



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Diseño de propuestas y  
herramientas tecnológicas  
como Ingeniero en  
entrenamiento en Geolis**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero Petrolero**

**P R E S E N T A**

Erick Eduardo Gonzalez Hernandez

**ASESOR(A) DE INFORME**

M.C. Victor Juan López Hernández



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2023**

# Autorización

## Agradecimientos

Quiero agradecer a la **UNAM** por haberme permitido tener la gran oportunidad de pertenecer a la mejor institución académica del país. Estoy muy agradecido con la universidad por haberme brindado una formación de calidad con profesores, alumnos, instalaciones, actividades extracurriculares, alianzas académicas, diversidad cultural, etc. Para mí es un honor el poder servir al país y a la humanidad con base en los conocimientos adquiridos en la máxima casa de estudios, y que en un futuro pueda devolver un poco de lo mucho que me dio la institución, principalmente contribuyendo a la formación de las siguientes generaciones de profesionistas útiles para la sociedad.

Quiero agradecer a **mis padres** Gabriela Hernandez y Eduardo Gonzalez, porque con su esfuerzo, ejemplo y apoyo incondicional me ayudaron a concluir esta etapa tan importante en mi vida. Ustedes me han enseñado a valorar cada una de las oportunidades que hay en ella, sobre todo, inculcando la superación para alcanzar grandes objetivos. Gracias por haberme guiado, educado, aconsejado y enseñado valores que me ayudaron durante las distintas etapas sociales y educativas. Gracias por estar cuando más los necesitaba.

A **mi madre**, quien hizo hasta lo imposible por apoyarme durante toda mi formación. Gracias por siempre haber creído en mí, y por haberme alentado a seguir adelante y nunca darme por vencido. No hay palabras para expresar lo inmensamente agradecido que estoy con Dios y con la vida por haberme dado a la mejor y más hermosa madre del mundo. Hoy se concluye este gran logro, pero sin duda esto no es mío, es tuyo por tu gran esfuerzo y dedicación hacia nosotros. Te amo mamá.

A **mis abuelos paternos** Porfirio Gonzalez y Paula Rosendo quienes estuvieron apoyándome desde pequeño, quienes estuvieron al pendiente de mí y de mi hermano ayudándonos en tareas o apoyándonos en trasladarnos de la casa a la escuela y viceversa. Gracias abuelo por tus grandes enseñanzas, hoy en día muchas cosas de las que sé, las aprendí de ti, sin duda lo que nos enseñaste tanto a mi como a mi hermano nos servirá para toda la vida. Gracias por todas esas platicas de enseñanza, por tus consejos y por tu gran ejemplo de trabajo, familia y vivienda. Un abrazo hasta el cielo.

A **mis abuelos maternos** Cecilia Aparicio y Magdaleno Hernandez por siempre apoyarnos de manera incondicional, por estar en los momentos más difíciles de la vida y etapa educativa, por guiarnos y aconsejarnos de la mejor manera, por ser unos padres para nosotros, por procurarnos y enseñarnos con el ejemplo.

A **mi tío** Miguel Angel Gonzalez por apoyarme durante las distintas etapas de la vida y por enseñarme con el ejemplo de vida, trabajo y familia.

A **mi familia**, le agradezco profundamente por haber creído en mí, por darme los ánimos para seguir estudiando, por haberme ayudado a ser la persona que soy actualmente, por apoyarme y por comprenderme en cada situación. Gracias porque muchos de mis logros se los debo a ustedes, ya que, sin su ayuda y apoyo moral, esto no hubiera sido fácil realizarlo.

A **mis amigos** y compañeros de la Preparatoria 8 “Miguel E.Schulz” (Liliana Martinez, Yeltzin Sosa, Luis Villalobos, Bryan Cruz y Daniela Martiñón), y de la Facultad de Ingeniería de la UNAM (Josmark Sanchez, Isaias Herrera, Abigali Medrano, Ito Moreno, Adán Altamirano, Noé Hernandez, Abraham Mar, Alan Vidal, Paola Aburto, Germán Guzmán, Aimeé Montiel, Verónica Arrona y Daniel Ramírez), les agradezco infinitamente su apoyo brindado en cada una de las materias, sin duda cada uno de ustedes fueron pieza clave para poder culminar ambas etapas estudiantiles. Gracias por toda la diversión, y por hacer la estancia y las clases más amenas.

A **mis profesores y sinodales**, les agradezco por ser personas con gran sabiduría y por esforzarse en ayudarme a llegar al punto en el que me encuentro. Gracias por exigirme y transmitirme todos sus conocimientos teóricos y prácticos, por fomentar el respeto, el compañerismo, el trabajo en equipo, la lectura y la superación personal. Todo esto, en la mayoría de las veces me ha servido para ser buena persona y altamente productivo en el aspecto laboral.

A **mi profesora** la Dra. Iza Canales García quien es digna de admirar, por haberme instruido y transmitido todos sus conocimientos sobre las materias, por su gran sabiduría acerca de la vida, por sus consejos y paciencia. Gracias por haberme apoyado de la mejor manera con el servicio social, gracias por ser siempre la motivación y por estar ahí en los momentos más críticos, además, gracias por ser la gran persona y profesionista. Sin duda sin su ayuda esto no se hubiera podido haber hecho realidad.

A **mi asesor** el M.C. Víctor Juan López Hernández, quien me instruyó durante el desarrollo de este trabajo y quien hizo uso de su tiempo para apoyarme en la documentación y elaboración de este escrito.

A **mi jefe** y director de Geolis el Ing. Jorge Luis Morales de la Mora por haber sido la primer persona en el sector laboral que creyó y apostó por mí. Por haberme brindado las herramientas y la confianza desde un principio al manejar información crucial y valiosa para la empresa. Por haberme instruido y capacitado para aportar valor a la compañía. Gracias por ser buena persona y sobre todo humana conmigo y con las personas que lo rodean.

A **mis compañeros y amigos** de Geolis (Ing. Karina Ciriaco, Ing. Alberto Alonso, Ing. Soreli Amador, Ing. Cristina Hernandez e Ing. Germán Vargas) por su incondicionalidad,

amistad y gran compañerismo. Por ser excelentes personas y las más humanas. Por ser un gran apoyo en cada una de las actividades, por darme los mejores consejos y nunca juzgarme. Por siempre estar ahí en los momentos más difíciles, por creer en mí y por ser grandes motivadores para salir adelante. Gracias **Kari** por ser la persona más bonita que hay en el mundo, la más humilde, la más humana, la más buena, la más sincera, la más amigable, la más alegre, es decir, la más todo, gracias por todo el apoyo que me has dado, por haberme permitido conocerte, por todas esas platicas profundas, por siempre motivarme, por creer y apostar por mí, y sobre todo por nunca dejarme solo. Gracias **Beto** por haber sido participe de estos proyectos y por ser como un hermano para mí, por siempre estar ahí motivándome a seguir y luchar hasta alcanzar nuestros objetivos, por todas esas platicas hasta la madrugada, por ser un gran compañero y buena persona. Gracias **Sol** por todo el apoyo brindado cuando llegamos a Villahermosa, fuiste la primer y única persona que sin conocernos nos dio la mano sin esperar nada a cambio, gracias por ser la persona más buena y amigable que hay en este mundo, gracias por todas esas platicas de enseñanza y por siempre estar en todos los momentos. Gracias **Cristi** por apoyarme y enseñarme durante la estancia de las prácticas profesionales, gracias por tu paciencia, por motivarme a crecer laboralmente, por tu altruismo y buena persona. Gracias **Ing. German** por ser un buen jefe y persona, gracias por creer en mí y por motivarme a crecer profesionalmente.

A todos, gracias por ser grandes agentes participes de motivación y por hacer de Geolis un lugar mejor. Los admiro.

Finalmente, agradecer de nuevo a mi alma mater, y a todas las personas que fueron parte de mis estudios, en especial a las que creyeron en mi desde los niveles básicos hasta el superior. En consecuencia, al ser parte del proceso pueden ser parte del resultado.

# CONTENIDO

<b>Resumen .....</b>	<b>VI</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>VII</b>
<b>Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>Objetivos.....</b>	<b>3</b>
<b>Antecedentes .....</b>	<b>4</b>
<b>Capítulo 1 Descripción de proyectos .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 GeoTalent.....</b>	<b>5</b>
1.1.1 Composición de GeoTalent .....	6
1.1.1.1 Universidades.....	7
Convenios .....	7
1.1.1.2 Estudiantes.....	7
Conferencias.....	7
Talleres.....	7
Servicio Social .....	7
Visitas a Campo .....	8
Residencias Profesionales .....	8
1.1.1.3 Recién Egresados.....	8
Pasantías & Training .....	8
1.1.1.4 Jóvenes Construyendo el Futuro (JCF).....	9
<b>1.2 Modelado de pozos.....</b>	<b>9</b>
Corewell.....	9
1.2.1 Comportamiento de afluencia (IPR).....	10
1.2.2 Correlaciones PVT.....	12
1.2.3 Rendimiento de elevación vertical (VLP).....	12
<b>1.3 Bombeo Hidráulico Tipo Jet.....</b>	<b>14</b>
1.3.1 Participación.....	14
<b>Capítulo 2 Desarrollo de proyectos .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Documentación de GeoTalent .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Desarrollo del modelado de pozos.....</b>	<b>18</b>
2.2.1 Comportamiento de afluencia (IPR).....	18

Modelos IPR.....	18
Darcy.....	19
Vogel.....	21
Standing.....	22
Fetkovich.....	23
Jones Blount y Glaze.....	24
IPR Generalizado .....	25
Programación en Python.....	26
2.2.2 Correlaciones PVT.....	28
Programación en Python.....	28
2.2.3 Rendimiento de elevación vertical (VLP).....	30
Patrones de flujo y su clasificación.....	31
Correlación de Orkiszewski.....	33
Programación en Python.....	33
<b>2.3 Bombeo Hidráulico Tipo Jet.....</b>	<b>35</b>
2.3.1 Diseño de BHJ .....	35
2.3.1.1 Caso de estudio.....	38
2.3.1.2 Propuesta técnica.....	44
<b>Capítulo 3 Resultados.....</b>	<b>49</b>
<b>3.1 GeoTalent en Página web.....</b>	<b>49</b>
3.1.1 Universidades .....	50
Convenios.....	50
3.1.2 Estudiantes .....	51
Conferencias.....	52
Servicio Social.....	52
3.1.3 Jóvenes Construyendo el Futuro .....	53
<b>3.2 Modelado de pozos en plataforma digital Corewell.....</b>	<b>54</b>
3.2.1 Comportamiento de afluencia (IPR) en Corewell.....	54
3.2.2 Correlaciones PVT en Corewell .....	56
3.2.3 Rendimiento de elevación vertical (VLP) en Corewell .....	57
<b>3.3 Bombeo Hidráulico tipo Jet (BHJ).....</b>	<b>59</b>
<b>Capítulo 4 Conclusiones.....</b>	<b>63</b>

<b>4.1 Conclusiones GeoTalent .....</b>	<b>63</b>
<b>4.2 Conclusiones modelado de pozos .....</b>	<b>63</b>
<b>4.3 Conclusiones de Bombeo Hidráulico tipo Jet .....</b>	<b>64</b>
<b>Referencias .....</b>	<b>65</b>



## Lista de figuras

<b>Figura. 1</b> Esquema de GeoTalent.....	6
<b>Figura. 2</b> Comportamiento de afluencia en el pozo.....	11
<b>Figura. 3</b> Gráfica VLP.....	13
<b>Figura. 4</b> Diagrama de flujo Geotalent .....	17
<b>Figura. 5</b> IPR Generalizado.....	26
<b>Figura. 6</b> Programa y Gráfica en Matlab.....	27
<b>Figura. 7</b> Programa y Gráfica en Python .....	27
<b>Figura. 8</b> Código de PVT en Matlab y Python.....	30
<b>Figura. 9</b> Código en Matlab.....	34
<b>Figura. 10</b> Código y Gráfica en Python .....	34
<b>Figura. 11</b> Estado mecánico .....	39
<b>Figura. 12</b> Análisis nodal del Pozo fluyente Puma Dorado-1 .....	41
<b>Figura. 13</b> Ajuste de correlación de flujo multifásico con RPPF.....	41
<b>Figura. 14</b> Sección de trabajo de una bomba jet (boquilla y cámara de mezcla).....	44
<b>Figura. 15</b> Escenario de BHJ con geometría C:5.....	45
<b>Figura. 16</b> Escenario de BHJ con geometría C+:5.....	46
<b>Figura. 17</b> Estado mecánico con bomba jet .....	47
<b>Figura. 18</b> Programa GEOTALENT .....	49
<b>Figura. 19</b> Universidades.....	50
<b>Figura. 20</b> Convenios .....	51
<b>Figura. 21</b> Estudiantes .....	51
<b>Figura. 22</b> Conferencias .....	52
<b>Figura. 23</b> Servicio Social.....	53
<b>Figura. 24</b> Jóvenes Construyendo El Futuro.....	53
<b>Figura. 25</b> Parámetros de Vogel en Corewell .....	54
<b>Figura. 26</b> Gráfica de Vogel en Corewell .....	55
<b>Figura. 27</b> Parámetros de entrada en Corewell.....	55
<b>Figura. 28</b> Gráfica de comparación de métodos.....	56
<b>Figura. 29</b> Datos para propiedades en Corewell .....	57
<b>Figura. 30</b> Diseño de módulo VLP en Corewell.....	58
<b>Figura. 31</b> Curva VLP en Corewell .....	58
<b>Figura. 32</b> Pozo Puma dorado-1 con BHJ.....	60
<b>Figura. 33</b> Resultados de la prueba del BHJ.....	61

## Lista de tablas

<b>Tabla 1</b> Relación de propiedades y autores .....	29
<b>Tabla 2</b> Datos para diseño del BHJ.....	36
<b>Tabla 3</b> Datos de simulación para las condiciones actuales.....	40
<b>Tabla 4</b> Parámetros con geometría C:5 .....	45
<b>Tabla 5</b> Parámetros con geometría C+:5 .....	46
<b>Tabla 6</b> Resumen de las condiciones operativas del pozo .....	48

## Resumen

La industria petrolera ha tomado un papel fundamental en el mundo al extraer, procesar y transformar los hidrocarburos en productos y servicios para los diferentes sectores. Por esta razón, esta industria requiere de personal altamente capacitado para la extracción y manejo de la producción de hidrocarburos en la superficie. Ante esa necesidad del sector, Geolis decidió implementar un programa de atracción de talento joven e interesado en el sector energético, que consiste en apoyar y capacitar a jóvenes universitarios, recién egresados y/o jóvenes construyendo el futuro. Con este programa llamado GeoTalent, se busca que los interesados se desarrollen profesionalmente en la industria y en la compañía, reduciendo la brecha de los conocimientos teóricos, académicos y prácticos, con conferencias, talleres, servicio social, visitas a campo, residencias profesionales, pasantías y/o training, y con proyectos reales. Además de promover la transferencia de conocimiento, el reclutamiento de talento joven y la capacitación, se logró ordenar y clasificar la información que llegaba al correo de la empresa por medio del uso de formularios en la página web, resguardando la información en los servidores de almacenamiento, y a su vez canalizándolos con el departamento responsable de las solicitudes.

Como proyecto adicional se realizó el modelado de pozos con base en la recopilación documental de comportamiento de afluencia (IPR), correlaciones empíricas (PVT) y rendimiento de elevación vertical (VLP). Este proyecto se realizó con el objetivo de hacer un software propio de la compañía por medio de códigos computacionales realizados en los lenguajes de programación Matlab y Python. Los cuales posteriormente fueron implementados en la plataforma digital "Corewell" perteneciente a la compañía Geolis. Esta plataforma al ser dinámica, amigable e integral es usada de forma interna y comercial para el monitoreo en tiempo real de las variables operativas de los equipos instalados, resguardo de información histórica de pozos, y como nuevo punto, para el modelado de pozos y diseño de los sistemas artificiales de producción. De modo que, con la prueba y uso del software, al introducir los datos del pozo, se puede modelar, visualizar y analizar el comportamiento del pozo al comparar algunos métodos IPR, además de predecir con base en la información del análisis nodal, si es necesario instalar un SAP.

El tercer proyecto se enfoca en el proceso, desarrollo y puesta en marcha de las propuestas técnicas del bombeo hidráulico tipo jet. Estas propuestas principalmente están basadas en los datos compartidos por el cliente de los pozos candidatos, los cuales, son enviados al departamento de diseño para que se analicen, se introduzcan al software, y se obtengan los resultados del análisis nodal y del sistema artificial de bombeo hidráulico tipo jet (BHJ). Posteriormente, con base en los resultados del software y con la aprobación del cliente, el equipo de operación se dedica a hacer la logística e instalación de los equipos superficiales y subsuperficiales para que se realice la prueba en campo. Esta prueba consiste en instalar los equipos en fondo y en superficie y, además, poner en funcionamiento el sistema BHJ a las condiciones que marco el diseño, tanto de presión de inyección como de flujo de inyección, de tal forma, que se optimice el pozo y se extraigan los hidrocarburos sin afectar al yacimiento.

## Abstract

The oil industry has played a fundamental role in the world by extracting, processing and transforming hydrocarbons into products and services for different sectors. For this reason, this industry requires highly trained personnel for the extraction and management of hydrocarbon production on the surface. Given this need in the sector, Geolis decided to implement a program to attract young talent interested in the energy sector, which consists of supporting and training young university students, recent graduates and/or juvenes construyendo el futuro. With this program called GeoTalent, it's sought that those interested develop professionally in the industry and in the company, reduce the gap in theoretical, academic and practical knowledge, with conferences, workshops, social services, field visits, professional residences, internships and/or training, and with real projects. In addition to promoting the transfer of knowledge, the recruitment of young talent and training, the information that arrives in the company's mail will be ordered and classified through the use of forms on the website, safeguarding the information on storage servers, and turn channeling them to the department responsible for the requests.

As an additional project, well modeling was carried out based on the documentary collection of inflow performance relationship (IPR), empirical correlations of pressure, volume and temperature (PVT) and vertical lift performance (VLP). This project was carried out with the objective of making the company's own software through computer codes made in the Matlab and Python programming languages. Which were later implemented in the digital platform "Corewell" belonging to the company Geolis. This platform, being dynamic, friendly and comprehensive, is used internally and commercially for real-time monitoring of the operating variables of the installed equipment, backup of historical well information, and as a new point, for well modeling and design of artificial lift methods. So, with the implementation of this software, by entering the well data, you can model, visualize and analyze the behavior of the well by comparing some IPR methods, in addition to predicting based on the information of the nodal analysis, if it's necessary to install a SAP.

Following the same line as the previous projects, the third project focuses on the process, development and start-up of the technical proposals for hydraulic jet pumping. These proposals are mainly based on the data shared by the client of the candidate wells, which are sent to the design department to be analyzed, entered into the software, and the results of the nodal analysis and the artificial lift jet pump. Subsequently, based on the results of the software and with the approval of the client, the operation team is dedicated to making the logistics and installation of the surface and subsurface equipment so that the test can be carried out in the field. This test consists of installing the equipment at the bottom and on the surface and, putting the BHJ system into operation at the conditions established by the design, both injection pressure and injection flow, in such a way that the well is optimized and the hydrocarbons are extracted without affecting the reservoir.

## Introducción

Geolis es una empresa de servicios cien por ciento mexicana perteneciente al grupo empresarial Nuvoil, el cual consta de 4 empresas principalmente; donde cada una desempeña un papel fundamental para la industria petrolera. Dichas empresas son, EMGAS, Geolis, TFS y ALHER O&G.

- **EMGAS:** Anteriormente SIC, la empresa con mayor antigüedad del grupo Nuvoil, refuerza los fuertes lazos de la compañía con su país a través de su nombre: EMGAS Empresa Mexicana de Gas.  
Donde sus principales servicios son: el acondicionamiento, procesamiento y sistemas de compresión de gas natural, así como ingeniería, procura y construcción de infraestructura para el sector energético. Con la finalidad de desarrollar soluciones para optimizar la producción de gas natural y crudo.
- **Geolis:** Es una empresa especializada en la optimización de la producción de activos petroleros donde se implementan sistemas de levantamiento artificial con tecnología innovadora que optimiza la producción y reactivación de pozos. Cuenta con personal altamente capacitado, sustentado en un modelo de mejora continua e innovación que va dirigido al cumplimiento y satisfacción de cada cliente, ofreciendo servicios de confiabilidad en el sector energético.  
Asimismo cuenta con diversos servicios, dentro de los cuales están: análisis nodal de pozos y campo, selección del sistema artificial, instalación y arranque de operaciones, diseño e ingeniería, monitoreo y automatización, mantenimiento de los equipos, módulos de separación portátil, sensores de fondo y telemetría.
- **TFS:** Ofrece soluciones integrales en operación y mantenimiento de turbomaquinaria diseñada conforme a las necesidades para el sector energético. Además de contar con servicios como: supervisión, instalación, comisionamiento, arranque, overhaul, operación y mantenimiento, entre otras. Para aplicaciones de compresión de gas y generación eléctrica.
- **ALHER O&G:** Es una empresa especializada en la dirección, administración y ejecución de proyectos de ingeniería, procura, construcción, instalación y comisionamiento, así como la operación y mantenimiento para el manejo de la producción de hidrocarburos onshore y offshore.  
Por lo que cuenta con servicios como: Project Management, automatización y control, soluciones de telecomunicación, sistemas integrales de medición y confiabilidad operativa.

La empresa donde he estado laborando es Geolis y como se mencionó anteriormente su principal fuerte radica en los Sistemas Artificiales de Producción. Esta se encuentra ubicada estratégicamente para ofrecer el mejor servicio en las zonas petroleras de México, contando con estructura sólida local con oficinas y operación en las regiones



petroleras más importantes del país como son los estados de Veracruz, Tabasco y en la región marina frente a las costas de Campeche.

Actualmente la compañía está en busca de ser una corporación internacional de la industria energética que, a través de la excelencia operativa y la maximización de los resultados financieros, incremente la generación de valor para los grupos de interés con estricto apego a la cultura empresarial que los distingue.

Por lo cual, al concluir mis créditos de la carrera, tuve la oportunidad de ingresar a laborar con un grupo de ingenieros en entrenamiento y desde el primero de marzo de 2021 hasta la fecha he estado trabajando desde casa por lo mismo de la pandemia, pero evidentemente al ser una industria extractiva donde el personal debe de estar a la orden del día en el campo, he tenido que viajar al estado de Tabasco y a Ciudad del Carmen con la finalidad de poner en práctica los conocimientos adquiridos en la universidad, considerando la obtención de una formación más integral sobre el sector.

El puesto con el que ingresé fue Ingeniero en Entrenamiento, el cual en un principio consistió en desarrollar 2 proyectos que ayudaran a la empresa en ser más eficientes en los procesos de desarrollo de proyectos, como en la administración del compromiso social con estudiantes y universidades de México, para así sumar talento a la compañía. Para estos proyectos estuve a cargo del director general de la empresa, el Ingeniero Jorge Luis Morales de la Mora, el cual fue mentor para dichos proyectos.

Al finalizar uno de los proyectos y por indicaciones del mismo director, mis labores se orientaron en apoyar al área de diseño principalmente, analizando la información de los pozos, haciendo análisis nodal para cada uno, y posteriormente diseñarlo conforme a las necesidades pertinentes y así poder entregar propuestas a cada cliente.

Desde el comienzo de mis actividades dentro de la compañía se me informó acerca del gran valor que aportaría a la empresa el desarrollo de cada proyecto, así como los beneficios para su crecimiento dentro del sector energético, es por lo que dichos proyectos han sido realizados bajo las mejores prácticas y bajo los requerimientos necesarios para las necesidades del área, además me ha permitido desarrollarme profesionalmente aprendiendo más allá de lo académico con las herramientas brindadas por la UNAM.

## Objetivos

### General

Dar a conocer las actividades que he desarrollado laboralmente en Geolis durante doce meses como Ingeniero en Entrenamiento, para así obtener el título de Ingeniero Petrolero.

### Específicos

- Creación de nueva sección en la página web de Geolis para desarrollar e impulsar el talento de jóvenes universitarios a través del primer contacto con la industria. De tal forma que puedan aplicar los conocimientos adquiridos en la universidad, logrando tener una formación más integral.
- Implementar software propio de la compañía, con el fin de brindar a los clientes mejores servicios con información clara y precisa en el momento adecuado para el desarrollo de campos, enfocado en sistemas artificiales de producción.
- Proveer herramientas tecnológicas a la empresa para el diseño y armado de propuestas de forma más eficiente.
- Dar a conocer el desarrollo y armado de propuestas de bombeo hidráulico tipo jet en el departamento de diseño.

## Antecedentes

Geolis fue fundada en 2015 especializada en la optimización de activos petroleros, a través de tecnología de vanguardia y personal altamente calificado.

Tras su creación no se contaba con alguna página principal donde se pudiera tener contacto con la empresa e identificar los servicios que la compañía ofrecía, por ello se procedió a realizar una página web para tales fines. Posteriormente, se enfocaron en las necesidades de los clientes como de la compañía para la presentación y control de la información; además del seguimiento de cada proyecto. De ahí surge el proyecto de Corewell en el año 2017, el cual principalmente nació de las necesidades anteriormente mencionadas y con el paso del tiempo este ha sido robustecido. Buscando ser más integrales en los servicios que otorga la empresa e identificando áreas de oportunidad en los que se pueda intervenir de la mejor manera.

Además, al ser una empresa socialmente responsable está enfocada en el crecimiento del sector a través de jóvenes universitarios y recién egresados con carreras que aporten el mayor valor a la industria petrolera en actividades económico-administrativo y de las ingenierías, permitiendo el primer contacto con dicha industria.

Con base en lo que ha hecho Geolis en siete años y con la finalidad de aportar medios con los cuales la empresa se viera fortalecida en lo ya mencionado, me di a la tarea de desarrollar e implementar secciones tanto en la página web como en la plataforma digital "Corewell".

Anteriormente la información de la sociedad que llegaba a la compañía era enviada a un solo correo y no se tenía un buen control de la información, por lo que con la implementación del programa GeoTalent en la página de internet se administró de mejor forma dicha información canalizándola a las áreas correspondientes.

Por otra parte, el software utilizado por los ingenieros de diseño era software de tipo comercial, por lo que en este caso al hacer el desarrollo de software propio se vieron beneficiados los diversos departamentos de la compañía, clientes y usuarios haciendo que tuvieran información con base en sus necesidades y en el momento adecuado.



## Capítulo 1 Descripción de proyectos

### 1.1 GeoTalent

La elaboración del programa de Geolis “GeoTalent” surgió de la necesidad por parte de la compañía de tener el control de la información proveniente de la sociedad interesada en el sector energético y educativo. Permitiendo identificar los intereses hacia la empresa de forma más rápida con un menor tiempo de respuesta en la solicitud. Además de brindar un manejo adecuado de la información dentro del corporativo, por lo que, con la implementación de esta sección en la página de internet resultó ser de gran valor para la administración de la información.

Con este proyecto se tuvo como propósito, desarrollar e impulsar el talento joven de estudiantes y recién egresados de carreras en ciencias de la tierra e ingenierías afines, reduciendo la brecha entre los conocimientos teóricos, académicos y prácticos que se adquieren en la industria.

Posibilitando que los jóvenes puedan fortalecer y poner en práctica sus conocimientos universitarios a través del uso de razón, logrando resolver problemas de ingeniería. De tal forma que la relación de la universidad con la industria se vea fortalecida con la transferencia de conocimientos y tecnología, y así se logre el constante aprendizaje de ambas partes.

Para Geolis es de suma importancia dicha relación, ya que es de su interés hacer una industria más sólida con personal especializado para continuar con el desarrollo del país y de la industria.

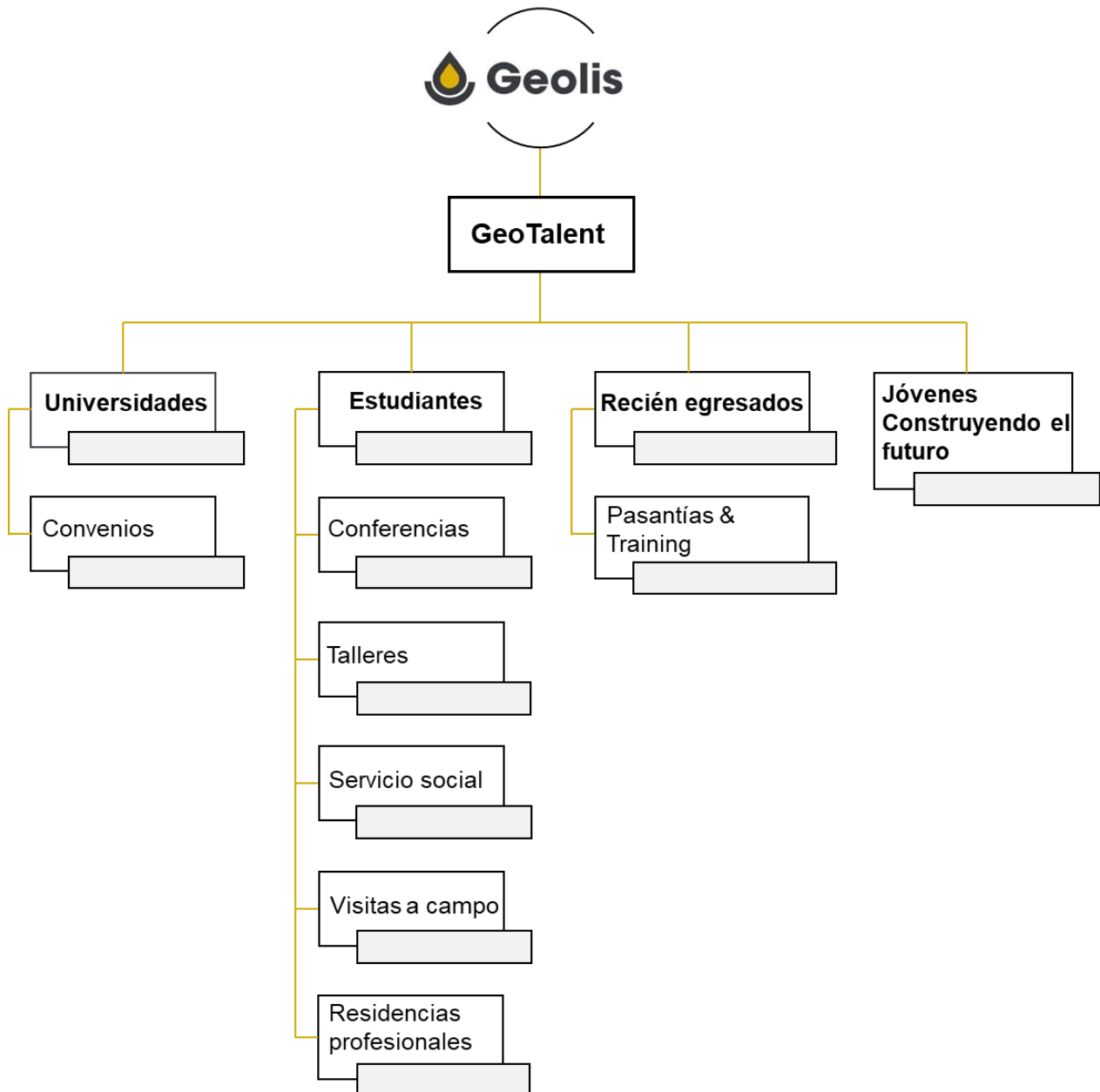
Esto se da gracias a la gran oportunidad de aprendizaje que brinda la empresa con el acercamiento al campo laboral, permitiendo la participación de los jóvenes en proyectos reales y conociendo más allá de cada uno.



### 1.1.1 Composición de GeoTalent

GeoTalent se compone de cuatro rubros principalmente, donde cada uno tiene diferentes secciones, **Figura. 1**.

En cada sección se otorga la información correspondiente con base en los intereses de la compañía y la sociedad.



**Figura. 1** Esquema de GeoTalent

A continuación, se dará una breve descripción de cada rubro y sección para su mejor entendimiento.



### 1.1.1.1 Universidades

Las universidades podrán tener contacto con la empresa a través de un convenio, en el cual se establecen algunos criterios para la transferencia de conocimientos entre las partes involucradas. Además de poder solicitar con base en el programa las actividades de interés hacia los alumnos.

- **Convenios**

Los convenios de colaboración entre Geolis y las Universidades abren una oportunidad para la transferencia de conocimientos entre ambas partes. Con esto se busca que los estudiantes puedan poner en práctica los conocimientos teóricos, participen en un entorno real para mejorar su empleabilidad y adquieran los conocimientos prácticos que les ayude a incorporarse al campo laboral.

### 1.1.1.2 Estudiantes

Los estudiantes de las universidades que así lo requieran, podrán acceder a las diversas secciones que se establecen en este rubro, siempre y cuando exista un convenio con la universidad de procedencia y la empresa, de tal forma que adquieran mayores conocimientos de la industria y que además puedan poner en práctica los adquiridos en la universidad.

- **Conferencias**

Como parte del compromiso social de Geolis hacia los estudiantes interesados es el desarrollo profesional dentro de la industria petrolera y ciencias de la tierra en general, por lo cual, la empresa tiene a disposición un conjunto de conferencias y ponentes con temas centrados en las actividades desempeñadas por la compañía, para ayudar a los alumnos a tener una formación profesional más integral.

- **Talleres**

La organización ha tenido la iniciativa de crear talleres como parte del compromiso social, tanto para estudiantes como para miembros de grupos interdisciplinarios, con la finalidad de que las personas que no conozcan mucho sobre el ramo petrolero puedan entender de mejor forma acerca del tema.

- **Servicio Social**

Geolis como empresa comprometida con la sociedad y las comunidades, donde además de ofrecer servicios y soluciones integrales para la explotación y operación de los campos petroleros, apoya con acciones benéficas a la población.



Por lo que el estudiante universitario puede poner en práctica sus conocimientos académicos en actividades administrativas, así como participar en actividades que fomenten su desarrollo personal y social.

Razón por la cual la organización brinda el apoyo para la realización de dicho procedimiento, permitiendo que los jóvenes de las comunidades aledañas a la compañía puedan incorporarse y cumplir con los objetivos del servicio.

- **Visitas a Campo**

La realización de visitas a campo está dirigida a todos los estudiantes de nivel superior, con el fin de vincular los conocimientos teórico-prácticos y así coadyuvar a la formación de profesionistas de calidad. Teniendo visitas a las diferentes instalaciones con las que cuenta Geolis, para que los alumnos conozcan físicamente los diferentes equipos empleados en la producción de pozos como los sistemas artificiales de producción.

- **Residencias Profesionales**

Geolis a través de residencias profesionales logra contribuir con la formación de personal capacitado al mismo tiempo que suma el talento de jóvenes universitarios. Otorgándoles la primera oportunidad a los estudiantes que culminaron o están por culminar su carrera, a través de un período de seis meses en donde sus conocimientos serán aplicados en proyectos reales.

### 1.1.1.3 Recién Egresados

Para este rubro al igual que con el anterior de Residencias Profesionales, la organización busca brindar un acercamiento al sector laboral al recién egresado, con el objetivo de atribuir a Geolis nuevos talentos para seguir ofreciendo servicios de calidad.

Además de permitir la participación en proyectos reales y conocer su línea de negocios de la empresa. Donde dos de las restricciones que se presentaría en la selección del candidato sería tener de egreso máximo 2 años y por ende contar con título universitario.

- **Pasantías & Training**

Para tal proceso la compañía podrá otorgarle un periodo de 6 meses y durante ese período se evaluará su desempeño, y se le otorgará un departamento acorde con su carrera. En caso de ser necesario podrá ir rotando en áreas según sea lo estipulado en la pasantía.



### 1.1.1.4 Jóvenes Construyendo el Futuro (JCF)

Conforme a los lineamientos establecidos por el Gobierno de México, JCF es un programa que vincula a jóvenes que actualmente no estudian o trabajan de entre 18 y 29 años con empresas, talleres, instituciones o negocios donde desarrollen o fortalezcan hábitos laborales y competencias técnicas para incrementar sus posibilidades de empleabilidad en el futuro.

## 1.2 Modelado de pozos

Como proyecto análogo a GeoTalent lleve a cabo la planificación del modelado de pozos en la plataforma Corewell perteneciente a Geolis.

### Corewell

Es una plataforma digital de la compañía Geolis que surgió en 2017, en la cual se pueden desempeñar actividades como: monitoreo en tiempo real, resguardar información histórica de los pozos en operación, diseño, entre otras.

Cabe destacar que para la empresa es de suma importancia esta plataforma, ya que con ella los clientes y miembros de la compañía interactúan con la información de cada uno de los pozos y servicios. Teniendo en cuenta las ventajas que tiene el poder contar con información en cualquier momento del día para detectar anomalías y proponer soluciones rápidas en la operación, y por ende reducir las visitas a campo.

Además de hacer servicios más integrales, juntando la parte operativa, financiera y la automatización de cada servicio, dándole sentido a la inversión que hace cada uno de los clientes y adaptándose a la necesidad de cada uno.

Dicho proyecto lo ejecuté con base en las necesidades que se tenían en el departamento de diseño y con los clientes. En el área de diseño se usaba software comercial que en ocasiones no era práctico emplear por la cantidad de información que se tenía que introducir al software para generar modelos de curvas IPR. Mientras que la problemática con los clientes era que no podían modelar la información de sus pozos, ni visualizar de mejor forma los escenarios de producción presentados en las propuestas referentes a la instalación de algún sistema artificial de producción.

De ahí que decidí hacer un software para la compañía, a fin de que les pudiera brindar herramientas tecnológicas para la obtención de parámetros necesarios en el diseño de



los sistemas artificiales de producción, teniendo como prioridad el bombeo hidráulico tipo jet.

Por lo que, el desarrollo de este proyecto lo hice considerando cada uno de los requerimientos establecidos por el equipo de diseño, siendo elemental la optimización del tiempo en cada propuesta.

En consecuencia, el modelado de pozos consistió en 3 puntos en específico, basados en lo mencionado anteriormente. Estos puntos son:

- **Comportamiento de afluencia (IPR)**
- **Correlaciones PVT**
- **Rendimiento de elevación vertical (VLP)**

### 1.2.1 Comportamiento de afluencia (IPR)

El flujo del yacimiento hacia el pozo ha sido llamado comportamiento de afluencia<sup>1</sup>. Y la gráfica de Gasto vs  $P_{wf}$  ha sido llamada IPR (Inflow Performance Relationship).

El comportamiento de afluencia (IPR) se define como la relación entre la tasa de producción del yacimiento y la presión de flujo del fondo del pozo.

Por lo tanto, el IPR se define en el rango de presión entre la presión promedio del yacimiento y la presión atmosférica. La tasa de flujo correspondiente a la presión atmosférica de flujo de fondo de pozo se define como el potencial de flujo abierto absoluto del pozo (AOF), mientras que la tasa de flujo es siempre cero cuando la presión de fondo de pozo es la presión promedio del yacimiento, lo que representa una condición de cierre.<sup>1</sup>

---

<sup>1</sup> Gilbert, W.E.: "Flowing and Gas-Lift Well Performance", Drill. & Prod. Prac. (1954) 126.

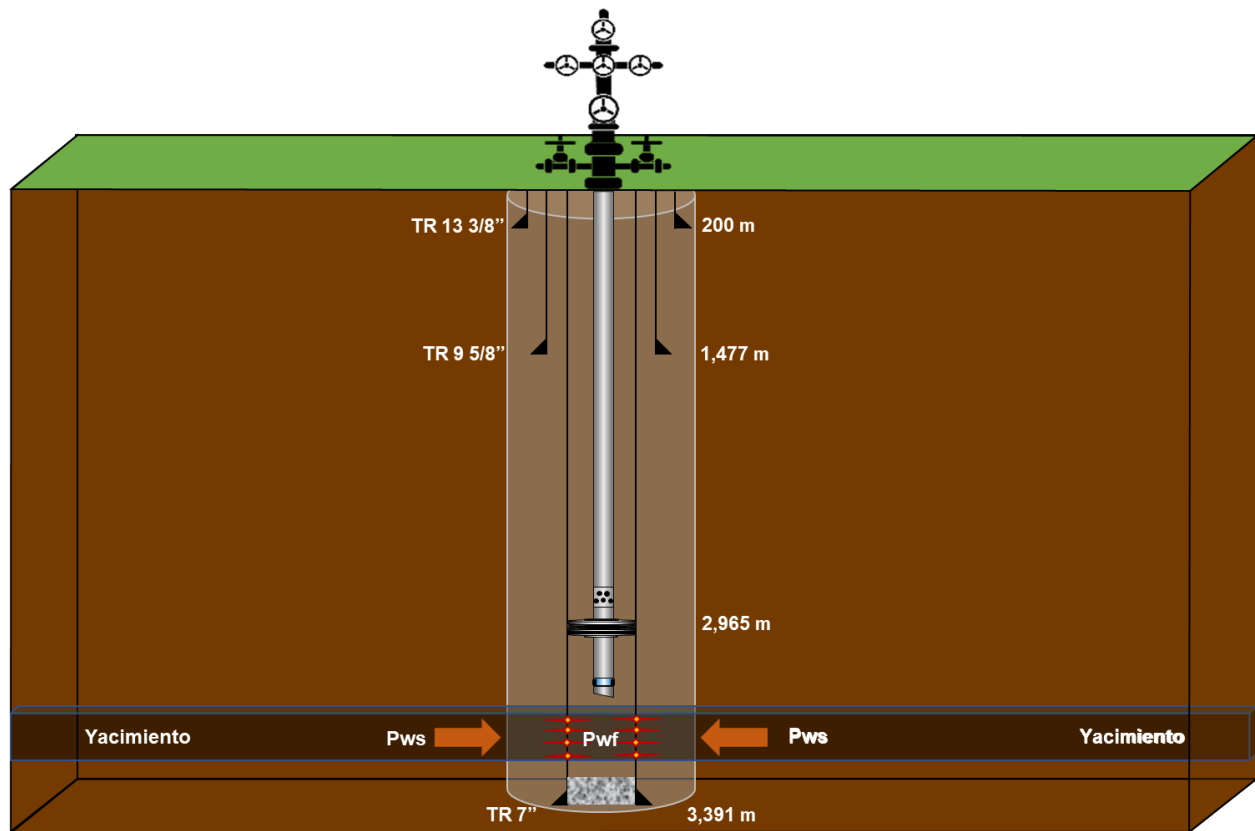


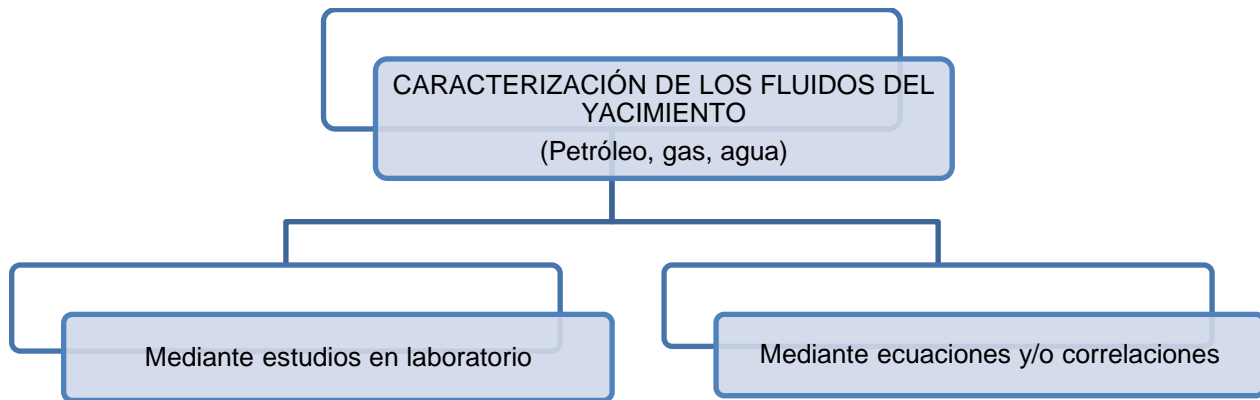
Figura. 2 Comportamiento de afluencia en el pozo

Por lo tanto, el proceso de producción comienza en el yacimiento cuando el área de drenaje es sometida a un diferencial de presión dado por la diferencia de las presiones  $\Delta p = (P_{ws} - P_{wf})$ , donde define el gasto producido por un yacimiento para una determinada caída de presión en el intervalo productor.



## 1.2.2 Correlaciones PVT

Para realizar un adecuado desarrollo de yacimiento es necesario clasificarlo según el tipo de fluido que se encuentra en el yacimiento para determinar el comportamiento termodinámico de dicho fluido.<sup>2</sup>



Este comportamiento puede desarrollarse mediante muestras de fondo analizadas en laboratorio (las cuales son más precisas) o con la ayuda de correlaciones empíricas. Una muestra representativa además de ser costosa no siempre está disponible. Por lo que diversos autores se dieron a la tarea de determinar las propiedades físicas de los fluidos requeridas en el modelo de aceite negro mediante correlaciones y con ello obtener datos del comportamiento de los fluidos desde el fondo hasta la superficie. Teniendo en cuenta que estas correlaciones son una aproximación a los valores reales.

Esto se tiene con la finalidad de poder establecer las actividades necesarias para el desarrollo de campos, que van desde los estudios de yacimientos hasta el diseño e implementación de sistemas artificiales de producción, contando con el cálculo de reservas, diseños de aparejos de producción, instalaciones de producción y servicios.

## 1.2.3 Rendimiento de elevación vertical (VLP)

El rendimiento de elevación vertical es la capacidad del pozo para producir bajo una restricción de presión superficial constante. Considera el gasto del pozo frente a la pérdida de presión entre el separador y el yacimiento. Determinando que en la gráfica de  $P_{wf}$  vs Gasto (suponiendo una presión fija en el cabezal del pozo/separador) se tiene la curva VLP “Outflow” de la tubería de producción.<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Matthews, C.S. and Russell. D.G.: Pressure Buildup and flow tests in Wells, Monograph Series, Richardson, Texas (1967)



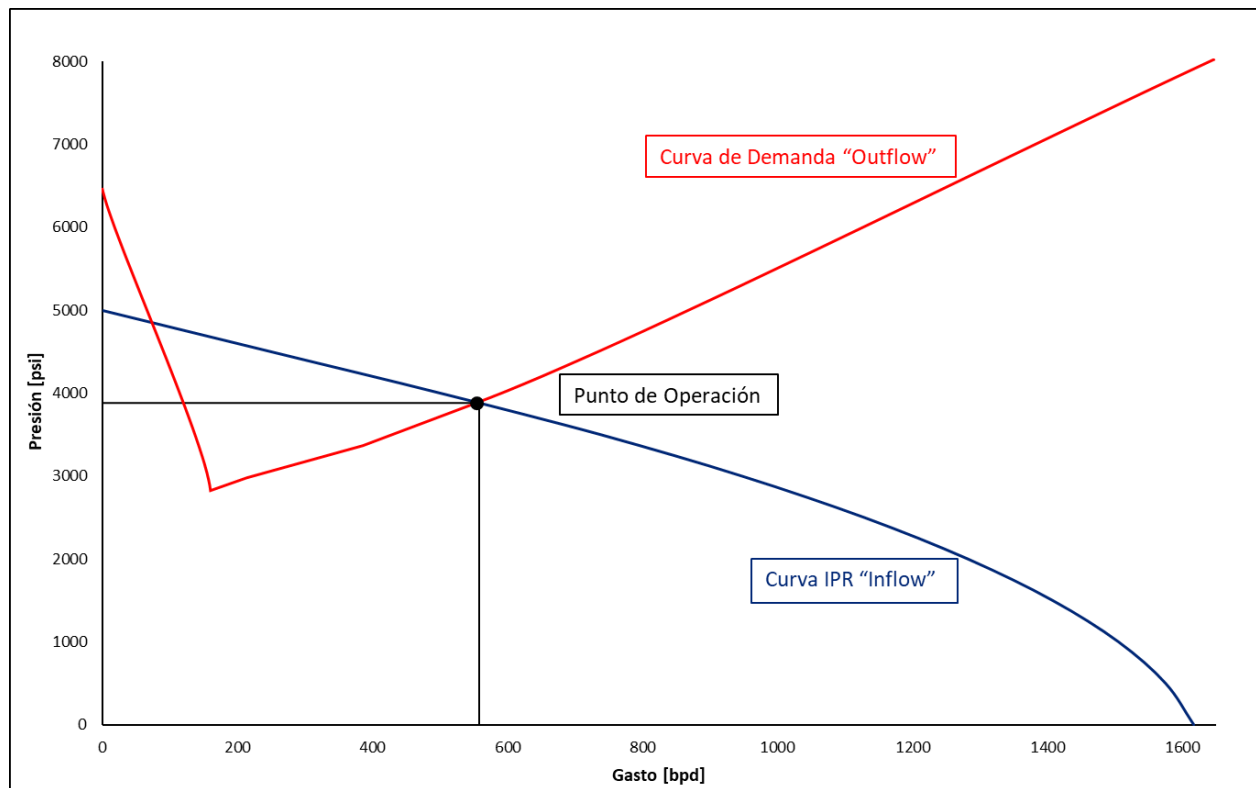


Figura. 3 Gráfica VLP

La gráfica VLP representada en la **Figura. 3**, es una herramienta de ingeniería simple para acoplar la curva IPR “Inflow” con la curva VLP de la tubería de producción, lo que permite determinar el gasto de producción superficial a través de todo el sistema de producción. Matemáticamente, dicho acoplamiento permite que el yacimiento produzca fluidos en el pozo, permitiendo que el sistema de tuberías lleve estos fluidos al separador en la superficie.

Esta gráfica se usa ampliamente en el diseño, evaluación económica y solución de problemas de pozos de petróleo y gas. La intersección de las curvas es el punto de solución o punto de flujo natural y determina el gasto de producción y la presión.

Si estas curvas no se cruzan, es probable que el pozo no tenga la suficiente energía para levantar los hidrocarburos a la superficie y se tenga que recurrir a los métodos de levantamiento artificial de producción para mitigar estos problemas.<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Brill, James P., and Mukherjee H.: “Multiphase Flow in Wells,” Richardson Texas: Society of Petroleum Engineers, 1999.



## 1.3 Bombeo Hidráulico Tipo Jet

Como parte de las actividades que he tenido como Ingeniero en Entrenamiento, fue apoyar al departamento de diseño en las propuestas de Bombeo Hidráulico Tipo Jet (BHJ). Este departamento es una de las piezas clave en Geolis, ya que, con base en las necesidades de campo por parte de los clientes, es como el equipo de diseño determina la mejor respuesta a sus requerimientos.

La información que llega de los campos donde requieren la presencia de Geolis es analizada por los Project Management Office (PMO) encargados del BHJ, quienes determinan las necesidades de los clientes y posteriormente comparten dicha información con las áreas correspondientes. Dentro de esas áreas estamos nosotros como departamento de diseño, donde se vuelve a verificar lo compartido por el cliente (histórico de producción, registro de presión, estado mecánico, etc.) para saber más acerca del pozo y poder realizar el análisis correspondiente.

Como parte principal del análisis de información es revisar el estado mecánico para ver si es apto o no para la instalación del bombeo hidráulico, en caso de que no fuera apto se debía tener comunicación con los PMO y el cliente para saber más acerca de la inversión que pensaban efectuar y con ello determinar una posible intervención al pozo para adaptarlo al sistema artificial.

Con la información recabada y analizada del proyecto procedía a realizar la propuesta del Bombeo Hidráulico, centrándola en la optimización de la producción de los activos petroleros.

### 1.3.1 Participación

Dentro de mis labores asignadas en el departamento de diseño, fue apoyar en el análisis de la información de los pozos, determinando datos característicos que posteriormente insertaría a softwares comerciales para poder obtener las condiciones actuales (IPR y análisis nodal) y óptimas del sistema artificial. Estos elementos me servirían como base para poder diseñar el bombeo hidráulico tipo jet en el software comercial, donde después de hacer varias simulaciones a distintas condiciones podía dimensionar la bomba jet.

Una vez que tenía listos los diseños del BHJ de los pozos candidatos, elaboraba la propuesta técnica-comercial para que el cliente verificara, aprobara y emitiera la orden de servicio para la operación en campo.

En la operación, cuando se requería obtener la mayor cantidad de información posible de los pozos se introducían sensores de fondo, con la finalidad de medir la producción



tras un tiempo asociado. Los datos que registraba el sensor de fondo los utilizaba para la actualización de los escenarios de producción y de las geometrías de la bomba jet, a fin de tener un pronóstico de producción más certero. Por lo que, en estos casos hacía uso de métodos de pruebas de presión vs producción, con el propósito de entender de mejor forma el comportamiento del yacimiento y hacer la comparación de la producción de la superficie con el registrado en el sensor.

Como parte de la operación del sistema artificial era contar con personal las 24 horas del día, 7 días de la semana. De tal forma que siempre tuviera un monitoreo constante en los parámetros principales: Gasto de inyección, Presión de inyección, Gasto producido, Presión en la línea de descarga.

## Capítulo 2 Desarrollo de proyectos

### 2.1 Documentación de GeoTalent

El desarrollo de este programa junto con los rubros y secciones los realicé con base en el diagrama de flujo de la **Figura. 4**.

Cabe mencionar que para poder iniciar con el desarrollo del proyecto debí tener varias sesiones virtuales con el personal de Geolis encargado de la vinculación de la sociedad con la empresa. Con la finalidad de tener claros los intereses de ambas partes, pero sobre todo de la compañía.

Posteriormente tuve que definir cuáles serían los rubros y secciones con base en lo acordado en cada sesión. Para que después fueran revisados y aprobados por el equipo Geolis.

Una vez aprobados los rubros y secciones tuve que solicitar información de la base de datos a grupo Nuvoil, la cual una vez analizada y clasificada me ayudaría con el armado de la estructura y programación de GeoTalent en la página web.

Parte del análisis que realicé de los documentos compartidos por el corporativo fue identificar rubros o secciones existentes de los que había proyectado, además de reconocer cuales podía llevar a cabo sin mayor problema. Determinando que algunos programas como el de Jóvenes Construyendo el Futuro al ser parte del Gobierno de México era uno de los que podían colocar dentro de GeoTalent sin modificación alguna; mientras que otros como el caso de la sección de Visitas a campo lo podía desglosar de la mejor manera, creando los documentos necesarios para su implementación con universidades y estudiantes interesados.

Dentro de los objetivos de Geolis con el programa GeoTalent era la administración de la información, por lo que, una vez hecho los documentos pertinentes (política de la empresa, requisitos, etc) realicé el diseño de la página y las rúbricas necesarias para cada punto dentro del programa, logrando que el personal encargado tuviera el control de la información. Teniendo en cuenta que tanto la página de internet como la plataforma digital interactuarán entre sí; obteniendo indicadores representativos para Geolis de dicho programa.

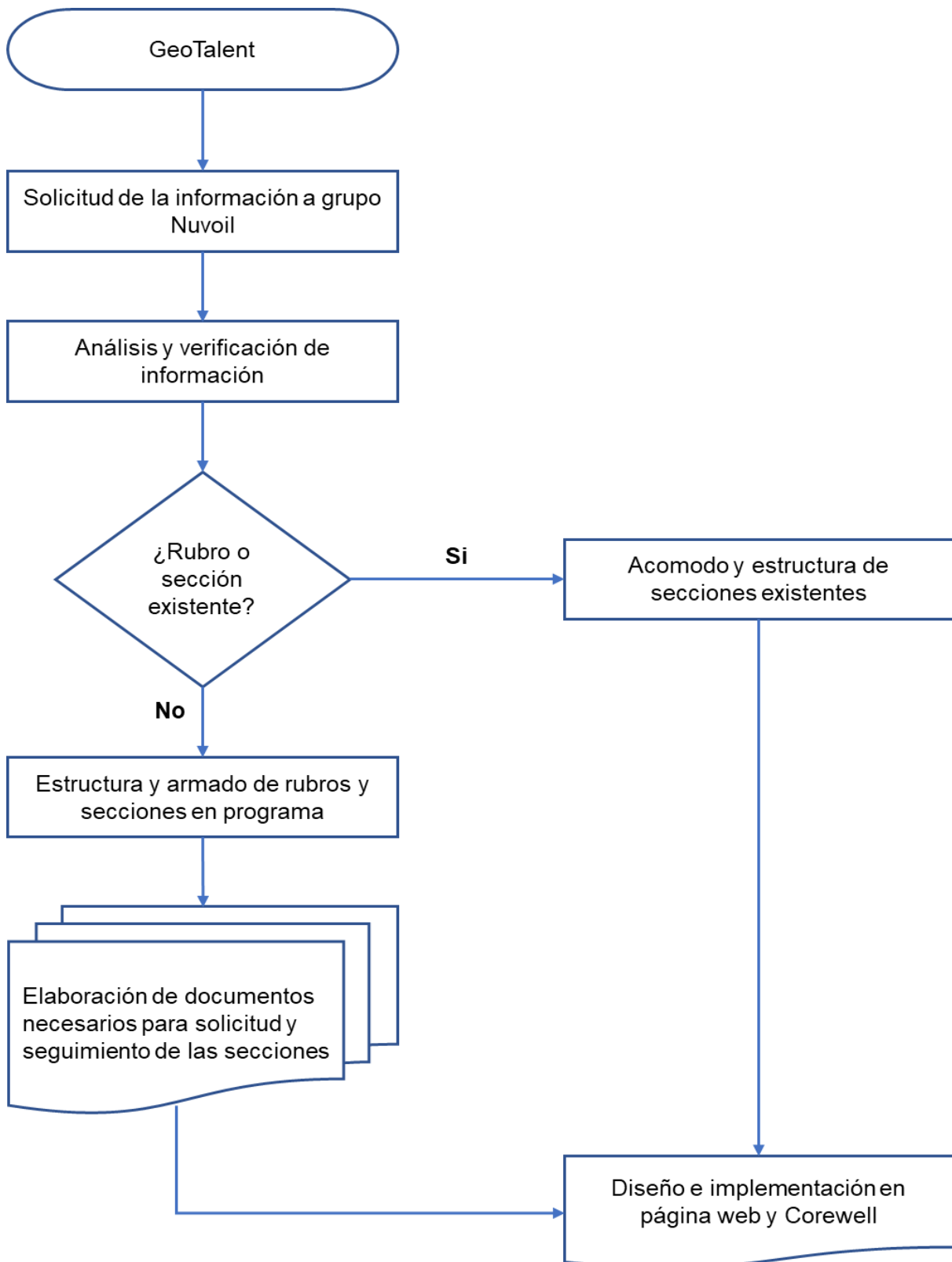


Figura. 4 Diagrama de flujo Geotalent



## 2.2 Desarrollo del modelado de pozos

Para efectuar este proyecto mantuve contacto virtual con el personal de la empresa, a fin de conocer más de las oportunidades laborales o administrativas que se tenían en la compañía. Definiendo que la principal problemática era la de no contar con software propio para el modelado de pozos, teniendo que recurrir la mayor parte de las veces a software comercial.

A partir de lo conversado con el equipo Geolis comencé a buscar soluciones; teniendo presentes los puntos de interés para el desarrollo de la plataforma digital.

Al mismo tiempo determinaba cuales eran los temas que se podían tratar en el proyecto, para que posteriormente procediera a la presentación de la propuesta al personal de la empresa, de tal forma que ellos verificaran y aprobaran cada contenido planteado.

Una vez que me aprobaron los temas presentados pude definir los alcances y objetivos que tenía cada uno, y con eso establecí las bases para la realización de los puntos clave del modelado.

De manera que lleve a cabo la elaboración de tres puntos anteriormente mencionados, tal como es, **comportamiento de afluencia (IPR), correlaciones PVT y rendimiento de elevación vertical (VLP).**

Llevándolo a cabo a través del compendio teórico de cada elemento aprobado.

Ya que tenía recabada toda la literatura de cada una de las partes que integraban el modelado, pude dar paso a la programación de cada método en Matlab y Python con base en cada uno de los autores correspondientes a los puntos anteriores, generando mis propias curvas y datos con parámetros de cada referencia bibliográfica.

Describiendo a continuación los métodos usados en cada rubro.

### 2.2.1 Comportamiento de afluencia (IPR)

#### Modelos IPR

Los métodos que elegí para esta sección fueron basados en yacimientos de aceite.

Determinando seis métodos correspondientes a cada autor, junto con una comparación de estos.



- **Darcy**

El comportamiento de afluencia de un pozo representa la capacidad de un pozo para aportar fluidos, es decir, será la respuesta en gasto de la formación productora ante el abatimiento de presión en el pozo.

Por lo que, Darcy se debe de considerar siempre en la predicción de los gastos de flujo, desde el yacimiento hasta los disparos. Determinando la siguiente ecuación que puede ser aplicada para predecir cualquier condición de flujo:

$$q = \frac{cte(kh)}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right)} \int_{P_{wf}}^{P_e} f(P) dP \quad \text{Ec (2.1)}$$

**Donde:**

<b>k=</b> Permeabilidad absoluta	[md]
<b>h=</b> Espesor del yacimiento	[ft]
<b>re=</b> Radio de drene	[ft]
<b>rw=</b> Radio del pozo	[ft]
<b>Pe=</b> Presión estática	[psi]
<b>P<sub>wf</sub>=</b> Presión de fondo fluyendo	[psi]
<b>f(P)=</b> Función de presión	[adim]
<b>cte=</b> Constante para unidades de campo (0.00708)	
<b>q=</b> Gasto de aceite	[bpd]

Al ser aplicable a todos los sistemas porosos la solución o forma que adquiera dependerá de las condiciones iniciales y de frontera (daño, almacenamiento, fracturas, penetración parcial, etc), así como también de la geometría y tipo de flujos establecidos en el sistema.<sup>4</sup>

Contando con modelos que son aplicables a pozos tanto bajosaturados como saturados. Determinando el método bajosaturado como IP y el saturado como IPR, además de contar con las expresiones de propiedades del yacimiento.

---

<sup>4</sup> Brown, K.E. et al.: "Production Optimization of Oil and Gas Wells by NODAL System Analysis," Technology of artificial Lift Methods, PennWell Publishing Co., Tulsa, Oklahoma (1984) Chap 4.



$$q_o = \frac{0.00708 k_o h (P_{ws} - P_{wf})}{\mu_o B_o \left[ \ln \left( \frac{r_e}{r_w} \right) - 0.75 + S \right]} \quad \text{Ec (2.2)}$$

**Donde:**

<b>k<sub>o</sub></b> = Permeabilidad efectiva	[md]
<b>h</b> = Espesor neto del yacimiento	[ft]
<b>r<sub>e</sub></b> = Radio de drene	[ft]
<b>r<sub>w</sub></b> = Radio del pozo	[ft]
<b>P<sub>ws</sub></b> = Presión estática del yacimiento	[psi]
<b>P<sub>wf</sub></b> = Presión de fondo fluyendo	[psi]
<b>μ<sub>o</sub></b> = Viscosidad del aceite	[cp]
<b>B<sub>o</sub></b> = Factor de volumen del aceite	[bbl/stb]
<b>S</b> = Daño de la formación	[adim]
<b>q<sub>o</sub></b> = Gasto de aceite	[bpd]

Por otra parte, se tiene el índice de productividad, que es de suma importancia para poder predecir el comportamiento de los pozos, determinado por la siguiente ecuación:

$$J = IP = \frac{q}{P_{ws} - P_{wf}} \quad \text{Ec (2.3)}$$

**Donde:**

<b>P<sub>ws</sub></b> = Presión estática del yacimiento	[psi]
<b>P<sub>wf</sub></b> = Presión de fondo fluyendo	[psi]
<b>q</b> = Gasto de aceite	[bpd]

Con lo que indica la expresión que el gasto es directamente proporcional al cambio de presión y la constante de proporcionalidad es el índice de productividad.

**Nota: Consideraciones Darcy**

- Flujo laminar.
- Saturación al 100%.
- Flujo monofásico.





- Gradientes de presión pequeños.
- Isotérmico y homogéneo.
- No reacciona con la formación.
- No se toman en cuenta los efectos gravitacionales.
- Ligeramente compresibles.
- Viscosidad constante.

Considerando un medio poroso que se encuentra saturado completamente con un fluido monofásico cuya viscosidad es de 1 [cp], se dice que el medio tiene una permeabilidad de 1 [Darcy] si permite el paso del fluido a un ritmo de 1 [cm<sup>3</sup>/s] a través de 1 [cm<sup>2</sup>] de área nominal al flujo, y bajo un gradiente de presión de 1 [atm/cm].

- **Vogel**

Vogel ofreció una solución simplificada al problema del flujo de dos fases. Al resolver las ecuaciones de Weller, Vogel tomó la siguiente ecuación general para tener en cuenta el flujo de dos fases en el yacimiento (efectos de saturación)<sup>5</sup>.

$$\frac{q_o}{q_{\max}} = 1 - 0.2 \left( \frac{P_{wf}}{P_{yac}} \right) - 0.8 \left( \frac{P_{wf}}{P_{yac}} \right)^2 \quad \text{Ec (2.4)}$$

**Donde:**

**P<sub>yac</sub>**= Presión estática del yacimiento [psi]

**P<sub>wf</sub>**= Presión de fondo fluyendo [psi]

**q<sub>o</sub>**= Gasto de aceite [bpd]

**q<sub>o max</sub>**= Gasto máximo de aceite [bpd]

Este efecto de saturación se da cuando la  $P_{yac} < P_b$  teniendo una curva no lineal determinada por la producción de dos fases.

Vogel llegó a esta ecuación a partir de una solución informática para varios yacimientos de gas en solución y para diferentes propiedades de los fluidos. Se ha encontrado que su solución es muy buena y se usa ampliamente en la predicción de curvas IPR donde existe flujo de dos fases (líquido y gas). Parece funcionar razonablemente bien para porcentajes de agua de hasta el 50%.<sup>5</sup>

Además, para el caso de la  $P_{wf}$  se podría resolver directamente con la ecuación:

<sup>5</sup> Vogel, J.V. "Inflow Performance Relationships for Solution Gas Drive Wells." Journal of Petroleum Technology (January 1968)



$$P_{wf} = 0.125P_{yac} \left[ -1 + \sqrt{81 - 80 \left( \frac{q_o}{q_{max}} \right)} \right] \quad \text{Ec (2.5)}$$

- **Standing**

Standing extendió el trabajo de Vogel para ocuparse de aquellos casos en los que  $FE \neq 1$ .

$$FE = \frac{P_{yac} - P'_{wf}}{P_{yac} - P_{wf}} \quad \text{Ec (2.6)}$$

**Donde:**

$P_{yac}$ = Presión estática de yacimiento [psi]

$P'_{wf}$ = Presión de fondo fluyendo equivalente sin daño [psi]

$P_{wf}$ = Presión de fondo fluyendo actual [psi]

$FE$ = Eficiencia de flujo [adim]

Presentó el uso de valores de FE entre 0.5 y 1.5. Un primer paso para este uso es determinar  $q_{o\max}$  para  $FE=1$ , después de lo cual se puede determinar el caudal para cualquier eficiencia de flujo y cualquier presión de flujo. Por lo tanto, se puede construir una curva IPR para eficiencias de flujo distintas de 1. La solución se puede obtener a partir de las siguientes ecuaciones:

$$P'_{wf} = P_{yac} - (P_{yac} - P_{wf})FE \quad \text{Ec (2.7)}$$

Entonces, la ecuación de Vogel se puede utilizar directamente.

$$\frac{q_o}{q_{max}} = 1 - 0.2 \left( \frac{P'_{wf}}{P_{yac}} \right) - 0.8 \left( \frac{P'_{wf}}{P_{yac}} \right)^2 \quad \text{Ec (2.8)}$$

(FE=1)

**Donde:**

$P_{yac}$ = Presión estática del yacimiento [psi]

$P'_{wf}$ = Presión de fondo fluyendo para  $FE=1$  [psi]

$q_o$ = Gasto de aceite [bpd]

$q_{o\max}$ = Gasto máximo de aceite [bpd]



En el uso de la ecuación de Vogel, se desarrolla un problema para ciertas condiciones de bajas presiones de flujo y altos valores de FE.

Por lo que a valores mayores de uno de FE los valores negativos de  $P'_{wf}$  generan problemas en la ecuación original de Vogel y mostrará una tasa de flujo reducida en comparación con los valores positivos de  $P'_{wf}$ .

Por lo cual se puede obtener una solución más precisa cambiando la forma de la ecuación.

Determinando una ecuación por Harrison para altos valores de FE y bajos valores de  $P_{wf}$ , la cual funcionará de igual forma para valores positivos o negativos de  $P'_{wf}$ .

$$\frac{q_o}{q_{max}} = 1.2 - 0.2e^{1.792\left(\frac{P'_{wf}}{P_{yac}}\right)} \quad \text{Ec (2.9)}$$

(FE=1)

Sin embargo, se ha observado que no predice los gastos en comparación con la ecuación de Vogel.<sup>6</sup>

### • Fetkovich

Fetkovich partió de la ecuación de flujo básica dada por Evinger y Muskat para flujo estable, la cual es aplicable tanto para pozos de petróleo como de gas.

Donde al hacer una serie de suposiciones se determinó que podía emplearse una ecuación general para modelar el comportamiento de afluencia, teniendo como resultado la siguiente ecuación<sup>7</sup>:

$$q = C(P_{yac}^2 - P_{wf}^2)^n \quad \text{Ec (2.10)}$$

$$C = \frac{q_1}{(P_{yac}^2 - P_{wf1}^2)^n} \quad \text{Ec (2.11)}$$

$$n = \frac{\log\left(\frac{q_1}{q_2}\right)}{\log\left(\frac{P_{yac}^2 - P_{wf1}^2}{P_{yac}^2 - P_{wf2}^2}\right)} \quad \text{Ec (2.12)}$$

**Donde:**

$P_{yac}$ = Presión estática del yacimiento [psi]

$P_{wf}$ = Presión de fondo fluyendo [psi]

<sup>6</sup> Standing, M.B. "Inflow Performance Relationships for Damaged Wells Producing by Solutions Gas Drive Reservoirs." Journal of Petroleum Technology (November 1970)

<sup>7</sup> Fetkovich, M.J. "The Isochronal testing of Oil Wells. SPE 4529. SPE of AIME



**q**= Gasto de aceite [bpd]

**C**= Constante de flujo [adim]

**n**= Exponente con valor promedio de 0.568 y 1 [adim]

### • Jones Blount y Glaze

JBG sugiere que el flujo radial tanto para el petróleo como para el gas podría representarse de otra forma para mostrar si existe una restricción cercana al pozo.<sup>8</sup>

La ecuación de flujo radial para el petróleo se escribe más comúnmente de la siguiente manera, excepto por la inclusión del término de flujo no Darcy:

$$q_o = \frac{0.00708k_o h(P_{ws} - P_{wf})}{\mu_o B_o \left[ \ln\left(\frac{r_e}{r_w}\right) - 0.75 + S + Dq \right]} \quad \text{Ec (2.13)}$$

Si se dispone de una prueba de gasto de tres o cuatro puntos, se pueden obtener b y a de un gráfico.

$$\frac{P_{yac} - P_{wf}}{q} = aq + b \quad \text{Ec (2.14)}$$

#### Donde:

**P<sub>yac</sub>**= Presión estática del yacimiento [psi]

**P<sub>wf</sub>**= Presión de fondo fluyendo [psi]

**q**= Gasto de aceite [bpd]

**a**= Grado de turbulencia [adim]

**b**= Condiciones de la formación con daño y sin daño [adim]

Por lo tanto, como se mencionó anteriormente se puede hacer uso de una gráfica de la ecuación de JBG usando una prueba de gasto de tres o cuatro puntos para distinguir las pérdidas de presión causadas por el flujo no Darcy (Dq) causadas por el daño (S). Este es un factor importante a la hora de seleccionar la estimulación adecuada o la reparación correctiva para mejorar la productividad.

El valor medido b indica las condiciones dañadas o no dañadas de la formación. Si el valor de b es bajo, menos de 0.05 no ocurre daño de formación en el pozo. El grado de daño aumentará al aumentar los valores de b.

<sup>8</sup> Jones, Loyd G., E.M.Blount, and O.H. Glaze. "Use of Short Term Multiple Rate Flow Tests to Predict Performance of Wells Having Turbulence." SPE 6133. SPE of AIME, 1976



El valor medido de  $a$  indica el grado de turbulencia en el sistema de formación de pozos.<sup>4</sup>

### • IPR Generalizado

Este método tiene la diferencia que emplea tanto el modelo de IP como el de IPR, haciendo uso de las ecuaciones para determinar una sola gráfica por arriba y por debajo de la presión de burbuja.

Si la  $P_{yac} > P_b$  primero se debe resolver con IP a partir del modelo de Darcy.

Por lo que la curva IPR completa se puede construir si conocemos el índice de productividad que existe en el punto de burbuja.

Eickmeier et al. y Neeley desarrollaron ecuaciones que son aplicables para construir la curva IPR completa:<sup>4 y 9</sup>

$$J = \frac{q_o}{(P_{yac} - P_b) + \frac{P_b}{1.8} \left[ 1 - 0.2 \left( \frac{P_{wff}}{P_b} \right) - 0.8 \left( \frac{P_{wff}}{P_b} \right)^2 \right]} \quad \text{Ec (2.15)}$$

$$q_{\max} = J(P_{yac} - P_b) + \frac{J P_b}{1.8} \quad \text{Ec (2.16)}$$

$$q_o = J(P_{yac} - P_b) + \frac{J P_b}{1.8} \left[ 1 - 0.2 \left( \frac{P_{wff}}{P_b} \right) - 0.8 \left( \frac{P_{wff}}{P_b} \right)^2 \right] \quad \text{Ec (2.17)}$$

#### Donde:

$P_{yac}$  = Presión estática del yacimiento [psi]

$P_{wff}$  = Presión de fondo fluyendo [psi]

$P_b$  = Presión de burbuja [psi]

$q_o$  = Gasto de aceite [bpd]

$q_{o\max}$  = Gasto máximo de aceite [bpd]

Por lo tanto, si conocemos  $J$ , podemos determinar  $q_{o\max}$  y asumiendo otras presiones, podemos calcular los gastos correspondientes.

<sup>4</sup> Brown, K.E. et al.: "Production Optimization of Oil and Gas Wells by NODAL System Analysis," Technology of artificial Lift Methods, PennWell Publishing Co., Tulsa, Oklahoma (1984) Chap 4.

<sup>9</sup> Eickmer, James R. personal Communication

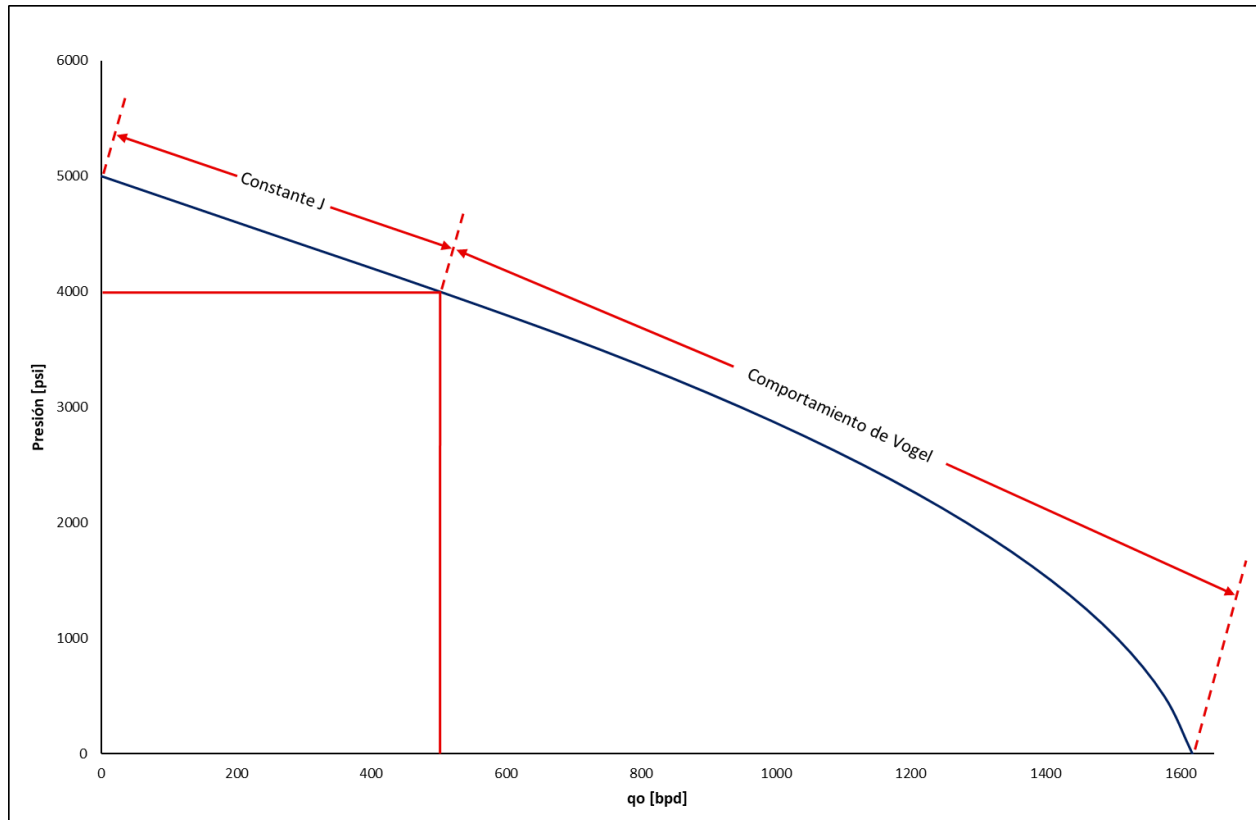


Figura. 5 IPR Generalizado

## Programación en Python

Los métodos previamente descritos los realicé en una plataforma de programación llamada Matlab y posteriormente en el lenguaje de programación Python, ya que la plataforma digital de Geolis se encuentra programada en este lenguaje.

Simultáneamente me encontraba trabajando con el departamento de Tecnologías de la Información, el cual se encontraba desarrollando los módulos para poder cargar los programas que había elaborado directamente en la aplicación.

Cada uno de los códigos los realicé y comprobé con base en la teoría que le correspondía a cada uno, haciendo uso de conocimientos adquiridos en la universidad.

Teniendo como resultado las gráficas que me interesaban cargar en la aplicación para hacer el diseño y armado de propuestas más eficiente.

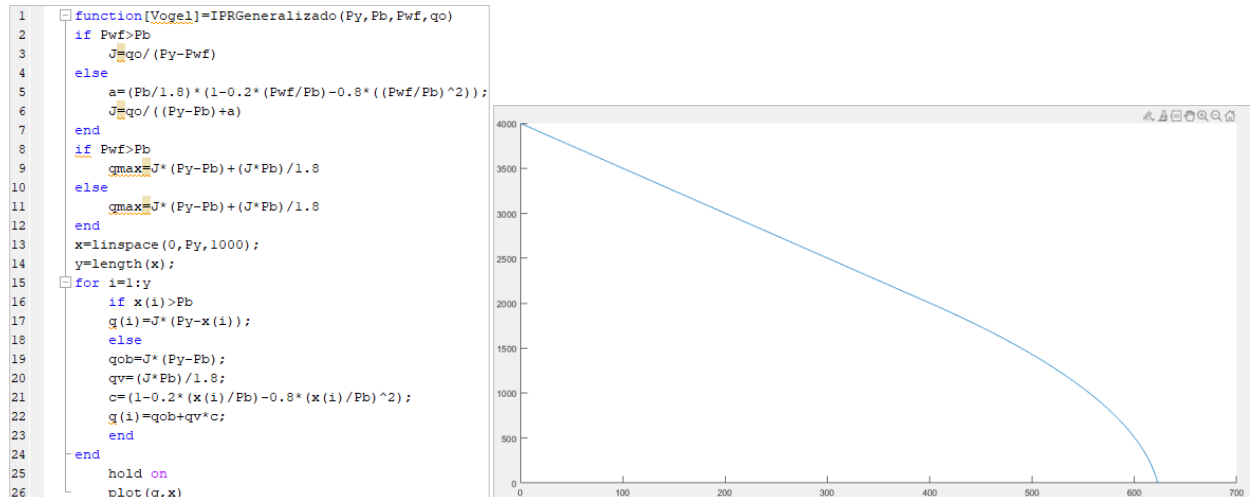


Figura. 6 Programa y Gráfica en Matlab

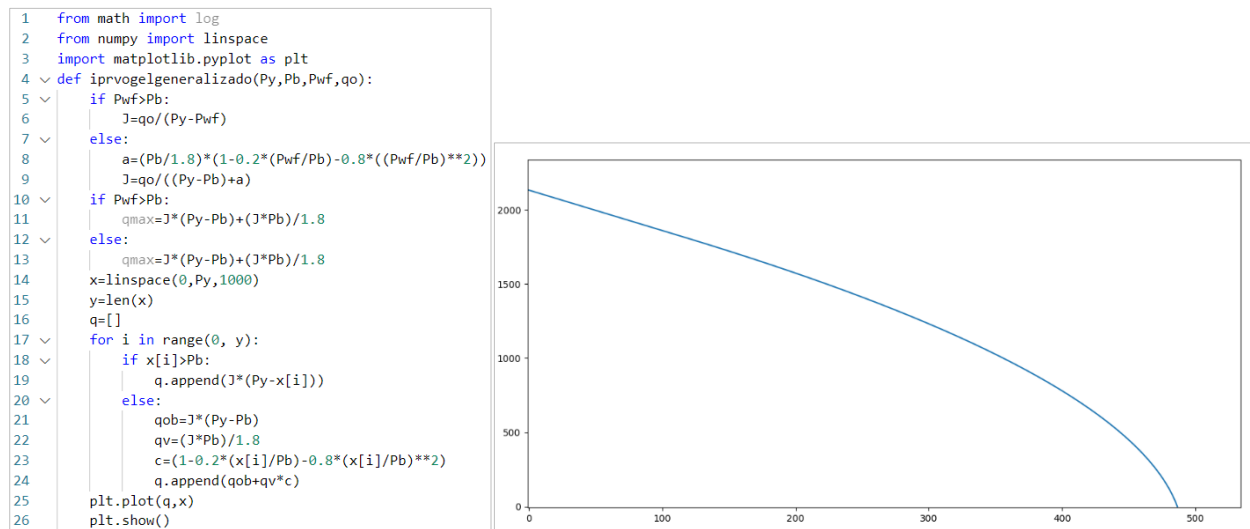


Figura. 7 Programa y Gráfica en Python

Además de realizar la programación de los métodos contribuí con el diseño del módulo de Corewell, donde determiné cada parámetro necesario para la obtención de cada gráfico, de tal forma que la estructura la realicé pensando en que la plantilla de la aplicación fuera de fácil uso para el usuario y que además mostrara los resultados de cada método, como el potencial absoluto o AOFPP por sus siglas en inglés.



## 2.2.2 Correlaciones PVT

Este fue el segundo punto aledaño al IPR que generé para el modelado de pozos, desarrollando la programación de diversos autores en Matlab y Python con el objetivo de realizar los cálculos necesarios para la curva VLP, además de la generación de parámetros para el diseño y armado de propuestas.

Al tener en cuenta los objetivos que se necesitaban cubrir hice una relación de las propiedades de cada uno de los fluidos presentes en los yacimientos, como son aceite, gas y agua, de tal forma que se pudieran establecer los cálculos pertinentes para la generación de información a partir de datos conocidos del yacimiento, como son la temperatura, presión, relación gas aceite, °API, etc.

### Programación en Python

Al tener definidas las propiedades que se querían calcular por medio de códigos en Python. Me di a la tarea de reunir toda la literatura correspondiente junto con las fórmulas para cada uno, determinando los rangos en los que eran aplicables las correlaciones, así como la estructura que tenía que llevar cada una. De tal forma que la programación y los resultados salieran conforme a los establecidos por los autores.

Dicha programación de las fórmulas para cada autor las realicé en ambos lenguajes de programación y las base en la literatura correspondiente, determinando una serie de autores para cada propiedad.

**Nota:** *Por motivos prácticos elaboré una tabla donde enuncia cada autor con su respectiva propiedad, omitiendo fórmulas para cada uno.*





Propiedades del aceite		Propiedades del gas		Propiedades del agua	
$R_s, B_o, P_b:$	Al Marhoun	$T_{pc}$ y $P_{pc}:$	Standing y Katz	$B_w:$	Gould
	Glaso	$T_{pc}$ y $P_{pc}$ (contaminantes):	Wichert y Aziz	$\rho_w:$	General
	Kartoatmodjo y Schmidt	$z:$	Dranchuck	$\mu_w:$	Van Wingen
	Standing		Brill	$\sigma_w:$	General
	Vazquez y Beggs		Papay		
$\mu_{od}:$	Beal	$B_g:$	General		
	Glaso	$\rho_g:$	General		
	Beggs y Robinson	$\mu_g:$	Lee		
	Kartoatmodjo y Schmidt				
$\mu_o:$	Kartoatmodjo y Schmidt				
	Vazquez y Beggs & Beggs y Robinson				
$\rho_o:$	General				
$\sigma_o:$	Baker y Swerdloff				
$C_o:$	Vazquez y Beggs				
	Kartoatmodjo y Schmidt				

**Tabla 1** Relación de propiedades y autores<sup>3</sup>

Los códigos los fui elaborando, haciendo uso de conocimientos adquiridos en la facultad y apegándome al desarrollo de cada escritor. Teniendo en cuenta que haría un desarrollo sin necesidad de contar o hacer uso de gráficas, considerando el uso de condicionales para diferenciar el cálculo de algunas propiedades con base en rangos específicos. Logrando tener los resultados esperados después de haber hecho varias pruebas con datos diferentes.

Una vez que ya tenía todo programado, con el apoyo del departamento de tecnologías de la información esto fue cargado a Corewell; previamente ya había elaborado una pestaña extra en el mismo módulo de IPR para colocar todas las correlaciones PVT.

<sup>3</sup> Brill, James P., and Mukherjee H.: "Multiphase Flow in Wells," Richardson Texas: Society of Petroleum Engineers, 1999.



<pre> 1 function[Bo]=factvol(Rs,gamg,gamo,T,Ps,Ts) 2 %Esta función calcula el factor del volumen del aceite a 3 %condiciones de P y T, a partir de la relación de 4 %solubilidad, la densidad relativa del gas y del aceite, 5 %la temperatura de la mezcla, y la presión y temperatura 6 %de la primera etapa de separación, por medio de la 7 %correlación de K&amp;S. 8 API=(141.3/gamo)-131.1; 9 if Ps==100 10     gamgf=gamg; 11 else 12     h=(Ps/114.7); 13     %Ps en [Psig] 14     i=API*Ts*log10(h); 15     %Ts en [°F] 16     j=0.0000591*i; 17     k=1+j; 18     gamgf=gamg*k; 19 end 20 a=gamo^-1.5; 21 b=gamgf^0.25; 22 c=Rs^0.755; 23 %Rs en [scf/stb] 24 d=0.45*T; 25 %T en [°F] 26 e=(a*b*c)+d; 27 f=0.0001*(e^1.5); 28 Bo=0.98496+f; </pre>	<pre> 1 def Bo(T_AM,Rs_AM,SGgas_AM,API_AM): 2 3     SGoil_AM=141.5/(131.5+API_AM) 4     print('La Gravedad Específica del Aceite es:', SGoil_AM) 5     k_AM=Rs_AM**(0.742390) 6     l_AM=SGgas_AM**(0.323294) 7     m_AM=SGoil_AM**(1.202040) 8     F_AM=k_AM*l_AM*m_AM 9     print(F_AM,'1') 10    ñ_AM=(0.862963e-3)*(T_AM+460.67) 11    print(ñ_AM) 12    o_AM=(0.182594e-2)*F_AM 13    print(o_AM) 14    p_AM=(0.318099e-5)*(F_AM**2) 15    print(p_AM) 16    Bo_AM=0.497069+ñ_AM+o_AM+p_AM 17    print(Bo_AM) </pre>
---	---

Figura. 8 Código de PVT en Matlab y Python

En relación con la pestaña PVT de Corewell, también contribuí con el diseño del módulo, estableciendo una plantilla que fuera de fácil uso para los usuarios, con parámetros esenciales para el correcto cálculo de las propiedades.

### 2.2.3 Rendimiento de elevación vertical (VLP)

Este apartado de VLP fue el tercer punto en el modelado de pozos que realicé en Corewell, donde definí las correlaciones que podían implementarse con base en los requerimientos principales de la curva. Teniendo como objetivo el poder hacer un software propio de la compañía donde se omitiera el uso de gráficas y por ende todo estuviera automatizado; esto con la finalidad de generar y hacer uso de la herramienta de forma más fácil y rápida, para que el personal de la empresa como los clientes pudieran generar mayor valor a sus actividades diarias.

Una vez que implementé los códigos de PVT en la pestaña correspondiente pude tener acceso a los valores calculados a partir de datos de yacimiento para que posteriormente se graficará la curva VLP junto con el comportamiento de afluencia. Determinando la literatura correspondiente para el desarrollo de este apartado, la cual se enuncia a continuación:

La ecuación de gradiente de presión derivada para flujo monofásico se puede modificar para flujo multifásico considerando que los fluidos son una mezcla homogénea.

$$\frac{dp}{dL} = \frac{f \rho_f v_f^2}{2d} + \rho_f g \text{sen}\theta + \rho_f v_f \frac{dv_f}{dL} \quad \text{Ec (2.18)}$$



Donde las definiciones de  $\rho_f v_f$  pueden variar con diferentes investigadores. Para flujo vertical,  $\theta = 90^\circ$ ,  $\sin \theta = 1$ ,  $dL = dZ$ , la ecuación se puede escribir como:

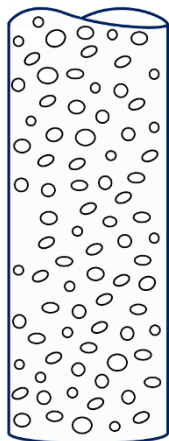
$$\left(\frac{dp}{dZ}\right)_t = \left(\frac{dp}{dZ}\right)_f + \left(\frac{dp}{dZ}\right)_{el} + \left(\frac{dp}{dZ}\right)_{acc} \quad \text{Ec (2.19)}$$

El componente de caída de presión causado por pérdidas por fricción requiere la evaluación de la fricción de dos fases. La caída de presión causada por el cambio de elevación depende de la densidad de la mezcla de dos fases. A excepción de las condiciones de alta velocidad, la mayor parte de la caída de presión en el flujo vertical es causada por este componente. La caída de presión causado por la aceleración es normalmente insignificante y solo se considera para casos de altas velocidades de flujo.<sup>3</sup>

### • Patrones de flujo y su clasificación

Precisar el patrón de flujo que ocurre en un lugar determinado de un pozo es extremadamente importante. La correlación empírica o modelo mecanicista utilizado para predecir el comportamiento del flujo varía con el patrón de flujo. Por lo tanto, diversos investigadores se dieron a la tarea de describir patrones de flujo y además intentaron predecir cuándo ocurrirían.

Para el flujo multifásico ascendente de gas y líquido, la mayoría de los investigadores ahora reconocen la existencia de cuatro patrones de flujo: flujo burbuja, flujo bache, flujo niebla y flujo anular. Determinando transiciones entre estos, tal como es el flujo bache y niebla que a veces se combinan en un patrón de flujo llamado flujo intermitente o la transición entre el flujo bache y el flujo anular que incorpora el flujo niebla.<sup>3</sup>

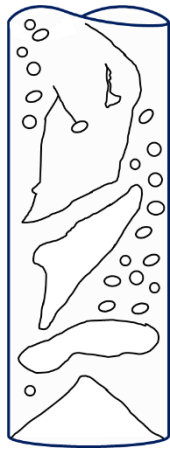
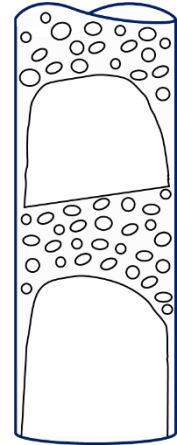


**Flujo burbuja.** El flujo burbuja se caracteriza por una fase gaseosa distribuida uniformemente y burbujas dispersas en una fase líquida continua. En función de la presencia o ausencia de resbalamiento entre las dos fases, el flujo burbuja se clasifica además en flujo burbuja y burbujas dispersas. En el flujo burbuja, relativamente son menos burbujas y son más grandes. Estas se mueven más rápido que la fase líquida debido al resbalamiento. En el flujo de burbujas dispersas, la fase líquida transporta numerosas burbujas diminutas, lo que no provoca ningún movimiento relativo entre las dos fases.

<sup>3</sup> Brill, James P., and Mukherjee H.: "Multiphase Flow in Wells," Richardson Texas: Society of Petroleum Engineers, 1999.

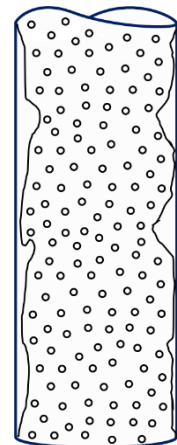


**Flujo bache.** El flujo bache se caracteriza por una serie de unidades de baches. Cada unidad está compuesta por una bolsa de gas llamada burbuja de Taylor, un tapón de líquido llamado bache y una película de líquido alrededor de la burbuja de Taylor que fluye hacia abajo en relación con la burbuja de Taylor. La burbuja de Taylor es una bolsa de gas en forma de bala simétrica que ocupa casi toda el área de la sección transversal de la tubería. El bache de líquido, que lleva burbujas de gas distribuidas, une la tubería y separa dos burbujas de Taylor consecutivas.



**Flujo niebla.** El flujo niebla es un flujo caótico de gas y líquido en el que la forma de las burbujas de Taylor y los baches de líquido se distorsionan. Ninguna fase parece ser continua. La continuidad del líquido en el bache se destruye repetidamente por una alta concentración de gas. Una dirección de movimiento oscilatoria o alterna en la fase líquida es típica del flujo niebla.

**Flujo anular.** El flujo anular se caracteriza por la continuidad de la fase gaseosa en un núcleo central con el líquido fluyendo hacia arriba, tanto como una película delgada a lo largo de la pared de la tubería como gotas dispersas en el núcleo. A altas velocidades de flujo de gas, se dispersa más líquido en el núcleo, dejando una película de líquido muy delgada que fluye a lo largo de la pared. El esfuerzo cortante interfacial que actúa en la interfaz núcleo/película y la cantidad de líquido arrastrado en el núcleo son parámetros importantes en el flujo anular.<sup>3</sup>



Por lo tanto, se han desarrollado muchos métodos para predecir gradientes de presión de flujo de dos fases y estos se diferencian en la forma en que se calculan los tres componentes del gradiente de presión total.

<sup>3</sup> Brill, James P., and Mukherjee H.: "Multiphase Flow in Wells," Richardson Texas: Society of Petroleum Engineers, 1999.



- **Correlación de Orkiszewski**

Las correlaciones de flujo multifásico se pueden ubicar en 3 categorías principalmente, donde la primera categoría hace uso del resbalamiento, pero no considera el patrón de flujo. La segunda categoría considera el resbalamiento, pero no el patrón de flujo, y en la tercera categoría emplea el término de resbalamiento y hace distinción de los patrones de flujo. Por lo que esta última categoría es donde pertenece la correlación de Orkiszewski.

Orkiszewski utilizó las transiciones del patrón de flujo de Duns y Ros para los límites entre el flujo bache y el flujo niebla, incluida la región de transición entre ellos. Determinando las ecuaciones pertinentes para la identificación de cada uno de los patrones, como son: el flujo burbuja, bache, transición bache-niebla y niebla. Además de definir el colgamiento de líquido y la densidad de resbalamiento.

Con base en lo anterior partió para establecer la caída de presión total con cada uno de los gradientes de presión determinados para cada flujo, haciendo consideraciones para cada uno y estableciendo las condiciones a cumplir para que exista cada flujo.<sup>3</sup>

**Nota:** *Por motivos prácticos sólo se mencionan algunos parámetros empleados en la correlación, omitiendo fórmulas para cada uno.*

## Programación en Python

La programación en Python la llevé a cabo una vez que ya había reunido toda la literatura correspondiente para cada método, por lo que por motivos prácticos hice uso de tres correlaciones principalmente, las cuales son: Orkiszewski, Aziz y Beggs & Brill.

Estas correlaciones me fueron de interés ya que son correlaciones en las cuales no es necesario contar con gráficas para los cálculos del gradiente de presión, teniendo en algunos casos la opción de polinomios para los valores donde se requiere usar una gráfica.

Por lo cual, fui programando cada correlación con base en la literatura previamente consultada, haciendo uso de la plataforma Matlab y posteriormente de Python. Por lo que para la programación de cada correlación tuve que hacer uso de condicionales para poder diferenciar entre cada patrón de flujo, así como para establecer términos necesarios basados en ecuaciones empleadas. Además de usar algunas funciones y en algunos casos métodos numéricos para poder predecir datos con base en iteraciones.

---

<sup>3</sup> Brill, James P., and Mukherjee H.: "Multiphase Flow in Wells," Richardson Texas: Society of Petroleum Engineers, 1999.



Por lo tanto, al tener el código de cada correlación las probe con datos para comprobar los resultados finales de cada una, dando paso a la gráfica compuesta por el IPR junto con la curva VLP. Estableciendo límites entre estas para que fuera más fácil su lectura.

```

1 function[gradtotal_BB]= BeggsBrill(qo_BB,qg_BB,Bo_BB,Bg_BB,Rs_BB,denoil_BB,dengas_BB,
2 At_BB=(pi/4)*(diametro_BB/12)^2;
3 qlqliquido_BB=0.000064988*qo_BB*Bo_BB;
4 velocidadesl_BB=qlqliquido_BB/At_BB;
5 qgas_BB=0.000011574*((qg_BB*10^6)-(qo_BB*Rs_BB))*Bg_BB;
6 velocidadesg_BB=qgas_BB/At_BB;
7 velocidadmezcla_BB=velocidadsl_BB+velocidadsg_BB;
8 NFr_BB=(velocidadmezcla_BB^2)/(32.2*diametro_BB/12);
9 NLv=1.938*velocidadsl_BB*(denoil_BB/ST_BB)^0.25;
10 colgamientoqliq_BB=qlqliquido_BB/(qlqliquido_BB+qgas_BB);
11 L1=316*(colgamientoqliq_BB^0.302);
12 L2=0.000925*(colgamientoqliq_BB^-2.468);
13 L3=0.1*(colgamientoqliq_BB^-1.452);
14 L4=0.5*(colgamientoqliq_BB^-6.738);
15 if (colgamientoqliq_BB<0.01 && NFr_BB<L1) || (colgamientoqliq_BB>=0.01 && NFr_BB<L2)
16 %Segregado
17 a=0.98;
18 b=0.4846;
19 c=0.0868;
20 d=0.011;
21 e=-3.768;
22 f=3.539;
23 g=-1.614;
24 HLO=(a*colgamientoqliq_BB^b)/(NFr_BB^c);
25 C=(1-colgamientoqliq_BB)+log(d*(colgamientoqliq_BB^e)*(NLv^f)*(NFr_BB^g));
26 if C<0
27 phi=1+(C*(sin(1.8*angulo_BB)-0.333*(sin(1.8*angulo_BB))^3));
28 else
29 phi=1;
30 end
31 Hlcorregido=HLO*phi;
32 elseif colgamientoqliq_BB>=0.01 && NFr_BB >= L2 && NFr_BB <= L3

```

Figura. 9 Código en Matlab

```

27 def Grad_Orki(RGA_Orki,Epsilon_Orki,SurfaceTensionOil_Orki,qw_Orki,dh_Orki,qo_Orki,Bo_Orki)
28 #Esta es para el cálculo con las correlaciones programadas
29 fo_Orki=(qo_Orki*Bo_Orki)/(qw_Orki*Bw_Orki+qo_Orki*Bo_Orki)
30 print('Flujo fraccional de aceite ',fo_Orki)
31 fw_Orki=1-fo_Orki
32 print('Flujo fraccional de agua ',fw_Orki)
33 #Esta es para el cálculo con las correlaciones programadas
34 DensityLi_Orki=DensityOil_Orki*fo_Orki+denwater_Orki*fw_Orki
35 print('Densidad del líquido',DensityLi_Orki)
36 #Esta es para el cálculo con las correlaciones programadas
37 SurfaceTensionL_Orki=SurfaceTensionOil_Orki*fo_Orki+SurfaceTensionWater_Orki*fw_Orki
38 print('Tensión superficial del líquido',SurfaceTensionL_Orki)
39 #Esta es para el cálculo con las correlaciones programadas
40 ViscosidadLiquido_Orki=Vo_Orki*fo_Orki+Vw_Orki*fw_Orki
41 print('Viscosidad del líquido',ViscosidadLiquido_Orki)
42 #Paso 1:
43 At_Orki=(pi/4)*((dh_Orki/12)**2)
44 print('El área es',At_Orki)
45 #Paso 2:
46 ql_Orki=6.4988e-5*(qo_Orki*Bo_Orki)
47 print('Gasto de líquido a condiciones de flujo',ql_Orki)
48 qgacf_Orki=1.1574e-5*(qo_Orki*(RGA_Orki-Rs_Orki))*Bg_Orki
49 print('Gasto de gas a condiciones de flujo',qgacf_Orki)
50 #Paso 3:
51 Vsl_Orki=ql_Orki/At_Orki
52 print('Velocidad superficial de líquido',Vsl_Orki)

```

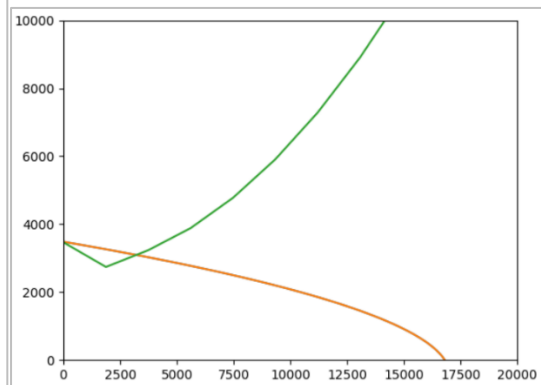


Figura. 10 Código y Gráfica en Python

Una vez que tenía los códigos programados en Python pude desarrollar el diseño del módulo en Corewell, donde coloqué los datos necesarios para el uso de la correlación.



## 2.3 Bombeo Hidráulico Tipo Jet

Para la realización del diseño del Bombeo Hidráulico Tipo Jet (BHJ) era necesario analizar la información de pozos de los clientes, ya que, cada uno de ellos era distinto a pesar de pertenecer al mismo campo. La diferencia de estos radicaba en los accesorios del aparato de producción, presión, gastos, corte de agua, etc. Por lo que, el análisis de los datos compartidos lo tenía que hacer cuidadosamente para tener las mejores condiciones del pozo.

De ahí que, la metodología empleada para el desarrollo de cada diseño y propuesta fue basada en los puntos descritos a continuación.

### 2.3.1 Diseño de BHJ

Como ya se mencionó, para el modelado del BHJ tenía que trabajar en sinergia con el cliente, a fin de lograr resultados satisfactorios en el diseño y la operación.

Para este rubro, tuve como base tres puntos principales para la elaboración de cada propuesta en la compañía, los cuales son:

- Verificación de estado mecánico.
  - Análisis de condiciones actuales (IPR Y Análisis nodal) de pozos.
  - Diseño de sistema artificial de producción de bombeo hidráulico tipo jet.
- 
- **Verificación de estado mecánico.**

Después del primer contacto del cliente con la compañía, se procedía a la verificación del estado mecánico por parte de los Project Manager, el cual era el primer filtro para la determinación del tipo de sistema artificial que podía implementarse en el pozo con base en sus características. Si los PMO determinaban que el pozo podía ser candidato a BHJ, compartían la información al departamento de diseño.

Principalmente en el estado mecánico identificaba los elementos que conformaban el aparato de producción, y que beneficiaban o perjudicaban la instalación del bombeo hidráulico. Dentro de los beneficios, se tenía una gran ventaja si el pozo contaba con válvula de pie, ya que, de esa manera era más fácil la recuperación de la bomba jet. Sin embargo, la camisa deslizable era el principal elemento que tenía que considerar en el estado mecánico para la instalación del sistema, debido a que en esa herramienta se aloja la bomba jet.

En algunos casos, si los pozos contaban con mandriles de BN que tuvieran un ID menor al del aparato de producción era perjudicial para la instalación, ya que se tenía que recurrir a una intervención para la adaptación del sistema artificial. Había casos en





los que los mandriles tenían el mismo ID que el aparejo de producción, por lo que, para esos casos, solo se tenían que colocar tapones en las válvulas o cumplir con la prueba de hermeticidad en el aparejo de producción.

De modo que, si determinaba en el análisis del estado mecánico que el pozo era candidato para el bombeo hidráulico, nos era compartida la información actualizada para su análisis detallado.

- **Análisis de condiciones actuales (IPR Y Análisis nodal) de pozos.**

Para el diseño óptimo del BHJ era necesario tener presentes las condiciones actuales del pozo (RGA, propiedades de los fluidos, profundidad, etc.). Por lo cual, la información de cada pozo tenía que examinarla detenidamente porque en caso de no contar con datos suficientes para el diseño, tenía que solicitarlos con el cliente o calcularlos por medio de fórmulas matemáticas.

De tal forma que la revisión de la información era distinta para cada uno, y dependía de lo compartido.

Los datos que principalmente buscaba eran:

Información para condiciones actuales	
Asentamientos de TR's	Presión de superficie
Profundidad de empacador	Corte de agua
Temperatura de yacimiento	Gravedad específica del aceite y gas
Presión de yacimiento	RGA
°API del aceite	Espesor del yacimiento
Gasto de aceite y gas	Viscosidad del aceite y gas
Profundidad del intervalo disparado	Permeabilidad del yacimiento
Survey del pozo	Diámetro del pozo
Temperatura de superficie	

**Tabla 2** Datos para diseño del BHJ

Como primer punto para la determinación del potencial del pozo, tenía que modelar la curva IPR haciendo uso de datos de la **Tabla 2**. En ocasiones algunos de estos datos no eran totalmente usados para la generación de la gráfica, debido a que la elección del comportamiento de afluencia estaba basada en las consideraciones de cada autor, en los parámetros de entrada, y en la información contenida del pozo.

Como se vio en el “**Capítulo 2.2 Modelado de pozos**”, parte de la información de la tabla anterior sólo era usada en métodos IPR específicos, tales como: Espesor del yacimiento, Diámetro del pozo y Permeabilidad del yacimiento. Por ese motivo la variación del modelado IPR era distinto para cada pozo.





Como segundo punto, tenía que generar la curva VLP con base en la información proporcionada; surgiéndome la necesidad de recopilar más datos de la tabla para la alimentación de la curva.

Ocasionalmente cuando no contaba con los datos PVT necesarios para las propiedades de los fluidos, tenía que calcularlos por medio de las correlaciones descritas en el “**Capítulo 2.2.2 Correlaciones PVT**” o hacer uso de las del software comercial, considerando las características del pozo.

Las fórmulas empleadas en el modelado de la VLP estaban basadas en cálculos básicos como los °API del aceite, los cuales eran necesarios para la simulación de las condiciones actuales del pozo.

$$^{\circ}API = \frac{141.5}{SG} - 131.5 \quad \text{Ec (2.20)}$$

Después de que reunía todos los datos necesarios para el modelado, procedía a la elaboración de la curva IPR y VLP en el software comercial, de tal forma que se obtuvieran las gráficas con el punto de operación actual.

- **Diseño de sistema artificial de producción de bombeo hidráulico tipo jet.**

El diseño del BHJ tenía que hacerlo en un segundo software comercial, y englobaba los datos de la simulación a las condiciones actuales del pozo, como las consideraciones adicionales para la obtención del diseño. Estas consideraciones principalmente estaban basadas en datos del pozo, proveedores y equipos superficiales, tales como: presión de inyección de fluido motriz, marca de la bomba jet, gasto de producción deseado, profundidad de la camisa deslizante y sentido de circulación del fluido.

Con tal información diseñaba el BHJ y posteriormente elaboraba las propuestas con base en los resultados del software.



### 2.3.1.1 Caso de estudio

El siguiente caso de estudio describe las actividades que realicé para la propuesta técnica del Pozo “**Puma Dorado-1**”, dicho pozo fue perforado y terminado en una formación de arenas con baja permeabilidad, por lo que, la compañía solicitante del servicio BHJ procedió al fracturamiento hidráulico en dos intervalos de la formación productora, con el fin de incrementar la permeabilidad de la roca y la recuperación de fluidos.

Este pozo era fluyente y tenía la particularidad de encontrarse ubicado en una zona de extensión del yacimiento con condiciones originales de presión, con una producción de crudo desde 12 [bpd] hasta 51 [bpd] en su punto más alto medido, mientras que los pozos aledaños tenían un gasto de 55-250 [bpd].

El bloque en el que se encontraba el pozo Puma Dorado-1 contaba con un total de ocho pozos perforados, de los cuales cinco eran productores, uno en terminación y dos en etapa de limpieza y definición de producción. El pozo en solicitud era uno de los dos recién perforados y en espera de la optimización de producción con el sistema artificial de producción. El espaciamiento entre pozos era el adecuado, por lo que, no se identificó drene compartido entre los pozos.

Principalmente con la implementación del BHJ en el pozo se buscaba el mantenimiento de la producción en la superficie, debido a que el pozo era muy inestable y tenía intermitencia en la producción.

Por esta razón, tuve que analizar el estado mecánico compartido por el cliente, con el propósito de identificar los elementos que conformaban el aparejo de producción y que facilitaban la instalación del bombeo hidráulico tipo jet. Determinando como elemento principal a la camisa deslizante a la profundidad de 907.23 [m], con un aparejo de producción de 2 7/8” a 917.43 [m] y empacador a 919.83 [m]. Así como los dos intervalos disparados y fracturados a las profundidades de 948-954 [m] y 1017-1023 [m], **Figura. 11**.

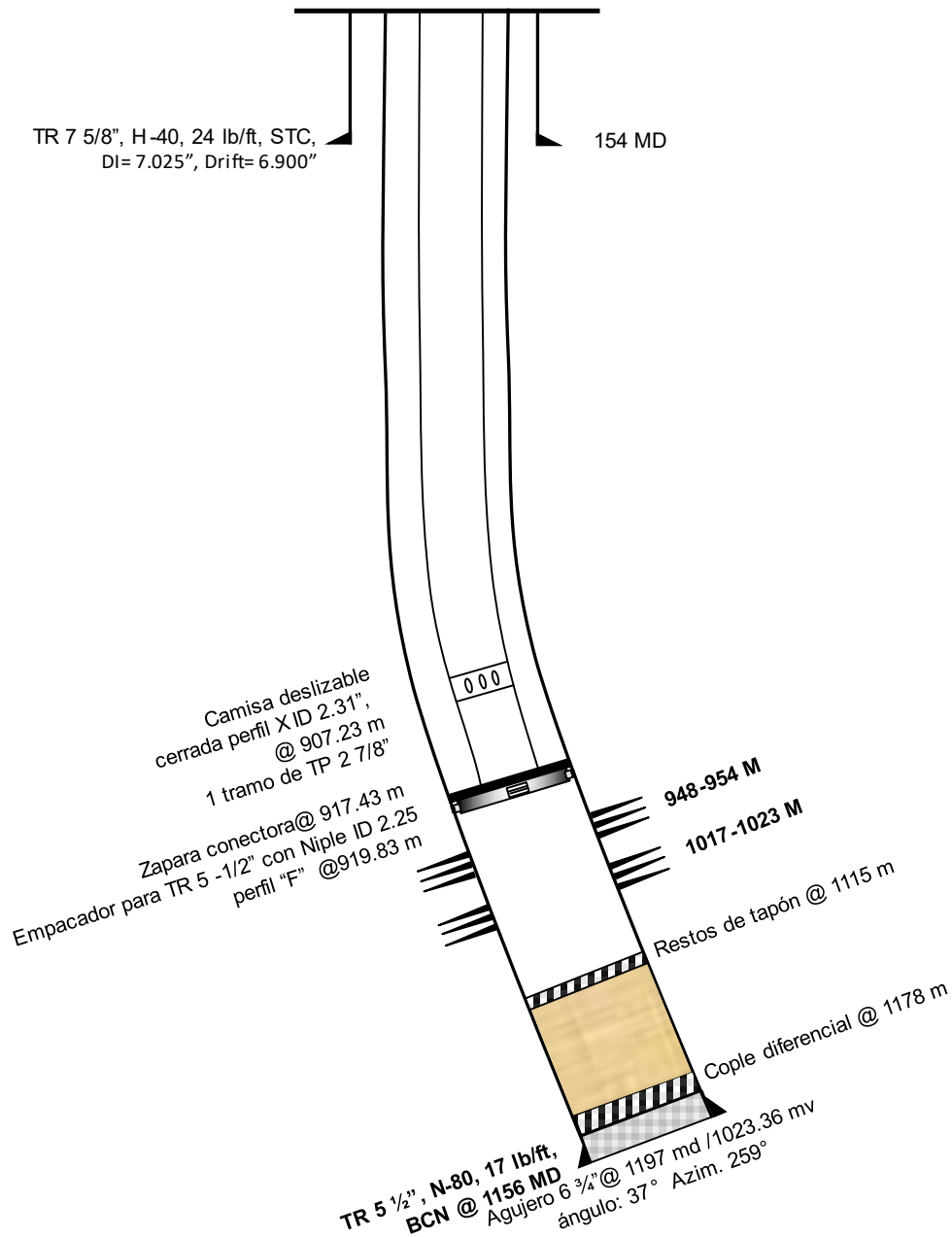


Figura. 11 Estado mecánico

Después de haber verificado y aprobado el estado mecánico en el que se iba a instalar el sistema, tuve que analizar la información del pozo para la obtención de los datos que utilizaría en la simulación de las condiciones actuales (IPR y VLP), y en el diseño del BHJ.

Identificando que los datos que nos fueron compartidos involucraban un registro de presión de fondo fluyendo (RPFF) con estrangulador de 24/64 [in], resultados del análisis de la prueba de presión-producción en el software comercial y la curva de producción del pozo desde el inicio de operación sin el BHJ.



Por otra parte, la simulación de las curvas IPR y VLP para las condiciones actuales en el software comercial tuvo que realizarlas por separado, debido a que primero tenía que dimensionar el potencial del pozo con base en algunos datos de la **Tabla 3**, y posteriormente modelar la curva VLP con datos de producción, propiedades de los fluidos del yacimiento y correlación de flujo multifásico en tuberías verticales.

Datos generales		
Presión del yacimiento:	1659	[psi]
Temperatura del yacimiento:	58	[°C]
Densidad del aceite:	36	[°API]
Espesor del yacimiento:	14	[m]
Presión en cabeza:	120	[psi]
RGA:	673	[scf/stb]
Permeabilidad del yacimiento:	0.45	[md]
Daño:	-5.8	[adim]
Radio de drene:	260	[m]
Gasto de producción:	55	[bpd]
Corte de agua:	13	[%]
Estrangulador:	24/64	[in]

**Tabla 3** Datos de simulación para las condiciones actuales

*Nota: Por motivos confidenciales de la compañía solicitante, sólo es mostrada parte de la información del pozo utilizada en el diseño.*

La generación de la gráfica IPR la lleve a cabo con base en el modelo de Darcy, debido al tipo de yacimiento y la cantidad de información obtenida del análisis del pozo en la prueba de presión-producción. Obteniendo un gráfico con un potencial (AOF) de 70 [bpd] tras el fracturamiento de los intervalos productores.

Con el IPR generado pude pasar a la ejecución de la VLP sobre la base del gráfico del potencial del pozo, utilizando datos de propiedades de los fluidos y de la tabla anterior para la alimentación de la curva. Hay que mencionar que para este apartado tome en cuenta los elementos superficiales del pozo, considerando principalmente al estrangulador de 24/64 [in] para la obtención del punto de operación actual representado en la gráfica de la **Figura. 12**, respecto a la producción obtenida en la última medición de 51 [bpd].

Al observar los resultados de la gráfica identifiqué la horizontalidad que presentaba la curva VLP, por lo cual, me fue de gran interés reconocer y comprobar la inestabilidad del pozo en relación con el historial de producción, además de establecer que el colgamiento había incrementado. Con esto definí que el pozo podía dejar de ser fluyente más rápido de lo que se esperaba, por lo que era necesario la instalación del sistema artificial como ayuda adicional para la producción.

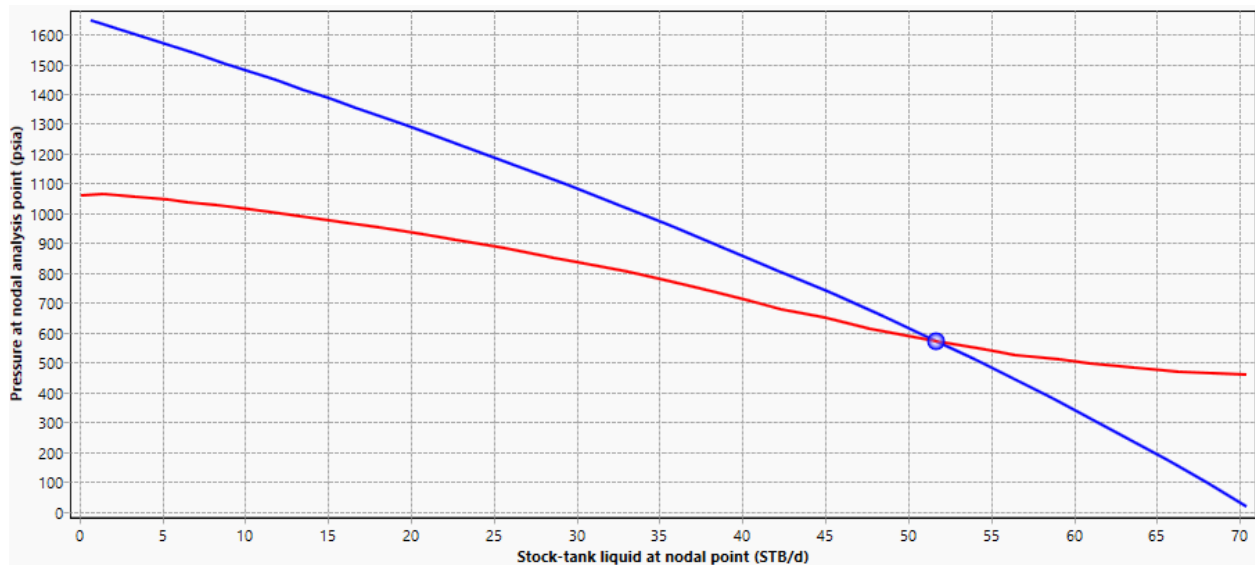


Figura. 12 Análisis nodal del Pozo fluyente Puma Dorado-1

Parte del ajuste del punto de operación actual lo desarrollé considerando el registro de presión de fondo fluyente y la ecuación de flujo multifásico para tuberías verticales Hagedorn & Brown, Duns & Ros map, debido a que es la que más se adaptaba a las condiciones del pozo, por lo mismo que es una correlación general que incluye prácticamente todos los rangos de flujo y un rango amplio de gas y líquido. Identificando en el ajuste la abrupta caída de la presión en el yacimiento por la baja permeabilidad del yacimiento reportada en el análisis del sensor de fondo.

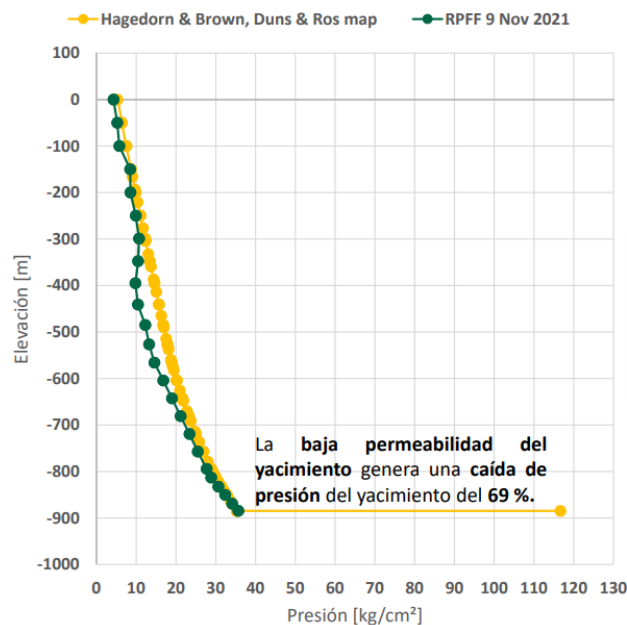


Figura. 13 Ajuste de correlación de flujo multifásico con RPF



En consecuencia y considerando el análisis nodal con las condiciones actuales del pozo, pude proceder con el diseño del BHJ en el software comercial, introduciendo los datos del modelado anterior y de equipos particulares del bombeo hidráulico tipo jet.

Los datos y resultados del análisis nodal los use como base para la obtención del diseño del BHJ, teniendo como elemento principal a la curva IPR para la simulación del sistema. Con la IPR elaborada en el nodal era más sencillo realizar la gráfica del software de bombeo hidráulico, porque sólo tenía que introducir los datos del análisis y comparar los resultados de la gráfica con la obtenida anteriormente. La finalidad de esto era tener similitud en el comportamiento de afluencia del pozo, además de poder diseñar de mejor manera el bombeo subsuperficial.

Por lo tanto, como puntos adicionales para el modelado tome en consideración datos de cuatro equipos esenciales del bombeo hidráulico, los cuales son:

- Marca de la bomba jet
- Tubo de mezcla
- Boquilla
- Equipo de bombeo superficial

Como primer punto para el diseño, considere los equipos y accesorios con los que contaba la compañía, y que podía usar en la simulación del pozo. La marca de la bomba jet era una de las limitantes que se tenía en el modelado, ya que el corporativo cuenta con tres de las mejores marcas en el mercado, por lo que no podía hacer uso de cualquiera que estuviera en la lista del software.

En el segundo punto se encontraba la selección del sentido de circulación del fluido motriz, puesto que hay flexibilidad en el sistema para la inyección y recuperación de fluidos en el pozo. Esta flexibilidad se centra en dos tipos de inyecciones. Uno es el sentido común y el más usado en la inyección del fluido motriz, que consiste en inyectar por el interior del aparejo y recuperar por el espacio anular. Mientras que el otro corresponde a la inyección de forma inversa, es decir, inyectar por el espacio anular y recuperar por el interior del aparejo. Por consiguiente, la elección del sentido de inyección en el software del BHJ lo relacione con la preferencia en la inyección por parte de la compañía, la cual resulta en la inyección del fluido motriz por el interior del aparejo de producción.

En el tercer punto tuve que insertar datos del fluido a inyectar, al igual que la presión mínima y máxima de inyección. Para el caso del fluido había oportunidad de elegir entre agua y aceite de inyección, eligiendo el agua para la simulación y operación, debido a que es un fluido que representa menores riesgos para la seguridad de los trabajadores, menor impacto ambiental, mayor eficiencia e infraestructura más reducida.



En relación con la presión de inyección del fluido motriz la referí a los equipos de bombeo superficiales y a la experiencia del departamento de diseño y operación. Las bombas que usábamos eran bombas triplex con capacidades de bombeo desde 1500 [psi] hasta 5000 [psi], optando para este caso por una bomba con presión máxima de descarga de 2000 [psi].

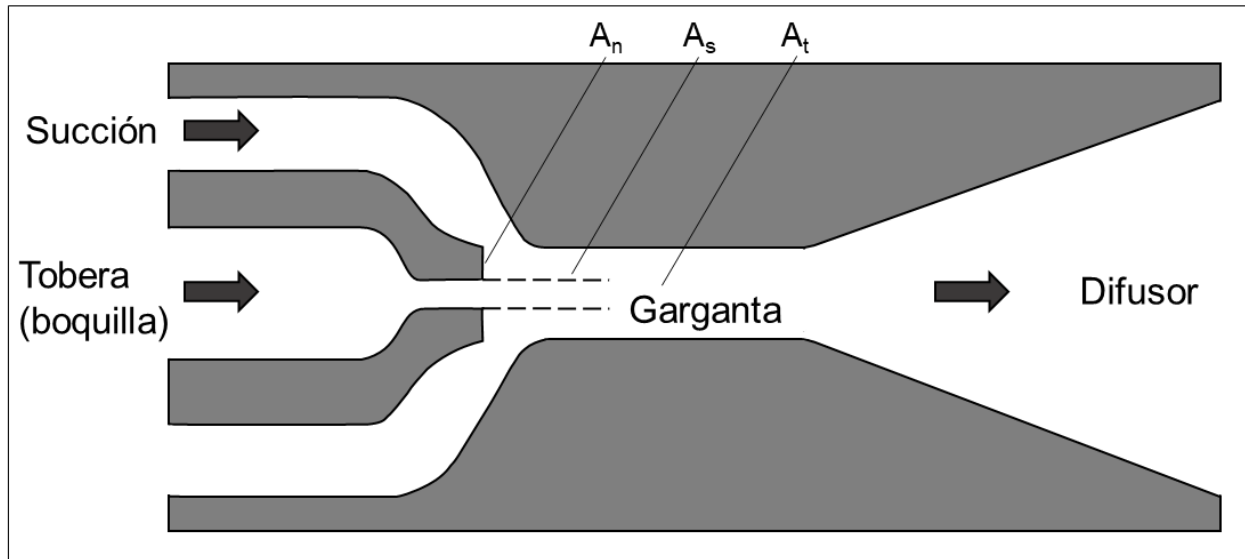
El último paso involucraba agregar el gasto deseado, y escoger el tubo de mezcla y boquilla que usaría en la simulación con el sistema.

En la **Figura. 14**, se observa el esquema de la sección de trabajo de una bomba jet. Si para una tobera dada, se selecciona una garganta de tal manera que el área de la tobera,  $A_n$ , sea el 60% del área del área de la garganta,  $A_t$ , entonces se obtendrá una carga relativamente alta con un flujo bajo. Existe un área más pequeña,  $A_s$  (Resultado de restar  $A_t - A_n$ ), alrededor del jet para la entrada de los fluidos, lo que lleva a bajos gastos de producción comparados con el gasto del fluido de potencia y a grandes cargas debido a que la energía de la tobera se transfiera sólo a una cantidad pequeña de fluido producido. Una bomba con las características anteriores es adecuada para pozos profundos. Gastos de producción mayores se pueden alcanzar si la bomba es grande, pero el gasto de producción siempre será menos que el de fluido de potencia.

Si se selecciona una bomba en la que el área de la tobera corresponde al 20% del área de la garganta, se tendrá un área de fluido mucho mayor para la producción alrededor del jet. Debido a que la transferencia de energía de la tobera se hace hacia un volumen de producción grande comparado con el volumen de fluido de potencia, se desarrollan cargas menores. Estas características son adecuadas para pozos someros. De acuerdo con la presión con la que se inyecta el fluido de potencia a la bomba y diferentes tamaños de garganta para una tobera dada, se obtiene una familia de curvas. Si las áreas de la tobera y de la garganta fueran dos veces mayores, los gastos de la tobera serían también el doble, y los gastos de producción serían el doble para cada valor de incremento de presión  $\Delta p$ . Debido a que las presiones que intervienen en las bombas son influenciadas por las densidades variables de la mezcla, las relaciones gas líquido y las viscosidades, los cálculos para predecir el comportamiento son complejos e iterativos y requieren de programas de cómputo para poder simplificarlos.<sup>10</sup>

---

<sup>10</sup> Bradley, Howard B. Petroleum Engineering Handbook. Society of Petroleum Engineers. 1987



**Figura. 14** Sección de trabajo de una bomba jet (boquilla y cámara de mezcla)

En vista de que se pretendía lograr la producción estabilizada en la superficie, el gasto que use fue el que obtuve de 51 [bpd] en el análisis nodal. Por el contrario, la elección de la boquilla y tubo de mezcla lo hice de acuerdo lo descrito anteriormente y con el ajuste que presentaban en la gráfica las curvas de presión de inyección con el gasto deseado. Señalando inicialmente en la lista del software una boquilla y un tubo de mezcla que cumpliera con las características necesarias para la producción de hidrocarburos. Posteriormente al haber ingresado toda la información correspondiente, logré la simulación del pozo con el bombeo hidráulico tipo jet, teniendo que cambiar en repetidas ocasiones la geometría (boquilla y tubo de mezcla) hasta que logré que coincidieran las curvas de inyección con el flujo de 51 [bpd].

Por ende, una vez que obtuve los resultados del software con el sistema artificial, lo que procedí a elaborar fue la propuesta técnica para el cliente.

### 2.3.1.2 Propuesta técnica

Respecto a la propuesta del pozo Puma Dorado-1 con el bombeo hidráulico tipo jet, realicé la proyección de dos escenarios con las geometrías de bomba C:5 y C+:5 (siendo C la boquilla y 5 el tubo de mezcla) para la producción esperada de 51 [bpd]. Estas geometrías fueron las que más se adaptaron a las condiciones del pozo tras el ajuste de cada una de las líneas de inyección con el gasto actual de operación.

En las gráficas resultantes del modelado del BHJ se mostraban las curvas IPR del pozo y de la bomba jet **Figura. 15 y Figura. 16**, teniendo como curva principal al IPR de la bomba, en la cual, se representaba el ajuste que había hecho con las líneas de inyección y el gasto deseado, colocando al gasto en medio de estas curvas, evitando caer en la zona de cavitación. De tal forma que, a raíz del ajuste, obtuve como





resultado cinco diferentes datos de gastos y presiones de inyección, de los cuáles, sólo un par de ellos (presión y gasto de inyección) serían los óptimos para el levantamiento de los fluidos en el pozo, mientras que los otros cuatro formaban parte del margen operativo que se podía tener en el pozo.

Como se mencionó anteriormente, al tener dos escenarios de producción con diferentes geometrías de bomba, también tenía dos tablas de datos (**Tabla 4 y Tabla 5**) con los resultados del ajuste que había realizado de las curvas de inyección y el punto de operación del bombeo hidráulico tipo jet. Indicando el margen operativo de los equipos superficiales (HP, Presión y gasto de inyección), así como la relación existente entre los parámetros de inyección con lo producido.

Estos datos me servirían para poder resumir e indicar a los operadores en la **Tabla 6**, los parámetros que podían usar durante la operación del bombeo hidráulico. De tal forma que, al conjuntar los datos del diseño y la experiencia del operador se cumpliera con la estabilización de la producción.

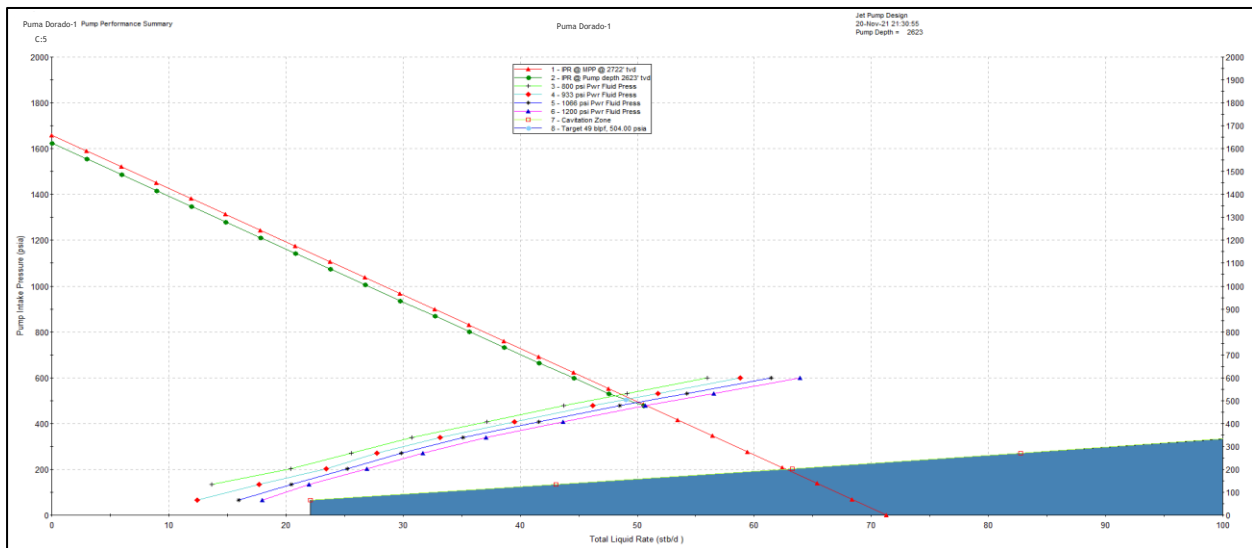


Figura. 15 Escenario de BHJ con geometría C:5

Q bruto [bpd]	Q neto [bpd]	Corte de agua [%]	Geometría	Potencia [hp]	Presión inyección [psi]	Gasto inyección [bpd]
48	42	13	C:5	11	800	723
49	43			14	926	756
49	43			14	933	758
50	44			16	1,066	791
51	44			19	1,200	823

Tabla 4 Parámetros con geometría C:5

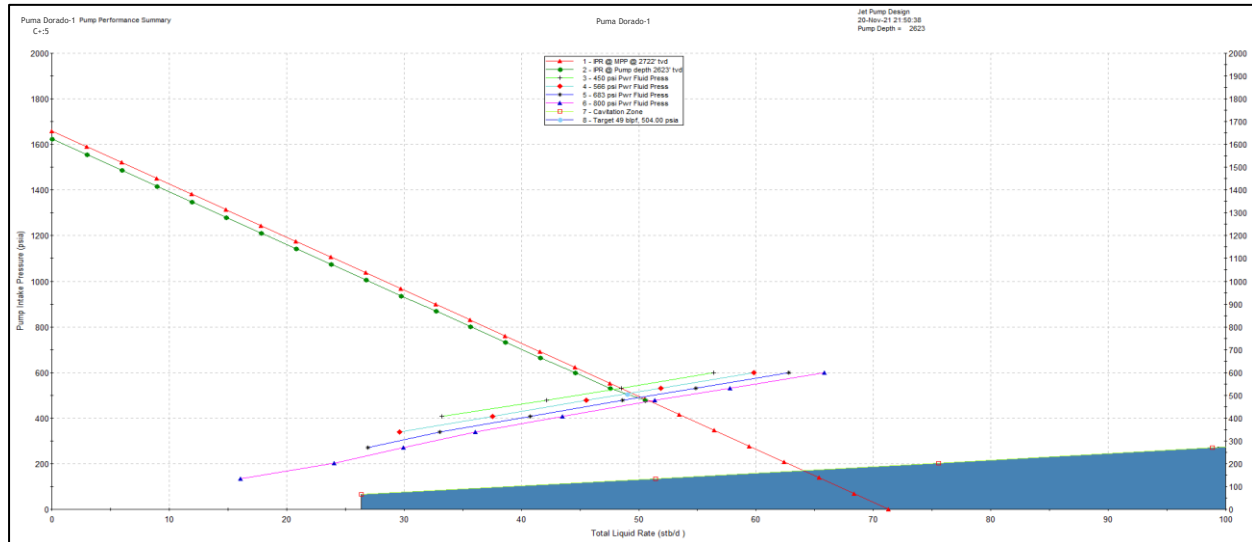


Figura. 16 Escenario de BHH con geometría C+:5

Q bruto [bpd]	Q neto [bpd]	Corte de agua [%]	Geometría	Potencia [hp]	Presión inyección [psi]	Gasto inyección [bpd]
48	42	13	C+:5	6	450	744
49	43			8	566	786
49	43			8	569	787
50	44			11	683	826
51	44			13	800	865

Tabla 5 Parámetros con geometría C+:5

Además de las tablas y las gráficas del diseño, también incluí dentro de la propuesta, el estado mecánico modificado con la bomba anclada en la camisa deslizante. Con el propósito de que el cliente tuviera mayor conocimiento acerca de la instalación que se pensaba efectuar y con ello determinar de mejor manera los acuerdos técnicos-comerciales entre Geolis y la empresa solicitante.

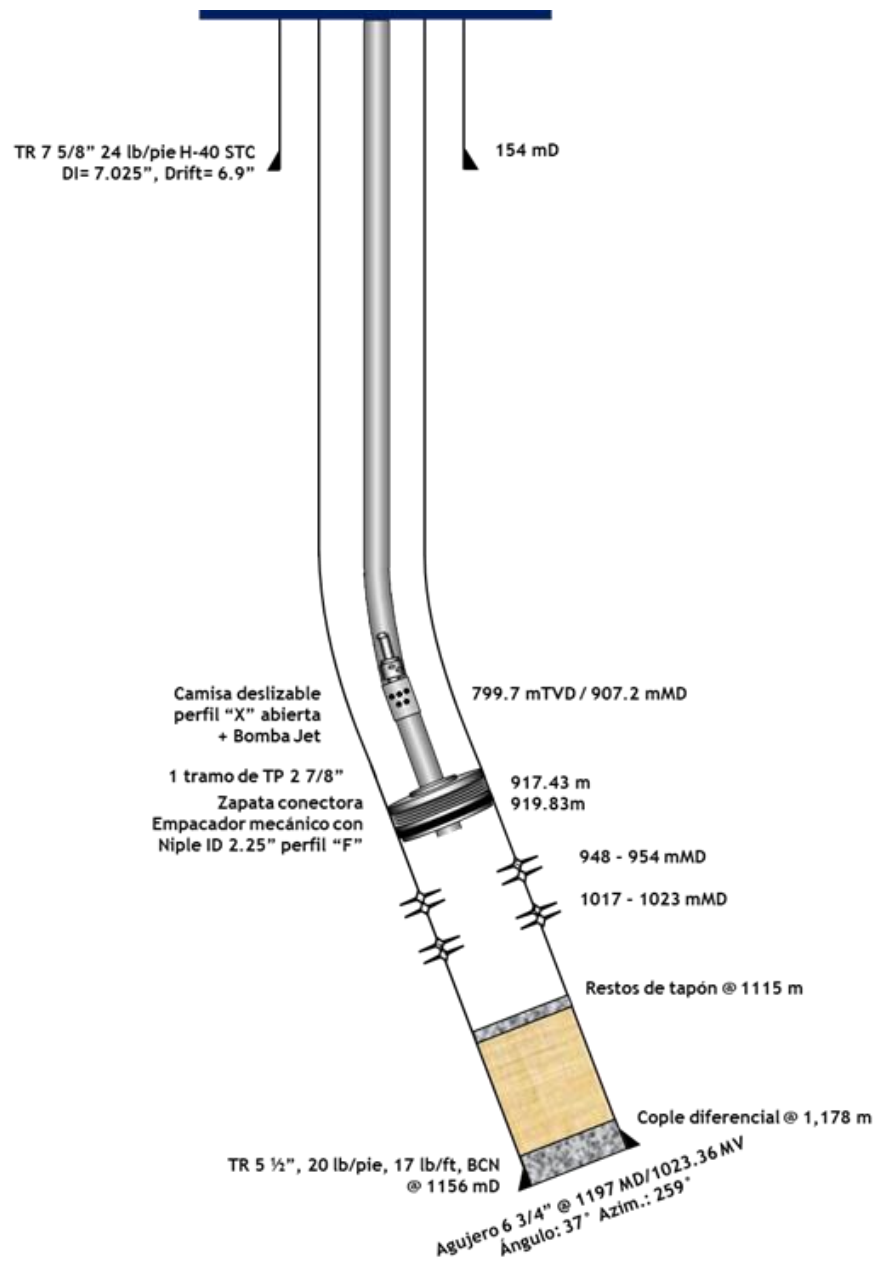


Figura. 17 Estado mecánico con bomba jet

Por último y como lo señalaba anteriormente, coloqué la tabla resumen con la cual, tanto el cliente como los operadores podían visualizar de mejor forma los parámetros a emplear durante la puesta en marcha.



Escenarios	1	2
Presión estática [psi]	1659	1659
GOR [scf/stb]	1,768	
Presión de succión de la bomba [psi]	504	504
Pwh [psi]	45	
Diámetro del aparejo // Profundidad de la bomba	2 7/8" // 907.2 MD	
Profundidad de la cima del intervalo productor [m]	948 MD	
Geometría	C:5	C+:5
Potencia [hp]	14	8
BLPD	49	49
BOPD	43	43
WC [%]	13	

**Tabla 6** Resumen de las condiciones operativas del pozo

## Capítulo 3 Resultados

### 3.1 GeoTalent en Página web

La ejecución del programa en la página de internet lo lleve a cabo mediante la colocación de un botón aledaño al de contacto, llamado “GEOTALENT”. Este botón permite que el usuario sea llevado al proyecto académico-profesional. Determinando que el botón de contacto (correo electrónico) fuera exclusivamente para motivos ajenos a GeoTalent.

Dentro del botón añadido, agregué cuatro botones más para los rubros del programa, **Figura. 18**. Estos botones permiten simplificar la visualización del contenido de cada rubro en secciones, posibilitando que el usuario tome la decisión de escoger el que más le resulte de interés.

De modo que el usuario al entrar en cada uno de los rubros encontrará información más detallada junto con sus secciones. Visualizando fotos, videos, mapas, indicadores, requisitos, formularios, etc.



**Figura. 18** Programa GEOTALENT



### 3.1.1 Universidades

Para este rubro decidí que sólo puede ir la sección de convenios, ya que eran los datos que más se adecuaban a tal situación. Por lo que, esta parte la determiné como el primer contacto que tendría la universidad con la empresa.



Figura. 19 Universidades

- **Convenios**

En esta sección establecí la información de cómo ha interactuado Geolis con las universidades en los últimos años con los proyectos y convenios firmados.

Al igual que coloqué un formulario para que los interesados pudieran llenarlo con datos relevantes y con ello solicitaran un convenio. Posteriormente la información proporcionada por el usuario junto con los convenios firmados los usaría como indicadores. Con el fin de conocer cómo ha contribuido el programa a la sociedad, a la compañía y a la industria petrolera.



- UNIVERSIDADES
- ESTUDIANTES
- RECIÉN EGRESADOS
- JÓVENES CONSTRUYENDO EL FUTURO

## CONVENIOS VIGENTES

Actualmente Geolis cuenta con 17 convenios vigentes con Universidades de diversos estados del país.



Figura. 20 Convenios

### 3.1.2 Estudiantes

Para este rubro coloqué 5 secciones de interés. Cumpliendo con los objetivos planteados en un principio. Colocando en cada sección ejemplos, fotos, documentos y formularios de lo que ha hecho Geolis a través del tiempo.



- UNIVERSIDADES
- ESTUDIANTES
- RECIÉN EGRESADOS
- JÓVENES CONSTRUYENDO EL FUTURO



Figura. 21 Estudiantes





## • Conferencias

En esta otra sección puse la información lo más sintetizada posible, proporcionando datos acerca de la trayectoria que ha tenido la empresa en conferencias con temas de relevancia para la industria petrolera, tanto en congresos como en universidades, pero siempre con los mejores miembros de la compañía.

Incorporando botones y formularios para mayor conocimiento del usuario acerca de la sección.

**Geolis** INICIO ACERCA DE SERVICIOS PROYECTOS NOTICIAS CONTACTO **GEOTALENT** in f

UNIVERSIDADES

**ESTUDIANTES**

RECIÉN EGRESADOS

JÓVENES CONSTRUYENDO EL FUTURO

## CONFERENCIAS

Como parte del compromiso social de Geolis hacia los estudiantes interesados en el desarrollo profesional dentro de la industria petrolera y ciencias de la tierra en general, la empresa pone a disposición un conjunto de conferencias y ponentes a disposición del alumnado para ayudar a una formación profesional integral.

*Ponencia titulada "Desarrollo de campos maduros bajo el esquema de reactivación de pozos cerrados", a cargo del Ing. Héctor Izquierdo - CMP 2019 León, Guanajuato.*

*Ponencia titulada "Adecuación del bombeo hidráulico para el manejo de producción en una batería", a cargo del Ing. Avelino González Pérez – Jornadas Técnicas, Tabasco, 2019.*

**Figura. 22** Conferencias

## • Servicio Social

Con esta sección pude administrar de mejor forma la información de los interesados mediante un formulario de solicitud, el cual se ligaría a las rúbricas de cada sección del proyecto.

Otorgando mediante documentos digitales los requisitos mínimos necesarios para la solicitud del servicio social. Colocando algunas notas y/o prevenciones antes de la captura de datos por parte del usuario.





## SOLICITUD DE SERVICIO SOCIAL

El Servicio Social es un requisito obligatorio para el estudiante universitario, el cual permite al estudiante poner en práctica los conocimientos adquiridos en su vida académica, en beneficio de la sociedad mexicana. Es por ello que se pone a disposición un formulario, con el cual se podrá hacer la solicitud de servicio social.

*NOTA: Para solicitud de servicio social es necesario contar con un convenio vigente con la universidad solicitante.*

[Guía para solicitud de servicio social](#)
[Requisitos para solicitud de servicio social](#)


Jóvenes en Servicio Social

Figura. 23 Servicio Social

### 3.1.3 Jóvenes Construyendo el Futuro

Como la información del programa es determinada por el gobierno, sólo me enfoque en la puesta en marcha de la página con videos testimonio y documentos digitales requeridos por el programa, realizando indicadores para su ejemplo dentro del rubro.



## JÓVENES CONSTRUYENDO EL FUTURO

Dentro del portafolio de proyectos de Geolis, se encuentra el programa Jóvenes Construyendo el Futuro, el cual brinda la oportunidad a jóvenes entre 18 y 29 años, que actualmente no estudian y no trabajan.

El objetivo principal es integrar a jóvenes en actividades de capacitación en el trabajo y así dotarlos de herramientas para una vida mejor.



JCF

Figura. 24 Jóvenes Construyendo El Futuro

**Nota:** Este programa se no se encuentra disponible en la página web por modificaciones a la misma.

## 3.2 Modelado de pozos en plataforma digital Corewell

### 3.2.1 Comportamiento de afluencia (IPR) en Corewell

Ya que había elaborado los códigos y el diseño de la plantilla, con ayuda del departamento de Tecnologías de la Información pude plasmar los resultados finales en la aplicación, pudiendo determinar mediante botones el tipo de pozo y el método a emplear por medio del nombre de cada autor del método.

Además de colocar campos con datos de entrada necesarios para cada uno, con los acrónimos para cada variable y sus respectivas unidades. Para que posteriormente cada gráfica se generara en una pestaña aleadaña a los parámetros de entrada.

Donde al final, si el usuario cuenta con todos los datos o cumple con los solicitados por algunos autores, puede realizar una comparación de métodos y visualizar de mejor forma el comportamiento de afluencia.

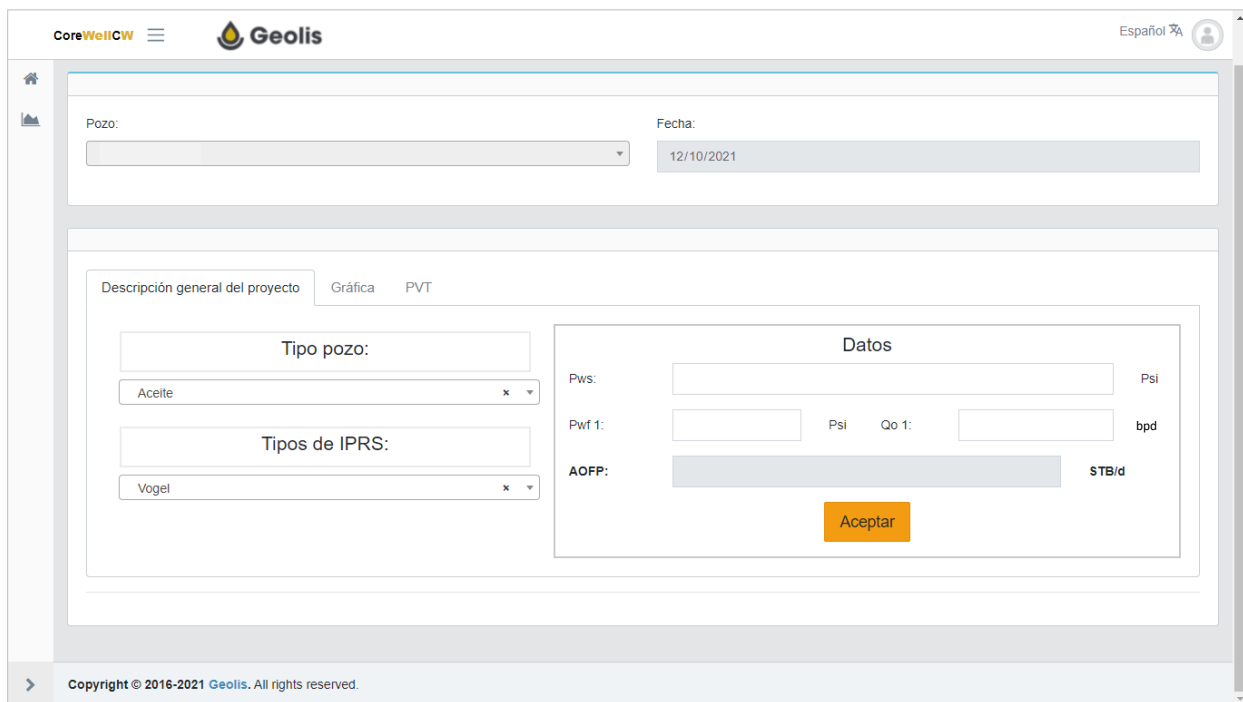


Figura. 25 Parámetros de Vogel en Corewell

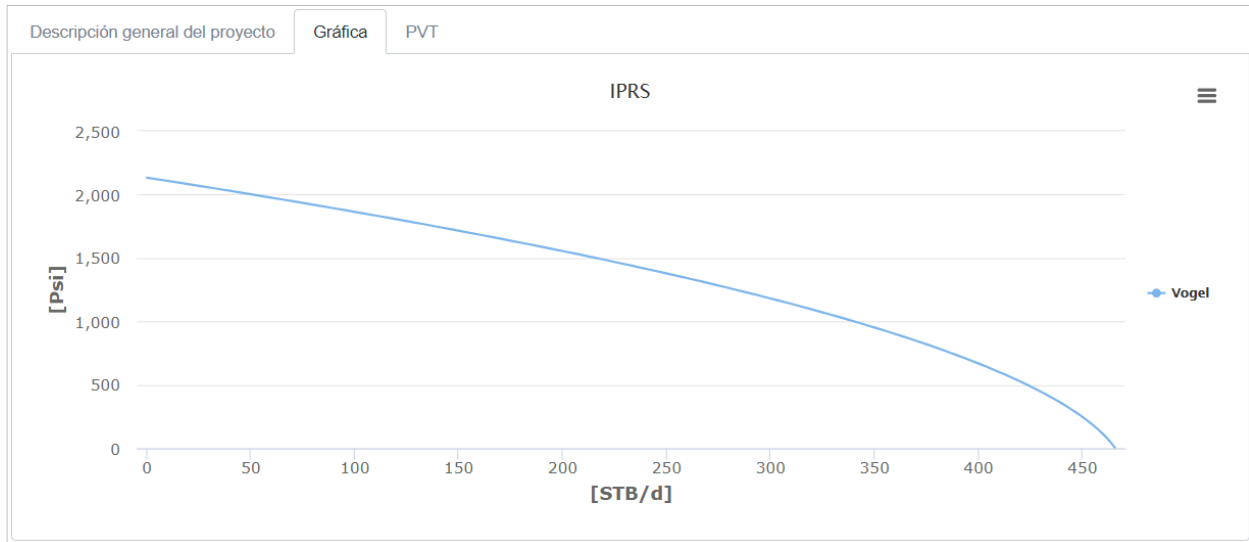


Figura. 26 Gráfica de Vogel en Corewell

**Tipo pozo:** Aceite

**Tipos de IPRS:** Todos los métodos

**Datos**

Pws:  Psi

Pwf 1:  Psi Qo 1:  bpd

Pwf 2:  Psi Qo 2:  bpd

Pwf 3:  Psi Qo 3:  bpd

Pwf 4:  Psi Qo 4:  bpd

K:  md

H:  ft

Bo:  bbl@c.y./bbl@c.s.

$\mu$  aceite:  cp

re:  ft

nw:  ft

Pb:  Psi

S:  0 Adimensional

Ef:  1 Adimensional

Aceptar

Figura. 27 Parámetros de entrada en Corewell

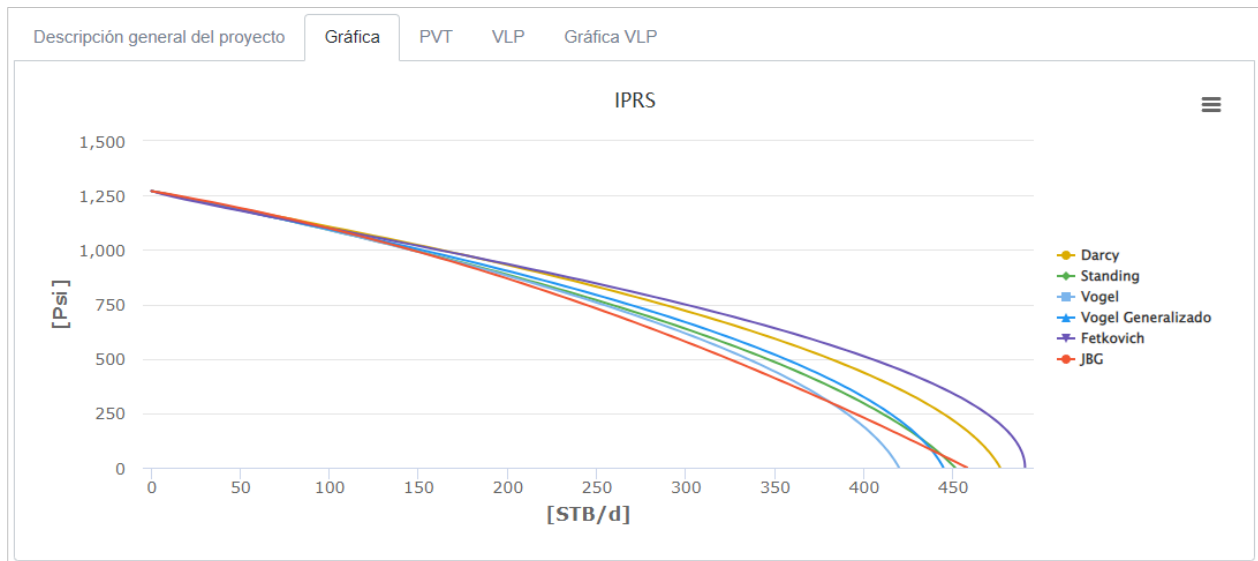


Figura. 28 Gráfica de comparación de métodos

### 3.2.2 Correlaciones PVT en Corewell

Con el diseño y programación de los códigos en Python, y con la ayuda del departamento de Tecnologías de la información pude aterrizar la pestaña PVT en Corewell, misma que usaría más adelante para la generación de la curva VLP.

Además, tras realizar dicha pestaña pude hacer más fácil la obtención de parámetros necesarios para el diseño y armado de propuestas.

Este apartado lo dividí en dos secciones principalmente, en la primera sección coloqué los datos de entrada donde definí cuales eran obligatorios y cuales eran opcionales, dejando datos por default basados en literatura. La segunda sección fue para el cálculo de las propiedades para cada autor, colocando botones para la selección del autor y poniendo un recuadro aledaño que mostrara su resultado junto con sus unidades, permitiendo al usuario colocar el dato en vez de calcularlo si es que era de su conocimiento.



Descripción general del proyecto Gráfica PVT

Propiedades del aceite, gas y agua:

Parámetros de entrada		Propiedades del aceite	
*Pws:	<input type="text"/>	Psi	
*Tyac:	<input type="text"/>	°F	
*API:	<input type="text"/>	Adim	
*Y gas:	<input type="text" value="0.64"/>	Adim	
*Y agua:	<input type="text" value="1.02"/>	Adimensional	
*RGA:	<input type="text"/>	scf/STB	
Ps:	<input type="text" value="100"/>	Psi	
Ts:	<input type="text" value="60"/>	°F	

Propiedades del aceite		Propiedades del gas	
Rs,Bo,Pb:	<input type="text"/>	Z:	<input type="text"/>
Rs:	<input type="text"/>	Z:	<input type="text"/>
Bo:	<input type="text"/>	Bg:	<input type="text"/>
Pb:	<input type="text"/>	Bg:	<input type="text"/>
μo muerto:	<input type="text"/>	ρg:	<input type="text"/>
μo:	<input type="text"/>	ρg:	<input type="text"/>
μo:	<input type="text"/>	μg:	<input type="text"/>
ρo:	<input type="text"/>	μg:	<input type="text"/>
ρo:	<input type="text"/>		

Contaminantes		Propiedades del agua	
CO2:	<input type="text" value="0"/>	%	
H2S:	<input type="text" value="0"/>	%	
N2:	<input type="text" value="0"/>	%	

Bw:	<input type="text"/>	Bw:	<input type="text"/>
Bw:	<input type="text"/>	Bw:	<input type="text"/>
pw:	<input type="text"/>	pw:	<input type="text"/>
pw:	<input type="text"/>	pw:	<input type="text"/>
μw:	<input type="text"/>	μw:	<input type="text"/>
μw:	<input type="text"/>	μw:	<input type="text"/>

Copyright © 2016-2021 Geolis. All rights reserved.

Figura. 29 Datos para propiedades en Corewell

### 3.2.3 Rendimiento de elevación vertical (VLP) en Corewell

El diseño del módulo lo realicé con base en los datos requeridos para calcular el gradiente de presión con base en la teoría de cada método. Además, que la pestaña PVT sirve como apoyo para los cálculos de las correlaciones, ya que de ahí se obtienen las propiedades de los fluidos, los cuales son necesarios para determinar la caída de presión en el pozo. Por lo que es de suma importancia contar con las pestañas tanto de IPR como de PVT para hacer funcionar la curva VLP. Además de los datos del pozo.



Descripción general del proyecto
Gráfica
PVT
VLP
Gráfica VLP

**Parámetros de entrada**

\*Pwh:  Psi

\*Profundidad:  ft

\*qo:  bpd

\*qw:  bpd

\*ID aparejo:  in

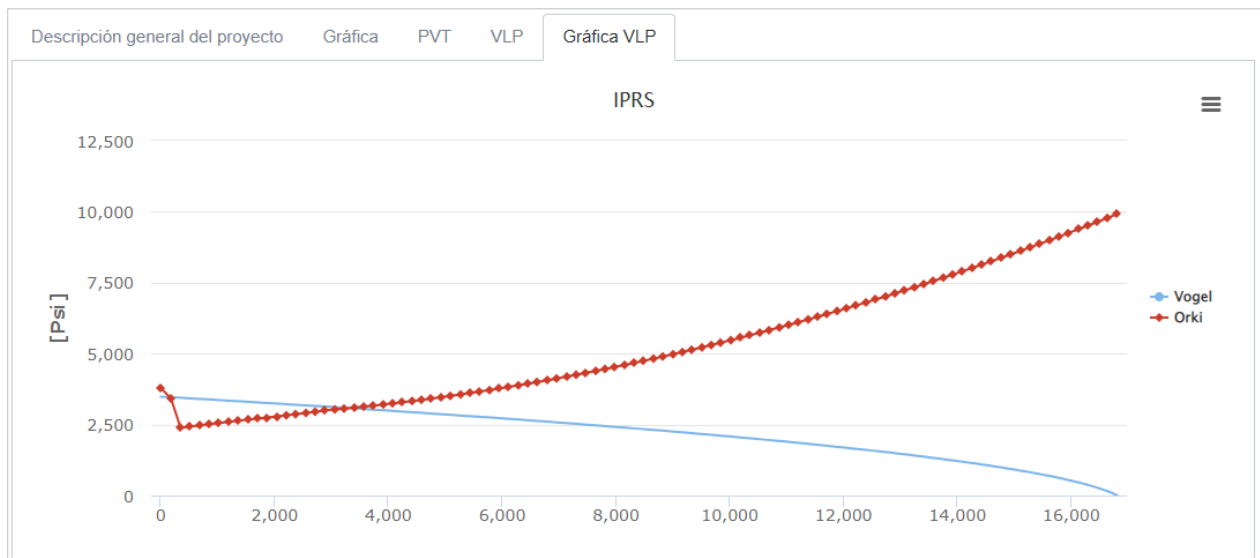
Rugosidad:  in

Ángulo:  Grados

**Correlaciones de flujo multifásico para curva VLP**

Autor VLP:  ?

**Figura. 30** Diseño de módulo VLP en Corewell



**Figura. 31** Curva VLP en Corewell

Esta curva VLP se integra al modelo de IPR haciendo la intersección de ambas curvas en el punto solución de producción y determina el Gasto de producción vs la Presión.

Si estas curvas no se cruzarán, el pozo no tendría energía suficiente para llevar los fluidos del fondo a la superficie y por lo tanto requeriría de alguna reparación para su reactivación, como es el caso de la aplicación de sistemas artificiales, reparaciones mayores, menores, etc.



### 3.3 Bombeo Hidráulico tipo Jet (BHJ)

Después de haber compartido al cliente la propuesta de implementación del sistema artificial (BHJ), y tras haber aceptado dicha propuesta, se iniciaron los trabajos en campo con la instalación del bombeo hidráulico en el pozo Puma Dorado-1. La duración que estableció el cliente para la prueba tecnológica con el BHJ fue de doce días, contados a partir del término de la instalación.

Durante la planeación del proyecto se identificaron las principales rutas críticas que podían surgir durante la ejecución, reconociendo que una de ellas intervenía con el tiempo del traslado de los equipos, ya que, con base en la experiencia de proyectos anteriores, había ocasiones en que surgían incidentes en el camino que impedían el traslado de los equipos y retrasaban el tiempo de llegada al sitio. Por lo que, en la ejecución, se tomaron las medidas correspondientes para dar cumplimiento con el tiempo establecido para la instalación.

Cabe resaltar que, para el arranque del proyecto, tuve que trasladarme al lugar donde se iba a instalar y operar el bombeo hidráulico tipo jet, presenciando desde la llegada de los equipos al sitio, hasta el desmantelamiento de estos.

Los equipos superficiales y subsuperficiales instalados en el pozo fueron los siguientes:

- Separador FWKO
- Bomba triplex
- Frac tank
- Bomba jet
- Housing de bomba jet
- Válvula de pie
- Sensor de fondo

La instalación de los equipos en el pozo tuvo una duración de dos días, donde además de colocar e interconectar los equipos superficiales (frac tank, separador y bomba triplex) al árbol de válvulas, se hizo la instalación de la válvula de pie y el anclaje del housing en la camisa deslizante con la intervención de la ULA (unidad de línea de acero). Mientras que, el anclaje de la bomba jet en el housing fue por medio de la liberación en caída libre de la bomba en el pozo, verificando únicamente el anclaje con la Unidad de Línea de Acero (ULA) antes de comenzar con la inyección del fluido motriz por el interior del aparejo de producción.

Por consiguiente, una vez que se terminaron de instalar todos los equipos superficiales y subsuperficiales en el pozo, se dio paso al inicio de la prueba con el sistema artificial BHJ, **Figura. 32.**



**Figura. 32** Pozo Puma dorado-1 con BHJ

Para tal caso se hizo uso de ambas geometrías con el fin de decretar el potencial del pozo con el sistema artificial, y con ello poder decidir que geometría era la que más se adaptaba al pozo con base en los resultados de la operación.

La bomba jet con geometría C:5 fue la primera que se usó en el pozo, esta bomba estuvo en operación un tiempo aproximado de 3.5 días con un aporte promedio de producción de 52 [bpd]. Por tal motivo, se cambió de geometría, al determinar que el gasto estaba acorde con el diseño, y que además se tenía un ligero aporte incremental en el pozo, decidiendo realizar el paro para el mantenimiento de la bomba triplex y también para cambiar de geometría a una C+:5 con la boquilla ligeramente más grande que la anterior, **Figura. 33**.

Este cambio de geometría se efectuó con éxito gracias a la válvula de pie instalada en el fondo del pozo y por medio de la circulación inversa, es decir, con la recuperación de la bomba por el interior del aparejo de producción. Este trabajo fue más rápido de lo que se esperaba y posterior a esto, se continuó con la operación normal del sistema artificial de producción.

El cliente al observar la estabilización de la producción del primer día con la geometría C+:5, nos dio la instrucción de continuar con la operación durante 7 días más sin cambiarla. Durante el quinto día de operación con la geometría C+:5, el cliente y nosotros como equipo Geolis, decidimos hacer un paro de nueve horas para tres cosas principalmente: cambio de válvulas de bomba triplex, cambio del medidor Coriolis que se encontraba conectado entre la línea de descarga del separador y el frac tank, puesto que no estaba midiendo correctamente el flujo descargado en la presa metálica, y además, para permitir que el pozo recuperara presión y se estabilizaran los fluidos en él, a causa de que un par de horas antes se había gasificado y no se tenía producción de hidrocarburos.





Después de que culminó el tiempo definido del paro, se procedió a continuar con la operación normal del bombeo subsuperficial, tomando en cuenta los parámetros operativos que había que tener en los equipos para las condiciones del pozo, bombeando a un gasto y presión de inyección menor a la que se estaba manejando, a fin de que pudiéramos observar el comportamiento de la producción en la superficie. Al no percibir aporte de hidrocarburos con las variables modificadas, decidimos restablecer con el panel de control los parámetros que se tenían antes del paro, esperando algunos minutos para que estos se estabilizaran y en consecuencia obtuviéramos respuesta del pozo con la producción en la superficie. Una vez que se estabilizaron, se comenzó a observar el aporte de hidrocarburos en la mirilla del separador, permitiendo realizar la primera descarga en el frac tank posterior al paro.

Luego de haber obtenido nuevamente la producción de hidrocarburos con el sistema artificial, por instrucciones del cliente, se incrementó gradualmente el gasto y la presión de inyección para conocer el comportamiento del pozo bajo estas condiciones. Consiguiendo incrementar ligeramente el volumen de hidrocarburos producidos por hora, respecto a lo que se había reportado al inicio con el cambio de geometría, sin embargo, durante el tiempo que estuvo en operación con esta, la producción no incremento de tal forma que alcanzara lo reportado con la primera geometría.

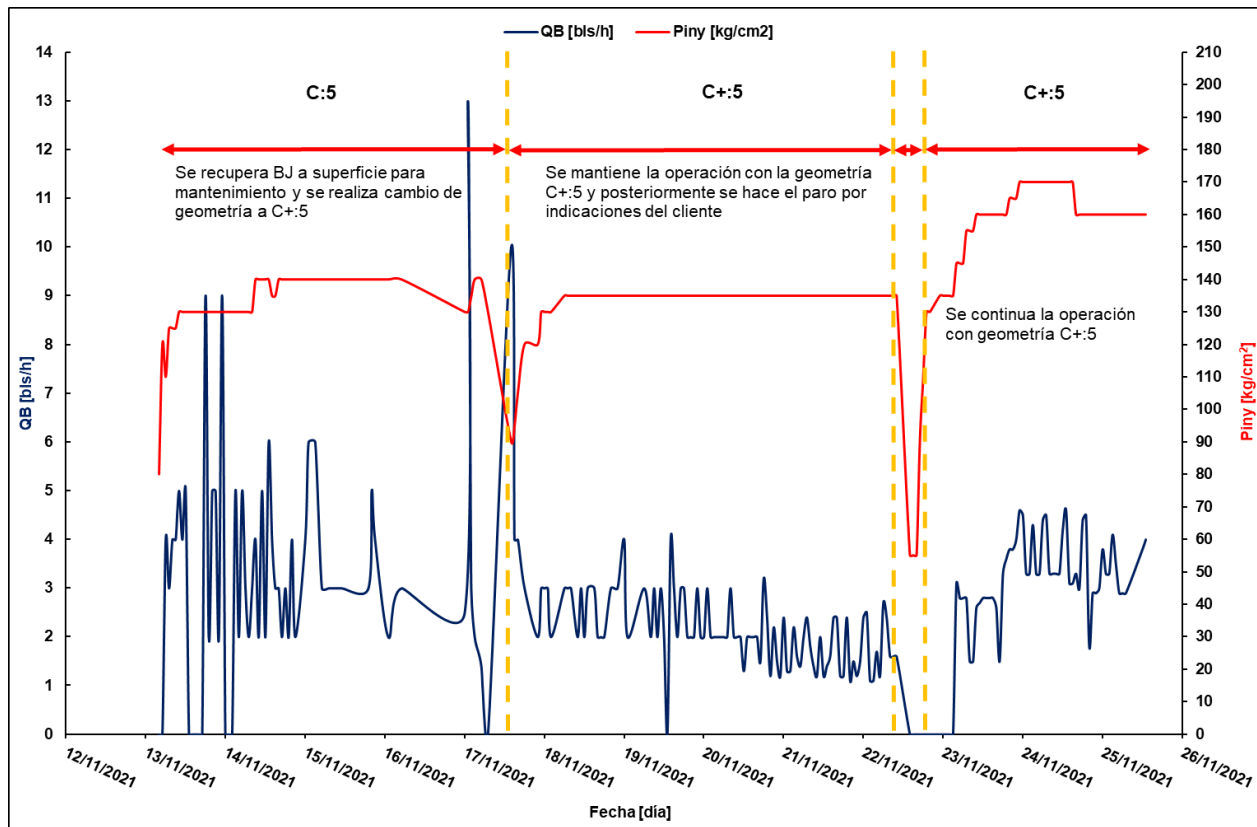


Figura. 33 Resultados de la prueba del BHJ



Al cabo de ocho días de operación con la geometría C+:5, se obtuvo una producción diaria muy inestable, que al final sumaron un total de 401 [bls] de hidrocarburos acumulados, que finalmente fue distribuido hacia las baterías de separación para su acondicionamiento por medio de auto-tanques.

## Capítulo 4 Conclusiones

### 4.1 Conclusiones GeoTalent

Con la implementación de GeoTalent en la página web de Geolis se pudo administrar la información de los solicitantes de forma óptima, permitiendo que los miembros del departamento de vinculación tuvieran un mejor control de dicha información con las rúbricas en cada sección, y un correcto almacenamiento mediante la plataforma digital Corewell. Consiguiendo que el personal no desatendiera sus labores diarias y se le diera un seguimiento correcto.

Por otra parte, se aseguró que el correo electrónico que se encuentra en la pestaña de contacto, únicamente fuera para intereses relacionados con proyectos, servicios, etc.

En cuanto a las alianzas universidad-empresa, se logró coadyuvar a la formación de profesionistas de calidad con los objetivos y secciones planteados, promoviendo día con día la innovación tecnológica para el desarrollo del país y de la industria petrolera. De manera que, la relación o alianza establecida dio como resultado la atracción de talento joven hacia la empresa para seguir brindando servicios de calidad.

### 4.2 Conclusiones modelado de pozos

Con la constante búsqueda de la empresa por ser cada vez más integral y eficaz en sus procesos de servicios, logré apoyar a la compañía con los módulos IPR, PVT y VLP, los cuáles sirvieron para hacer más robusta la aplicación digital y así ser más competitivos en el sector energético.

Además, con la realización de este software propio de la compañía Geolis, pude otorgar las herramientas necesarias para el diseño y armado de propuestas de sistemas artificiales de producción, de forma más rápida y eficiente, donde los tiempos de proceso se vieron significativamente reducidos en comparación cuando no se contaban con tales herramientas digitales.

Así mismo, con los módulos implementados en Corewell determiné escenarios más detallados, donde la información valiosa para cada cliente y para la compañía se visualizó de mejor manera en cada propuesta presentada a los interesados.

Obteniendo resultados favorables en cada uno de los módulos, que al ser comparados con los softwares comerciales no era tan distinto en cuanto resultados.



### 4.3 Conclusiones de Bombeo Hidráulico tipo Jet

El análisis del pozo fue complejo, debido al fracturamiento hidráulico que había realizado el cliente, además, que la caída de presión en el pozo era demasiado baja y no se lograba tener un correcto ajuste con las distintas geometrías de bomba, por lo cual, restringía el margen operativo para la producción de hidrocarburos.

Por otra parte, con base en los resultados de la prueba de campo, pude determinar la magnitud y responsabilidad de cada una de las partes que integraban el proyecto, y que hacían que resultara satisfactorio la instalación y operación del sistema artificial en el campo. Por lo que, en la ejecución en sitio, identifique la importancia de tener una buena planeación e incluir a todas las partes involucradas que sumarían valor durante el desarrollo del proyecto.

Además, en la operación se comprobó que el diseño del BHJ en el software comercial estaba acorde con las condiciones del pozo, obteniendo resultados satisfactorios en la prueba de campo, y recuperando el volumen establecido en el diseño a pesar de la abrupta caída de presión en la bomba jet, la cual nos limitaba a extraer un mayor gasto con las geometrías dadas. De modo que, tuvimos que hacer algunos ajustes en el gasto y la presión de inyección del fluido motriz, para dar cumplimiento con el volumen estimado en el diseño



## Referencias

1. Gilbert, W.E.: "Flowing and Gas-Lift Well Performance", *Drill. & Prod. Prac.* (1954) 126.
2. Matthews, C.S. and Russell. D.G.: *Pressure Buildup and flow tests in Wells*, Monograph Series, Richardson, Texas (1967)
3. Brill, James P., and Mukherjee H.: "Multiphase Flow in Wells," Richardson Texas: Society of Petroleum Engineers, 1999.
4. Brown, K.E. et al.: "Production Optimization of Oil and Gas Wells by NODAL System Analysis," *Technology of artificial Lift Methods*, PennWell Publishing Co., Tulsa, Oklahoma (1984) Chap 4.
5. Vogel, J.V. "Inflow Performance Relationships for Solution Gas Drive Wells." *Journal of Petroleum Technology* (January 1968)
6. Standing, M.B. "Inflow Performance Relationships for Damaged Wells Producing by Solutions Gas Drive Reservoirs." *Journal of Petroleum Technology* (November 1970)
7. Fetkovich, M.J. "The Isochronal testing of Oil Wells. SPE 4529. SPE of AIME
8. Jones, Loyd G., E.M.Blount, and O.H. Glaze. "Use of Short Term Multiple Rate Flow Tests to Predict Performance of Wells Having Turbulence." SPE 6133. SPE of AIME, 1976
9. Eickmer, James R. personal Communication
10. Bradley, Howard B. *Petroleum Engineering Handbook*. Society of Petroleum Engineers. 1987