo entre las fases, mediante una velocidad de deslizamiento. De este modo el modelo resuelve una única ecuación de continuidad y cantidad de movimiento para toda la mezcla. Este modelo es muy usado en la simulación de cavitación en bombas.

Modelo de volumen de fluido. Permite el modelado de dos o más fluidos inmiscibles, mediante la resolución de un único conjunto de ecuaciones de conservación de la masa, momento y energía. A diferencia de los anteriores, el VOF se basa en la suposición que las fases no están compenetradas. Por tanto, se limita al análisis de flujos estratificados, con superficies libres o con grandes bolsas de aire atrapadas o transportadas en corrientes. Aquí los campos de velocidad, presión y temperatura son compartidos por todas las fases y representan valores promediados en función de las fracciones de volumen en cada celda.

Tabla 2.1 Clasificación y características de los modelos de flujo multifásicos.

Adaptado de Fluent V6.3-User's Guide, 2006.

Características	Fases interpenetradas			Fases inmiscibles
	DPM	Euleriano	De mezcla	VOF
Generales				
<i>Régimen de flujo</i>	Flujos con burbujas, gotas o partículas en suspensión.	Flujos con burbujas, gotas o partículas en suspensión, lechos fluidizados y flujo con arrastre de partículas.	Flujos con burbujas, gotas o flujo por arrastre de partículas.	Flujos estratificados, con superficie libre y flujos con bolsas de aire.
<i>Densidad de partículas</i>	Baja a moderada.	Baja a alta.	Baja a moderada.	Alta a baja
<i>Fracción de Volumen</i>	Diluida	Diluida a Densa.	Diluida a moderadamente densa.	Diluida a Densa.
<i>Cierre Turbulento</i>	Débil a fuerte acoplamiento entre fases	Débil a fuerte acoplamiento entre fases	Débil acoplamiento entre fases	Débil a moderado acoplamiento entre fases
<i>Número de Stokes</i>	Cualquier Número.	Cualquier Número.	$Stk \ll 1$	Cualquier Número.

3. DISCRETIZACIÓN EN CFD.

Las ecuaciones expuestas en el capítulo anterior sólo se pueden resolver para condiciones muy específicas de flujo. Por ello es necesario recurrir a métodos numéricos. El software comercial ANSYS CFX emplea el método de volúmenes finitos, que implica discretizar el volumen usando una malla. La malla se usa para generar volúmenes de control finitos, donde se conservan la masa, el momento y la energía. Las posiciones discretas donde las propiedades son calculadas son definidas por la malla, la cual tiene subdominios (nodos, elementos, volúmenes de control...).

El método de los volúmenes finitos utiliza la forma integral de las ecuaciones de conservación. El dominio se divide en volúmenes de control en los cuales se aplican las ecuaciones integrales que son aproximadas mediante cuadraturas. En este caso los nodos residen en el centroide del volumen y se interpolan para obtener sus valores en las caras de dichos volúmenes. Se pueden usar en todo tipo de mallas, tanto estructuradas como no estructuradas. (Lozano, 2013).

3.1 TIPOS DE MALLAS.

Mallas estructuradas (3D) Son aquellas formadas por de nodos que pueden ser identificados mediante un grupo de índices ordenados (i, j, k). Es el tipo de malla más simple donde cada nodo tiene 6 vecinos y es equivalente a una malla cartesiana mediante el cambio de coordenadas apropiado. Su mayor desventaja es que sólo pueden ser utilizadas en dominios con geométricas simples y muchas veces acumulan puntos en regiones que no son de interés. Suelen ser las mallas más utilizadas en los métodos de elementos finitos. Gran cantidad de algoritmos

están diseñados para mallas cartesianas regulares y son aplicados a otras mallas mediante una transformación de coordenadas.

En la ilustración 1 se observa un mallado estructurado hexaédrico visto en 3 perspectivas.

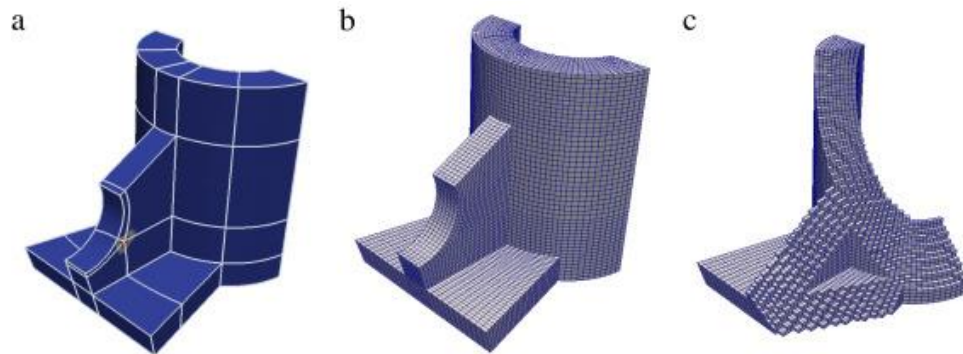


Ilustración 3.1. Ejemplos de mallado estructurado. Smoothness driven frame field generation for hexahedral meshing Original Research Article: Computer-Aided Design, Volume 72, March 2016, Pages 65-77 N. Kowalski, F. Ledoux, P. Frey

Mallas no estructuradas. Este tipo de mallas es más flexible ya que Los elementos pueden tener cualquier forma, sin restricciones en cuanto al número de elementos vecinos ni nodos, con el fin de adaptarse de manera arbitraria al dominio. Pueden ser usadas con cualquier método de discretización espacial. En la práctica, las mallas se construyen utilizando tetraedros o hexaedros en 3D. La ventaja de su flexibilidad contrasta con la estructura irregular de los datos que produce y la necesidad de usar algoritmos más complejos ya que las matrices que hay que resolver son llenas. En la ilustración 2 se puede observar un dominio simétrico con mallados no estructurados.

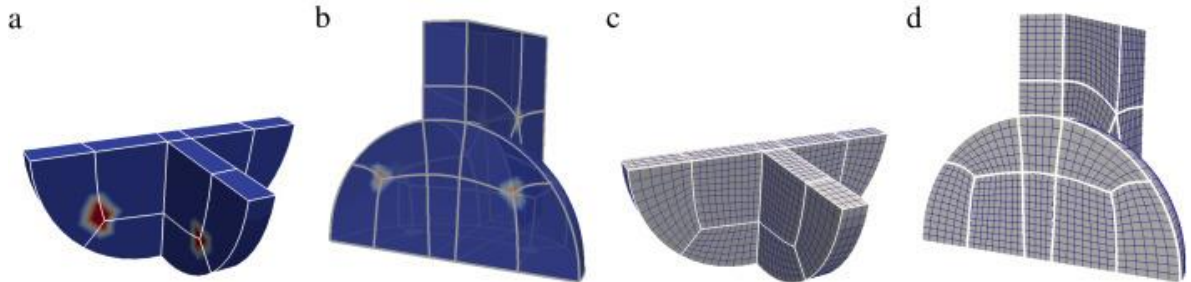


Ilustración 3.2 ejemplos malla no estructurados. Smoothness driven frame field generation for hexahedral meshing Original Research Article Computer-Aided Design, Volume 72, March 2016, Pages 65-77
N. Kowalski, F. Ledoux, P. Frey

3.2 MÉTODO DE LOS VOLÚMENES FINITOS.

En este método se considera un malla construido en el espacio fluido. Alrededor de cada punto de la malla se forma un volumen de control que no se intercepta con los aledaños, de esta forma el volumen total de fluido es igual a la suma de los volúmenes de control considerados. La ecuación diferencial se integra en cada volumen, obteniendo su discretización. También se debe especificar perfiles de variación de la variable dependiente dentro del malla.

Ejemplo Ilustrativo. A continuación, se expondrá un ejemplo para explicar las generalidades de este método. Se considera la ecuación de conducción de calor unidimensional:

$$\frac{d}{dx} \left(K \frac{dT}{dx} \right) + S = 0 \quad (3.1)$$

Aquí K es el coeficiente de conducción térmica, T es la temperatura, S es el término fuente el cual representa a la tasa de generación de calor por unidad de volumen.

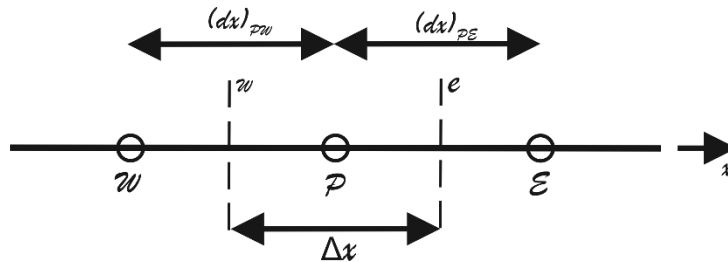


Ilustración 3.3. Adaptado de Método de los volúmenes finitos, apuntes de clase, Espinoza y Niño.

En la ilustración 3 se muestra una malla, se va resolver la ecuación de forma integral para el punto central P. Entre W y P se encuentra el punto w que es el límite izquierdo del volumen de control construido entorno a P, de igual entre P y E se encuentra e que es el límite derecho. La distancia entre w y e es Δx . El volumen de control tiene dimensiones: $\Delta x \times 1 \times 1$. Debido a que éste es un problema unidimensional.

Integrando la ecuación 3.1 se obtiene:

$$\int_w^e \frac{d}{dx} \left(K \frac{dT}{dx} \right) dx + \int_w^e S dx = 0$$

$$\left(K \frac{dT}{dx} \right)_e - \left(K \frac{dT}{dx} \right)_w + S \Delta x = 0 \quad 3.2$$

Ahora es importante hacer una suposición sobre la variación de T en el volumen de control. Dos suposiciones simples son posibles: paso constante y paso lineal. En este caso la suposición más simple para evaluar las derivadas en w y e es un paso lineal. De este modo la ecuación 3.2 queda expresada de la siguiente manera:

$$K_e \frac{T_e - T_p}{dx_e} - K_w \frac{T_p - T_w}{dx_w} + S\Delta x = 0 \quad 3.3$$

4. METODOLOGÍA CFD.

Una metodología general para el desarrollo de una simulación en CFD poder ser descrita en forma de diagrama de flujo como se muestra en la ilustración 4, Para el desarrollo de la simulación se el paquete de simulación de ANSYS. Específicamente los programas ICEM CFD y CFX. El primero fue usado para la creación de las geometrías y la elaboración de los mallados, el segundo para la simulación numérica de los flujos.



Ilustración 4. Metodología general CFX. Tomado de: Modelamiento de flujo compresible por el método de los volúmenes finitos en gasoductos, 2010.

Planeación del Estudio. Se debe planear los objetivos específicos para lograr el modelamiento del flujo, en este punto se deben definir las condiciones de frontera, las condiciones operacionales y las condiciones iniciales. Para lograr una buena caracterización del problema que se va a estudiar es necesario que los anteriores datos provengan de fuentes confiables y que puedan ser verificados.

Descripción Geométrica del Dominio CAD. Este proceso se realiza mediante el uso de sistemas CAD. Aquí se debe obtener una geometría limpia para poder realizar posteriormente una malla de calidad. En este caso la geometría se creó en el programa ICEM CFD. Es necesario tener en cuenta que se deben conocer todas las características descriptivas del dominio para obtener la representación más cercana a la real.

Selección del método de control y generación de la malla. Posterior a la descripción geométrica está el mallado del dominio, ANSYS ofrece el paquete Meshing además del ICEM CFD que permite la discretización de la geometría que se desea modelar. En este caso se usó ICEM CFD para la creación de la malla y MESH para el control de la calidad de la misma. Como se había dicho anteriormente, en el método de volumen finito los puntos se unen mediante líneas de la malla para formar caras, las cuales se agrupan para formar un conjunto de volúmenes de control y realizar los cálculos numéricos en el centro de cada uno de estos volúmenes. Por tal razón, cuanto más fina se la malla, las aproximaciones serán más exactas, pero debe tenerse en cuenta las exigencias de cómputo.

Definición de propiedades y condiciones de frontera. La principal condición de frontera para modelar flujos en tuberías es aquella debida a la superficie; como el fluido no puede pasar a través de la superficie sólida, la componente normal de la

velocidad relativa del fluido con respecto a la superficie debe ser cero a lo largo de toda la superficie, a esta condición de frontera se denomina de no deslizamiento. Debido a esta condición, la componente tangencial de la velocidad sobre la superficie es cero. La definición de propiedades y condiciones de frontera se especifican en el pre procesamiento de datos en la sección llamada CFX-pre. El CFX-pre, despliega un menú donde se ingresan el tipo de simulación que se debe elegir si es estable o transitorio, para flujos no estacionarios se debe determinar el delta t, el cual indica cada cuanto se realizan los cálculos numéricos sobre toda la malla. Igual que en el refinamiento de la malla, no existe un método bien establecido para la determinación del intervalo de tiempo, generalmente la experiencia es la que en algunos casos ayuda a determinar este valor para lograr la estabilidad y convergencia de las soluciones.

Convergencia significa que conforme el tamaño del elemento de la malla y el tamaño de paso tiendan a cero, los resultados obtenidos se aproximarán a la solución del sistema de ecuaciones verdadera. *Estabilidad* significa que conforme el cálculo avance, los errores tienden a reducirse.

Posteriormente se seleccionan el dominio y los subdominios, en el dominio se asignan el tipo de dominio, el fluido que se va a modelar, las condiciones de inicialización, las condiciones de referencia (P y T), el tipo de transferencia de calor y el modelo de turbulencia. Los subdominios o condiciones de frontera, consisten en definir las condiciones de entrada, condiciones de salida, condiciones de pared, régimen de flujo y transferencia de calor de cada uno. Adicional a esto, se debe caracterizar la forma en que se hará el control numérico, las unidades con que se desean los resultados, el control y criterio de convergencia y si se quiere el seguimiento de alguna variable en especial.

Cálculo. El cálculo se lleva a cabo en el CFX-solver donde se solucionan las ecuaciones gobernantes integradas para cada volumen de control. Todas las variables de solución y propiedades del fluido se almacenan en los nodos del elemento. Es necesario definir las condiciones iniciales de cada una de las variables que se desean obtener durante la simulación, de ellos depende la robustez del proceso y la rapidez con que se obtienen los resultados.

Estado estacionario y transitorio. Las dependencias en el tiempo de las características del flujo pueden ser especificados como estado estable o transitorio. Simulaciones en estado estable, por definición, son aquellas cuyas características no cambian con el tiempo y cuyas condiciones de equilibrio se supone que se ha llegado después de un intervalo de tiempo relativamente largo. Por lo tanto, no requieren información en tiempo real para describirlos. Simulaciones en estado transitorio requieren información en tiempo real para determinar los intervalos de tiempo en el que el Solver calcula el campo de flujo. El comportamiento transitorio puede ser causado por el cambio inicialmente en las condiciones de frontera del flujo una vez se inicia la corrida, o puede ser intrínsecamente relacionado con las características del flujo, de modo que una condición de estado estacionario no se alcanza nunca, aun cuando todas las demás condiciones del flujo no cambian.

Número Courant RMS. El tamaño **timestep** se ajusta de tal manera que la condición del número de Courant RMS se satisfaga. La condición de Courant es una condición de convergencia de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales solucionadas mediante ciertos algoritmos. Es por esto que el paso de tiempo debe ser inferior a un cierto valor sino la simulación producirá resultados incorrectos.

5. DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN.

Para el desarrollo de la simulación se seguirá la metodología expuesta anteriormente. El objetivo es calcular la presión en cabeza de pozo que para este estudio será considerada exactamente igual a las condiciones de entrada a la línea y validarlo con los datos reales. También, teniendo en cuenta los perfiles de temperatura y presión, se simula la obstrucción del flujo debido a la precipitación de parafinas tomando reducciones del diámetro de 10%, para simular el efecto del ensuciamiento por parafinas Finalmente se hace un análisis de resultados.

El efecto del bombeo mecánico, mecanismo de producción presente en el pozo, no fue considerado. Esto debido a que implica un flujo a baches, el cual requería un perfil de caudal el cual no fue posible realizar en CFX.

5.1 ADQUISICIÓN Y CÁLCULO DE DATOS.

Las dos líneas de los pozos escogidos para la simulación producen fluidos de la misma arena. Las líneas escogidas fueron C37 y C67, debido a su alta producción con respecto a las demás y teniendo en cuenta que se han hecho sobre ellos diversos trabajos de grado que permiten tener mayor y mejor cantidad de información sobre ellos.

Algunos datos fueron adquiridos de la información de los pozos disponible en las oficinas del campo escuela Colorado, otros fueron calculados por medio de expresiones y correlaciones empíricas. En la tabla 5.1 se muestra un resumen de las propiedades de los fluidos para el desarrollo de la simulación.

Propiedades del aceite.

Densidad	51,05	Lb/ft ³
Viscosidad	8.549	Cp.
Conductividad	0,13	
Capacidad Calorífica	0,68	BTU/Lb.°F
Peso Molecular	155,86	Lb/mol

Propiedades del Gas

Densidad	0,0483	Lb/ft ³
Viscosidad	0,0107	Cp
Conductividad	0.016	
Capacidad Calorífica	0.52	BTU/Lb.°F
Peso molecular	0,041	Lb/mol

5.1.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN.

Las propiedades de las líneas de flujo fueron tomadas del proyecto de grado “Evaluación del comportamiento hidráulico del sistema de recolección de fluidos del campo colorado (Pérez)” en la Tabla 5.1 se muestran los datos de las líneas C37 y C67. Los caudales de aceite y agua fueron tomados de los reportes de liquidación de producción del campo escuela, sin embargo, en el mes de octubre, la producción de agua en ambos pozos es de 0.

La razón por la que se escoge el comportamiento del pozo en el mes de octubre, es por la disponibilidad de los datos reales en estas fechas los cuales son necesarios para la validación de la simulación. En las gráficas siguientes se muestra la producción reportada diaria de aceite en el pozo seleccionado, para el mes de octubre.

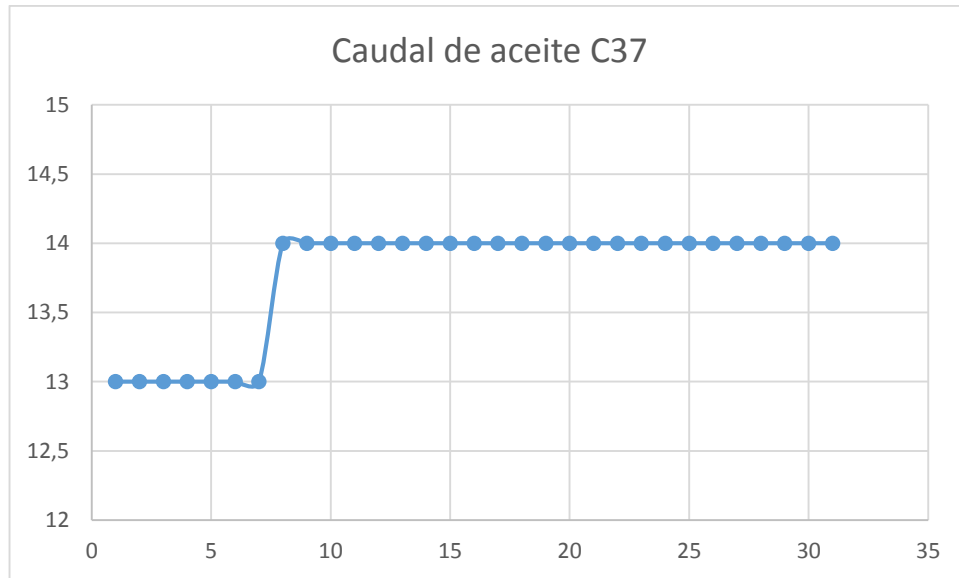


Gráfico 5.1. Datos de producción mes de octubre de 2012

Debido a que en los pozos no hay medidores de gas es necesario obtener un valor de producción de gas a partir de un promedio aritmético. Esto es, tomando la producción total de gas en el campo dada por el histórico y teniendo en cuenta los pozos que producían para la fecha establecida, se divide la producción de gas entre el número de pozos en producción, obteniendo el estimado de producción de gas por pozo.

Así se encuentra que la producción total de gas en el campo para el 20 de octubre de 2012 fue de 211. 35 KPCD, para 21 pozos en producción. Entonces el valor de gas tomado para realizar la simulación es de 10.05 KPCD. Este dato también es registrado en la tabla 5.1.

Tabla 5.1 datos de operación del pozo c37

Línea	C37
Longitud (ft)	302
Diámetro (in)	27/8
Caudal de aceite (bbl/día)	14
Caudal de agua (bbl/día)	0
Caudal de gas (kpcd)	10.05
Temperatura (°F)	77.5

5.1.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS DE YACIMIENTO.

El pozo C37 es un pozo productor de la arena B, y sus propiedades se muestran en la tabla 5.1. En el campo colorado se han realizado estudios básicos que muestran algunas propiedades del yacimiento, aunque presentan gran deficiencia en cuanto a la información de los fluidos.

Tabla 5.2. Informe colorado 2003. Diagnóstico y Estrategias de Recobro para ocho áreas de la gerencia centro oriente. ECOPETROL'

Parámetro	Arena B	Unidad
Temperatura de Yacimiento	114	°F
API	41.2	API
Profundidad Promedio	1700	Ft
Presión de Burbuja	648	Psia
Viscosidad a Pb	1.64	cp
Bo a Pb	1.091	Rb/Stb
Aceite Original en sitio	20	MMBbl
Área	634	Acres

Respecto a las propiedades de los fluidos del yacimiento los datos necesarios para realizar los cálculos fueron tomados del proyecto de grado "Procedimientos metodológicos para la caracterización de fluidos de campos maduros. Aplicación a

los fluidos del campo colorado (Cristancho y Hoyos).” Donde se realizaron una serie de pruebas de laboratorio a fluidos procedentes de las arenas B y C del campo escuela.

- Viscosidad del aceite: En las pruebas realizadas en laboratorio por Cristancho y Hoyos, se obtuvieron los siguientes resultados para viscosidad vs temperatura, los cuales están expuestos en la tabla 5.3. Se extrapolo la viscosidad a un valor de 77.5°F usando la ecuación de Andrade.

Tabla 5.3. Datos experimentales viscosidad vs temperatura.

Temperatura (°F)	Viscosidad (Cp)
90	6.91
100	5.49
110	4.56
120	3.8
130	3.44
140	3.23
150	3.08

La *extrapolación de Andrade* consta de resolver un sistema de ecuaciones 2x2 tomando dos valores determinados de viscosidad y temperatura para calcular los coeficientes A y B, con el fin de extrapolar la viscosidad a un tercer valor de temperatura.

$$\mu = Ae^{\frac{B}{T_{abs}}} \quad 5.1$$

De los datos de producción se tiene una temperatura de operación de 77.5 °F, con la ecuación 5.1 se calculó un valor de viscosidad del aceite de 8.549 cp.

- Viscosidad del gas: En la ingeniería de gas natural (GPSA Ingeniería Data Book, 2004) el método estándar es la correlación gráfica basada en el método de dos pasos. En el primer paso, la viscosidad a la presión atmosférica se calcula utilizando el peso molecular aparente del gas natural y la temperatura a la que se desea la viscosidad. Si el gas contiene nitrógeno, sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono, el valor se corrige para cada uno, dependiendo de su concentración y de la gravedad de gas. En el segundo paso, se obtiene la relación de la viscosidad del gas a la temperatura y presión deseada sobre la viscosidad a presión atmosférica, utilizando la presión y la temperatura pseudoreducidas del gas en las condiciones requeridas. Así se obtuvo un valor de viscosidad del gas de 0.0107 cp.
- Peso molecular del aceite: Los resultados del análisis composicional realizado a los fluidos provenientes de la arena B, son expuesto en un trabajo soporte para el presente proyecto: “Determinación del umbral de cristalización de las parafinas en el crudo de campo escuela colorado”, desarrollada por el ingeniero Emiliano Ariza León. En el trabajo se expone un peso molecular de 155,86 lb/mol. Este valor es calculado a partir de la composición del fluido, sumando los pesos moleculares aparentes de los componentes de la mezcla, además de peso molecular caracterizado para la fracción pesada.
- Peso molecular del gas: A partir de la gravedad específica del gas de 0,644 se calculó un peso molecular para el gas de 18,64 lb/mol.

En el manual de ingeniería química de Perry, se encuentra la siguiente explicación se explica que la conductividad térmica de crudos varía con la temperatura, pero no tanto como las viscosidades. A temperatura estándar los valores están entre el

rango de 0.12 y 0.15 W K⁻¹ m⁻¹. La variación respecto a la temperatura es significativa cuando la diferencia de temperatura superior a 100 °C, si no es útil usar un valor único de conductividad térmica sin un error significativo. Los crudos muy densos tienden a tener valores más altos de conductividad, sin embargo, el efecto no es muy grande.

5.2 GENERACIÓN DE GEOMETRÍA.

La geometría de la línea fue creada en ICEM CFD. Para ello se siguió el siguiente algoritmo:

- Se crearon cilindros sólidos con los parámetros expuestos en el apartado anterior.
- Se genera un punto en el origen de coordenadas en torno al cual se creará la geometría.
- Se ponen otros dos puntos para indicar el radio de los cilindros
- Con estos 3 puntos se genera la curva que es una de las caras.
- Se crea otro punto perpendicular a la superficie de la curva anteriormente creada, se traza una línea entre este y el origen.
- Se establece la superficie de la cara del cilindro seguido del cuerpo del sólido.
- Se genera la otra cara del cilindro y finalmente la superficie del sólido.

A continuación, en la ilustración 5.1 se muestra la vista isométrica de la geometría correspondiente a la línea C37.

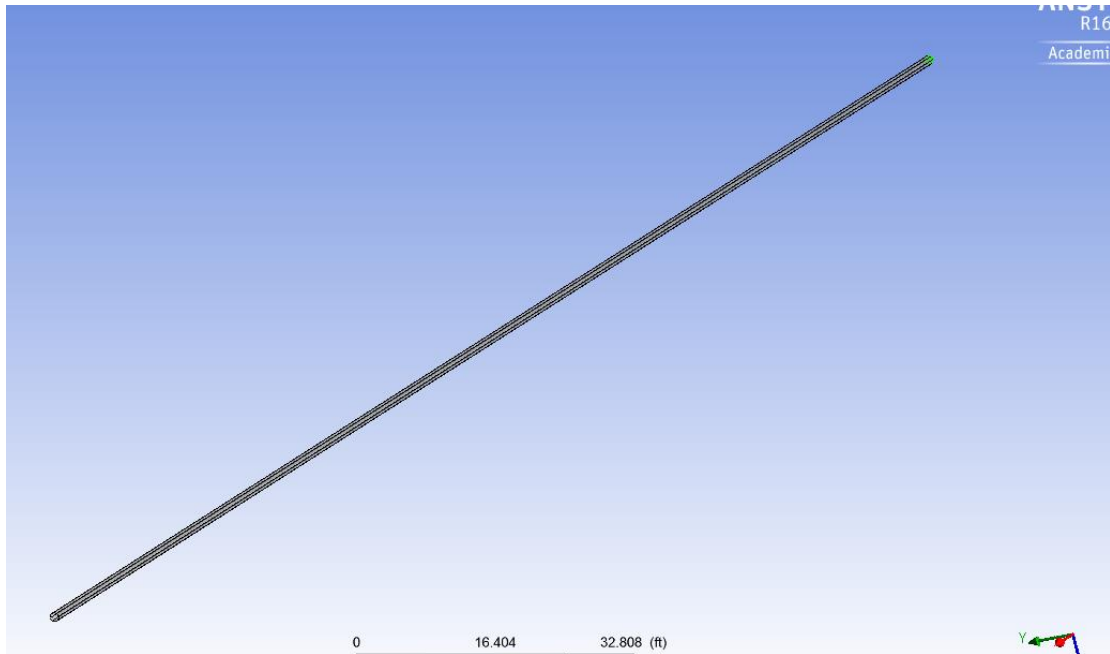


Ilustración 5.1 vista isométrica línea C37.

5.3 CREACIÓN DEL ENMALLADO.

La malla fue generada con la herramienta Mesh, se generó una malla tetraédrica, con el fin de un mejor acoplamiento a la geometría. Los detalles del enmallado se muestran en la tabla 5.4. La malla fue diseñada de tal manera que se dividió el eje superior del cilindro en 3020 partes, es decir longitudinalmente la malla tiene 1000 divisiones. Mientras tanto, en la cara, cada lado de los tetraedros fue puesto para una medida de 0,025 pies. En las ilustraciones 5.2 y 5.3 se muestran las imágenes correspondientes a las vistas del enmallado.

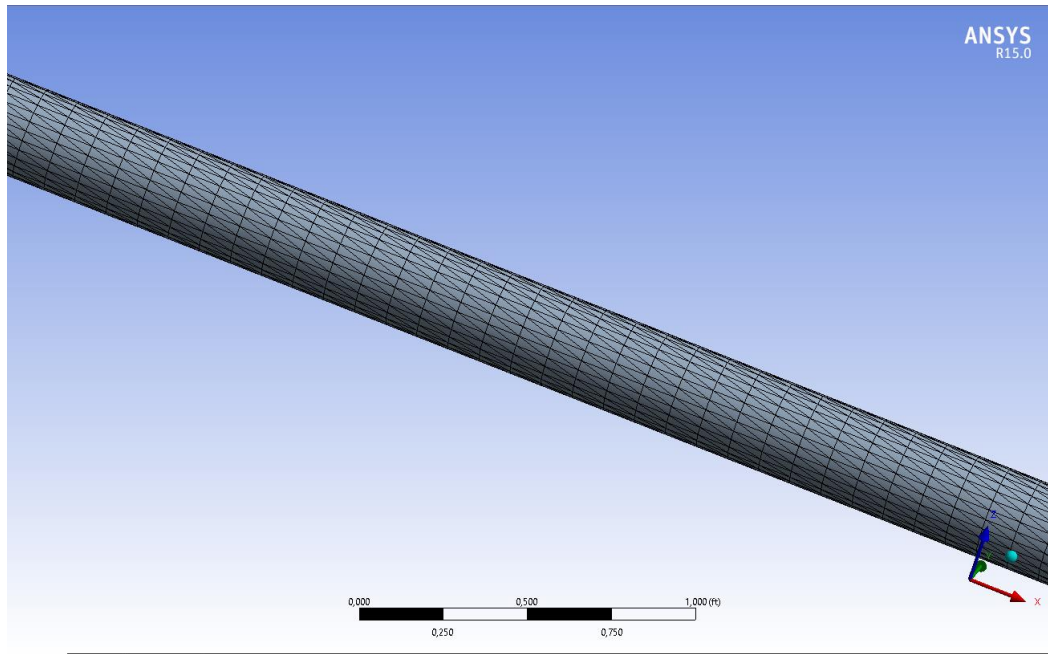


Ilustración 5.2. Vista isométrica de la malla.

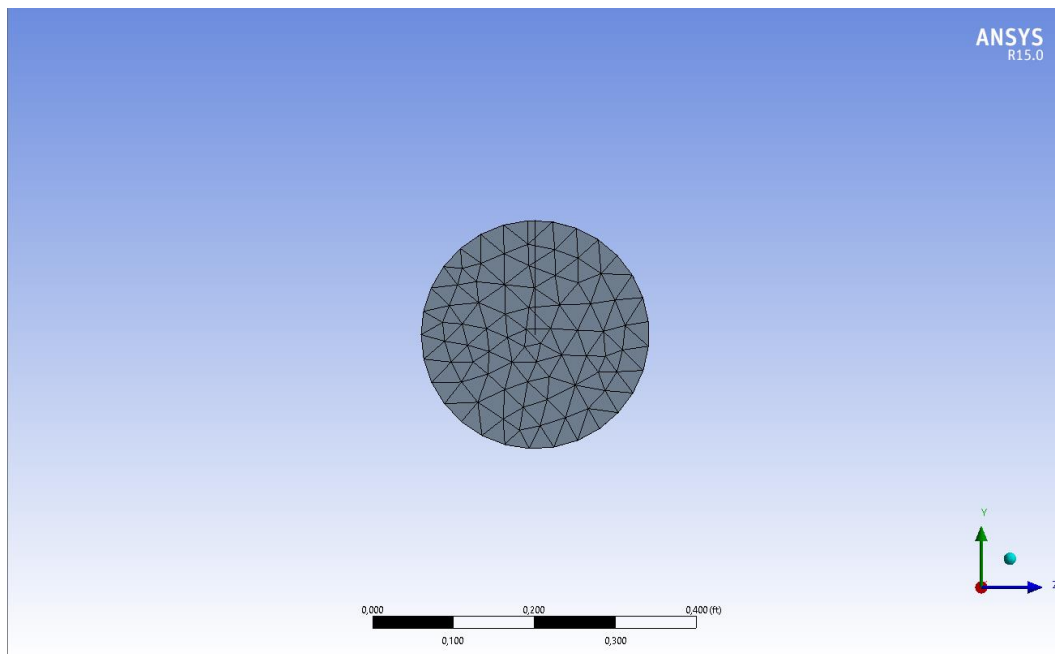


Ilustración 5.3. Vista frontal de la malla.

Tabla 5.4

Número de nodos	908958
Número de elementos	5018603
Valor de calidad máximo	0.99
Valor de calidad mínimo	0.1
Valor de calidad promedio	0.7

En la Ilustración 5.4 se muestra la distribución estadística de los valores de calidad de los elementos que constituyen la malla.

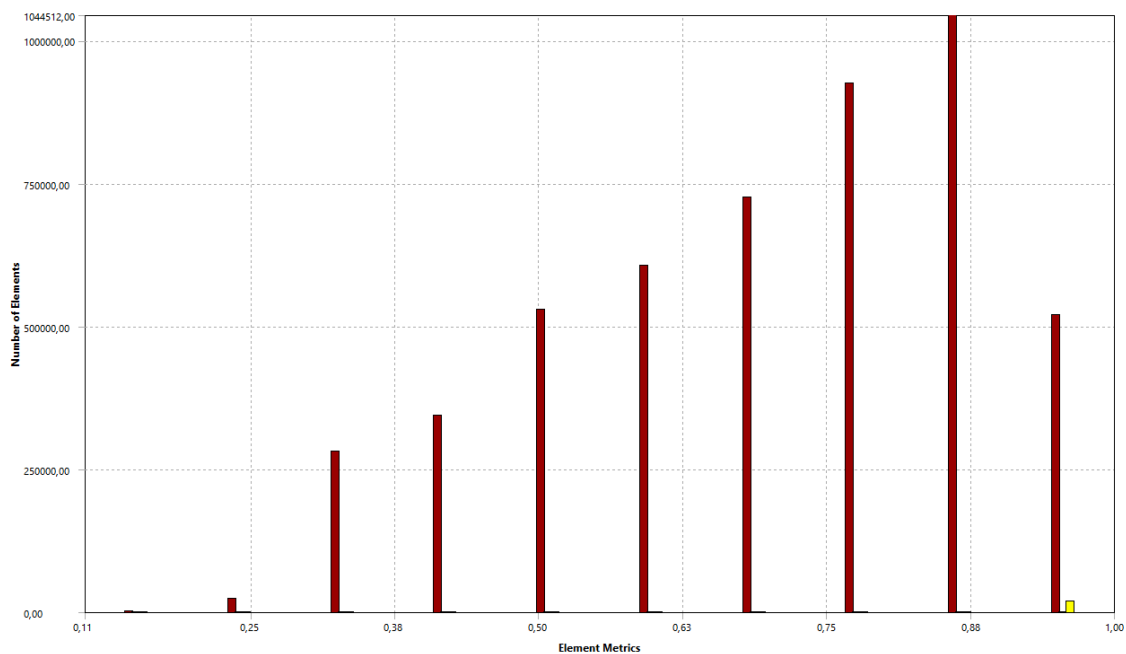


Ilustración 5.4. Parámetro de calidad de la malla.

5.4 ESTABLECIMIENTO DE LAS CONDICIONES DE FRONTERA.

El sistema a simular se encuentra en estado estable, esto implica que el sistema está que la masa se conserva dentro del sistema. La simulación se hizo con un flujo

bifásico, entonces se crearon 2 fluidos con las propiedades calculadas anteriormente. Se usó una presión de referencia de 14,7 psi. La turbulencia fue simulada con el modelo K-épsilon. El modelo seleccionado para flujo multifásico fue el modelo de mezcla, el cual considera ambas fases como medio continuo.

Inlet: En la entrada de fluido la condición inicial fue la velocidad de flujo, igual al caudal sobre el área transversal al flujo, como se observa en la figura. Las fracciones de flujo del gas y el aceite fueron calculadas sumando los caudales y dividiéndolos entre el total.

Tabla 5.5 Detalles de la frontera (inlet). C37

INLET	
Régimen de Flujo	Subsónico
Velocidad Normal	34.725 ft/s
Turbulencia	Gradiente Cero
Transferencia de Calor	Temperatura estática
Fracción de Gas	0.992239
Fracción de Aceite	0.007761

Outlet: Se usó una presión de salida acorde con la presión en cabeza de pozo real, para permitir el flujo positivo, no se hizo un cálculo preciso si no una suposición teniendo en cuenta las condiciones del sistema hidráulico estudiadas en el proyecto de grado “Evaluación del comportamiento hidráulico del sistema de recolección de fluidos del campo colorado”. Se usa una presión en la salida, es decir a la entrada

del colector de 36 psi para el C37. Esto teniendo en cuenta una caída de presión de 1 psi cada 100 ft.

Tabla 5.6 Condiciones de salida (outlet). C37

OUTLET	
Régimen de Flujo	Subsónico
Presión.	36 Psi
Promedio de presión	Promedio en todo el outlet.

Pared (Wall): Cómo se dijo anteriormente, se supone una superficie no deslizante en la pared (velocidad tangencial del fluido en la pared es 0). Se asume una rugosidad relativa del acero comercial desgastado de 1.2 milímetros, valor usual en la literatura. Y la transferencia de calor por conducción, que se da por la ley de Fourier, es decir no se asume una pared adiabática.

Tabla 5.7. Condiciones de la pared (Wall). C37

Pared	
Momento y masa	Pared no deslizante
Rugosidad de la pared	1.2 mm
Transferencia de calor	Temperatura estática

6. SIMULACIÓN CON SOFTWARE ESPECIALIZADO.

El software especializado de producción, a diferencia de una metodología CFD trabajan con cálculos de caída de presión por medio del análisis nodal y correlaciones empíricas de flujo. Con el fin de comparar resultados se procedió a relizar una simulación de este tipo.

A continuación, se enuncian algunos antecedentes a considerar para el modelado de la línea de flujo.

- Pérez (2012) realizó una evaluación del comportamiento hidráulico del sistema de recolección de fluidos del campo colorado, siendo el pozo COL-37, objeto de análisis. En su investigación caracterizó el perfil de presión de la línea en superficie, registrando una presión teórica en cabeza de 51.5 [psi].
- Se describirá el perfil de presión, desde el fondo del pozo hasta la interacción del mismo con los fluidos provenientes del pozo COL-55, por medio de un software especializado. Se considerará esta última en el modelo, como un nodo de presión de 51 [psi] (Pérez, 2012).

6.1 METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN.

Se crea un esquema de simulación del pozo COL-37 por medio de un software especializado. Hay presencia de flujo multifásico (i.e. Aceite, gas, agua), en conjunto con un sistema de levantamiento artificial de bombeo mecánico, a fin de obtener la presión en cabeza del mismo, atendiendo a la metodología descrita en la ilustración 6.1.

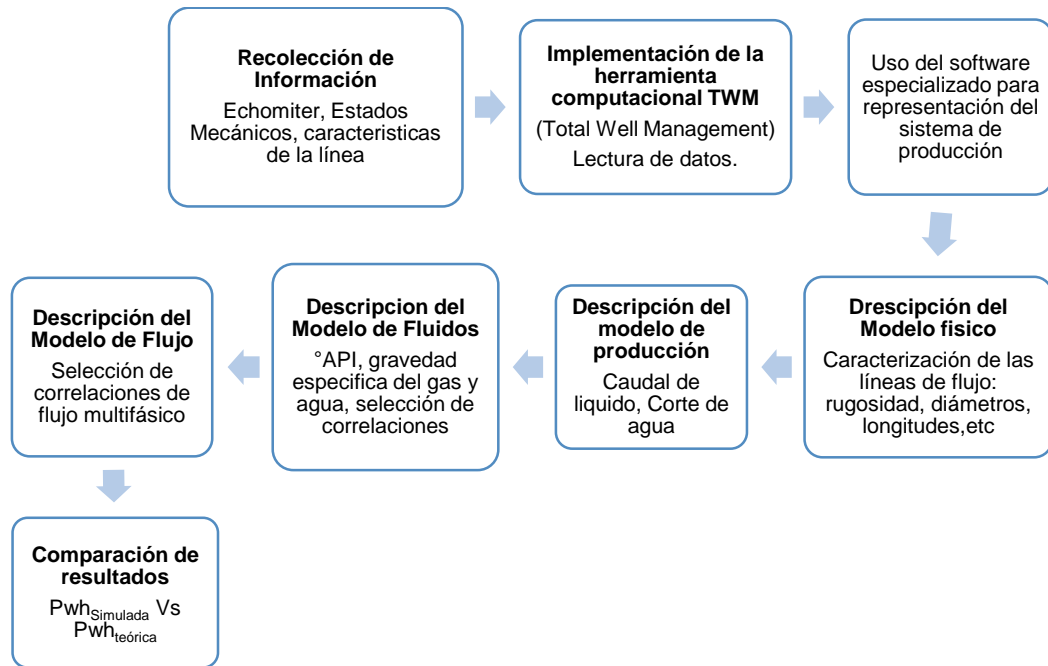


Ilustración 6.1. Metodología de simulación usando software especializado.

6.2 MODELO DE SIMULACIÓN.

Acorde a la metodología planteada, se procede a describir las características en general de los modelos mencionados. La información utilizada fue recolectada de Campo Escuela Colorado.

- Modelo Físico:** Para el sistema en superficie se empleó una extensión de tubería de acero al aire de 1089 ft, completamente horizontal (i.e. pendiente de cero), con un diámetro de 27/8 in (Pérez, 2012). En adición, en subsuelo, se implementó una longitud de 5407 ft para el *tubing*, y 6449 ft para el *casing*, cuyos diámetros son de 2.441 in y 4.95 in, respectivamente (Colorado, 2011). Asimismo, la bomba se ubicó a 4575 ft de profundidad. Se asumió un coeficiente de transferencia de calor de 2 Btu/ft²-h-°F. En la ilustración 6.2 se muestra dicho esquema.

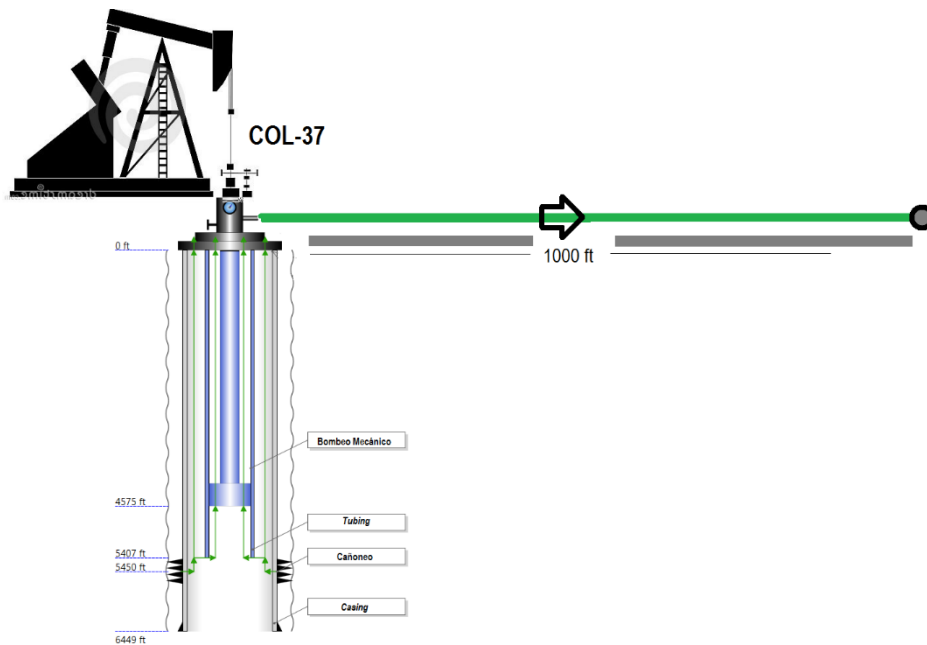


Ilustración 6.2 Esquema modelo físico.

- **Modelo de Producción:** El pozo cuenta con una tasa de producción de aceite de 6 STB/d, un corte de agua de 40 %, un GOR de 962 Scf/STB (Pérez, 2012). Por medio del software especializado se generó la curva IPR a implementar (Ver ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. 6.3). El pozo manifiesta una presión y temperatura de yacimiento de 1200 psig y 150 °F, respectivamente; y una presión de fondo de 746.6 psig.
- **Modelo de Fluidos:** Es un crudo liviano, de 40 °API. Exhibe una gravedad específica del gas y del agua de 0.83 y 1.05, respectivamente.
- **Modelo de Flujo: Pérez (2012),** determina que la correlación de flujo multifásico que describe con mayor veracidad el perfil de presión del sistema de recolección de crudo de Campo Colorado es, la correlación de Dukler AGA-Flanigan, obteniendo un factor de ajuste del 80% (Pérez, 2012).

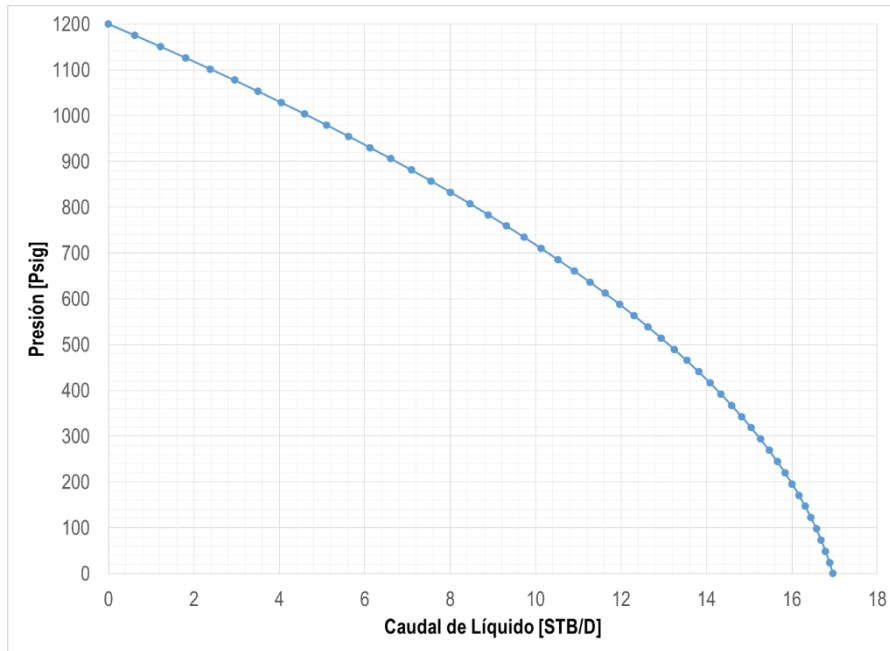


Ilustración 6.3 curva IPR COL-37.

6.3 RENDIMIENTO DEL MODELO DE SIMULACIÓN.

Al evaluar el rendimiento del modelo, se obtienen errores relativos de 0.95 % respecto al Pwh, teórico y experimental. Asimismo, en la Tabla 6.1 se visualizan los parámetros de producción modelados, evidenciando una concordancia con los mismos. En la Tabla 6.2, se observan los perfiles hidráulicos obtenidos del software, donde, la presión en cabeza es de 51.01091 Psi (fila señalada).

En las Figuras 6.4 y 6.5, se muestran perfiles de presión, con el objeto de apreciar de manera gráfica, la influencia del sistema de levantamiento artificial, aumentando la presión de 411 a 1562.7 psig.

Tabla 6.1. Parámetros de Producción. Tomado del software especializado

Name	Type	Pressure (out) psi	Temperatur... degF	ST liquid rate STB/d	ST Oil rate STB/d	ST Water rate STB/d	ST Gas rate mmscf/d	ST GOR SCF/STB	ST WCUT %	FL Gas rate (...) mmcf/d	Branch	FL WCUT %
1	Completion	732.5363	150.2335	10.00354	6.002124	4.001416	0.005774047	962.0001	40	0.000102961	COL37	37.73003
2	Flowline	51	70	10.00354	6.002124	4.001416	0.005774047	962.0001	40	0.001703188		39.83021
3	Manifold	51	70	9.995956	5.997574	3.998383	0.00576967	962.0001	40	0.001701896		39.83021
4	COL37	51.01091	71.60294	10.00354	6.002124	4.001416	0.005774047	962.0001	40	0.001708215		39.81764

Tabla 6.2. Perfiles hidráulicos. Tomado del software especializado.

Equipment	Type	Total distance ft	Elevation ft	Pressure psi	Temperature degF	Fluid mean... ft/s	Liquid holdup %	EVR	G-L Pattern
		0	-5450	1214.7	150				Undefined
Completion	Completion	0	-5450	732.5363	150.2335				Undefined
Casing	Tubing	0	-5450	732.5363	150.2335	0.01416126	92.4	0.0006621238	Segregated
	Tubing	43	-5407	717.5508	148.4946	0.014354	92.4	0.0006666144	Segregated
Tubing	Tubing	43	-5407	717.5508	148.4946	0.01585166	92.4	0.0007360371	Segregated
	Tubing	875	-4575	425.7512	137.0097	0.02446712	92.4	0.000914437	Segregated
RodPump	Rod Pump	875	-4575	1577.377	142.9823				Undefined
Flowline	Flowline	875	-4575	1577.377	142.9823	0.009017074	92.4	0.0005551306	Segregated
	Flowline	1450	-4000	1379.858	128.3035	0.009481533	92.4	0.0005692482	Segregated
	Flowline	2450	-3000	1031.974	114.6864	0.0111843	92.4	0.0006182538	Segregated
	Flowline	3450	-2000	678.8252	100.3268	0.01508947	92.4	0.0007181238	Segregated
	Flowline	4450	-1000	320.5174	85.96488	0.02881524	92.4	0.0009923696	Segregated
	Flowline	5450	0	51.01091	71.60294	0.1684832	37.83726	0.00239961	Segregated
	Flowline	5450	0	51.01091	71.60294	0.3287551	61.35052	0.004679031	Strat. Smooth
	Flowline	5994.5	0	51.00546	70	0.327788	61.35751	0.004672143	Strat. Smooth
	Flowline	6539	0	51	70	0.3278228	61.3572	0.004672392	Strat. Smooth

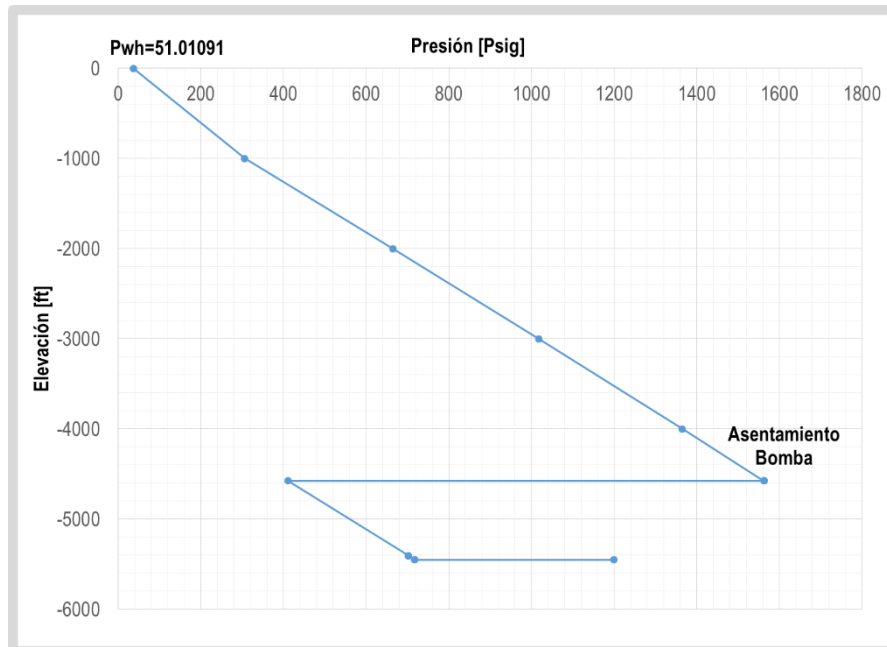


Ilustración 6.4. Perfil de Elevación Vs Presión

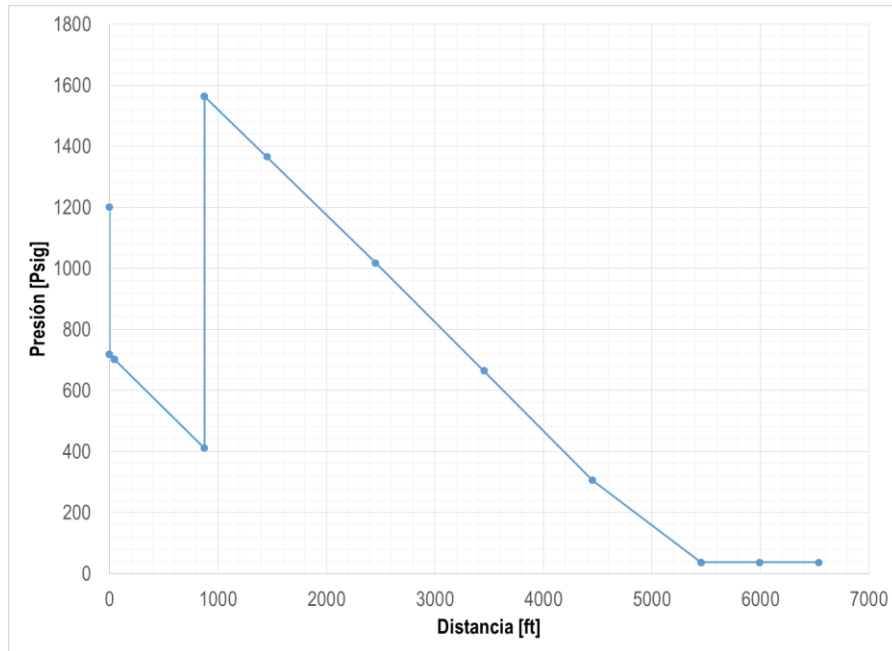


Ilustración 6.5. Perfil de Presión Vs Distancia.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

En este capítulo se expondrán los resultados obtenidos por la simulación del flujo en ambas líneas. Primero, se presentan los datos reales medidos en campo por los operarios del campo escuela colorado. Se sacó un promedio de las mediciones hechas en cabeza de pozo durante el mes de octubre de 2012 y se tiene una presión en cabeza de pozo de 50 psi.

7.1 RESULTADOS CON 0 ENSUCIAMIENTO.

En la imagen 7.1 se visualizan las presiones obtenidas. Se obtuvo una presión en cabeza de 56 psi. El error respecto a la medición en campo es de 10%.

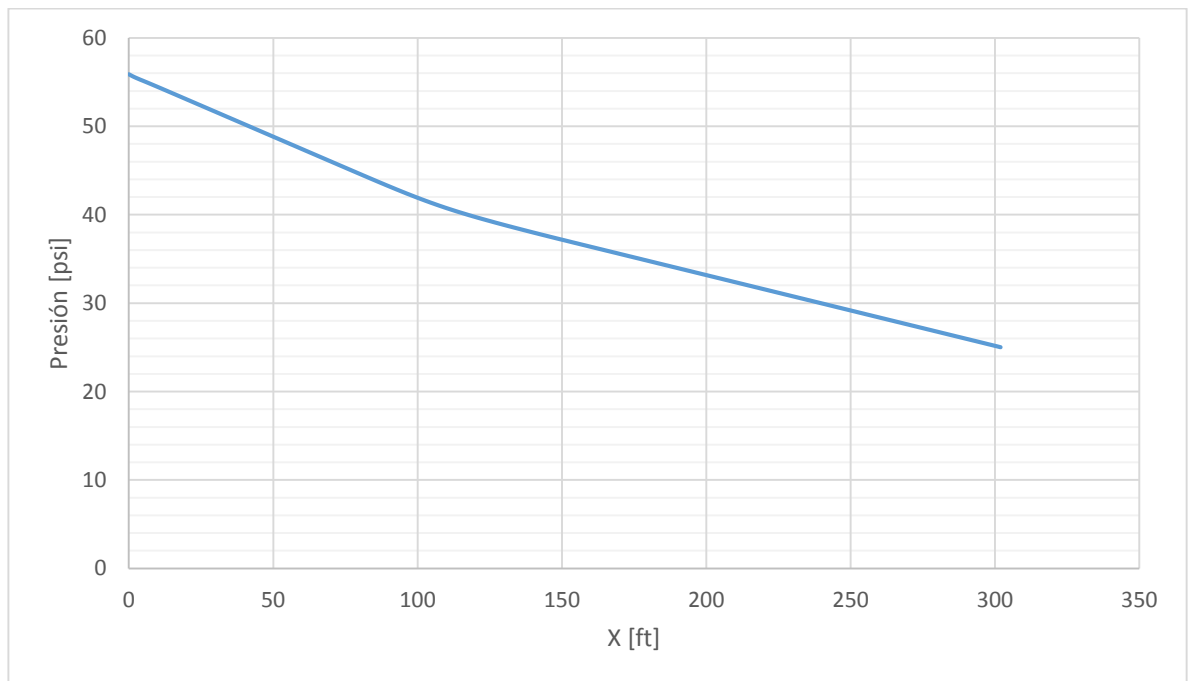


Ilustración 7.1. Grafica presión contra distancia.

En la imagen 7.1 se tiene el perfil de presión respecto a la distancia. Se obtuvo un buen rendimiento (bajo error) en la simulación asumiendo que la tubería no estaba taponada en ningún porcentaje por parafinas y que el flujo en el campo era continuo.

Lo anterior debido principalmente al bajo caudal y a su intermitencia. El bajo caudal es debido a que al asumir flujo continuo con una producción de 14 barriles por día difiere significativamente de la realidad teniendo en cuenta que el sistema de bombeo mecánico toma el aproximadamente el doble del tiempo en producir un barril respecto al flujo natural y continuo, es decir esos 14 barriles en realidad son producidos en medio día (Esto depende del tiempo que tome el pistón en recorrer la distancia del pozo).

Sin embargo, el perfil de presión es lógico en cuanto a lo esperado en caída de presión. Los perfiles de velocidad muestran un comportamiento típico del flujo, el centro de la tubería tiene mayor velocidad. La velocidad del gas es mucho mayor a la del crudo y más estable en el centro de la tubería, lo cual podría indicar un flujo anular.

En la imagen 7.2 y 7.4 se observa la velocidad de una partícula fluida de aceite y de gas que fluyen en el centro de la tubería. Se tiene una velocidad máxima en el centro de la tubería de aproximadamente $22,4 \text{ ft s}^{-1}$ y 23 para el gas.

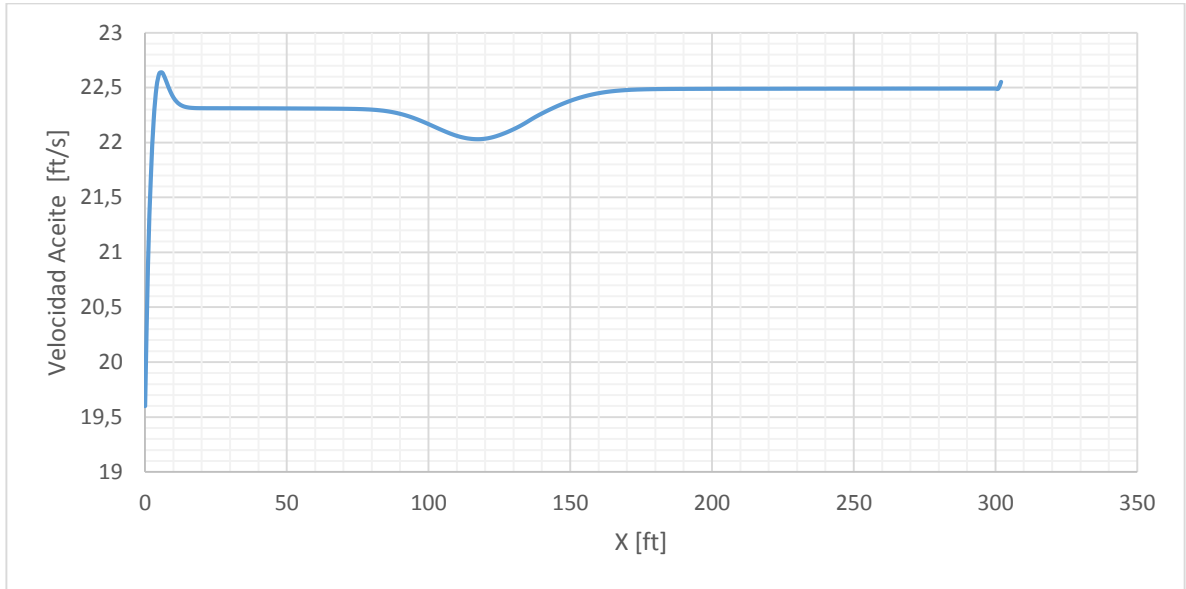


Ilustración 7.2. Gráfica velocidad contra distancia para el aceite.

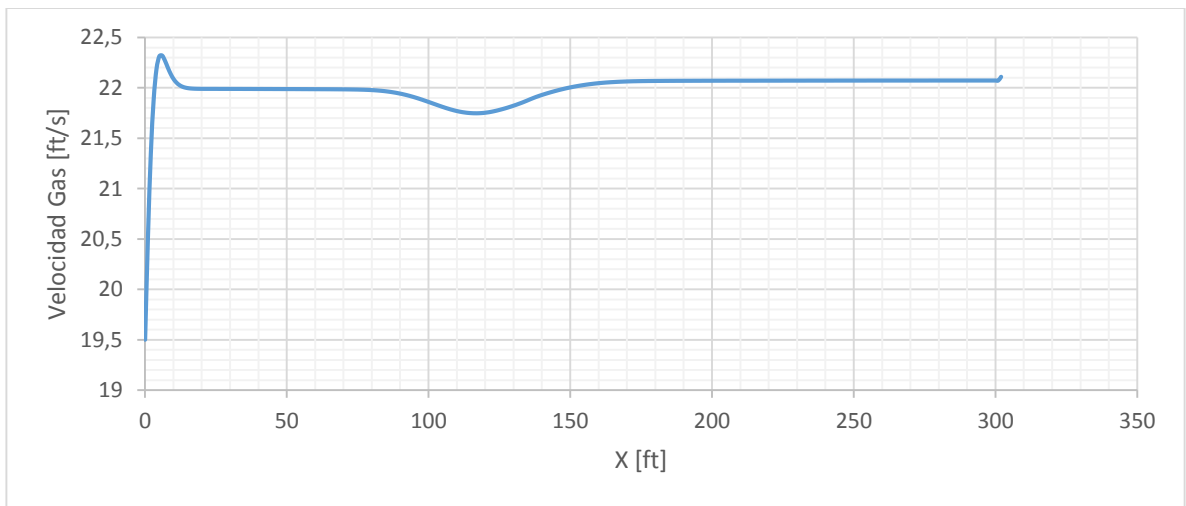


Ilustración 7.3. Gráfica velocidad contra distancia para el gas

7.2 RESULTADOS 10% DE ENSUCIAMIENTO.

Con el 10% de ensuciamiento se observa un aumento de presión de una presión en cabeza, el cual marca un error del 16.7% es decir a 59.7 psi como se observa en la figura 7.5.

En la imagen 7.5 y 7.6 se observa la velocidad de una partícula fluida de aceite y de gas que fluyen en el centro de la tubería. Se tiene una velocidad máxima en el centro de la tubería de aproximadamente $22,4 \text{ ft s}^{-1}$ para el aceite y $22,2$ para el gas.

Los resultados obtenidos para un ensuciamiento del 10% son alejados de la realidad, ya que genera presiones altas con respecto a las reales. Es sabido en la realidad que campo escuela presenta graves problemas de precipitación de parafinas y aún su presión de fondo fluyente es apta para la producción. Sin embargo, la simulación muestra un resultado lógico en cuanto que el aumento de la presión en la línea de producción es un resultado evidente de la precipitación y es la principal causante de la declinación de la producción allí.

Se observa un perfil de presión típico y esperado para esta simulación. Si se crea un perfil de velocidad para un plano en el centro de la geometría se obtendría un único perfil de velocidad y turbulencia. Sin embargo, en estos resultados se registran los perfiles de diferentes líneas de flujo generadas para el estudio 3D. Aun así, se puede observar la tendencia de la velocidad a aumentar, si comparamos este perfil con el de velocidad obtenido en el 3D, se puede concluir que los vectores de velocidad cercanos al centro tienden a acelerar debido a la fuerza generada por la diferencia de presión, mientras los cercanos a la pared desaceleran por el efecto de la fricción.

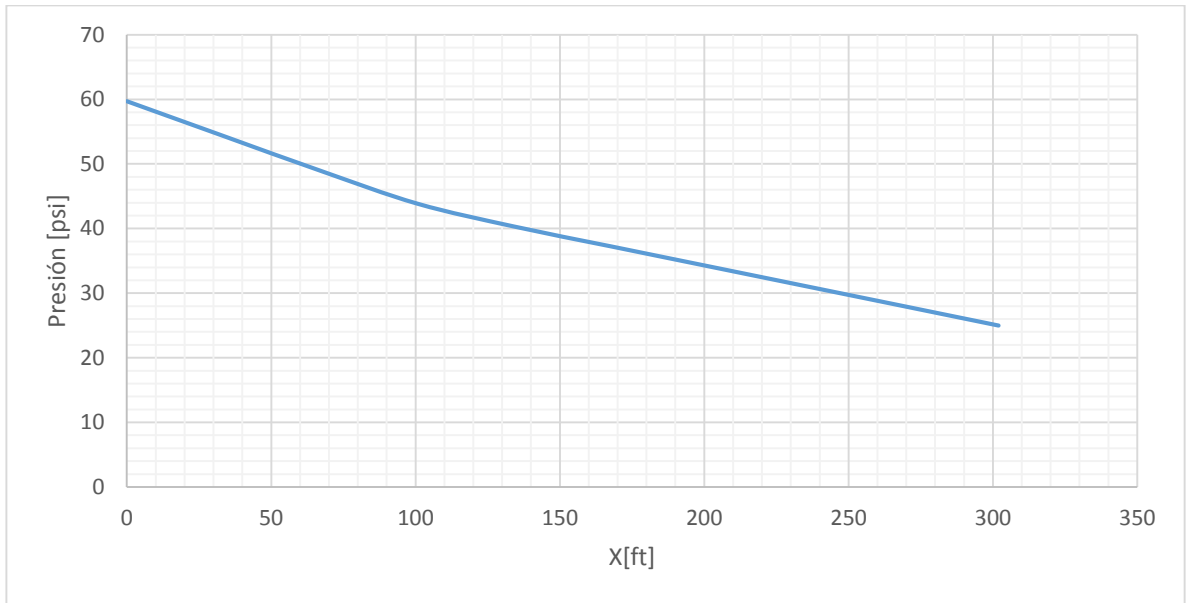


Ilustración 7.4 perfil de presión con reducción de diámetro del 10%.

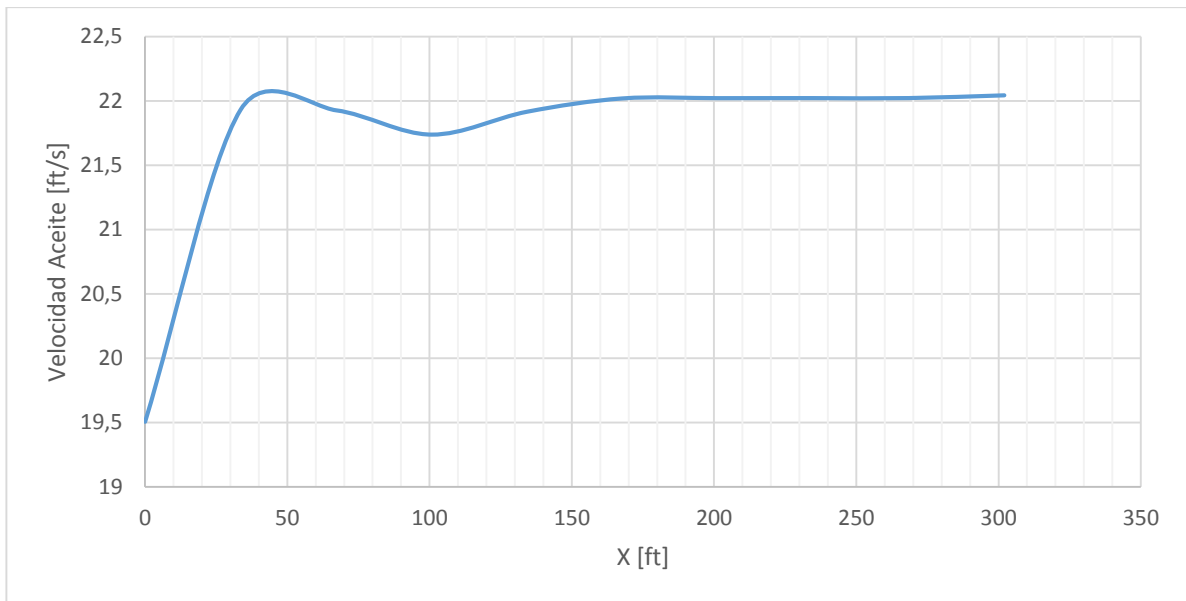


Ilustración 7.5 Velocidad aceite con ensuciamiento del 10%

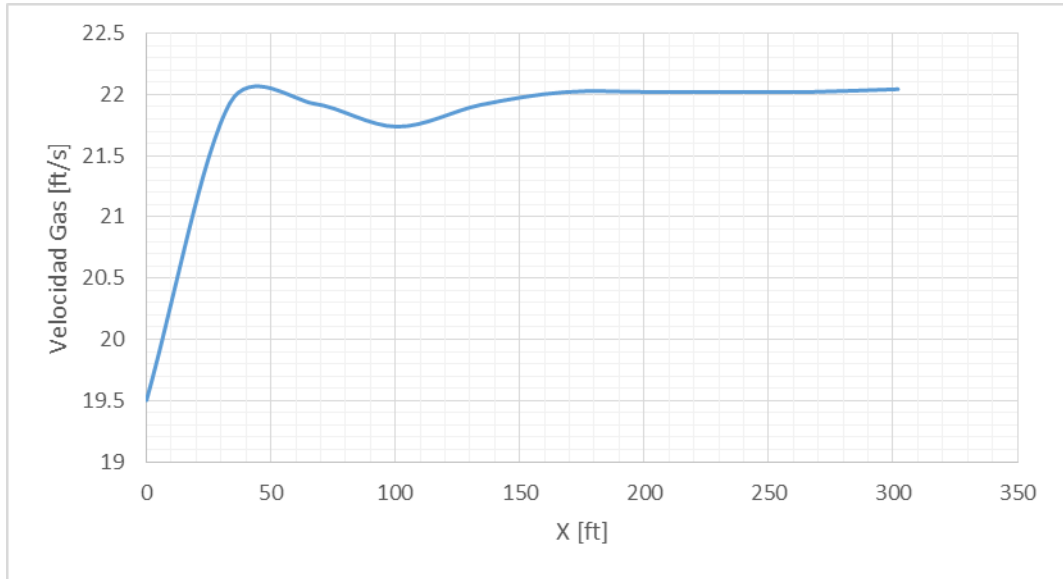


Ilustración 7.6 Velocidad del gas con ensuciamiento del 10%

Si siguiendo con el análisis, se presentan los resultados de las presiones en cabeza obtenidas para las distintas metodologías y se calcula el error relativo, como se muestra en la tabla 7.1

Tabla 7.1. Resultados, presión en cabeza obtenidas.

Pwh Software especializado [psi]	Pwh Software CFD – 0 Ensuciamiento [psi]	Pwh software CFD – 10% Ensuciamiento [psi]	%Error – 0 ensuciamiento o.	%Error – 10 ensuciamiento o.
51	56	59.7	8%	14.7%

8. CONCLUSIONES.

- Ansys CFX no es un software especializado en ingeniería de producción, lo cual dificulta la obtención de los datos. Porque no son los usados de forma estándar en la industria.
- Ansys CFX sería una herramienta útil para la ingeniería de producción si permitiera simular el comportamiento de los fluidos teniendo en cuenta el sistema de levantamiento artificial, sin embargo un software cfd de código abierto permitiría obtener simulaciones más reales.
- Ansys CFX se limita al tener sistemas con geometrías demasiado grandes y velocidades de flujo pequeñas.
- Ansys CFX realizaría simulaciones mucho más coherentes con la realidad en campos con flujo continuo y altos caudales.
- Es fácil simular en Ansys CFX el flujo multifásico, en comparación con otros softwares cfd, sin embargo, para la industria petrolera resulta mejor el uso de software como Olga o PipeSym.

8. RECOMENDACIONES.

- Realizar la misma simulación para tramos más pequeños de tubería para minimizar el efecto del bajo caudal.
- Al momento de crear el mallado para tuberías sencillas como líneas de flujo, se debe usar un mallado menos fino, lo cual aumentaría la capacidad de cálculo sin afectar la precisión de la simulación
- Usar una metodología CFD para un campo con flujo continuo y presencia de agua.
- Crear un código CFD que permita simular el flujo desde el fondo de pozo, teniendo en cuenta la presión ejercida por el pistón de un sistema de bombeo mecánico.
- Usar un software de código abierto para adaptar la simulación usando un perfil de caudal típico del bombeo mecánico, usando como datos de partida los resultados obtenidos con el software especializado.

9. BIBLIOGRAFÍA.

- Ruban, L. Classical Fluid Dynamics, Oxford University Press, Oxford United Kingdom (2014).
- Cristancho D, Hoyos J. Procedimientos Metodológicos Para la Caracterización de Fluidos de Campos Maduros, Universidad Industrial De Santander, Bucaramanga Colombia (2008).
- Restrepo S. Solución de Navier-Stokes Por Diferencias Finitas. (2010).
- Versteeg W. Computacional Fluid Dynamics, Longman Scientific And Tecnical, Burnt Mill (1995),
- Pérez R. Evaluación del Comportamiento Hidráulico del Sistema de Recolección de Fluidos del Campo Colorado, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga (2012).
- K. Mohammadzadeh, S.H. Hashemabadi, S. Akbari. Computational Fluid Dynamics (CFD) Research Laboratory, School of Chemical Engineering, Iran University of Science and Technology, 16846 Tehran, Iran