



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**PETROSOFT: PAQUETE DE SOFTWARE
PARA LA INGENIERIA PETROLERA**

MATERIAL DIDÁCTICO

Que para obtener el título de

Ingeniero Petrolero

P R E S E N T A

Víctor Enrique Meza Puente

ASESOR DE MATERIAL DIDÁCTICO

Dr. Simón López Ramírez



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

CONTENIDO

| | | |
|-------|----------------------------------------------------|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2 | JUSTIFICACIÓN | 1 |
| 3 | OBJETIVOS..... | 2 |
| 4 | DESCRIPCIÓN..... | 2 |
| 4.1 | Tecnologías Empleadas..... | 2 |
| 4.1.1 | Lenguaje de Programación <i>C#</i> | 2 |
| 4.1.2 | Entorno de Desarrollo <i>Visual Studio</i> | 3 |
| 4.1.3 | Generador de Documentación <i>Sandcastle</i> | 3 |
| 4.1.4 | Lenguaje de Marcado <i>XML</i> | 3 |
| 4.1.5 | Software <i>Sandcastle Help File Builder</i> | 3 |
| 4.2 | Documentación..... | 4 |
| 4.2.1 | Tutoriales | 4 |
| 4.3 | Módulos | 5 |
| 4.3.1 | Convertor de Unidades..... | 6 |
| 4.3.2 | Paquete de Métodos Numéricos | 7 |
| 4.3.3 | Correlaciones PVT | 8 |
| 4.3.4 | Curvas IPR..... | 10 |
| 4.3.5 | Análisis de Registro de Pozos..... | 11 |
| 4.3.6 | Permeabilidades Relativas | 12 |
| 5 | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... | 13 |
| 6 | REFERENCIAS..... | 14 |

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad el desarrollo de tecnologías computacionales son de vital importancia para la vida moderna, para favorecer el desarrollo de tales tecnologías se han puesto a la disposición de científicos, ingenieros, y programadores herramientas que permiten la ampliación de estas tecnologías, tales como son los lenguajes de programación, entornos de desarrollo, y documentadores de código. Recientemente, se han logrado avances significativos que mejoran la disponibilidad y versatilidad de estas herramientas. Sin embargo, considero que la facultad de ingeniería no ha aprovechado al máximo el potencial de estas herramientas; con el fin de ayudar a remediar esta situación, como aportación a la facultad se desarrolló material didáctico que se fundamenta en la siguiente hipótesis: Desarrollar un paquete de software para la ingeniería petrolera permitirá mejorar el proceso enseñanza aprendizaje.

El material didáctico desarrollado consiste en un paquete de software que servirá de apoyo para las siguientes asignaturas: Análisis Numérico, Productividad de Pozos, Petrofísica y Registro de Pozos, Propiedades de los Fluidos Petroleros, Flujo Multifásico en Tuberías, y Recuperación Secundaria y Mejorada.

Las principales funcionalidades de este paquete de software son las siguientes: conversión de unidades, análisis numérico, correlaciones PVT, cálculo de curvas IPR, análisis de registros geofísicos de pozo, correlaciones para permeabilidad relativa, y cálculos de frente de avance.

En los apartados siguientes se describen las capacidades principales, el método de desarrollo, y tecnologías empleadas, del paquete de software para ingeniería petrolera *Petrosoft*.

2 JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, los ingenieros rara vez realizan cálculos de ingeniería manualmente, generalmente hacen uso de paquetes de software especializado como instrumentos indispensables en el ejercicio de su profesión, sin embargo, durante la formación académica de dichos ingenieros la exposición que tienen los alumnos a capacitación respecto al uso y especialmente el desarrollo de este tipo de software es limitado. Este material didáctico pretende ser una ayuda que permita a los alumnos familiarizarse con software especializado, y sobretodo que adquieran los recursos, herramientas, y capacitación necesaria para el desarrollo de sus propias herramientas de software.

Asimismo, durante la explicación de conceptos teóricos mediante la resolución de ejercicios, los profesores pueden beneficiarse de contar con software que les sea útil para explicar los conceptos enseñados, o resolver rápidamente ejercicios propuestos, y que tengan a su disposición el código fuente para que puedan ampliar, o ajustar el software a sus necesidades didácticas particulares.

3 OBJETIVOS

- Crear recursos de software que estén a la disposición tanto del personal académico como del alumnado.
- Proveer una plataforma general para la posterior continuación de desarrollo de software especializado para ingeniería petrolera.

4 DESCRIPCIÓN

4.1 Tecnologías Empleadas

Para el desarrollo de cualquier proyecto de software, se requieren de herramientas que faciliten su implementación, a pesar de que en el mercado existen una gran variedad de herramientas disponibles, a continuación se listan las que fueron consideradas las mejores para el trabajo a realizar y porque.

Para el desarrollo de este paquete de software se hizo uso de las siguientes tecnologías: lenguaje de programación C#, entorno de desarrollo *Visual Studio*, generador de documentación *Sandcastle*, lenguaje de marcado *XML (Extensible Markup Language)*, y software *Sandcastle Help File Builder (SHFB)*.

4.1.1 Lenguaje de Programación C#

El paquete de software fue desarrollado en el lenguaje de programación C# debido a su acceso a la estructura (*framework*) .NET que entre sus ventajas está el acceso a librerías para la rápida implementación de interfaces gráficas. Además C# por ser un lenguaje orientado a objetos dispone de ciertas características que facilitan la legibilidad y mantenimiento del código desarrollado tales como encapsulación, propiedades, y documentación en lenguaje de marcado XML.

4.1.2 Entorno de Desarrollo *Visual Studio*

Visual Studio es un entorno de desarrollo sofisticado que facilita la generación de aplicaciones proveyendo funciones tales como: diseñador de formas, completador de código inteligente (*Intellisense*), *debugger*, y refactorización. Además *Visual Studio* es el entorno de desarrollo por excelencia para C#.

4.1.3 Generador de Documentación *Sandcastle*

Sandcastle es un software de Microsoft que permite la generación automática de documentación en formato MSDN a partir de código compilado (*assemblies*) y de los comentarios en lenguaje XML escritos en el código fuente usando tecnología de reflexión (*reflection*). Esta tecnología fue usada para la generación de la referencia API de la documentación; donde se describen las clases, métodos, y propiedades de las librerías programadas.

4.1.4 Lenguaje de Marcado XML

Para la documentación del código fuente se empleó el lenguaje de marcado XML (*Extensible Markup Language*), lo cual aporta dos principales ventajas: 1) la integración de los comentarios escritos al completador inteligente de código (*Intellisense*), y 2) la generación automática de documentación con el uso de un generador de documentación tal como *Sandcastle*.

4.1.5 Software *Sandcastle Help File Builder*

Por último también se hizo uso del software *Sandcastle Help File Builder (SHFB)* el cual provee una interfaz gráfica e integración del generador de documentación *Sandcastle* con el entorno de desarrollo *Visual Studio*. Esta integración provee un entorno de desarrollo más cómodo y productivo, ya que a la vez que se escribe el código fuente de la aplicación a desarrollar, también se puede desarrollar en el mismo *Visual Studio* la documentación conceptual, y documentación API que va a acompañar dicha aplicación, así como la organización (tabla de contenido) y diseño que va a tener dicha documentación, he de mencionar que la documentación generada de esta manera debe ser escrita en lenguaje XML.

4.2 Documentación

Para el buen mantenimiento de un paquete de software es indispensable la elaboración de documentación comprensible, que explique lo más claramente posible el funcionamiento interno de dicho software. Para este propósito se hizo uso de las capacidades de documentación del lenguaje C# por medio del lenguaje de marcado XML, así como de las herramientas *Sandcastle* y *Sandcastle Help File Builder*. Con lo cual se documentó el código fuente, y se elaboró la documentación conceptual y API (*Application Programming Interface*) correspondiente.

Cada clase, método, propiedad, y variable están debidamente documentados a lo largo del código fuente usando el lenguaje de marcado XML. Además, cada módulo de software cuenta con un archivo de ayuda .chm (*Compiled HTML Help File*) accesible desde la interfaz gráfica que contiene la siguiente documentación:

- Documentación Conceptual: Descripción de las principales funcionalidades del módulo, así como tutoriales.
- Documentación API: Descripción de cada clase, método (función), y propiedad del módulo, así como organigramas y diagramas de flujo que describen la relación entre cada uno de estos elementos.

4.2.1 Tutoriales

Junto con cada módulo de software se incluyeron tutoriales que ayudan al usuario familiarizarse rápidamente con las capacidades del módulo en cuestión. Los tutoriales guían al usuario paso a paso en la realización de cálculos de problemas de ingeniería petrolera, dichos ejercicios fueron obtenidos de distintas fuentes bibliográficas (listadas al final de este documento).

En la **figura 4.1** se muestra un ejemplo de documentación conceptual para el módulo de correlaciones PVT, donde se guía al usuario a través de cálculos de propiedades PVT para gas seco.

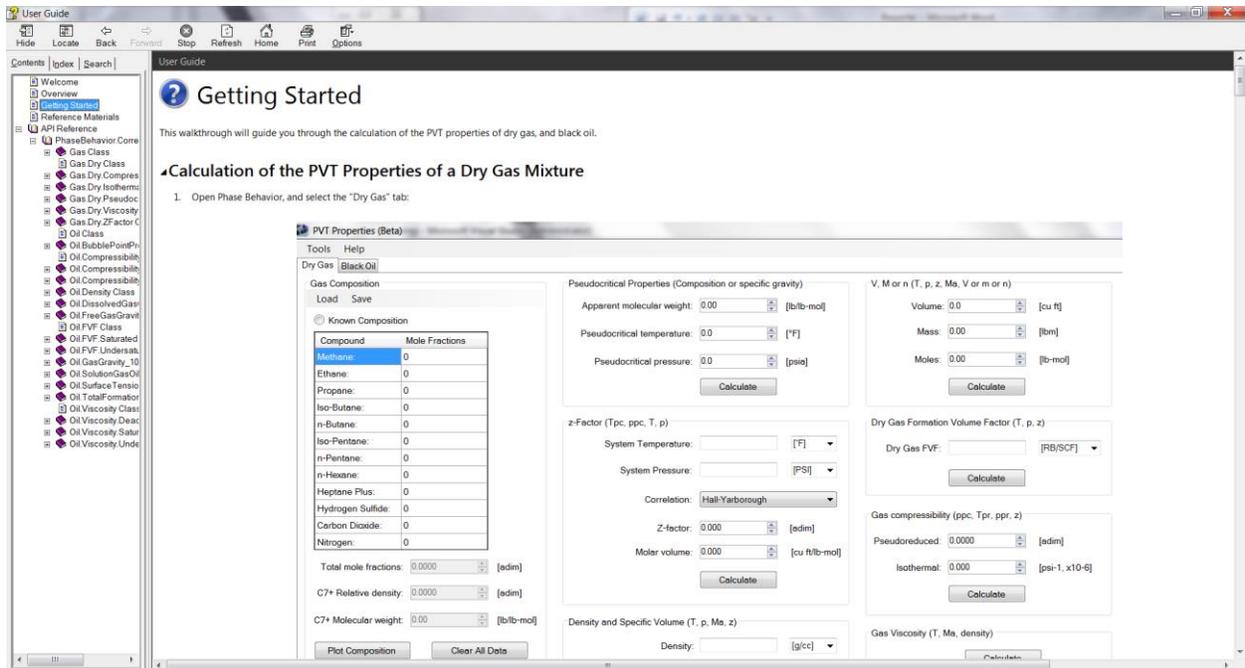


Figura 4.1 - Ejemplo de documentación conceptual.

4.3 Módulos

Este paquete de software está dividido en seis módulos: Un conversor de unidades, un paquete de métodos numéricos, cálculo de propiedades PVT por medio de correlaciones, cálculo de curvas IPR, análisis de registros geofísicos de pozo, y cálculo de permeabilidades relativas. En la **figura 4.2** se muestra la interfaz gráfica principal del paquete de software Petrosoft, desde donde se inician todos los módulos disponibles.

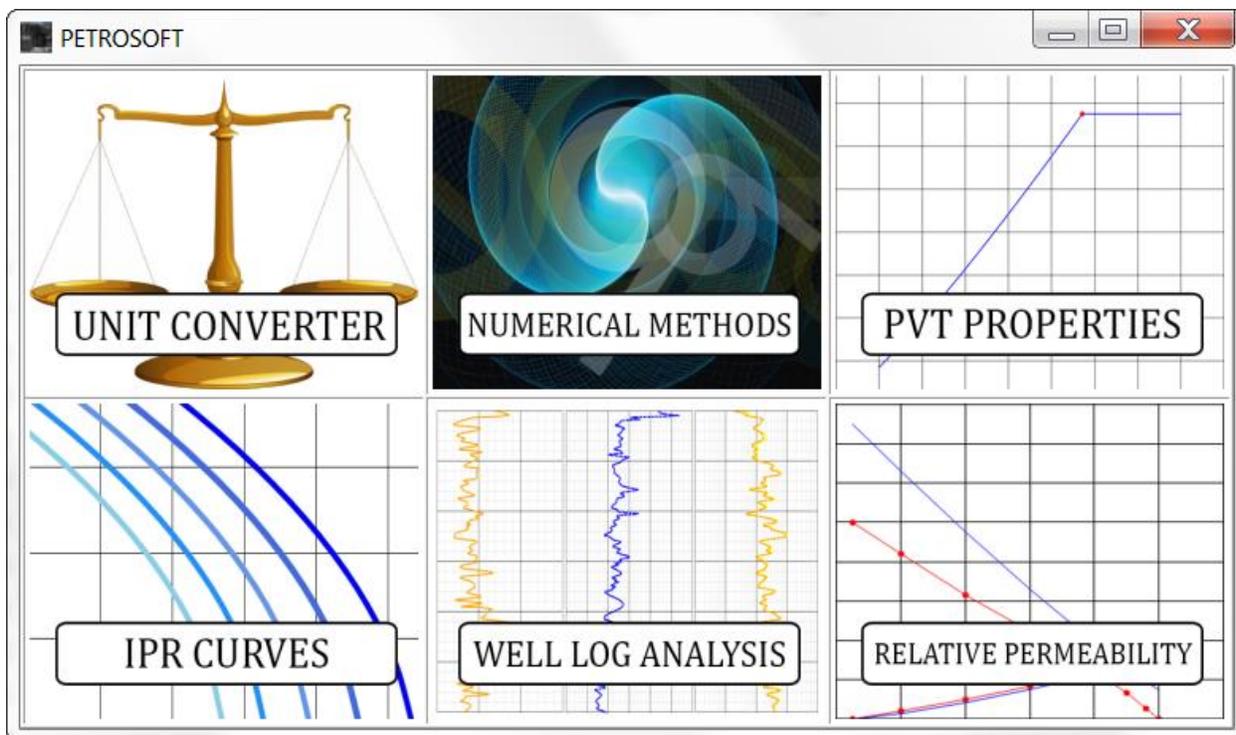


Figura 4.2 - Muestra de la interfaz principal del paquete de software.

4.3.1 Conversor de Unidades

Este módulo realiza conversiones entre distintas unidades comúnmente utilizadas en cálculos de ingeniería petrolera. En la **figura 4.3** se muestra la interfaz gráfica del conversor de unidades. Este módulo contiene:

- Conversión de Unidades: Gravedad específica, factor de volumen de gas, factor de recuperación, etc.
- Despliegue de constantes comúnmente utilizadas en cálculos en diferentes unidades: Constante universal de los gases, salinidad del agua, etc.

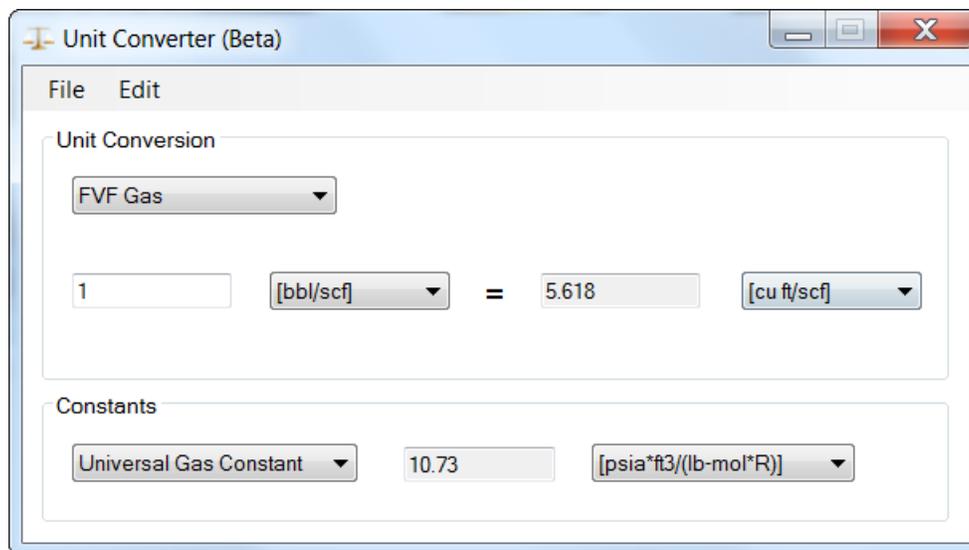


Figura 4.3 - Interfaz gráfica del conversor de unidades.

4.3.2 Paquete de Métodos Numéricos

Este módulo contiene:

- Raíces de Ecuaciones: Método de Newton-Raphson (no se requiere proporcionar la derivada de la ecuación, se utiliza diferenciación numérica para obtener los valores necesarios).
- Solución de Sistemas de Ecuaciones Lineales: Método directo de Eliminación de Gauss, y método iterativo de Gauss-Seidel.
- Ajuste de Curvas: Regresión por Mínimos Cuadrados, Interpolación por método de Newton, y Splines Cúbicos.
- Diferenciación e Integración Numérica: Diferenciación numérica por medio de Diferencias Finitas Centrales hasta cuarto orden, Integración Numérica por medio del método de Cuadratura Adaptiva.
- Solución de Sistemas de Ecuaciones Diferenciales Ordinarias: Solución de una ecuación o sistemas de ecuaciones diferenciales por medio del método de Runge-Kutta de Cuarto Orden.

En la **figura 4.4** se muestra la interfaz gráfica del paquete de métodos numéricos, para el caso en que se seleccionen raíces de ecuaciones; la interfaz gráfica varía en caso de que se seleccione solución de sistemas lineales de ecuaciones, ajuste de curvas, diferenciación e integración numérica, o solución de sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias.

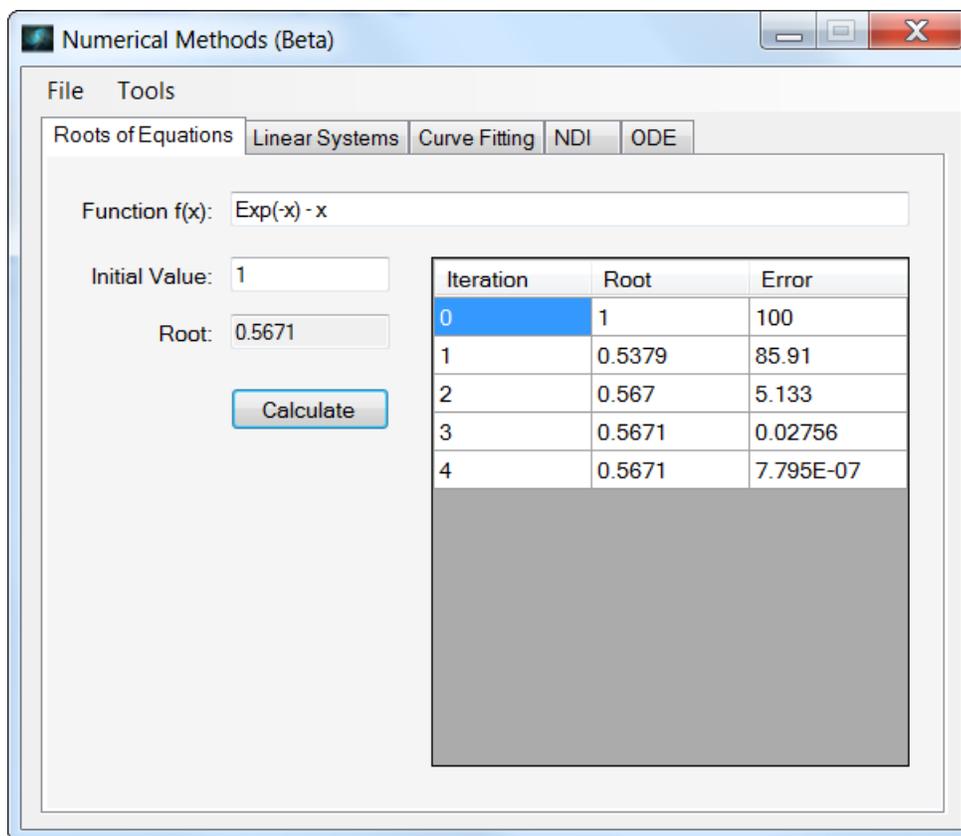


Figura 4.4 - Interfaz gráfica del paquete de métodos numéricos.

4.3.3 Correlaciones PVT

Este módulo está dividido en dos secciones: correlaciones para gas seco, y correlaciones para aceite negro.

Correlaciones para Gas Seco

Ingreso de propiedades del gas cuando la composición es conocida y cuando es desconocida, en caso de ser desconocida se proporcionan las correlaciones de Sutton y Standing. Cálculo de propiedades pseudocríticas. Cálculo del factor z utilizando correlaciones de Hall-Yarborough, Dranchuk-Abu-Kassem, y Dranchuk-Purvis-Robinson. Cálculo de la densidad y volumen específico del gas. Cálculo del volumen, masa, y número de moles. Cálculo del factor de volumen del gas. Cálculo de la compresibilidad del gas. Cálculo de la viscosidad del gas por medio de la correlación de Lee.

Correlaciones para Aceite Negro

Cálculo de la relación de solubilidad, presión de burbuja, factor de volumen del aceite, gravedad específica del gas disuelto, gravedad específica del gas libre, densidad del aceite, viscosidad del aceite, compresibilidad del aceite, y tensión superficial. Estos cálculos se realizan por medio de las siguientes correlaciones: Vazquez-Beggs, Kartoatmodjo-Schmidt, Standing, Lasater, Glaso, Katz, Beggs-Robinson, Baker-Swerdlhoff, Abdul-Majeed.

En la **figura 4.5** se muestra la interfaz gráfica de este módulo para el caso en que se seleccionen correlaciones para aceite negro, la interfaz gráfica varía en caso de que se seleccione correlaciones para gas seco.

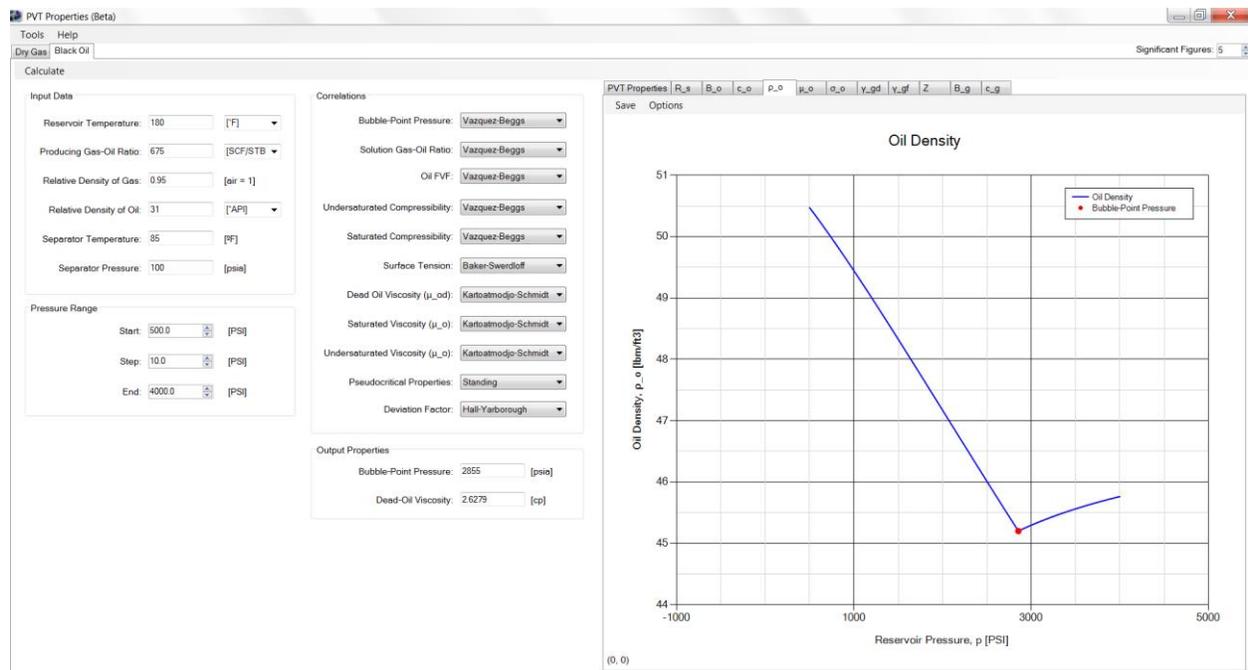


Figura 4.5 - Interfaz gráfica del módulo para correlaciones PVT.

4.3.4 Curvas IPR

Este módulo calcula curvas IPR para yacimientos de aceite de aceite bajo saturado y saturado, así como para yacimientos de gas.

Para yacimientos de aceite este módulo calcula curvas IPR con los métodos: Vogel, J-Constante, Standing, Wiggins, Fetkovich, y Klins-Clark. Estas curvas se calculan a partir de una prueba de producción, datos de propiedades del yacimiento, datos de permeabilidad relativa, o de una prueba "Flow-after-Flow". Se pueden ingresar una o múltiples pruebas de producción.

Para yacimientos de gas se disponen de los siguientes métodos: *Back Pressure*, *LIT Pressure-Squared*, y *LIT Pressured-Quadratic*.

En la **figura 4.6** se muestra la interfaz gráfica principal de este módulo.

The screenshot shows the 'Well Performance (Beta)' software interface. The 'IPR' tab is active. The 'Reservoir' is set to 'Oil', 'Method' is 'Vogel', and 'Data available' is 'Production test'. Under 'Well-bore and PVT Data', the following values are entered: Average reservoir pressure: 2,500 [psig], Future reservoir pressure: 2,200 [psig], Bubble-point pressure: 4,000 [psig], Stabilized oil flow rate: 350.0 [STB/day], and Stabilized well bore pressure: 2,000 [psig]. The 'Bottom-Hole Flowing Pressure Data' section has the radio button 'Enter values in the table' selected. Below it is a table with the following data:

| | pwf [psig] | Qo [STB/day] |
|-----|------------|--------------|
| ▶ 1 | 2500 | 0 |
| 2 | 2300 | 148 |
| 3 | 2100 | 285 |
| 4 | 1900 | 412 |
| 5 | 1700 | 527 |
| 6 | 1500 | 632 |
| 7 | 1300 | 725 |
| 8 | 1100 | 808 |

Below the table, the radio button 'Set the parameters to make a range' is selected. The parameters are: Start: 2500.00 [psig], End: 0.00 [psig], and Step: 200.00 [psig]. At the bottom of the window are three buttons: 'Calculate', 'Graph', and 'Clear'.

Figura 4.6 - Interfaz gráfica para el cálculo de curvas IPR.

4.3.5 Análisis de Registro de Pozos

Este módulo puede analizar y graficar los siguiente tipos de registros: Registros de porosidad (neutrón, densidad, y sónico), rayos gamma, registros eléctricos (laterolog profundo, y laterolog superficial).

Este módulo cuenta con métodos que puede realizar los siguientes cálculos: Determinación de los parámetros M-N, cálculo de porcentaje mineralógico con el método de lito-porosidad, cálculo del exponente de cementación m, porosidad de flujo, saturaciones (a partir de la ecuación de Archie), tortuosidad, coeficiente de partición, conductividad.

Y finalmente este módulo puede realizar los siguientes crossplots: M-N, Rasmus, Pickett.

En la **figura 4.7** se muestra la interfaz gráfica de este módulo para el caso en que se realizan *cross-plots*, la interfaz varía cuando se selecciona carga de datos, o cálculos de propiedades petrofísicas.

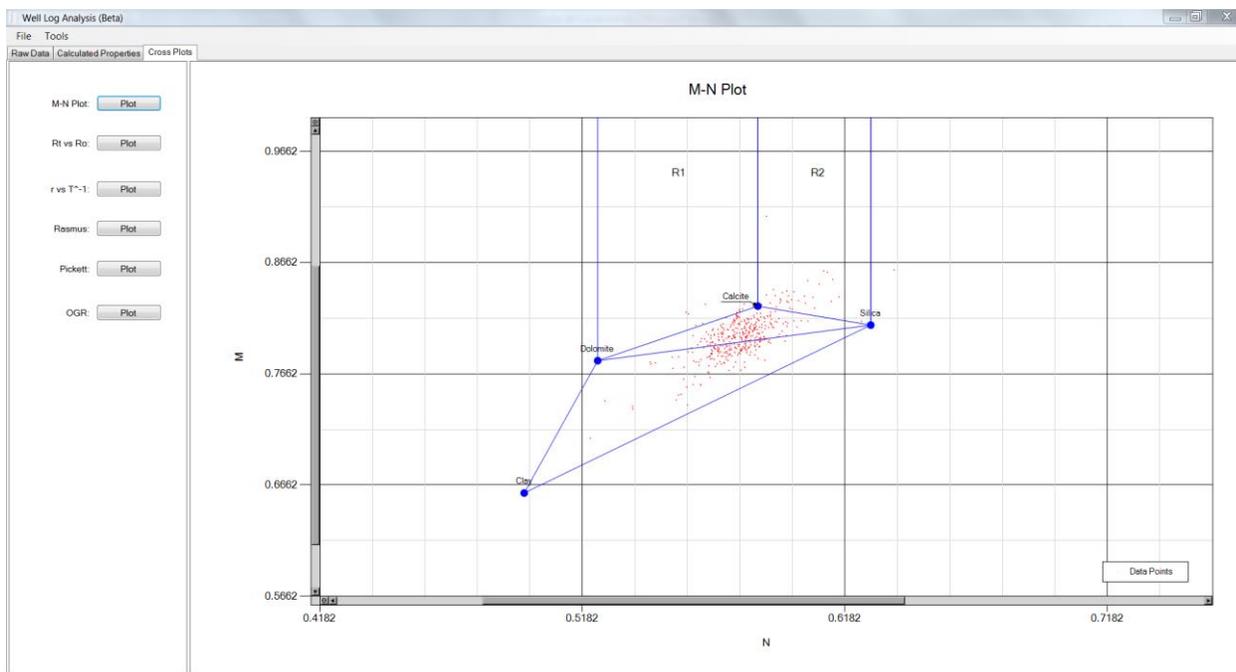


Figura 4.7 – Interfaz gráfica del módulo para el análisis de registros geofísicos de pozo.

4.3.6 Permeabilidades Relativas

Este módulo permite el cálculo de permeabilidades relativas por medio de las siguientes correlaciones: Corey, Pirson, Pirson-Modificado, Chierici, y Lomeland. Así como la comparación entre los resultados obtenidos con estas correlaciones, y datos medidos.

Este módulo también permite hacer evaluaciones comunes para la recuperación mejorada a partir de datos de permeabilidad relativa tales como flujo fraccional y frentes de avance.

En la **figura 4.8** se muestra la interfaz gráfica de este módulo cuando se seleccionan las gráficas de frente de avance, esta interface varía cuando se seleccionan las gráficas de permeabilidad relativa, flujo fraccional, o la gráfica de la derivada del flujo fraccional.

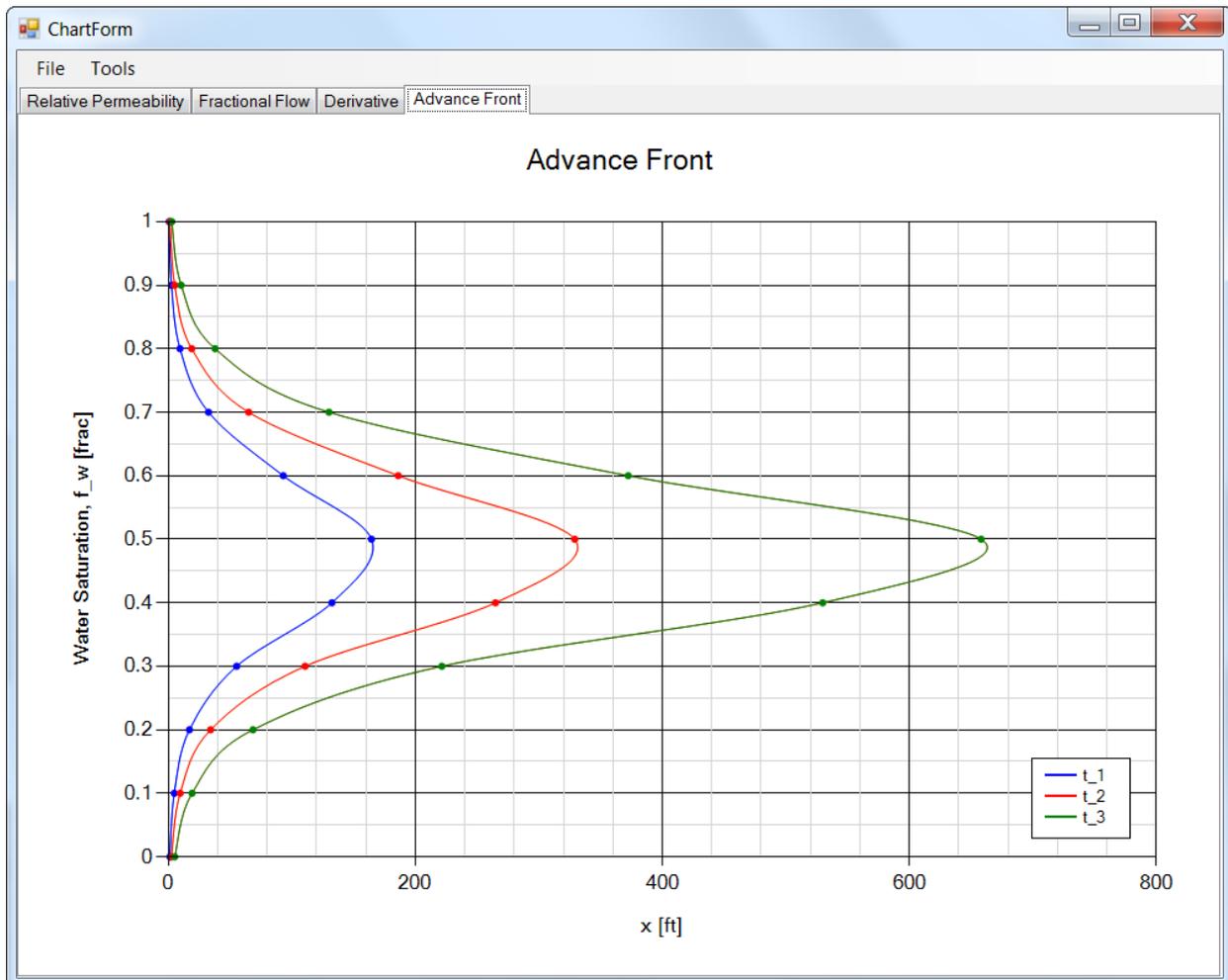


Figura 4.8 - Interfaz gráfica del módulo para cálculo de permeabilidades relativas.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1) Se desarrollo un paquete de software para ingeniería petrolera que servirá como plataforma para el continuo desarrollo de software propio dentro de la facultad.
- 2) Se documentó cabalmente alrededor de 11,000 líneas de código conciso con comentarios, ejemplos, diagramas de flujo, y organigramas (este número de líneas de código equivaldría a un documento de 275 páginas, con 40 líneas de texto por cada página).
- 3) Se desarrolló un paquete de software con diversas aplicaciones explícitamente útiles para seis asignaturas del programa de licenciatura de ingeniería petrolera.
- 4) Los módulos desarrollados pueden apoyar el proceso de enseñanza aprendizaje en otras asignaturas del plan de estudios además de las listadas en el trabajo, ya que se dispondría de herramientas básicas para el desarrollo de proyectos con mayor complejidad, además de proveer de visualizaciones gráficas para comparar escenarios.
- 5) El programa sirve de formato, estilo, y referencia para desarrollar y documentar futuras aplicaciones.

El desarrollo de software especializado es un trabajo arduo, pero reutilizable, lo cual implica que el trabajo desarrollado tiene el potencial de servirle a alguien más y puede ser continuado y mejorado por otros estudiantes o profesores, con lo cual, al pasar el tiempo se puede generar una base de software valiosa para la facultad.

Por lo anterior considero que sería una buena política el promover el desarrollo de software independiente dentro de la facultad de ingeniería, lo cual contribuiría a la necesaria independencia tecnológica que se requiere para la formación óptima de ingenieros competentes, a la vez que los estudiantes desarrollan sus habilidades de investigación y programación, lo cual les brindaría mejores oportunidades de trabajo.

6 REFERENCIAS

Para la elaboración de este trabajo se hizo uso de las siguientes referencias bibliográficas:

- Stellman, Andrew; Greene, Jennifer. *Head First C#*. United States of America. O'Reilly Media, Inc., 2010.
- Chapra, Steven C. Canale, Raymond P. *Numerical Methods for Engineers*. New York. Mc Graw Hill, 2010.
- McCain William D. *The Properties of Petroleum Fluids*. Tulsa, Oklahoma. PennWell Books, 1990.
- Bánzer, Carlos. *Correlaciones Numéricas PVT*. Maracalbo. Universidad del Zulia, 1996.
- McCain William D. Jr.; Spivey, John P.; Lenn, Christopher P. *Petroleum Reservoir Fluid Property Correlations*. PennWell Books, 2011.
- Ahmed, Tarek. *Reservoir Engineering Handbook*. Houston, Texas. Gulf Professional Publishing, 2001.
- Ezekwe, Nnaemeka. *Petroleum Reservoir Engineering Practice*. United States of America. Prentice Hall, 2011.
- Asquith, George; Krygowski, Daniel. *Basic Well Log Analysis*. Tulsa, Oklahoma. America Association of Petroleum Geologists. 2004.
- Clase de caracterización estática impartida por el físico Gustavo Mendoza Romero en la facultad de ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.