

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La transnacional argentina YPF (Yacimientos Petrolíferos Federal) llega al Ecuador en el año de 1995 y adquiere la compañía MAXUS, con el fin de invertir en el área petrolera del país. En el año 1998 YPF es adquirida por la compañía española REPSOL, con el propósito de expandirse internacionalmente principalmente en Latinoamérica, mantener el liderazgo en las actividades tradicionales de la compañía e incrementar la exploración y producción.

Para poder cumplir con lo mencionado REPSOL – YPF ECUADOR adecua y amplía las dos plantas de producción de crudo con las que contaba MAXUS, las denominadas NPF (Facilidades de Producción del Norte) y SPF (Facilidades de Producción del Sur), estas plantas están ubicadas en la provincia de Orellana, en el cantón Aguarico, dentro del Parque Nacional Yasuní; a este lugar también se lo conoce como Bloque 16.

Con el desarrollo del campo (Bloque 16), las plantas de producción tuvieron que manejar otras cantidades de fluido diferentes a las diseñadas. Este incremento trajo una variación de presión y velocidad de flujo en las líneas de producción y transporte de fluidos. Para acomodar la nueva producción de fluidos, se realizaron variaciones en el diseño, y construcción tanto de líneas, como de facilidades en este entorno.

El diseño original y actual de procesamiento de fluidos para las plantas de producción se detalla a continuación.

Tabla 1.1: Producción total de crudo y agua de formación diaria del diseño original y del diseño actual

ITEM	DISEÑO ORIGINAL	DISEÑO ACTUAL
PRODUCCIÓN DE CRUDO	53000 ¹ BOPD	60000 BOPD
PRODUCCIÓN DE AGUA	500000 ² BWPD	600000 BWPD

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

REPSOL – YPF ECUADOR se vio en la necesidad de simular toda la red hidráulica que compone el Bloque 16, de manera que sea factible analizar si los parámetros de flujo en las líneas fueron los correctos, si ocasionaron pérdidas de producción de crudo causadas por las contrapresiones no previstas en el diseño de las líneas, y si cumplieron o no con los estándares de diseño y construcción impuestos en la industria petrolera.

Dicha simulación ayudaría a la empresa en el futuro para poder saber y controlar todos los parámetros de flujo en las líneas de las plantas de producción en el caso de que se requieran nuevos incrementos de manejo de fluido.

Por otra parte esta simulación verificaría de que las líneas y equipos estén trabajando dentro del rango de seguridad y que no expongan la producción a derrames o daños personales.

1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Las presiones, velocidades, caudal y otros parámetros de flujo cambiaron de acuerdo al aumento en la producción de crudo y envejecimiento del campo (Bloque 16); es decir el diseño original de la planta fue hecho para otros

¹ BOPD.-Barriles de Crudo por Día

² BWPD.-Barriles de Agua por Día

valores de los parámetros mencionados de los que se tiene en la condición actual.

El principal problema que REPSOL – YPF ECUADOR quiso solucionar con el presente proyecto fue el de controlar los valores críticos de los parámetros de flujo en las líneas; que le permitiría llegar al punto óptimo de producción de crudo. Para ello se elaboró un programa de simulación de la red hidráulica que compone el Bloque 16, que permitió a la empresa tomar las decisiones que crean necesarias para la solución de los problemas existentes.

1.3 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Conforme a pasado el tiempo el Bloque 16 ha sufrido cambios en su diseño, se han aumentado líneas, accesorios y equipos que ayuden a manejar los nuevos volúmenes de crudo y agua de formación, pero también se han quitado varios equipos, líneas y accesorios ya sea para ser reemplazados por otros o porque ya cumplieron su vida funcional. Todos estos cambios en el diseño que ha sufrido el bloque llevó a la empresa a que mediante un programa o simulador ver en donde existen problemas.

REPSOL YPF ECUADOR pensó en dos alternativas que solucionarán el problema ya planteado:

1. Adquirir un programa comercial que simule la red hidráulica del Bloque 16, ó
2. Diseñar su propio simulador con ayuda de una persona joven y ecuatoriana.

Los ³programas comerciales son muy costosos además REPSOL - YPF ECUADOR debía asignar este trabajo y estudio alguna otra empresa y esto representaría más costo, es por ello que la compañía se decidió por la

³ Existen programas comerciales como Pipesim, Pipephase, y Stoner

segunda opción; el estudio que se realizó para diseñar el simulador se acercó más a las necesidades de la empresa pues este se hizo en el campo así se pudo constatar los problemas que sufre el bloque, por otra parte ayudó a la compañía a obtener información que no la tenía y que gracias al proyecto de grado se logro recopilar para el estudio.

1.4 META

La meta planteada para este proyecto fue: ***Contar con un programa de simulación de la red hidráulica de REPSOL – YPF ECUADOR del Bloque 16, realizado en un tiempo de 6 meses.***

1.5 OBJETIVO

1.5.1 GENERAL

Simular la red hidráulica de REPSOL – YPF ECUADOR del Bloque 16. Este proyecto se llevó a cabo, dada la necesidad de la empresa de contar con un modelo de la red hidráulica que le permitiera verificar si los nuevos volúmenes de flujo pueden ser manejados con la infraestructura existente.

1.5.2 ESPECÍFICOS

Los resultados y efectos que se esperaron obtener del proyecto fueron los siguientes:

- Analizar el diseño de las plantas de producción y Well Pads que conforman el Bloque 16.

- Analizar y estudiar todos los parámetros de flujo que intervienen en el diseño.
- Recopilar toda la información para el estudio.
- Determinar cual es el lenguaje de programación que más le conviene al proyecto y a la empresa.
- Tener un programa de simulación que arroje resultados reales de los parámetros de flujo en las líneas del Bloque que se analice
- Tener un programa de simulación que sea barato para la empresa.
- Realizar estudios y análisis del Bloque 16 con el simulador y obtener conclusiones sobre el mismo.

1.6 JUSTIFICACIÓN

Este proyecto se llevó acabo porque es una de las prioridades del Gobierno Nacional y de REPSOL – YPF ECUADOR, el incrementar o mejorar la producción y recuperación de crudo pesado; de manera que sea posible transportar la mayor cantidad de este crudo por el ⁴OCP.

Este proyecto ayudó a REPSOL – YPF ECUADOR a saber cuales son los valores críticos de los parámetros de flujo en las líneas y así poder tomar las decisiones que crean que ayudaría a incrementar la producción de crudo.

⁴ OCP.-Oleoducto de Crudo Pesado

Otra de las prioridades de la empresa y del proyecto fue la de contar con un estudio de simulación serio y realizado por personal ecuatoriano, de esta manera se aportó al desarrollo tecnológico del país.

El beneficio de este proyecto fue directamente para REPSOL-YPF ECUADOR, dado que la empresa no cumple con la tasa asignada de producción en el OCP. Esto implica que el costo de transporte de crudo se incrementa, reduciendo así la rentabilidad de la operación.

1.7 METODOLOGÍA A EMPLEAR

Para llevar a cabo este proyecto, se realizó primeramente una toma de datos de las condiciones de operación del campo (Bloque 16) y su red de flujo.

Luego de esto se buscó las metodologías de cálculo más conveniente en base a toda la información que se estudió del tema, tanto de libros como de Papers publicados por las asociaciones profesionales internacionales relativas al tema.

Después de haber hecho este estudio se hizo la toma de datos referentes a los fluidos que se producen en el Bloque 16. Todos los parámetros de flujo que intervinieron en la validación del programa (propiedades de los fluidos, velocidad, presión, etc.), salieron como resultado de la metodología seleccionada. Además se estudió y tomó datos de la geografía de interés en las plantas de producción que componen este bloque.

Una vez que se obtuvo todos los datos necesarios y requeridos para la ejecución del proyecto, se procedió a la programación de la simulación, se hizo una evaluación de cual sería el mejor lenguaje para ser empleado en el proyecto, esta evaluación consta dentro del Capítulo III.

Luego de esto se procedió a la implementación de la simulación de la red hidráulica en el Bloque 16, sobre la base de los modelos realizados.

Finalmente se implementaron las recomendaciones obtenidas del proyecto.

CAPÍTULO 2

RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

INTRODUCCIÓN

Este capítulo trata de la recopilación de información que fue necesaria para poder simular la red hidráulica del bloque, es por ello que se debe tener claro los tipos de trabajo que se efectúan al extraer el petróleo de los pozos y al inyectar el agua de formación.

2.1.1 PROSPECCIÓN

2.1.1.1 Geología del Petróleo

El petróleo no se encuentra distribuido de manera uniforme en el subsuelo hay que tener presencia de al menos cuatro condiciones básicas para que éste se acumule:

- Debe existir una roca permeable de forma tal que bajo presión el petróleo pueda moverse a través de los poros microscópicos de la roca.
- La presencia de una roca impermeable, que evite la fuga del aceite y gas hacia la superficie.
- El yacimiento debe comportarse como una trampa, ya que las rocas impermeables deben encontrarse dispuestas de tal forma que no existan movimientos laterales de fuga de hidrocarburos.

- Debe existir material orgánico suficiente y necesario para convertirse en petróleo por el efecto de la presión y temperatura que predomine en el yacimiento.

Figura 2.1: Trampas estratigráficas: lentes de arena donde el petróleo se encuentra impregnado entre los granos (poros)



Fuente: La Geofísica en la Industria Petrolera. Universidad de Oriente, Núcleo Bolívar. Venezuela.

El petróleo no suele encontrarse en el lugar en el que se genera. La generación de petróleo se produce a partir de la materia orgánica que se encuentra en sedimentos de grano fino, como arcillas; a estos sedimentos se les llama rocas madre. Posteriormente el petróleo se traslada a sedimentos de grano más grueso, como areniscas, por medio de un proceso llamado migración; A veces el petróleo no encuentra obstáculos en su migración, por lo que sale o brota, a la superficie como un manantial (así el hombre conoció la existencia de petróleo) o bien queda atrapado. Las trampas son sitios del subsuelo donde existen condiciones adecuadas para que se acumulen los hidrocarburos, éstas se caracterizan por la presencia de rocas porosas y permeables conocidas como rocas almacén o reservorios, donde se acumulan

o almacenan los hidrocarburos bordeados de capas de rocas impermeables o rocas sello que impiden su migración.

En términos geológicos, las capas subterráneas se llaman "formaciones" y están debidamente identificadas por edad, nombre y tipo del material rocoso del cual se formaron. Esto ayuda a identificar los mantos que contienen las ansiadas rocas sedimentarias.

2.1.1.2 Exploración Petrolera

Exploración es el término utilizado en la industria petrolera para designar la búsqueda de petróleo o gas.

Desde sus inicios hasta la actualidad se han ido desarrollando nuevas y complejas tecnologías. Sin embargo este avance, que ha permitido reducir algunos factores de riesgo, no ha logrado hallar un método que permita de manera indirecta definir la presencia de hidrocarburos. Es por ello que para comprobar la existencia de hidrocarburos se debe recurrir a la perforación de pozos exploratorios.

Los métodos empleados son muy variados: desde el estudio geológico de las formaciones rocosas que están aflorando en superficie hasta la observación indirecta, a través de diversos instrumentos y técnicas de exploración.

Una de las herramientas más utilizadas en esta etapa son los mapas. Hay mapas de afloramientos (que muestran las rocas que hay en la superficie), mapas topográficos y los mapas del subsuelo. Estos últimos quizás sean los más importantes porque muestran la geometría y posición de una capa de roca en el subsuelo, y se generan con la ayuda de una técnica básica en la exploración de hidrocarburos: *la sísmica de reflexión*.

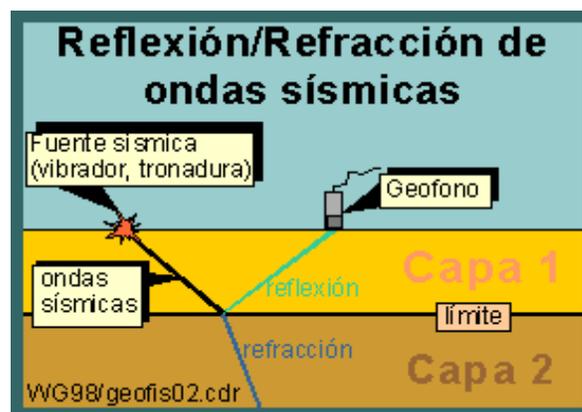
La sísmica de reflexión consiste en provocar mediante una fuente de energía (con explosivos enterrados en el suelo –normalmente entre 3 y 9 m. de profundidad- o con camiones vibradores –éstos implican una importante reducción en el impacto ambiental) un frente de ondas elásticas que viajan por el subsuelo y se reflejan en las interfases por los distintos estratos.

En la superficie se cubre un área determinada con dichos aparatos de alta sensibilidad llamados también "geófonos", los cuales van unidos entre sí por cables y conectados a una estación receptora.

Las ondas producidas por la explosión atraviesan las capas subterráneas y regresan a la superficie. Los geófonos las captan y las envían a la estación receptora (sismógrafo), donde mediante equipos especiales de cómputo, se va dibujando en interior de la tierra.

Se puede medir el tiempo transcurrido entre el momento de la explosión y la llegada de las ondas reflejadas, pudiéndose determinar así la posición de los estratos y su profundidad, describiendo la ubicación de los anticlinales favorables para la acumulación del petróleo.

Figura 2.2: Sísmica de Reflexión



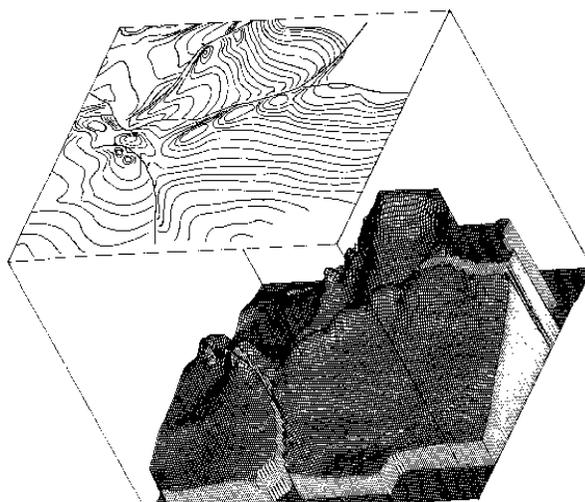
Fuente: La Geofísica en la Industria Petrolera. Universidad de Oriente, Núcleo Bolívar. Venezuela.

Toda la información obtenida a lo largo del proceso exploratorio es objeto de interpretación en los centros geológicos y geofísicos de las empresas petroleras.

Allí es donde se establece qué áreas pueden contener mantos con depósitos de hidrocarburos, cuál es su potencial contenido de hidrocarburos y dónde se deben perforar los pozos exploratorios para confirmarlo. De aquí sale lo que se llama "prospectos" petroleros.

El producto final es una representación del subsuelo, ya sea en dos dimensiones (2D) o en tres dimensiones (3D). La ventaja de la sísmica en 3D radica en la enorme cantidad de información que proporciona con respecto a la 2D, con lo que se reduce sensiblemente la incertidumbre acerca de la posición y geometría de las capas subterráneas. Su desventaja radica en los altos costos.

Figura 2.3: Sísmica en 3D



Fuente: La Geofísica en la Industria Petrolera. Universidad de Oriente, Núcleo Bolívar. Venezuela.

2.1.2 PERFORACIÓN

2.1.2.1 Introducción

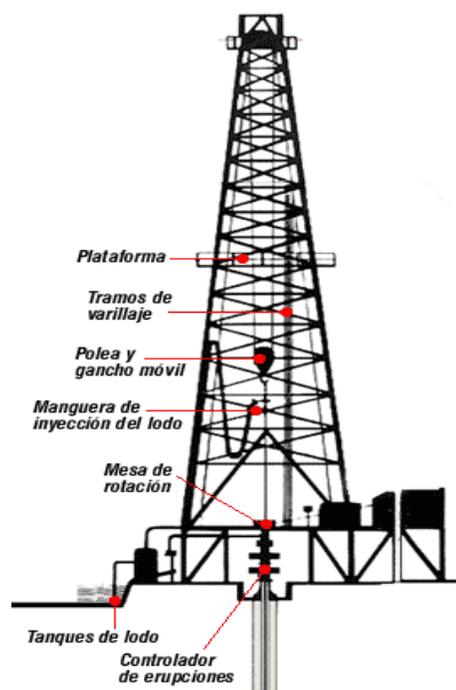
La única manera de saber realmente si hay petróleo en el sitio donde la investigación geológica propone que se podría localizar un depósito de hidrocarburos, es mediante la perforación de un pozo.

La profundidad de un pozo es variable, dependiendo de la región y de la profundidad a la cual se encuentra la estructura geológica o formación seleccionada con posibilidades de contener petróleo.

Hay diversas formas de efectuar la perforación, pero el modo más eficiente y moderno es la perforación rotatoria o trepanación con circulación de barro.

El equipo de perforación propiamente dicho consiste en un sistema mecánico o electromecánico, compuesto por una torre, de unos veinte o treinta metros de altura, que soporta un aparejo diferencial: juntos conforman un instrumento que permite el movimiento de tuberías con sus respectivas herramientas, que es accionado por una transmisión energizada por motores a explosión o eléctricos. Este mismo conjunto impulsa simultánea o alternativamente una mesa de rotación que contiene al vástago, tope de la columna perforadora y transmisor del giro a la tubería.

Figura 2.4: Plataforma de perforación vertical de un pozo



Fuente: “Directional Drilling Overcomes Obstacles, Protects Environment”, Barbeauld RO

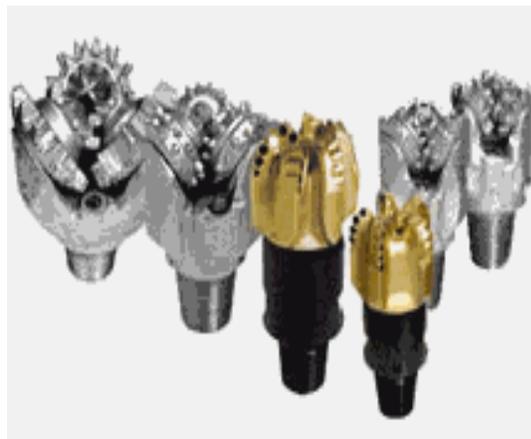
Paralelamente el equipo de perforación cuenta con elementos auxiliares, tales como tuberías, bombas, tanques, un sistema de seguridad que consiste en

válvulas de cierre del pozo para su control u operaciones de rutina, generadores eléctricos de distinta capacidad según el tipo de equipo, etc.

El trépano es la herramienta de corte que permite perforar. Es y ha sido permanentemente modificado a lo largo del tiempo a fin de obtener la geometría y el material adecuados para vencer a las distintas y complejas formaciones del terreno que se interponen entre la superficie y los hidrocarburos (arenas, arcillas, yesos, calizas, basaltos), las que van aumentando en consistencia en relación directa con la profundidad en que se las encuentra.

El rango de diámetros de trépano es muy amplio, pero pueden indicarse como más comunes los de 12 ¼ y de 8 ½ pulgadas.

Figura 2.5: Diferentes tipos de trépano



Fuente: “Directional Drilling Overcomes Obstacles, Protects Environment”, Barbeauld RO

2.1.2.2 Perforación multilateral

La utilización de esta técnica es definir un pozo multilateral como aquel que a partir de una misma boca de pozo se accede con dos o más ramas, a uno o varios horizontes productivos. Hasta la fecha no se ha encontrado una manera de clasificar al tipo de pozo multilateral ya que la forma y variedad está solo limitada a nuestra imaginación y a las características de nuestros reservorios, así podemos tener:

- Vertical y horizontal al mismo reservorio.
- Vertical y horizontal a distintos reservorios.
- Dos o más dirigidos al mismo o distinto horizonte productivo.
- Horizontal con dos o más ramas.
- Vertical y varios horizontales a distintos reservorios.
- La estructura final de un pozo multilateral será función del yacimiento y de los recursos tecnológicos disponibles

Figura 2.6: Inclinaciones direccionales



Fuente: “Directional Drilling Overcomes Obstacles, Protects Environment”, Barbeauld RO

Los operadores perforan pozos de alcance extendido para llegar a los yacimientos que no se pueden explotar de otra manera sin incurrir en costos o riesgos ambientales inaceptables, por ejemplo perforar desde una superficie terrestre a una locación marina en lugar de construir una isla artificial. La perforación de varios pozos desde una locación de superficie es común en zonas terrestres restringidas, por ejemplo en las selvas tropicales, como medida de protección del medio ambiente.

Al igual que en otras operaciones de perforación, en la perforación direccional también existe la necesidad de obtener un rendimiento que resulte efectivo en

costos. De acuerdo con los informes de las compañías dedicadas a la exploración y producción, los gastos de perforación representan alrededor del 40% de los costos de descubrimiento y desarrollo.

2.1.3 EXTRACCIÓN DE HIDROCARBUROS POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE

El bombeo electrosumergible o ⁵ESP, se basa en el principio de centrifugación de fluidos. Un rotante gira a alta velocidad y expulsa el fluido hacia la periferia del rotor donde es ingresado en una tubería que lo descarga. Este tipo de bombas tienen diferentes estados de centrifugación. Es decir, no es un solo rotor sino que son varios colocados en forma sucesiva uno sobre el otro y alimentándose entre ellos para ganar mayor presión.

Su ventaja principal es que realmente no tiene casi instalaciones de superficie a excepción de un control de velocidad del motor. La motorización es eléctrica exclusivamente y el motor se encuentra en la bomba misma al fondo del pozo. Estas se energizan con un cable eléctrico blindado que va paralelo al ⁶tubing y que conecta las tomas de potencia en la superficie con la bomba. Cuando se colocan más de una bomba electrosumergible se lo llama Tandem.

Figura 2.7: Bomba electrosumergible



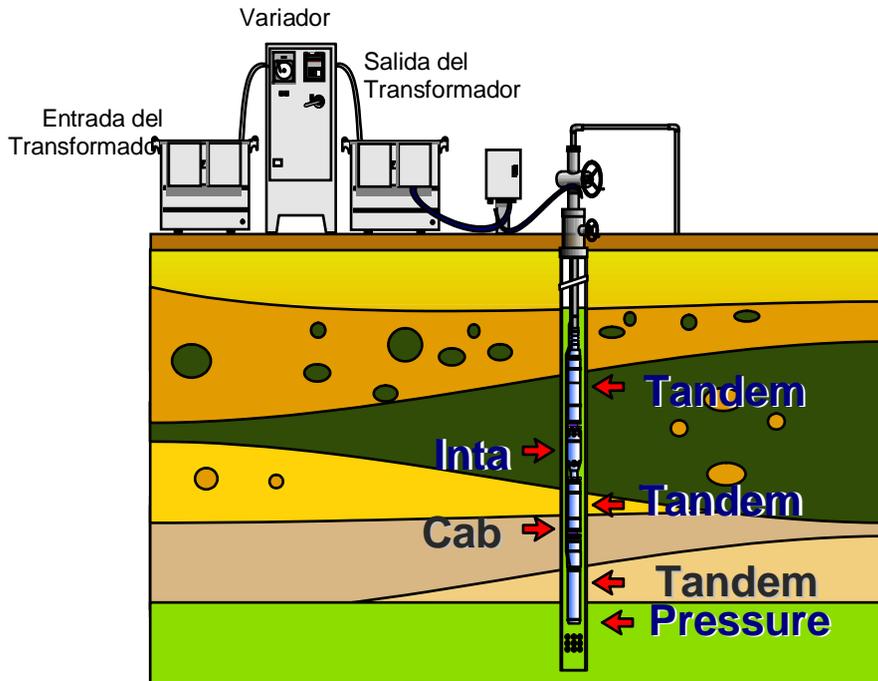
Fuente: CENTRILIFT PUMPS

⁵ ESP.-Electrical Submersible Pumps (Bomba electrosumergible)

⁶ El tubing es la tubería por donde se transporta el petróleo desde el yacimiento hacia el cabezal del pozo en la superficie.

El motor mismo es la bomba. Su tecnología es la más complicada y cara pero son preferidas en caso de tener que elevar grandes caudales.

Figura 2.8: Instalación típica del Bombeo Electrosumergible



Fuente: CENTRILIFT PUMPS

La desventaja es que son difíciles de instalar y su energización no siempre es altamente confiable. En cuanto al costo de instalación, es el más alto, pero el mantenimiento de superficie es mínimo y limitado a los componentes electrónicos de los variadores de velocidad y protecciones eléctricas.

2.1.4 DISPOSICIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN

El agua que resulta de la separación del petróleo (como se indicará más adelante) es almacenada en tanques en las plantas de proceso, esta, por medio de bombas de media presión alimentadas por bombas boosters y dependiendo de la distancia, por bombas inyectoras en la localidad es inyectada en pozos especialmente acondicionados. (Ver figura 2.16)

2.2 CARACTERIZACIÓN DEL BLOQUE 16

REPSOL – YPF ECUADOR S.A., es una empresa hidrocarburífera que opera el Bloque 16 de la Región Amazónica Ecuatoriana, con los mejores criterios y prácticas que exige una industria moderna, comprometida con la conservación del ambiente, la seguridad de las personas y sus medios de trabajo, la calidad de sus procesos y el respeto y colaboración hacia las comunidades indígenas ubicadas en su área de influencia.

En 1998, REPSOL - YPF adquiere los derechos de explotación y producción del Bloque 16 con una extensión de 220.000 ha, el bloque se implanta en pleno Bosque Húmedo Tropical, ocupando un 12 % del Parque Nacional Yasuní y un 22% de la Reserva Étnica Huaorani. El gasto de producción actual es de \$3,48/barril siendo una de las empresas pioneras en la búsqueda de mejores tecnologías aplicadas al sector hidrocarburífero.

Dentro del Bloque 16 existen dos plantas de producción de crudo: NPF (Facilidades de Producción del Norte) y SPF (Facilidades de Producción del Sur), existen seis campos que se encuentran en explotación: Capiron, Tivacuno, Amo, Daimi, Iro y Ginta, las areniscas productoras de crudo son las areniscas Hollin, T, U inferior, U superior y M1 inferior, M1 superior. El petróleo se encuentra en trampas estructurales, en la areniscas Hollin, T y U y en trampas mixtas en la arenisca M1 superior o M1 "A". Los yacimientos tienen una permeabilidad entre 1 y 10 darcies, una porosidad entre 16 y 28% y una viscosidad entre 20 y 150 cp a condiciones de reservorios.

El petróleo se produce con un porcentaje de agua y sedimentos promedio del 90%. Para su transporte, mediante procesamiento del fluido producido, el porcentaje de agua se reduce a valores inferiores al 1%, el grado API varía entre 14 - 17 grados, y se le considera un crudo ⁷pesado

A continuación mediante la siguiente tabla se da a conocer las especificaciones y características del crudo que se produce en el Bloque 16.

⁷ API=(141.5/ densidad) - 131.5

Tabla 2.1: Especificación del crudo del Bloque 16

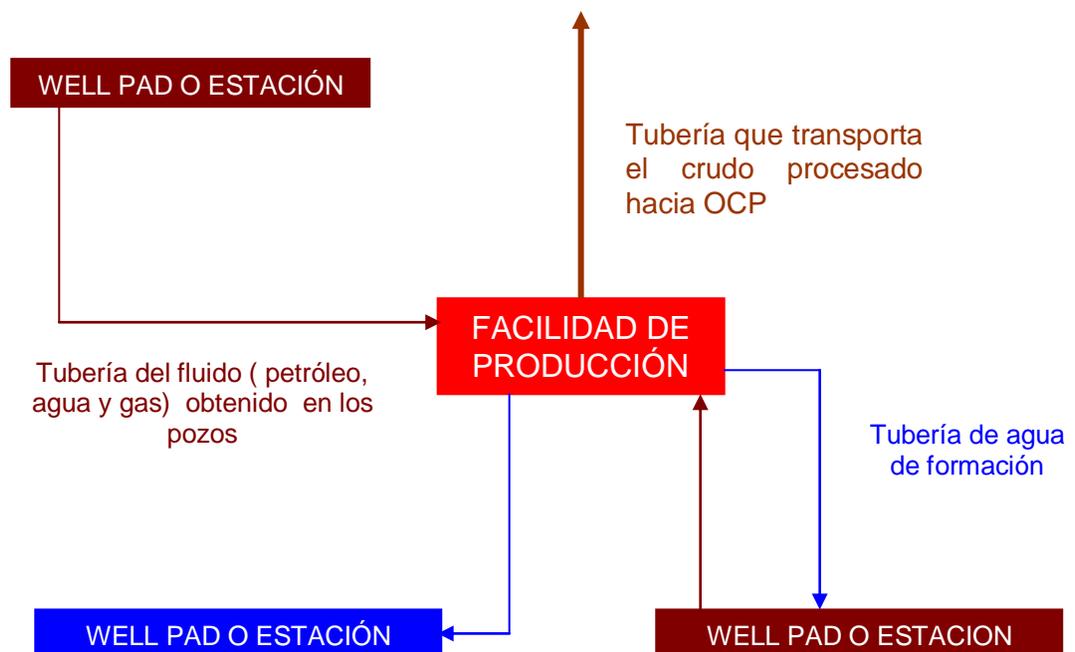
Tested Results	Units	Method
Density @ 15C	kg/m3	964.5 ISO 12185
Viscosity @ 15C	mm2/s	872 ISO 3104
Water	%v/v	0.9 ISO 3733
Micro Carbon Residue	%m/m	15 ISO 10370
Sulphur	%m/m	2.5 ISO 8754
Total Sediment Potent	%m/m	LT 0.01 ISO 10307-2
Ash	%m/m	0.12 LM 10/07/01
Vanadium	mg/kg	380 ISO 10478 Extended
Sodium	mg/kg	65 ISO 10478 Extended
Aluminium	mg/kg	1 ISO 10478
Silicon	mg/kg	1 ISO 10478
Iron	mg/kg	5 ISO 10478 Extended
Nickel	mg/kg	134 ISO 10478 Extended
Calcium	mg/kg	6 ISO 10478 Extended
Magnesium	mg/kg	LT 1 ISO 10478 Extended
Lead	mg/kg	LT 1 ISO 10478 Extended
Zinc	mg/kg	LT 1 ISO 10478 Extended
Pour Point	Deg.C	0 ISO 3016
Flash Point	Deg.C	LT 40 ISO 2719
Asphaltene	%m/m	12.1 ASTM D 3279
Calculated Valvues		
Net Specific Energy	MJ/kg	40.32
CCAI (IgnitionQuality)		817
Aluminium+Silicon	mg/kg	2

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

Para determinar la presencia de trampas estructurales dentro del bloque que podrían contener hidrocarburos, REPSOL – YPF ECUADOR utiliza la técnica de prospección sísmica. Se emplea la tecnología de perforación de pozos en racimo (vertical, horizontal y direccional), lo que significa una reducción notable en el número de plataformas y espacios de deforestación requeridos para el mismo número de pozos, si utilizáramos las técnicas convencionales.

Dentro de las actividades relevantes se tiene: desbroce y remoción de terreno, construcción de plataformas, montaje de la torre de perforación, operaciones de perforación, corrida de casing y cementación, tratamiento de fluidos de perforación, corrida de casing y cementación, tratamiento de fluidos de perforación, tratamiento y disposición de ripios de perforación, trabajos de completación y puesta en producción. Debido a los altos volúmenes de crudo, fue el BES(Bombeo Electrosumergible) considerado como el sistema de mejor aplicación en el Bloque 16, pues este brindaba una alta eficiencia en el levantamiento artificial de crudo.

Figura 2.9: Esquema simplificado del Bloque 16



El fluido obtenido (petróleo, agua y gas) se direcciona a las instalaciones de cada estación en donde por medio de un sistema múltiple (manifold) se integra la producción de todos los pozos y, luego de acuerdo a la ubicación de la plataforma de producción (Well Pad) es dirigido hacia las plantas de proceso del norte (NPF) y/o sur (SPF), en donde se procede a la separación de las fases (agua, petróleo y gas), almacenamiento de crudo, utilización del gas asociado para generación de energía e inyección del agua de formación.

2.2.1 WELL – PADS

En el Bloque 16 existen los denominados Well Pads, que son las estaciones donde se encuentran los pozos productores de crudo y los pozos inyectoros de agua de formación de cada campo. El área promedio de estas estaciones de pozo es de 3.8⁸ha, pueden llegar a tener hasta 14 pozos(vertical, direccional u horizontal), la perforación en los pozos horizontales puede ser de 850ft a 10000ft, en los pozos direccionales se alcanza hasta 2.5 Km con ángulos mayores a 55° a 12500ft. La ventaja de este tipo de estaciones es que el impacto ambiental es mínimo, se tiene una reducción de costos de inversión y operación y una optimización del movimiento de la torre de perforación y además sus instalaciones eléctricas y de producción son centralizadas.

REPSOL – YPF ECUADOR cuenta con 13 Well Pads dentro del Bloque 16 que son Capiron, Tivacuno y Bogi ubicados en la zona norte del bloque, Amo A, Amo B, Amo C, Wip, Daimi A, Daimi B, Ginta A, Ginta B, Iro A, Iro 1 ubicados en la zona sur del bloque.

⁸ ha.- Hectáreas

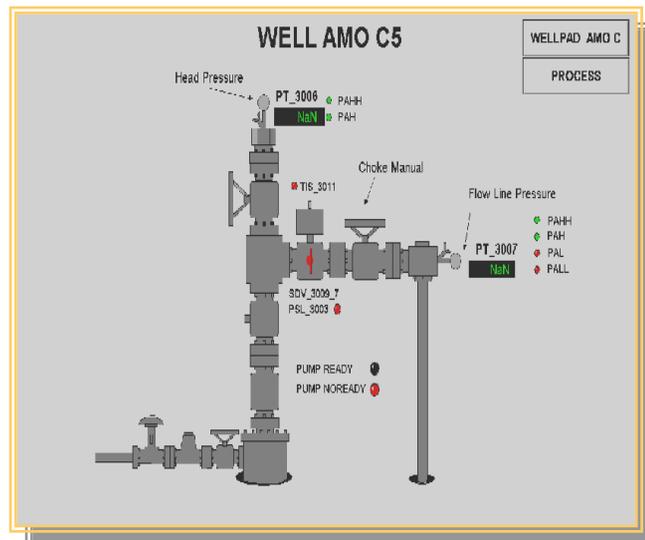
Figura 2.10: Fotografía de cabezales productores de crudo del Well-Pad Capiron



Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

Es en el cabezal donde llega el crudo desde el pozo (se lo denomina cabezal productor) o el agua de formación desde las facilidades de producción para ser inyectada al pozo (se lo denomina cabezal inyector).

Figura 2.11: Cabezal productor del pozo AMO C5



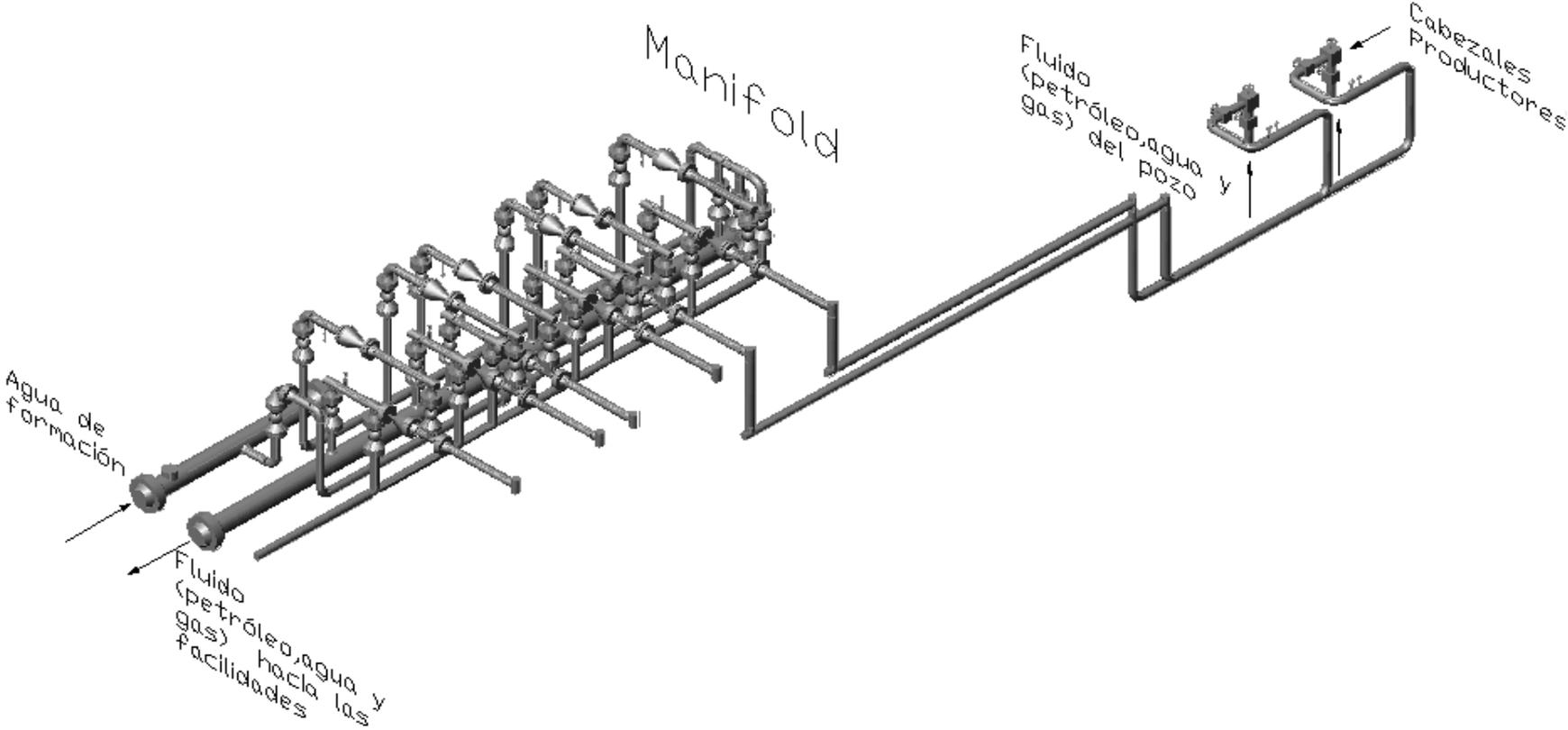
Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

2.2.1.1 Sistema de extracción de crudo

El crudo que se encuentra en los entrampamientos es bombeado mediante bombas electrosumergibles hacia el ⁹cabezal productor, de aquí el crudo se dirige hacia el manifold del Well- Pad que es un conjunto de válvulas que direccionan al crudo mediante la línea de producción del Well Pad hacia la tubería de flujo que se conecta con las facilidades de producción (que es donde se tratará al crudo para poder separarlo del agua y gas que lo componen) o direccionan hacia un sistema de conteo de crudo para luego ser reintegrado a la línea de producción. Además en el manifold existe una línea de agua de formación que proviene de las facilidades que es utilizada para cuando se hagan trabajos de reacondicionamiento de pozos.

⁹ En el cabezal productor la presión es de 350 PSI y la temperatura es de 150°F aproximadamente

Figura 2.12: Manifold de un Well Pad



Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

2.2.1.2 Sistema de inyección de agua de formación

El agua de formación luego de haber sido separado del crudo en las facilidades pasan a tanques de almacenamiento que por gravedad alimentan a unas bombas booster (bombas de baja presión) conectadas en paralelo, que a su vez alimentan a bombas de media presión (llamadas también bombas de transferencia) también conectadas en paralelo que son las encargadas finalmente de enviar el agua hacia los Well Pads donde mediante bombas de alta presión o también llamadas bombas inyectoras envían el agua hacia el pozo mediante los ¹⁰ cabezales inyectoras. Esta agua debe ser inyectada a los pozos pues es altamente contaminante y no se puede trabajar con ella, el agua de formación puede ser aplicada para levantamiento artificial de crudo, pero este método no se aplica en el bloque. En cada facilidad de producción existen 2 tanques de almacenamiento de agua de formación que tienen una capacidad de 25000 barriles cada uno.

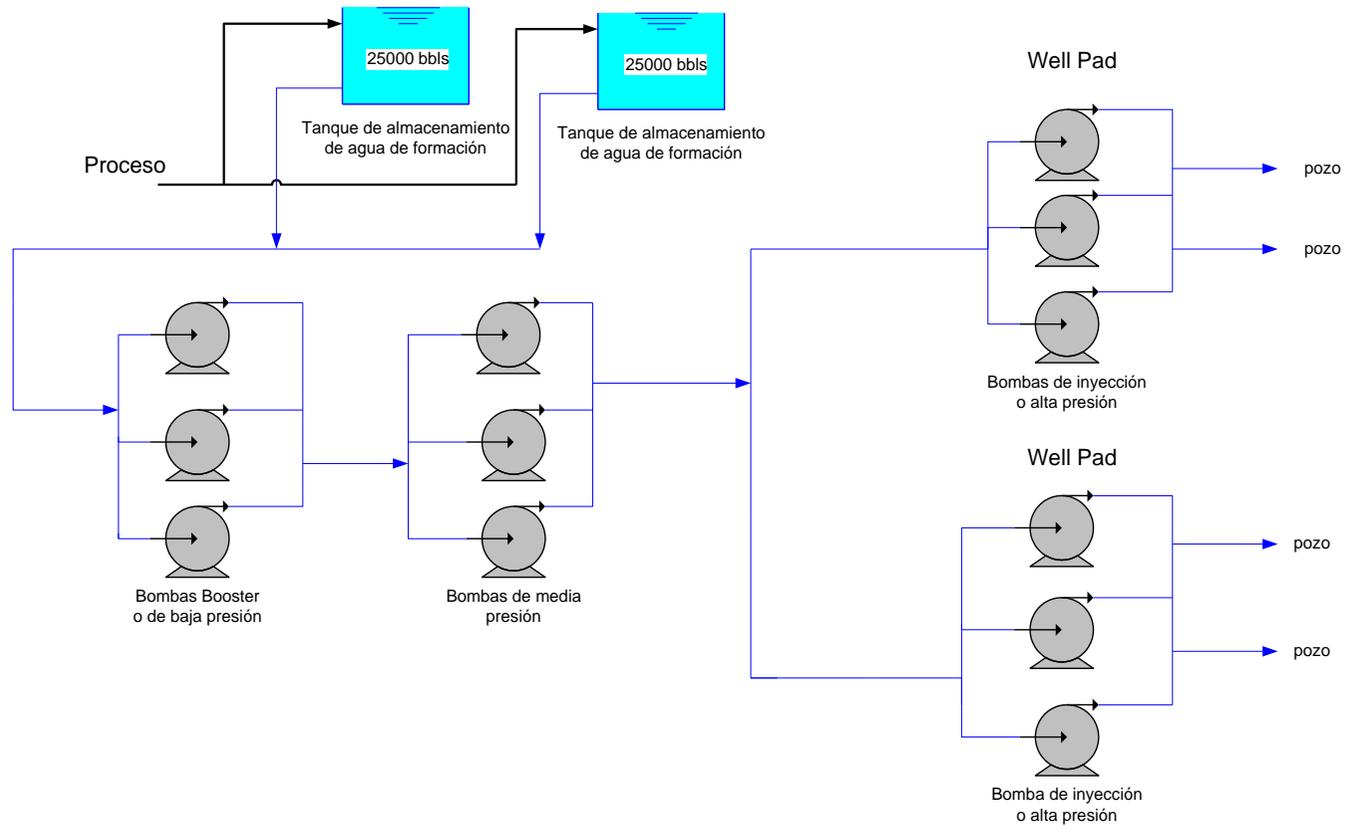
2.2.2 FACILIDADES DE PRODUCCIÓN

El Bloque 16 cuenta con dos plantas de producción de crudo que son: NPF (Facilidades de Producción del Norte) y SPF (Facilidades de Producción del Sur), es aquí donde se separa el agua y el gas del crudo.

Existen 3 campos alrededor de NPF, que son Bogi, Capirón, Wip y Tivacuno; en Bogi y Wip solo se esta inyectando agua hacia los pozos, en Capirón solo se esta extrayendo crudo de los pozos y en Tivacuno se inyecta agua en algunos pozos y se extrae crudo de otros. Por otro lado en SPF existen 5 campos alrededor de este que son Amo, Wip, Daimi, Ginta e Iro. Los Well Pads de Amo C, Dami A, Ginta A, GintaB e Iro 1 son estaciones donde solo se extrae crudo, por el contrario en Wip y Amo 1 solo se inyecta agua de formación en los pozos, mientras en las estaciones de Amo A, Iro A y Amo B se inyecta agua de formación y se extrae crudo de los pozos.

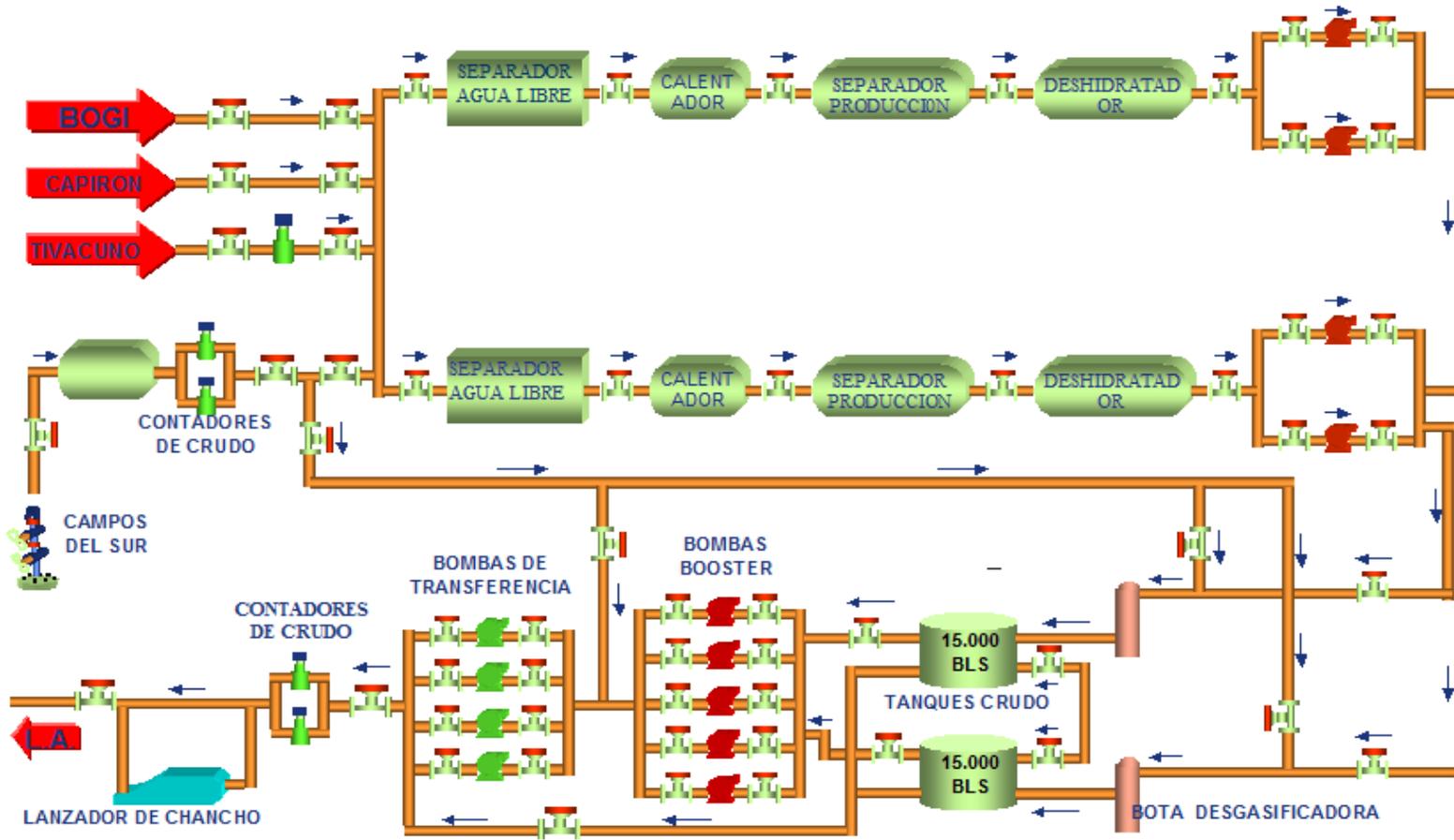
¹⁰ En el cabezal inyector la presión es de 2500 PSI y la temperatura es de 200°F aproximadamente

Figura 2.14: Sistema de inyección de agua de formación



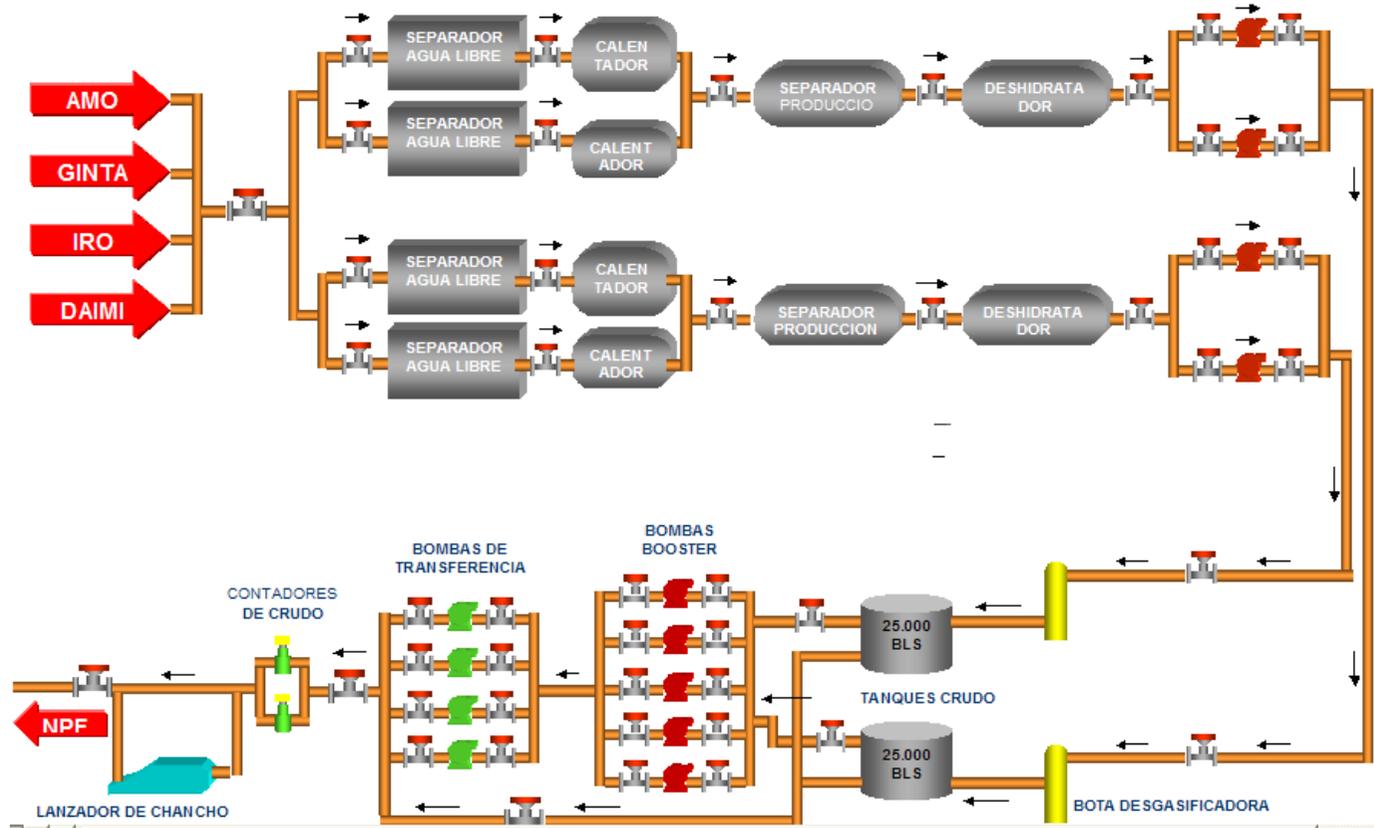
Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

Figura 2.15: Facilidades de Producción del Norte (NPF)



Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

Figura 2.16: Facilidades de Producción del Sur (SPF)



Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

2.2.2.1 Proceso de Producción de Crudo en las Facilidades

El crudo que proviene de los Well-Pad llega a los recibidores de cada facilidad que direccionan al crudo hacia el separador de agua libre que es primer paso de separación de agua y gas del crudo, el crudo entra a este separador con un porcentaje de agua promedio del 90% y sale con un porcentaje del 10%, en el siguiente paso el crudo se dirige hacia un intercambiador de calor que eleva la temperatura del fluido para hacerlo menos viscoso y poderlo separar mejor en los siguientes pasos, la temperatura de ingreso del crudo a este calentador es de aproximadamente 186°F y la salida es de 196°F, con esta temperatura el fluido ingresa al separador de producción donde a la salida queda con un porcentaje de agua del 5% para luego dirigirse al deshidratador hidrostático que a diferencia de los otros separadores que separan al crudo del agua y del gas que lo componen, este solo separa el agua del crudo, saliendo este último con un porcentaje de agua menor al 1% para terminar el proceso de separación en una bota desgasificadora que se encuentra antes de los tanques de almacenamiento, el crudo que ya se ha procesado en SPF se bombea mediante bombas de baja y alta presión hacia NPF para finalmente bombearlo con el mismo sistema hacia otras estaciones de bombeo que llevarán el crudo mediante el OCP hacia Balao para poder ser comercializado. Existen 2 tanques de almacenamiento de crudo en cada facilidad de producción que tienen una capacidad de 15000 barriles cada uno en NPF y de 25000 barriles cada uno en SPF.

Todo el agua separada en el proceso se dirige primeramente a un Scrubber que mediante los ánodos de sacrificio retienen la mayor cantidad de sales del agua, para luego ser almacenada en 2 tanques de almacenamiento, mediante bombas de baja y media presión envían el agua de formación hacia los Well Pads para poder ser inyectada en los pozos mediante bombas de alta presión. El gas separado en el proceso se lo trata para poder ser utilizado en generación eléctrica.

2.2.2.2 Suministro Eléctrico

La energía es suministrada por 2 turbinas a diesel (10 MW cada una) y 5 generadores a gas (1MW cada uno) en NPF, 1 turbina a diesel (10 MW), 16 generadores a gas (16 MW cada uno) y 6 generadores a crudo (7MW cada uno) en SPF. Siendo la capacidad instalada al interior del bloque de 105 MW. Se cuenta también con pequeños generadores auxiliares dispuestos en las plantas de proceso y ciertas plataformas que pueden operar puntualmente o ingresar al sistema en situaciones eventuales.

2.3 INFORMACIÓN RECOPIADA PARA EL ESTUDIO

Fueron simuladas dos partes que componen el bloque, pues estas dos son en las que más problema tiene la empresa (como se puede ver en la Tabla 1.1), estas partes son, todo el sistema de inyección de agua de formación, desde los tanques de almacenamiento hasta los cabezales inyectoros de cada Well Pad y el sistema de crudo desde el cabezal productor hasta la entrada de cada facilidad de producción. Para realizar toda esta simulación se debió recopilar la información necesaria para el estudio, esta ¹¹recopilación fue uno de los mayores inconvenientes del proyecto y que más tiempo llevó, pues no había información actualizada del bloque como diámetro, longitud, cédula, tipo de material, gráficas características de bombas, propiedades físicas de los fluidos que maneja el bloque, presión y temperatura en diferentes puntos de la geografía de interés, caudales de inyección de agua de formación al pozo y caudales de producción de crudo en cada uno de los pozos ,etc. ; la poca información que había se buscó intensamente en carpetas y archivos que no fueron fáciles de conseguir.

Se realizó una toma de datos en el campo de toda la información que hacía falta, esta toma de datos se la hizo con ayuda del personal técnico operativo de la compañía. Las longitudes, diámetros, espesores , tipo de material y otros

¹¹ Gran parte de esta información fue recopilada en el campo (Bloque 16)

parámetros características de las tuberías y los accesorios que componen la geografía de cada Well Pad y plantas de producción se pueden ver en los planos isométricos que se adjuntan en los anexos.

2.3.1 INFORMACIÓN DE TUBERÍAS QUE CONECTAN FACILIDADES CON WELL PADS

Para la realización del proyecto se necesitaba saber cual es la longitud, diámetro, espesor y otras características de las tuberías que transportan agua de formación de las facilidades hacia los Well Pads y de las tuberías que transportan el crudo de los Well Pads hacia las facilidades para ser procesado. Estas tuberías transportan crudo y agua de formación, la especificación del crudo que maneja el Bloque 16 se muestra en la Tabla 2.1, a continuación se muestra la especificación de las sales del agua que se inyecta en el bloque, las propiedades físicas de esta agua se las considera igual a la del agua dulce.

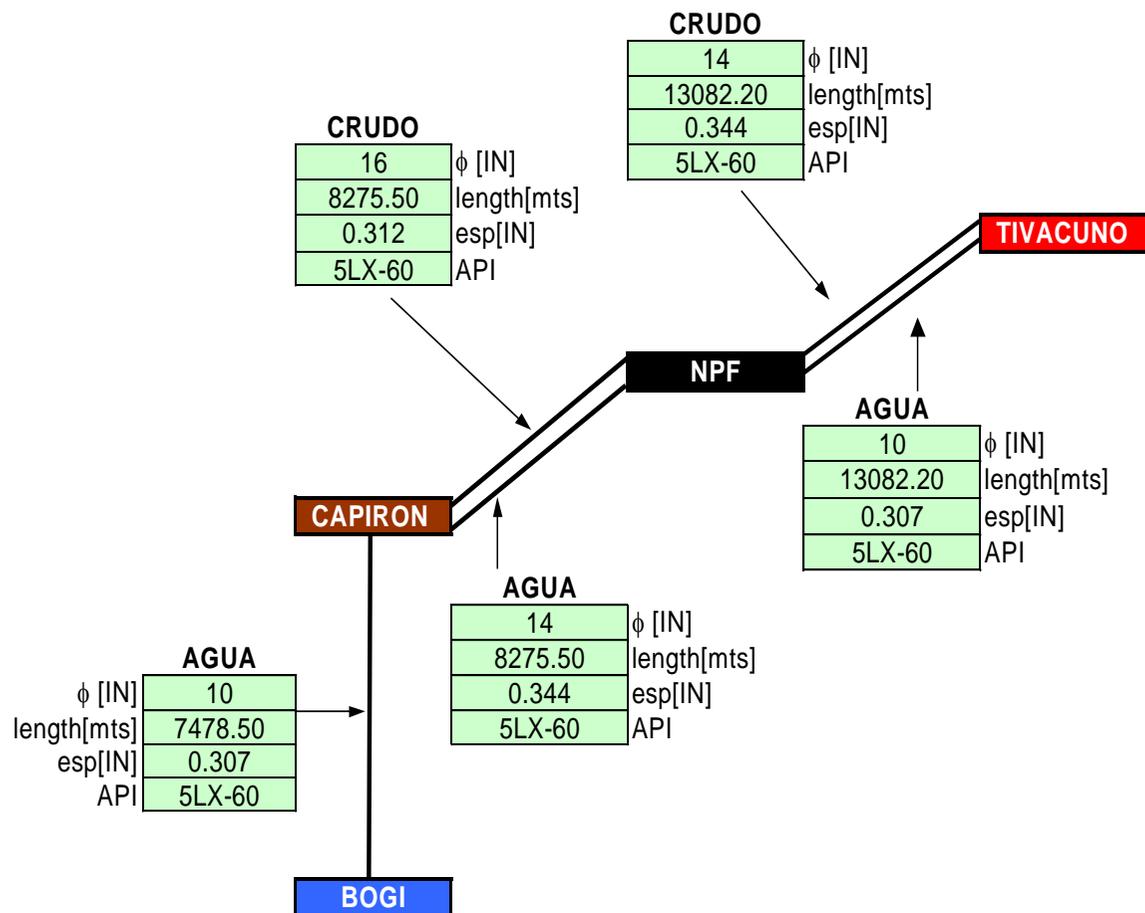
Tabla 2.2: Especificación de sales del agua de formación que se inyecta en el Bloque 16

PARAMETRO	INYECCIÓN NPF	INYECCIÓN SPF
pH	7.17	7.5
TEMPERATURA. oC	39	22.6
CONDUCTIVIDAD mS/cm	88.5	26000
SALINIDAD CNa- (mg/l)	54.2	17900
Ca++ (mg/l)	1380	212
Mg++ (mg/l)	127.2	67.2
Cl-(mg/l)	32.52	10740
Na+ (mg/l)	21.68	7160
Fe++ (mg/l)	4.9	0.7

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

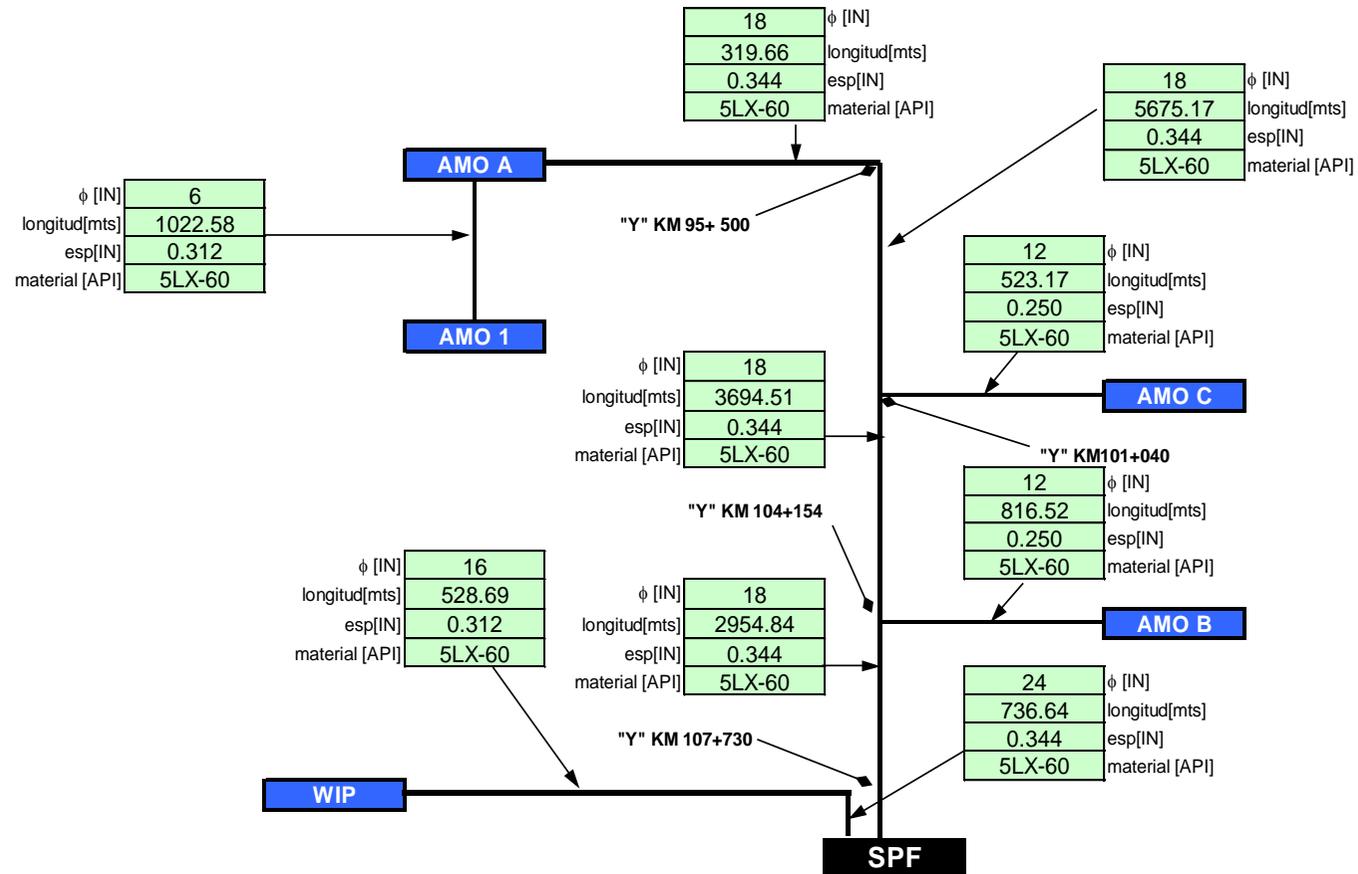
Los siguientes gráficos nos dan a conocer los parámetros característicos (diámetro, longitud, espesor y tipo de material) de estas tuberías que unen las facilidades con los Well Pads

Figura 2.17: Dimensiones de líneas de transporte de agua de formación y crudo de la zona norte del Bloque 16



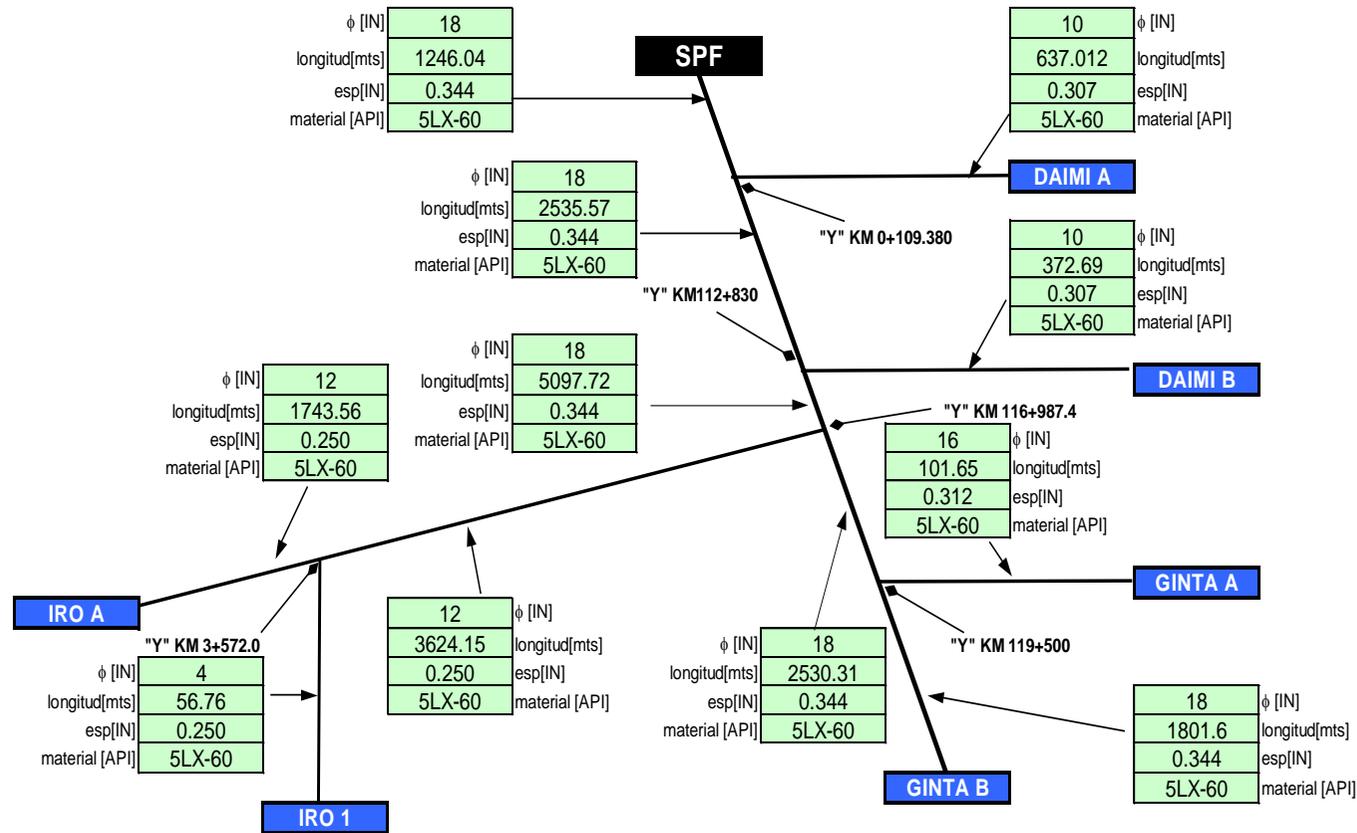
Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

Figura 2.18: Dimensiones de líneas de transporte de agua de formación de la zona sur del Bloque 16



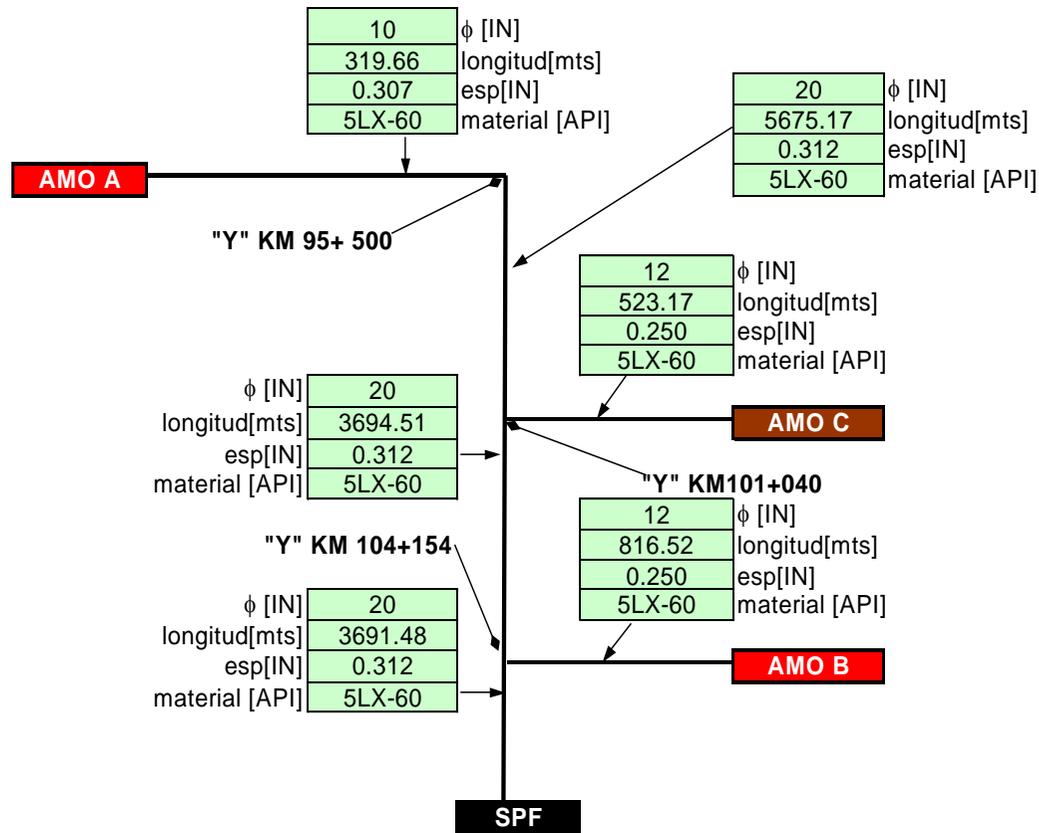
Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

Figura 2.19: Dimensiones de líneas de transporte de agua de formación de la zona sur del Bloque 16



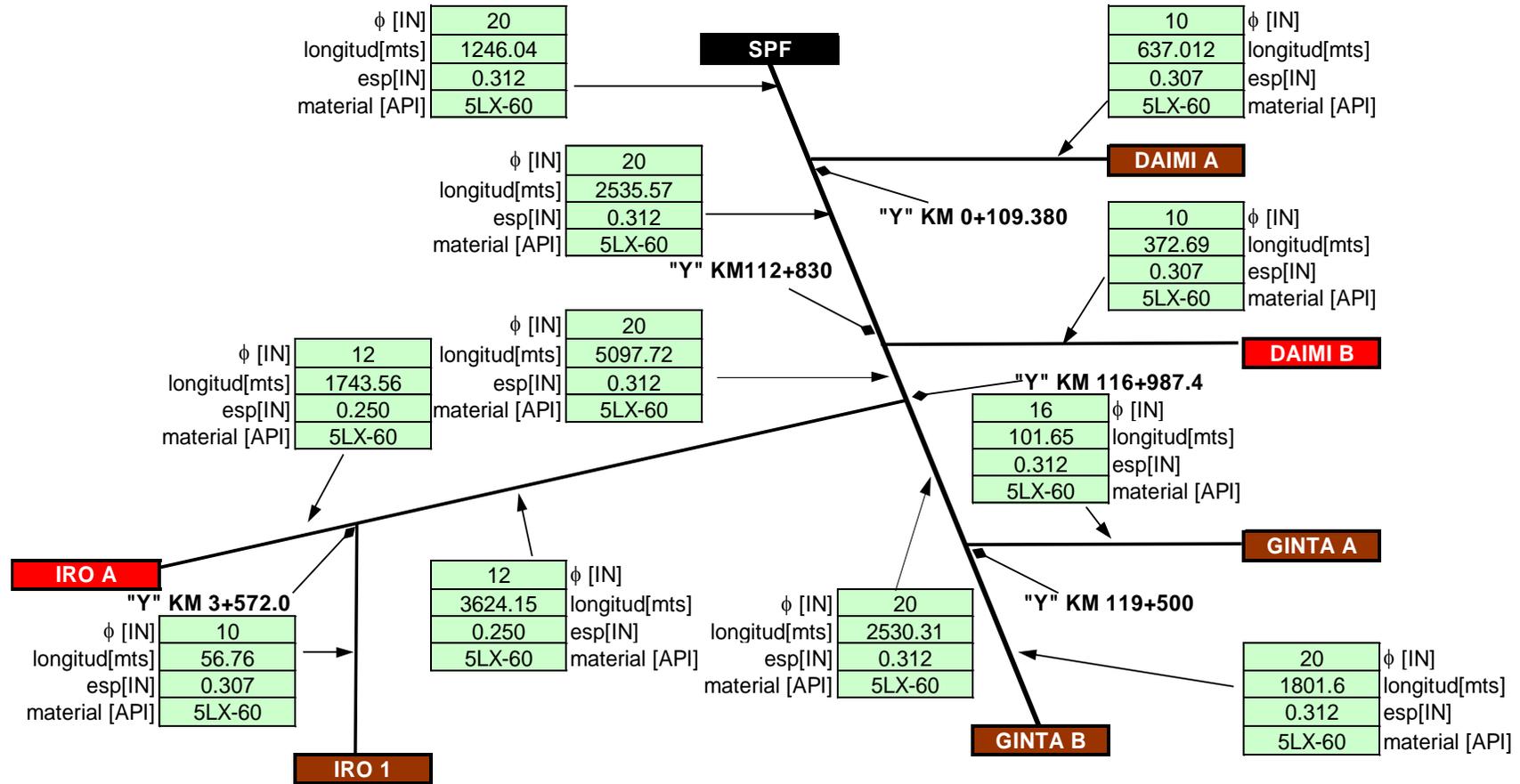
Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

Figura 2.20: Dimensiones de líneas de transporte de crudo de la zona sur del Bloque 16



Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

Figura 2.21: Dimensiones de líneas de transporte de crudo de la zona sur del Bloque 16



Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

2.3.2 INFORMACION DE BOMBAS DEL SISTEMA DE INYECCION DE AGUA DE FORMACIÓN

Es importante para el estudio saber las características y curvas de las bombas que conforman el sistema de inyección de agua de formación (bombas de baja, media y alta presión) , esta información nos dio la presión y caudal a la que las bombas trabajan.

Las curvas características de cada bomba que conforma el sistema de inyección de agua se adjunta en los anexos

Las bombas ¹²booster y de transferencia de agua de formación que REPSOL – YPF ECUADOR utiliza son de marca SULZER. En NPF existen 3 bombas booster y una bomba para ¹³Sand Jet que es utilizada en ocasiones como booster, estas bombas se encuentran dispuestas en paralelo y que se conectan en serie con 3 bombas de media presión que también están dispuestas en paralelo. En cambio en SPF existen 6 bombas booster y una bomba para Sand Jet que es utilizada en ocasiones como booster, estas bombas se encuentran dispuestas en paralelo y que se conectan en serie con 7 bombas de media presión que están dispuestas en paralelo.

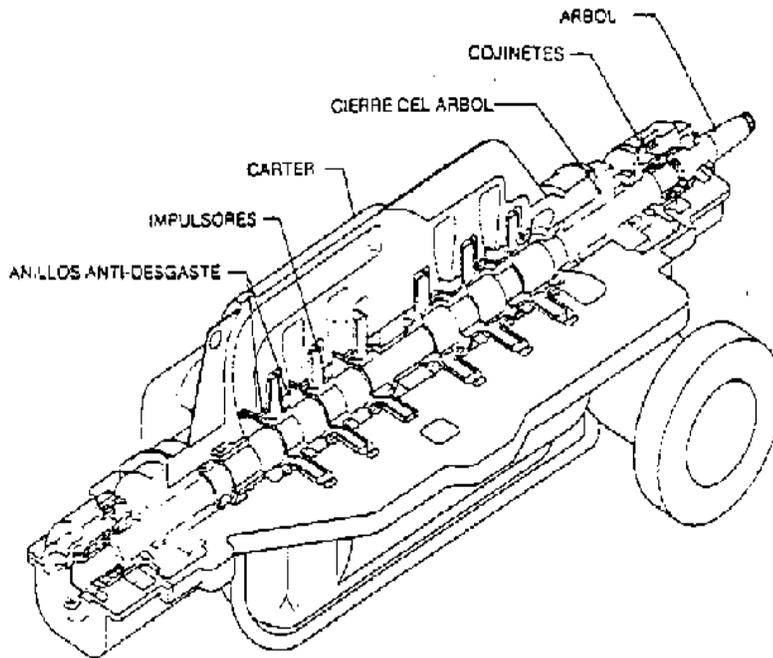
El comportamiento funcional de las bombas SULZER puede ser afectada por cambios de la gravedad específica de la materia bombeada, de la viscosidad, de la velocidad funcional de la bomba y el ¹⁴NPSH, las bombas centrifugas fueron creadas para fines específicos y pueden ser adecuadas o no para cualquier otro servicio sin pérdidas de rendimiento o averías.

¹² Bomba Booster.- Bomba de baja presión

¹³ La bomba de Sand Jet sirve para limpiar con agua a presión los tanques

¹⁴ NPSH.- altura neta positiva de succión

Figura 2.22: Bomba SULZER de agua de presión intermedia y 6 etapas

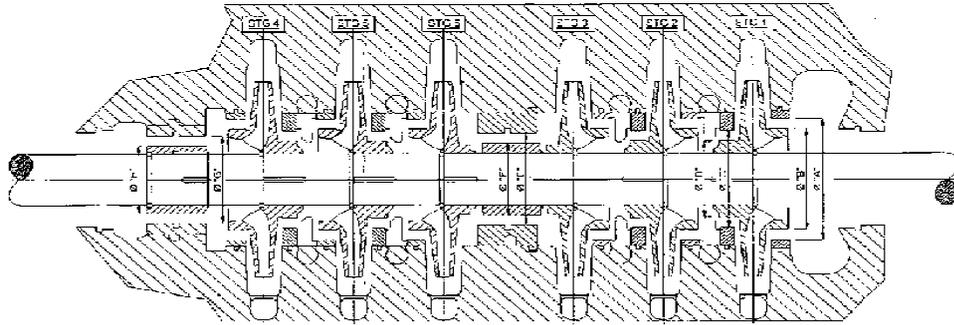


Fuente: SULZER PUMPS

En esta bomba SULZER el carter hendido horizontalmente esta fundido con boquillas integrales de aspiración y descarga conforme a los reglajes ANSI para bridas, existe una gran variedad de aleaciones según la aplicación; el eje tiene un maquinado preciso que suministra un ajuste exacto del impulso y un montaje preciso de los elementos; los impulsores son accionados por clavijas y se colocan axialmente por aros de retención o anillos de empuje hendidos; la bomba esta equipada con un cierre mecánico tipo cartucho, un prensaestopas con empaquetadura o un prensaestopas sin empaquetadura; la bomba tiene cojinetes de empuje y cojinetes radiales y el acoplamiento se selecciona conforme a los requisitos para el servicio y para las condiciones de funcionamiento para una aplicación específica.

Las bombas de alta presión o de inyección de agua de formación son bombas de marca en algunos casos REDA y en otros SULZER.

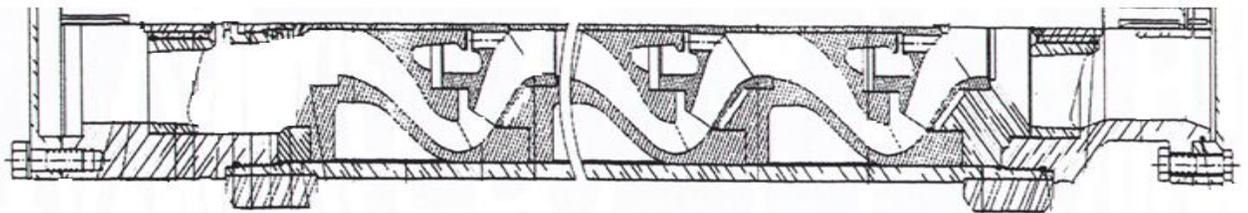
Figura 2.23: Corte de bomba SULZER de agua de presión intermedia y 6 etapas



Fuente: SULZER PUMPS

Las bombas REDA son bombas centrifugas, horizontales y multietapas y que al igual que las SULZER no requiere ningún mantenimiento diario.

Figura 2.24: Bomba REDA de inyección de agua de alta presión



Fuente: REDA PUMPS

Tabla 2.3: Características de bombas de inyección de agua de formación de baja y media presión

Facilidad	Tag	Marca	Tipo Bomba	Descripción	Etapas No.	Diámetro [in]	Presión de Cabeza [ft]	GPM	RPM	BHP	
NPF	P-1121A	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA BAJA PRESION	1	6x15 W	178	1377	1780	100	
	P-1121B	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA BAJA PRESION	1	10x12x23A	178	3444	1189	250	
	P-1121C	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA BAJA PRESION	1	10x12x23A	178	3444	1189	250	
	P-1123A		BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA PARA SAND JET	1	6x10x10A	297	986	3570		
	P-1119A	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA MEDIA PRESION	7	6x8x11D	2722	1377	3570	1250	
	P-1119B	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA MEDIA PRESION	6	8x10x13B	2722	3434	3570	3000	
	P-1119C	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA MEDIA PRESION	6	8x10x13B	2722	3434	3570	3000	
	SPF	P-2121A	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA BAJA PRESION	1	6x8x17A	178	1377	1760	100
		P-2121B	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA BAJA PRESION	1	10x12x17	178	3444	1760	250
P-2121C		SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA BAJA PRESION	1	10x12x17	178	3444	1760	250	
P-2121D		SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA BAJA PRESION	1	12x12x17	100	3724	1180	500	
P-2121E		SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA BAJA PRESION	1	12x12x17	100	3724	1180	500	
P-2123 A		SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA PARA SAND JET	1	6x8x21A	297	1320	1760	200	
P-2119A		SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA MEDIA PRESION	7	6x8x11D	2722	1450	3570	1250	
P-2119B		SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA MEDIA PRESION	6	8x10x13B	2722	3434	3570	3000	
P-2119C		SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA MEDIA PRESION	6	8x10x13B	2722	3434	3570	3000	
P-2119D		SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA MEDIA PRESION	7	8x10x13B	2719	3460	3560	3000	
P-2119F		SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA MEDIA PRESION	7	8x8x12.5A	2727	1450	3560	1500	
P-2119H	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA MEDIA PRESION	7	8x8x12.5A	2727	1450	3560	1500		

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

Tabla 2.4: Características de bombas de inyección de agua de formación de alta presión

Well Pad	Tag	Marca	Tipo Bomba	Descripción	Etapas No.	Diámetro [in]	Presión de Cabeza [ft]	GPM	RPM	BHP
BOGI	P-1950	REDA	CENTRIFUGA MULTIETAPA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	34	8.63	1432.66	438	3571	600
	P-1951	REDA	CENTRIFUGA MULTIETAPA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	34	8.63	1432.66	438	3571	600
	P-1952	REDA	CENTRIFUGA MULTIETAPA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	34	8.63	1432.66	438	3578	600
TIVACUNO	P-9108	REDA	CENTRIFUGA MULTIETAPA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	34			438	3578	500
	P-9109	REDA	CENTRIFUGA MULTIETAPA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	34			438	3578	500
NPF	P-1079A	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	12	4x6x10C	4287	875	3560	1250
	P-1079B	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	12	4x6x10C	4287	875	3560	1250
AMO A	P-9101	REDA	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	34	8.63	1432.66	438	3578	600
	P-9102	REDA	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	34	8.63	1432.66	438	3578	600
	P-9103	REDA	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	34	8.63	1432.66	438	3578	500
	P-9110	REDA	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	34	8.63	1432.66	438	3578	500
	P-2079I	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	7	6x8x11D	3700	1200	3560	1500
	P-2079J	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	7	6x8x11D	3700	1200	3560	1500
	P-2079M	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	7	6x8x11D	3700	1200	3560	1500

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

Tabla 2.5: Características de bombas de inyección de agua de formación de alta presión

Well Pad	Tag	Marca	Tipo Bomba	Descripción	Etapas No.	Diámetro [in]	Presión de Cabeza [ft]	GPM	RPM	BHP
AMO B	P-2079 G	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	7	6X8X11D	3700	1200	3560	1500
	P-2079 H	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	7	6X8X11D	3700	1200	3560	1500
	P-2079 L	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	7	6X8X11D	3700	1200	3560	1500
DAIMI B	P-2079F	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	7	6x8x11D	3696	1200	3560	1500
IRO A	P-2079K	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	7	6x8x11D	3700	1200	3560	1500
WIP	P-2079 A	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	8	4X6X10.5D	3696	1200	3580	1500
	P-2079 B	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	8	4X6X10.5D	3696	1200	3580	1500
	P-2079 C	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	8	4X6X10.5D	3696	1200	3580	1500
	P-2079 D	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	7	6x8x11D	3696	1200	3560	1500
	P-2079 E	SULZER	BOMBA CENTRIFUGA	BOMBA DE AGUA ALTA PRESION	7	6x8x11D	3696	1200	3560	1500

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

2.3.3 INFORMACIÓN DE POZOS DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN Y POZOS DE EXTRACCIÓN DE CRUDO

Para poder extraer el petróleo de los yacimientos, se perforan pozos de la forma ya antes vista. Los nombres de los pozos productores de crudo con los que cuenta REPSOL-YPF ECUADOR en el Bloque 16 en cada uno de sus Well Pads son los que se menciona a continuación.

Tabla 2.6: Pozos productores de crudo del Bloque 16

NPF					
Well Pad	Pozos				
CAPIRON	CAPIRON 1	CAPIRON A4	CAPIRON A7	CAPIRON A10	CAPIRON A15
	CAPIRON A1	CAPIRON A5	CAPIRON A8	CAPIRON A12	CAPIRON A17
	CAPIRON A3	CAPIRON A6	CAPIRON A9	CAPIRON A14	CAPIRON A18
SPF					
Well Pad	Pozos		Well Pad	Pozos	
AMO A	AMO A4	AMO B8	GINTA B	GINTA B2	GINTA B17
AMO B	AMO 2B	AMO B9		GINTA B3	GINTA B18
	AMO B4	AMO B11		GINTA B4	GINTA B19
	AMO B5	AMO B12		GINTA B5	GINTA B20
	AMO B7			GINTA B6	GINTA B21
AMO C	AMO C1	AMO C13		GINTA B8	GINTA B22
	AMO C5	AMO C14		GINTA B9	GINTA B23
	AMO C7			GINTA B10	GINTA B24
DAIMI B	DAIMI B1	DAIMI B6		GINTA B11	GINTA B25
	DAIMI B2	DAIMI B7		GINTA B12	GINTA B26
	DAIMI B3	DAIMI B8	GINTA B13	GINTA B27	
	DAIMI B4	DAIMI B9	GINTA B14	GINTA B29	
	DAIMI B5		GINTA B15	DABO 1	
GINTA A	GINTA A1	GINAT A8	IRO A	IRO A1	IRO A5
	GINTA A2	GINAT A9		IRO A2	IRO A6
	GINTA A3	GINAT A10	IRO 1	IRO 1	IRO 5
	GINTA A4	GINAT A11		IRO 2	IRO 6
	GINTA A5	GINAT A12		IRO 3	IRO 7
	GINTA A6	GINAT A14		IRO 4	IRO 8
	GINTA A7				

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

El agua de formación que es separada en el proceso de producción de crudo es inyectada en pozos, muchos de estos fueron pozos productores de crudo que luego de haber extraído toda la cantidad posible de crudo fueron acondicionados para poder ser inyectados esta agua, pero también existen pozos que fueron perforados exclusivamente para inyección de agua de formación, es decir que estos pozos no fueron antes pozos productores. Los pozos inyectoros de agua de formación se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2.7: Pozos inyectoros de agua de formación del Bloque 16

NPF		
Well Pad	Pozos	
BOGI	BOGI 1	BOGI A3
	BOGI A2	BOGI A4
TIVACUNO	TIVACUNO A2	
WIP-NPF	NPF 1	NPF 2
	SPF	
Well Pad	Pozos	
AMO A	AMO 1	AMO A3
	AMO A1	AMO A6
	AMO A2	
AMO B	AMO B1	AMO B10
	AMO B6	
WIP	WIPSI 1	WIPSI 3
	WIPSI 2	WIPSI 4
IRO A	IRO A3	
DAIMI B	DAIMI B10	

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

CAPÍTULO 3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN

3.1 DETERMINACIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN

Visual Basic es uno de los lenguajes de programación que más entusiasmo despiertan entre los programadores de PCs, tanto expertos como novatos. En el caso de los programadores expertos por la facilidad con la que desarrollan aplicaciones complejas en poquísimo tiempo (comparado con lo que cuesta programar en Visual C++, por ejemplo). En el caso de los programadores novatos por el hecho de ver de lo que son capaces a los pocos minutos de empezar su aprendizaje. El precio que hay que pagar por utilizar Visual Basic es una menor velocidad o eficiencia en las aplicaciones.

Este lenguaje de programación visual, se lo llama también lenguaje de cuarta generación. Esto quiere decir que un gran número de tareas se realizan sin escribir código, simplemente con operaciones gráficas realizadas con el ratón sobre la pantalla.

Visual Basic es también un programa *basado en objetos*, aunque no *orientado a objetos* como C++ o Java. La diferencia está en que Visual Basic utiliza objetos con propiedades y métodos, pero carece de los mecanismos de herencia y polimorfismo propios de los verdaderos lenguajes orientados a objetos como Java y C++.

Para este proyecto de grado se utilizó ¹⁵VBA, este no es nada más que un Editor de Visual Basic dentro de Microsoft Excel, que permite crear en Excel cuadros de textos, cuadros de diálogos, botones de comando, programar

¹⁵ VBA.- Visual Basic Application en Excel

funciones, etc, es decir todo lo que este lenguaje de programación nos permite programar y hacer.

Ahora bien, este lenguaje de programación fue escogido porque permite que el usuario del simulador interactúe con este y además el Excel permite trabajar de mejor manera con tabla de datos, gráficas y cálculos matemáticos.

A continuación se da a conocer un poco más de las características de Visual Basic Application, de la programación basada en objetos y orientada a eventos.

3.1.1 INTRODUCCIÓN (PROGRAMAS SECUENCIALES, INTERACTIVOS Y ORIENTADOS A EVENTOS)

Existen distintos tipos de programas. En los primeros tiempos de los ordenadores los programas eran de tipo **secuencial** (también llamados tipo batch) Un programa secuencial es un programa que se arranca, lee los datos que necesita, realiza los cálculos e imprime o guarda en el disco los resultados. De ordinario, mientras un programa secuencial está ejecutándose no necesita ninguna intervención del usuario. A este tipo de programas se les llama también *programas basados u orientados a procedimientos o a algoritmos (procedural languages)*. Este tipo de programas siguen utilizándose ampliamente en la actualidad, pero la difusión de los PCs ha puesto de actualidad otros tipos de programación.

Los programas **interactivos** exigen la intervención del usuario en tiempo de ejecución, bien para suministrar datos, bien para indicar al programa lo que debe hacer por medio de menús. Los programas interactivos limitan y orientan la acción del usuario. Un ejemplo de programa interactivo podría ser Matlab.

Por su parte los programas **orientados a eventos** son los programas típicos de Windows, tales como Netscape, Word, Excel y PowerPoint. Cuando uno de estos programas ha arrancado, lo único que hace es quedarse a la espera de las acciones del usuario, que en este caso son llamadas eventos.

El usuario dice si quiere abrir y modificar un fichero existente, o bien comenzar a crear un fichero desde el principio. Estos programas pasan la mayor parte de

su tiempo esperando las acciones del usuario (eventos) y respondiendo a ellas. Las acciones que el usuario puede realizar en un momento determinado son variadísimas, y exigen un tipo especial de programación: la programación orientada a eventos. Este tipo de programación es sensiblemente más complicada que la secuencial y la interactiva, pero Visual Basic la hace especialmente sencilla y agradable.

3.1.2 PROGRAMA PARA EL ENTORNO WINDOWS

Visual Basic está orientado a la realización de programas para Windows, pudiendo incorporar todos los elementos de este entorno informático: ventanas, botones, cajas de diálogo y de texto, botones de opción y de selección, barras de desplazamiento, gráficos, menús, etc.

Prácticamente todos los elementos de interacción con el usuario de los que dispone Windows pueden ser programados en Visual Basic de un modo muy sencillo. En ocasiones bastan unas pocas operaciones con el ratón y la introducción a través del teclado de algunas sentencias para disponer de aplicaciones con todas las características de Windows .

3.1.2.1 Modo de Diseño y Modo de Ejecución

La aplicación Visual Basic de Microsoft puede trabajar de dos modos distintos: en modo de diseño y en modo de ejecución. En modo de diseño el usuario construye interactivamente la aplicación, colocando controles en el formulario, definiendo sus propiedades, y desarrollando funciones para gestionar los eventos. La aplicación se prueba en modo de ejecución. En ese caso el usuario actúa sobre el programa (introduce eventos) y prueba cómo responde el programa. Hay algunas propiedades de los controles que deben establecerse en modo de diseño. También hay propiedades que sólo pueden establecerse en modo de ejecución y que no son visibles en modo de diseño.

Todos estos conceptos –controles, propiedades, eventos, etc. se explican en los apartados siguientes.

3.1.2.2 Formularios y Controles

Cada uno de los elementos gráficos que pueden formar parte de una aplicación típica de Windows es un tipo de control: los botones, las cajas de diálogo y de texto, las cajas de selección desplegadas, los botones de opción y de selección, las barras de desplazamiento horizontales y verticales, los gráficos, los menús, y muchos otros tipos de elementos son controles para Visual Basic. Cada control debe tener un nombre a través del cual se puede hacer referencia a él en el programa. Visual Basic proporciona nombres *por defecto* que el usuario puede modificar.

En la terminología de Visual Basic se llama ¹⁶formulario a una ventana. Un formulario puede ser considerado como una especie de contenedor para los controles. Una aplicación puede tener varios formularios, pero un único formulario puede ser suficiente para las aplicaciones más sencillas. Los formularios deben también tener un nombre, que puede crearse siguiendo las mismas reglas que para los controles.

3.1.2.3 Objetos y Propiedades

Los formularios y los distintos tipos de controles son entidades genéricas de las que puede haber varios ejemplares concretos en cada programa. En programación orientada a objetos (más bien basada en objetos, habría que decir) se llama clase a estas entidades genéricas, mientras que se llama objeto a cada ejemplar de una clase determinada. Por ejemplo, en un programa puede haber varios botones, cada uno de los cuales es un objeto del tipo de control ¹⁷Command Button, que sería la clase.

¹⁶ Al formulario también se lo llama form

¹⁷ Command Button o Botón de Comando

Cada formulario y cada tipo de control tienen un conjunto de propiedades que definen su aspecto gráfico (tamaño, color, posición en la ventana, tipo y tamaño de letra, etc.) y su forma de responder a las acciones del usuario (si está activo o no, por ejemplo). Cada propiedad tiene un nombre que viene ya definido por el lenguaje.

Por lo general, las propiedades de un objeto son datos que tienen valores lógicos (True, False) o numéricos concretos, propios de ese objeto y distintos de las de otros objetos de su clase. Así pues, cada clase, tipo de objeto o control tiene su conjunto de propiedades, y cada objeto o control concreto tiene unos valores determinados para las propiedades de su clase.

Casi todas las propiedades de los objetos pueden establecerse en tiempo de diseño y también casi siempre en tiempo de ejecución. En este segundo caso se accede a sus valores por medio de las sentencias del programa, en forma análoga a como se accede a cualquier variable en un lenguaje de programación. Para ciertas propiedades ésta es la única forma de acceder a ellas. Por supuesto Visual Basic permite crear distintos tipos de variables.

Se puede acceder a una propiedad de un objeto por medio del nombre del objeto a que pertenece, seguido de un punto y el nombre de la propiedad.

3.1.2.4 Nombres de objetos

En principio cada objeto de Visual Basic debe tener un nombre, por medio del cual se hace referencia a dicho objeto. El nombre puede ser el que el usuario desee, e incluso Visual Basic proporciona nombres por defecto para los diversos controles. Estos nombres por defecto hacen referencia al tipo de control y van seguidos de un número que se incrementa a medida que se van introduciendo más controles de ese tipo en el formulario (por ejemplo VScroll1, para una barra de desplazamiento -scroll bar- vertical, HScroll1, para una barra horizontal, etc.).

Los nombres por defecto no son adecuados porque hacen referencia al tipo de control, pero no al uso que de dicho control está haciendo el programador. Por ejemplo, si se utiliza una barra de desplazamiento para introducir una

temperatura, conviene que su nombre haga referencia a la palabra temperatura, y así cuando haya que utilizar ese nombre se sabrá exactamente a qué control corresponde. Un nombre adecuado sería por ejemplo hsbTemp, donde las tres primeras letras indican que se trata de una horizontal scroll bar, y las restantes (empezando por una mayúscula) que servirá para definir una temperatura.

3.1.2.5 Eventos

Ya se ha dicho que las acciones del usuario sobre el programa se llaman eventos. Son eventos típicos el clicar sobre un botón, el hacer doble clic sobre el nombre de un fichero para abrirlo, el arrastrar un icono, el pulsar una tecla o combinación de teclas, el elegir una opción de un menú, el escribir en una caja de texto, o simplemente mover el ratón.

Cada vez que se produce un evento sobre un determinado tipo de control, Visual Basic arranca una determinada función o procedimiento que realiza la acción programada por el usuario para ese evento concreto. Estos procedimientos se llaman con un nombre que se forma a partir del nombre del objeto y el nombre del evento, separados por el carácter (_), como por ejemplo txtBox_click, que es el nombre del procedimiento que se ocupará de responder al evento click en el objeto txtBox.

3.1.2.6 Métodos

Los métodos son funciones que también son llamadas desde programa, pero a diferencia de los procedimientos no son programadas por el usuario, sino que vienen ya pre-programadas con el lenguaje. Los métodos realizan tareas típicas, previsibles y comunes para todas las aplicaciones. De ahí que vengan con el lenguaje y que se libere al usuario de la tarea de programarlos. Cada tipo de objeto o de control tiene sus propios métodos.

Por ejemplo, los controles gráficos tienen un método llamado Line que se encarga de dibujar líneas rectas. De la misma forma existe un método llamado

Circle que dibuja circunferencias y arcos de circunferencia Es obvio que el dibujar líneas rectas o circunferencias es una tarea común para todos los programadores y que Visual Basic da ya resuelta.

Repasemos a continuación todos estos conceptos pero ahora desde el punto de vista de algunos de los objetos que nos encontraremos en Excel como ¹⁸WorkSheet o ¹⁹Range.

Un objeto Range está definido por una clase donde se definen sus propiedades, recordemos que una propiedad es una característica, modificable o no, de un objeto. Entre las propiedades de un objeto Range están Value , que contiene el valor de la casilla , Column y Row que contienen respectivamente la fila y la columna de la casilla, Font que contiene la fuente de los caracteres que muestra la casilla, etc.

Range, como objeto, también tiene métodos, recordemos que los métodos sirven llevar a cabo una acción sobre un objeto. Por ejemplo el método Activate, hace activa una celda determinada, Clear, borra el contenido de una celda o rango de celdas, Copy, copia el contenido de la celda o rango de celdas en el portapapeles.

3.1.2.7 Conjuntos

Un conjunto es una colección de objetos del mismo tipo, es un array de objetos. Por ejemplo, dentro de un libro de trabajo puede existir más de una hoja (WorkSheet), todas las hojas de un libro de trabajo forman un conjunto, el conjunto Worksheets.

Cada elemento individual de un conjunto se referencia por un índice, de esta forma, la primera, segunda y tercera hoja de un libro de trabajo, se referenciarán por Worksheets(1), Worksheets(2) y Worksheets(3).

¹⁸ Objeto hoja de cálculo

¹⁹ Objeto casilla o rango de casillas

3.1.2.8 Objetos de Objetos

Es muy habitual que una propiedad de un objeto sea otro objeto.

En Excel, el objeto WorkSheets tiene la propiedad Range que es un objeto, Range tiene la propiedad Font que es también un objeto y Font tiene la propiedad Bold (negrita).

Dicho de otra forma, hay propiedades que devuelven objetos, por ejemplo, la propiedad Range de un objeto WorkSheet devuelve un objeto de tipo Range.

3.1.3 DECLARACIÓN DE VARIABLES

En Visual Basic no es necesario declarar las variables. A pesar de ello, es recomendable que siempre se declare las variables a utilizar, de esta forma sabrá cuales utiliza el procedimiento y que tipo de datos guarda cada una, pues existen procedimientos complicados y que requerirán el uso de más variables, si no declara las variables al principio del procedimiento ocurrirán dos cosas: primero, las variables no declaradas son asumidas como tipo ²⁰Variant, segundo, se reducirá considerablemente la legibilidad de los procedimientos ya que las variables se irán colocando a medida que se las necesite, esto, a la larga complicará la corrección o modificación del procedimiento.

En el siguiente ejemplo se da a conocer como se declara una variable tipo String.

Dim Casilla As String

Dim Texto As String

A continuación se presenta en una tabla los tipos de datos que hay en Visual Basic para Excel

²⁰ este es un tipo de dato que puede almacenar cualquier valor, número, fechas, texto, etc. pero se debe tomar en cuenta que ocupa 20 Bytes y para guardar una referencia a una casilla, la edad de alguien, etc. no son necesarios tantos bytes

3.2 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

El estudio se basa en el análisis de pérdidas en tubería, para ello debemos partir de la ecuación general de la energía. En los siguientes párrafos se expone todos los parámetros que involucra las pérdidas de energía.

3.2.1 ECUACIÓN GENERAL DE LA ENERGÍA

Para comenzar la explicación de lo que es la ecuación general de la energía debemos conocer lo que es la ecuación de Bernoulli.

3.2.1.1 Conservación de la Energía – Ecuación de Bernoulli

En física se aprendió que la energía no puede ser creada ni destruida, sino que puede ser transformada de un tipo a otro. A éste enunciado se lo conoce como la ley de la **conservación de la energía**.

Cuando se analicen problemas de flujo en conductos, existen tres formas de energía que siempre hay que tomar en consideración :

1. *Energía Potencial*. Debido a su elevación, la energía potencial del elemento con respecto de algún nivel de referencia es:

$$PE = w \cdot z \quad \mathbf{3.1}$$

en la que w es el peso del elemento y z es la elevación.

2. *Energía Cinética*. Debido a su velocidad, la energía cinética del elemento es:

$$KE = \frac{w \cdot v^2}{2 \cdot g} \quad \mathbf{3.2}$$

en la que v es la velocidad del fluido y g la gravedad.

3. *Energía de flujo*. Es conocida como *energía de presión o trabajo de flujo*, ésta representa la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de una cierta sección en contra de la presión p . Esta se calcula a partir de la ecuación:

$$FE = \frac{w \cdot p}{\gamma} \quad \mathbf{3.3}$$

en la que γ es el peso específico del fluido.

La cantidad total de energía de estas tres formas que posee el elemento de fluido será la suma, representada con E :

$$E = FE + PE + KE$$
$$E = \frac{w \cdot p}{\gamma} + w \cdot z + \frac{w \cdot v^2}{2g} \quad \mathbf{3.4}$$

Cada uno de estos términos se expresa en unidades de energía, en el sistema que se desee trabajar.

Ahora consideremos de que el fluido se traslada de una sección a otra, donde los valores p , z y v son diferentes en las dos secciones. En la sección 1 la energía total es:

$$E1 = \frac{w \cdot p1}{\gamma} + w \cdot z1 + \frac{w \cdot v1^2}{2g} \quad \mathbf{3.5}$$

En la sección 2, la energía total es:

$$E2 = \frac{w \cdot p2}{\gamma} + w \cdot z2 + \frac{w \cdot v2^2}{2g} \quad \mathbf{3.6}$$

Si no se agrega energía al fluido o se pierde entre las secciones 1 y 2, entonces el principio de conservación de la energía requiere que:

$$E1 = E2$$

$$\frac{w \cdot p1}{\gamma} + w \cdot z1 + \frac{w \cdot v1^2}{2g} = \frac{w \cdot p2}{\gamma} + w \cdot z2 + \frac{w \cdot v2^2}{2g} \quad \mathbf{3.7}$$

El peso del elemento, w, es común a todos los términos y se le puede cancelar, entonces se convierten:

$$\frac{p1}{\gamma} + z1 + \frac{v1^2}{2g} = \frac{p2}{\gamma} + z2 + \frac{v2^2}{2g} \quad \mathbf{3.8}$$

A ésta se le conoce como la *ecuación de Bernoulli*.

La ecuación general de la energía, es una expansión de la ecuación de Bernoulli, que hace posible resolver problemas **en los que se presentan pérdidas y adiciones de energía**, esto se expresa de manera matemática en la *ecuación de Darcy*:

$$E'1 + h_A - h_R - h_L = E'2$$

$$\frac{p1}{\gamma} + z1 + \frac{v1^2}{2g} + h_A - h_R - h_L = \frac{p2}{\gamma} + z2 + \frac{v2^2}{2g} \quad \mathbf{3.9}$$

Los términos E'1 y E'2 denotan la energía que posee el fluido por unidad de peso en las secciones 1 y 2, respectivamente:

$$E' = \frac{P}{\gamma} + z + \frac{v^2}{2g} \quad \mathbf{3.10}$$

Los términos de remociones y pérdidas de energía:

hA = Energía añadida o agregada al fluido mediante un dispositivo mecánico como puede ser una bomba.

hR = Energía removida o retirada del fluido mediante un dispositivo mecánico como podría ser un motor de fluido.

hL = Pérdidas de energía por parte del sistema, debidas a fricción en los conductos, o pérdidas menores debidas a la presencia de válvulas y conectores.

Este estudio involucró el sistema de inyección de agua de formación y el sistema de producción de crudo desde los Well Pads hasta las facilidades.

3.2.2 PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN FLUIDOS

Para el análisis de pérdidas se debe tomar en cuenta la velocidad promedio a la que viaja el fluido en estudio, esta se determina de la siguiente manera.

El caudal Q , esta en función de la velocidad promedio del fluido v , y del área de la sección A :

$$Q = A \cdot v \quad 3.11$$

despejando a la velocidad nos queda:

$$v = \frac{Q}{A} \quad 3.12$$

La rapidez de flujo de peso W , está relacionada con Q mediante la ecuación:

$$Q = \frac{W}{\gamma} \quad 3.13$$

reemplazando la ecuación 3.13 en la 3.12, nos quedaría:

$$v = \frac{W}{A \cdot \gamma} \quad 3.14$$

Para entender lo que involucra las pérdidas de energía por fricción o pérdidas mayores debemos tener en claro lo que es el número de Reynolds, flujo laminar y flujo turbulento.

3.2.2.1 Número de Reynolds

El comportamiento de un fluido, particularmente con respecto a las pérdidas de energía, depende bastante de si el flujo es laminar o turbulento como se verá más adelante. Por esta razón se debe tener medios para predecir el tipo de flujo sin tener necesidad de observarlo. Se puede mostrar experimentalmente y verificar analíticamente que el carácter del flujo en un conducto redondo depende de cuatro variables: de la velocidad promedio de flujo v , el diámetro del conducto D y la viscosidad cinemática del fluido ν . Reynolds fue el primero en demostrar que un flujo laminar o turbulento puede ser predicho si se conoce la magnitud de un número adimensional, conocido ahora como número de Reynolds N_R :

$$N_R = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad 3.15$$

pero la viscosidad cinemática del fluido es igual:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad 3.16$$

donde μ es la viscosidad dinámica del fluido y ρ es la densidad del fluido, entonces el número de Reynolds también es igual a:

$$N_R = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} \quad 3.17$$

Los flujos que tienen un número de Reynolds grande, típicamente debido a una alta velocidad o una baja viscosidad, o a ambas, tienden a ser turbulentos. Aquellos fluidos que poseen una alta viscosidad y/o que se mueven a bajas velocidades tendrán un número de Reynolds pequeño y tenderán a ser laminares. Para aplicaciones prácticas en flujos de conductos, tenemos que si el número de Reynolds para el flujo es menor de 2000, el flujo será laminar; tenemos también que si el número de Reynolds es mayor que 4000, se puede suponer que el flujo es turbulento. En el intervalo de números de Reynolds entre 2000 y 4000, es imposible predecir qué tipo de flujo existe; por consiguiente, este intervalo se conoce como región crítica o transitoria.

3.2.2.2 Pérdidas de energía debido a la fricción (Pérdidas Mayores)

El término h_L , se define como la energía perdida por el sistema. Un componente de la pérdida de energía se debe a la fricción en el fluido en movimiento. La fricción es proporcional a la cabeza de velocidad del flujo y al cociente de la longitud entre el diámetro de la corriente de flujo, para el caso de flujo en conductos y tubos. Esto se expresa de manera matemática en la ecuación de Darcy:

$$h_L = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad 3.18$$

donde:

h_L = pérdida de energía debido a la fricción

L = longitud de la corriente de flujo.

D= diámetro del conducto.

V= velocidad de flujo promedio

f = factor de fricción (adimensional)

Las pruebas han demostrado que el factor de fricción f depende de dos números, también adimensionales que son, el numero de Reynolds y la rugosidad; esta última es el cociente del diámetro, D, del conducto entre la rugosidad promedio, ε , de la pared del conducto . El factor de fricción puede ser calculada por la expresión de ²¹Churchill, esta expresión involucra a los dos número adimensionales ya mencionados, a continuación la expresión:

$$f = 8 \cdot \left[\left(\frac{8}{N_R} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^{1.5}} \right]^{\frac{1}{12}} \quad \mathbf{3.19}$$

donde :

$$A = \left\{ 2.457 \cdot \ln \left[\frac{1}{\left(\frac{7}{N_R} \right)^{0.9} + \left(0.27 \frac{\varepsilon}{D} \right)} \right] \right\}^{16}$$
$$B = \left(\frac{37.53}{N_R} \right)^{16}$$

El material de tubería utilizado en la geografía del Bloque 16 es acero comercial. El acero comercial es utilizada dentro de las facilidades y Well Pads, y también es utilizado en la tubería que conecta estas estaciones. El valor de rugosidad relativa fue obtenido de la siguiente tabla:

²¹ La expresión de Churchill sirve para cuando el flujo este en régimen laminar, transitorio o turbulento, dicha expresión fue sacada del libro Analysis and Design of Energy Systems.

Tabla 3.1: Rugosidad relativa de acero comercial y tubing

Diámetro de Tubería [mm]	Diámetro de Tubería [in]	eps=0.000005	eps=0.00015
2.54	0.1	0.0006597	0.018186
50.8	2	0.0000303	0.000896
76.2	3	0.0000200	0.000596
101.6	4	0.0000149	0.000446
127	5	0.0000118	0.000357
152.4	6	0.0000098	0.000297
203.2	8	0.0000073	0.000222
254	10	0.0000058	0.000178
508	20	0.0000028	0.000089
762	30	0.0000019	0.000059
1016	40		0.000044
1270	50		0.000035
1524	60		0.000029
2032	80		0.000022
2540	100		0.000018
MATERIAL		Tubing	Acero Comercial

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

3.2.2.3 Pérdidas por accesorios (Pérdidas Menores)

Las pérdidas menores ocurren cuando hay un cambio en la sección cruzada de la trayectoria de flujo o en la dirección de flujo, o cuando la trayectoria de flujo se encuentra obstruida, como sucede con la válvula. La energía se pierde bajo estas condiciones debido a fenómenos físicos bastante complejos. La predicción teórica de la magnitud de estas pérdidas también es compleja, y por tanto, normalmente se usan datos experimentales.

Esta pérdida de energía es proporcional a la cabeza de velocidad del fluido al fluir éste alrededor de un codo, a través de una dilatación o contracción de la sección de flujo, o a través de una válvula, etc. Los valores experimentales de pérdidas de energía generalmente se reportan en términos de un coeficiente de resistencia, K, de la siguiente forma:

$$h_L = K \cdot \left(\frac{v^2}{2g} \right) \quad \mathbf{3.20}$$

Alguno de los valores que se utilizaron en el análisis como coeficiente de resistencia K, se describen en la siguiente tabla:

Cuadro 3.2: Coeficiente de pérdidas por accesorios K

Accesorio	Coeficiente K
Codo 90° Standard	0.75
Te con flujo a través de un tramo	1.3
Te con flujo a través de la rama	1.5
Pérdida entrada borde cuadrado	0.5
Codo 45° Standard	0.35

Fuente: J.H Perry and C. H Chilton, Chemical Engineers, McGraw-Hill Book Company, 1963

Los valores de coeficiente de resistencia K para válvulas, expansiones y reducciones de tubería fueron calculadas mediante las siguientes fórmulas:

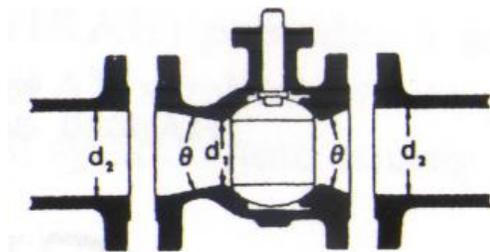
Para válvulas de bola full port:

$$K = 3.f \quad 3.21$$

donde f es el factor de fricción.

Para válvulas de bola con reducción y expansión:

Figura 3.1: Válvula de Bola



Fuente: Analysis and design of Energy Systems, Hodge and Taylor

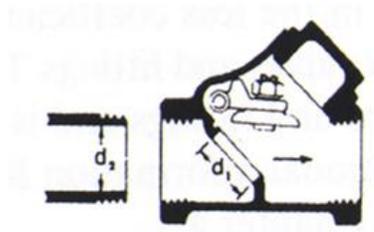
$$\beta = \frac{d_1}{d_2} \quad 3.22$$

Si $\beta < 1$ y $\theta > 45^\circ \leq 180^\circ$, entonces:

$$K = \frac{3 \cdot f + 0.5 \cdot \sqrt{\sin \frac{\theta}{2} (1 - \beta^2) + (1 - \beta^2)^2}}{\beta^4} \quad 3.23$$

Para válvulas Check:

Figura 3.2: Válvula Check

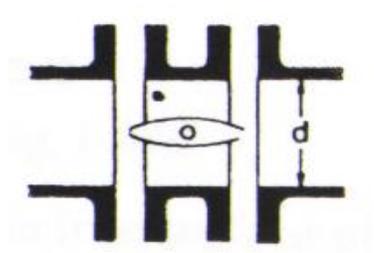


Fuente: Analysis and design of Energy Systems, Hodge and Taylor

$$K = 100 \cdot f \quad 3.24$$

Para válvulas mariposa:

Figura 3.3: Válvula Mariposa



Fuente: Analysis and design of Energy Systems, Hodge and Taylor

Si el diámetro de la válvula es de 2" a 8"

$$K = 45 \cdot f \quad 3.25$$

Si el diámetro de la válvula es de 10" a 14"

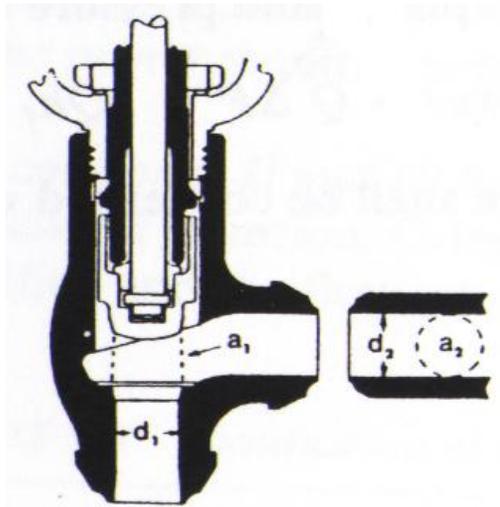
$$K=35.f \quad 3.26$$

Si el diámetro de la válvula es de 10" a 14"

$$K=25.f \quad 3.27$$

Para válvulas de choque:

Figura 3.4: Válvula de Choque



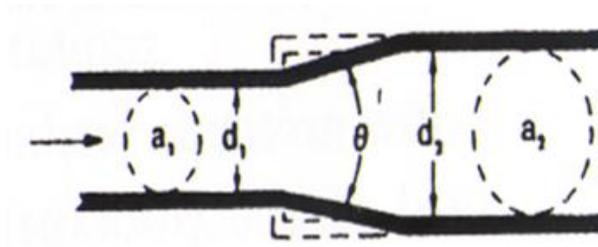
Fuente: Analysis and design of Energy Systems, Hodge and Taylor

$$K=55.f \quad 3.28$$

Esta válvula es de globo con un ángulo.

Para dilatación gradual o expansión:

Figura 3.5: Dilatación gradual o expansión



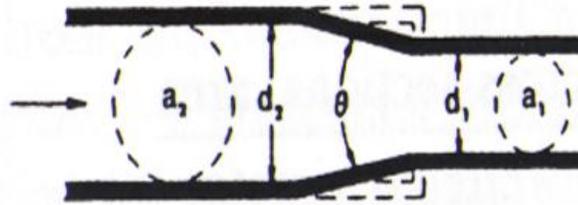
Fuente: Analysis and design of Energy Systems, Hodge and Taylor

Si $\theta > 45^\circ \leq 180^\circ$

$$K = \frac{(1 - \beta^2)^2}{\beta^4} \quad 3.29$$

Para contracción gradual o reducción:

Figura 3.6: Contracción gradual o reducción



Fuente: Analysis and design of Energy Systems, Hodge and Taylor

Si $\theta \leq 45^\circ$

$$K = \frac{0.8 \cdot \sin \frac{\theta}{2} (1 - \beta^2)}{\beta^4} \quad 3.30$$

Si $\theta > 45^\circ \leq 180^\circ$

$$K = \frac{0.5 \cdot (1 - \beta^2) \cdot \sqrt{\sin \frac{\theta}{2}}}{\beta^4} \quad 3.31$$

3.2.2.4 Sistema de línea de tubería en serie

Si el sistema es arreglado de tal forma que el fluido fluye a través de una línea continua sin ramificaciones, éste se conoce con el nombre de sistema en serie. En una línea de tubería en serie la pérdida de energía total es la suma de las pérdidas individuales grandes y pequeñas. Esta afirmación está de acuerdo con el principio de que la ecuación de la energía es una manera de tomar en cuenta toda la energía en el sistema entre los puntos de referencia.

²² Existen sistemas de líneas de tuberías en serie dentro del estudio.

$$h_r = \sum h \quad 3.32$$

$$Q_1 = Q_2 = Q \quad 3.33$$

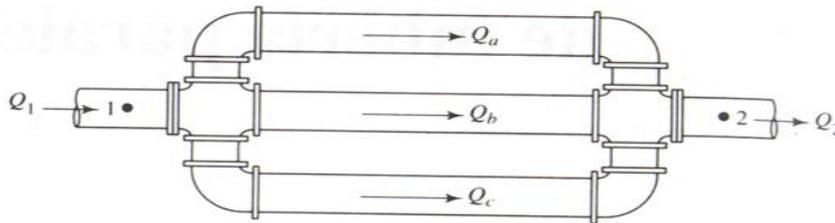
3.2.2.5 Sistema de línea de tubería en paralelo

Por el contrario del sistema de línea de tubería en serie, si el sistema provoca que el fluido se ramifique en dos o más líneas se le llama sistema ²³paralelo. El análisis de los sistemas de línea de tubería paralelo requieren el uso de la ecuación general de la energía junto con las ecuaciones que relacionan las velocidades de flujo de volumen en las diferentes ramas del sistema y las expresiones para las pérdidas de cabeza a lo largo del sistema.

$$Q_1 = Q_a + Q_b + Q_c \quad 3.34$$

$$h_a = h_b = h_c \quad 3.35$$

Figura 3.7: Ejemplo de un sistema de línea de tubería paralelo con tres ramas



Fuente: Mecánica de Fluidos Aplicada, Robert Mott

3.2.2.6 Bombas Centrifugas

Debido a que las bombas centrífugas no son del tipo de desplazamiento positivo, existe una gran dependencia entre la capacidad y la presión que debe desarrollar la bomba. Esto hace que su funcionamiento sea de alguna forma más complejo. La curva típica de funcionamiento muestra la cabeza total

²³ Existen sistemas de líneas de tuberías en paralelo dentro del estudio.

sobre la bomba H, versus la capacidad o descarga Q. La cabeza total sobre la bomba H, representa la cantidad de energía que se adiciona a una unidad de peso del fluido conforme éste pasa a través de la bomba. Existe un gran espacio libre entre el impulsor rotatorio y la cubierta de la bomba. Este factor coopera en la disminución de la capacidad a medida que la cabeza total aumenta.

3.2.2.6.1 *Bombas operando en serie*

Dirigiendo la salida de una bomba a la entrada de una ²⁴segunda bomba, permite la obtención de la misma capacidad a una cabeza total igual a la suma de los valores de las otras bombas. Este método permite la operación contra valores de cabeza altos, los cuales son pocos frecuentes.

3.2.2.6.2 *Bombas operando en paralelo*

Utilizando dos ²⁵bombas idénticas para alimentar fluido desde la misma fuente y entregarlo en la misma cabeza del sistema duplica la velocidad de flujo entregada. Este método se lo utiliza cuando la capacidad deseada está más allá del límite de capacidad de cualquier bomba por sí sola. Este método también proporciona flexibilidad en la operación del sistema, debido a que una de las bombas puede apagarse durante las horas de baja demanda o para darles mantenimiento.

3.2.2.6.3 *Bombas multietapas*

Un funcionamiento similar al que se logra por medio de la utilización de bombas es serie se puede obtener utilizando bombas ²⁶multietapa. Dos o más impulsores se arreglan en la misma cubierta de tal forma que el fluido corre en

²⁴ Existen sistemas de bombas operando en serie dentro del estudio

²⁵ Existen sistemas de bombas operando en paralelo dentro del estudio

²⁶ Excepto las bombas de baja presión, los demás tipos de bombas (media y alta presión) son multietapas.

forma sucesiva de una a la siguiente. En cada etapa se incrementa la presión del fluido de tal forma que se puede desarrollar un valor de cabeza total muy elevado.

3.2.2.6.4 Cabeza de succión positiva neta (NPSH)

La cabeza de succión positiva neta (NPSH) se relaciona con la presión a la entrada de la bomba. La entrada o sistema de succión debe ser capaz de permitir la entrada a la bomba de un flujo parejo de líquido a una presión suficientemente alta para evitar la formación de burbujas en el fluido. A medida que la presión en un fluido disminuye, la temperatura a la cual se forman burbujas de vapor también disminuye. Por lo tanto es esencial que la presión de succión a la entrada de la bomba tenga un valor más elevado que la presión a la cual presentaría vaporización a la temperatura de operación del líquido. Esto se logra proporcionando una cabeza de succión positiva neta.

3.2.3 DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL CRUDO

Para llegar a determinar las propiedades del fluido crudo, se partió del grado API de este.

3.2.3.1 Gravedad Específica

La gravedad específica se puede definir de dos maneras:

- a. La gravedad específica es el cociente de la densidad de una sustancia entre la densidad del agua a 15.6°C (60°F).
- b. La gravedad específica es el cociente del peso específico de una sustancia entre el peso específico del agua a 15.6°C (60°F).

La gravedad específica de los aceites crudos varía, dependiendo del lugar en que son encontrados. El Instituto Norteamericano de Petróleo, ²⁷API, desarrolló la escala API, para líquidos más ligeros que el agua. La fórmula de la gravedad específica sg en función del grado API es la siguiente:

$$sg = \frac{141.5}{131.5 + \text{grado API}} \quad \mathbf{3.36}$$

3.2.3.2 Peso Específico

Como ya se mencionó la gravedad específica es el cociente del peso específico de una sustancia entre el peso específico del agua a 60°F, esto se puede expresar de manera matemática como:

$$sg = \frac{\gamma_{sustancia}}{\gamma_{agua \text{ a } 60^{\circ}\text{F}}} \quad \mathbf{3.37}$$

, por lo que la fórmula del peso específico de una sustancia es:

$$\gamma_{sustancia} = sg * \gamma_{agua \text{ a } 60^{\circ}\text{F}} \quad \mathbf{3.38}$$

El peso específico del agua a 60°F, es

$$\gamma_{agua} = 62.4 \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^3}$$

3.2.3.3 Densidad

Como ya se mencionó la gravedad específica es el cociente de la densidad de una sustancia entre la densidad del agua a 60°F, esto se puede expresar de manera matemática como:

²⁷ API.- American Petroleum Institute

$$sg = \frac{\rho_{sustancia}}{\rho_{agua \text{ a } 60^{\circ}\text{F}}} \quad 3.39$$

, por lo que la fórmula de la densidad de una sustancia es:

$$\rho_{sustancia} = sg * \rho_{agua \text{ a } 60^{\circ}\text{F}} \quad 3.40$$

La densidad del agua a 60°F, es

$$\rho_{agua} = 1.94 \frac{\text{slugs}}{\text{ft}^3}$$

3.2.3.4 Viscosidad Cinemática

Muchos cálculos en mecánica de fluidos implican el cociente de la viscosidad dinámica entre la densidad del fluido. Como una convención, la viscosidad cinemática, ν , se define como:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad 3.41$$

La viscosidad dinámica, μ , del crudo en análisis es:

$$^{28} \mu = 0.00015 \frac{\text{lbf} \cdot \text{seg}}{\text{ft}^2}$$

Conforme la temperatura del aceite o el petróleo va aumentando, su viscosidad disminuye notablemente. Todos los fluidos exhiben este comportamiento en algún grado.

²⁸ La viscosidad dinámica del crudo se la estimo para un sg de 0.93 y una temperatura de 200°F, esta viscosidad se la obtuvo del Apéndice D del libro Mecánica de Fluidos Aplicada de Robert L. Mott.

3.3 DISEÑO Y CODIFICACIÓN DEL PROGRAMA

Antes de dar a conocer la codificación del simulador es necesario mostrar las estructuras, funciones, operaciones y controles que fueron utilizadas en la programación.

3.3.1 ESTRUCTURAS, OPERADORES, CONTROLES Y FUNCIONES DE VISUAL BASIC

3.3.1.1 Estructura Condicional if

Las estructuras condicionales son instrucciones de programación que permiten controlar la ejecución de un fragmento de código en función de si se cumple o no una condición.

En primer lugar veremos la instrucción **if** Condición **then....End if** (**Si** Condición **Entonces...Fin Si**). La estructura condicional que se construye con la instrucción **Si** Condición **Entonces... Fin Si** tiene la forma siguiente:

Si Condición **Entonces**

Sentencia1

Sentencia2...

SentenciaN

Fin Si

Cuando el programa llega a la instrucción **Si** Condición **Entonces** , se evalúa la condición, si esta se cumple (es cierta), se ejecutan todas las sentencias que están encerradas en el bloque, si no se cumple la condición, se saltan estas sentencias. Esta estructura en Visual Basic tiene la sintaxis siguiente:

If Condición **Then**

Sentencia1

Sentencia2

SentenciaN...

End If

Ahora veremos la estructura **if...Else**. Esta estructura se utiliza cuando se requiere una respuesta alternativa a una condición. Su estructura es la siguiente:

Si Condición Entonces

Sentencia1

Sentencia2...

SentenciaN

Sino

Sentencia1

Sentencia2...

SentenciaN

Fin Si

Como podemos ver, si se cumple la condición, se ejecuta el bloque de sentencias delimitado por **Si Condición Entonces** y si no se cumple la condición se ejecuta el bloque delimitado por **Sino** y **Fin Si**. En Visual Basic la instrucción **Si Condición Entonces ... Sino ... Fin Si** se expresa con las instrucciones siguientes:

If Condición Then

Sentencia1

Sentencia2...

SentenciaN

Else

Sentencia1

Sentencia2...

SentenciaN

End If

3.3.1.2 Operadores Lógicos

Estos operadores se utilizan cuando se necesitan evaluar dos o más condiciones para decidir si se ejecutan o no determinadas acciones.

3.3.1.2.1 Operador Lógico And (Y)

Se utiliza este operador cuando sea preciso que para ejecutar un bloque de instrucciones se cumpla más de una condición. Se deberán cumplir todas las condiciones .

3.3.1.2.2 Operador Lógico Or (O).

Se utiliza este operador cuando sea preciso que para ejecutar un bloque de instrucciones se cumpla alguna de una serie de condiciones. Sólo es necesario que se cumpla alguna de las condiciones que se evalúan.

Las tablas siguientes de verdad nos sirve para ver los resultados de evaluar dos condiciones con el operador And y con el operador Or.

Tabla 3.2: Tabla de verdad con el operador AND

Condición 1	Condición 2	Resultado
Falsa	Falsa	FALSO
Falsa	Cierta	FALSO
Cierta	Falsa	FALSO
Cierta	Cierta	CIERTO

Tabla 3.3: Tabla de verdad con el operador OR

Condición 1	Condición 2	Resultado
Falsa	Falsa	FALSO
Falsa	Cierta	CIERTO
Cierta	Falsa	CIERTO
Cierta	Cierta	CIERTO

Como podemos ver en el operador AND deben de cumplirse todas las condiciones (dos o más) para que el resultado sea cierto. Con el operador OR sólo es necesario que se cumpla una (de las dos o más) para que el resultado sea cierto.

3.3.1.3 La Función MsgBox

Esta función muestra un mensaje en un cuadro de diálogo hasta que el usuario pulse un botón. La función devuelve un dato tipo Integer en función del botón pulsado por el usuario. A la hora de invocar esta función, se permiten diferentes tipos de botones.

3.3.1.4 Procedimientos y funciones

Se define como procedimiento y/o función a un bloque de código que realiza alguna tarea. Se podría fácilmente caer en la tentación de utilizar, como hasta ahora, un único procedimiento por programa pero se dará cuenta rápidamente de que este método no es nada práctico ya que grandes bloques de código implican mayor complicación del mismo, repetición de sentencias y lo que es más grave, mayores problemas de seguimiento a la hora de depurar errores, ampliar funcionalidades o incluir modificaciones.

La filosofía de utilizar procedimientos es la antigua fórmula del "divide y vencerás", es decir, con los procedimientos podremos tratar cada problema o tarea de forma más o menos aislada de forma que construiremos el programa paso a paso evitando tener que resolver o controlar múltiples cosas a la vez.

Cada tarea la realizará un procedimiento, si esta tarea implica la ejecución de otras tareas, cada una se implementará y solucionará en su correspondiente procedimiento de manera que cada uno haga una cosa concreta. Así, los diferentes pasos que se deben ejecutar para que un programa haga algo, quedaran bien definidos cada uno en su correspondiente procedimiento, si el programa falla, fallará a partir de un procedimiento y de esta forma podremos localizar el error más rápidamente.

Los procedimientos son también un eficaz mecanismo para evitar la repetición de código en un mismo programa e incluso en diferentes programas.

En el siguiente ejemplo veremos como se define un procedimiento o función.

Sub Nombre_Procedimento

Sentencias.

End Sub.

3.3.1.5 Controles

3.3.1.5.1 Cuadro de Texto

Sirve para ingresar valores o tipo de datos que puede ser utilizado como el programador disponga.

3.3.1.5.2 Etiqueta

Las etiquetas sirven básicamente para acompañar los controles con texto descriptivo.

3.3.1.5.3 Botón

Los botones se utilizan básicamente para invocar las macros que realizarán las acciones. No es el único control que puede invocar macros, cualquiera de los controles puede invocarla, pero es el más habitual.

3.3.1.5.4 Casillas de verificación (CheckBox)

Estos controles se suelen utilizar para activar o desactivar la ejecución de determinadas acciones. Casi siempre implican una estructura condicional a la hora de hacer alguna cosa,

Si las casilla está activada **Entonces**

Acciones

....

Fin Si

3.3.1.6 Cambiar las propiedades de los objetos

Se debe desplegar la ventana de propiedades para cambiar algunas de los objetos acabados de incrustar. Debe estar en modo diseño, el botón debe estar activado.

3.3.1.6.1 Cambiar el texto del control. Propiedad Caption

1. Seleccionar el control .
2. Pulsar sobre el botón de la barra de controles, se activa la ventana de Propiedades.
3. En la propiedad Caption, cambiar el texto Label1 por el texto que se quiera escribir en la etiqueta.
4. Ajustar la posición y el tamaño del control.

3.3.1.6.2 Cambiar el nombre de un control. Propiedad Name

No es necesario cambiar el nombre de los controles pero si muy conveniente, se debe tener en cuenta que a través de los nombres de un control será como se refiera a ellos a través de las macros. Siempre es mejor llamar a un control por un nombre descriptivo que por Text1 o Command1, etc. Ahora veremos como cambiar el nombre del control.

1. Seleccionar el control Cuadro de Texto.
2. Si esta activada la ventana de propiedades, se la debe activar.
3. En la propiedad Name, cambiar text1 o command1, etc, dependiendo con el control que se este trabajando por el nombre que se le quiera poner al este control. Si se quiere dar nombres con más de una palabra se debe utilizar guión bajo en lugar de dar espacios en blanco, pues la propiedad Name no permite dar espacios en blanco entre cada palabra.

3.3.1.6.3 *Escribir código para el evento Click del Botón*

Debe estar en modo Diseño, se debe asegurar que el botón está pulsado. Hacer doble click sobre el botón, observar que se activa automáticamente la ventana de Visual Basic y aparece un esqueleto de función

Sub Name_Boton_Click()

3.3.1.6.4 *End Sub*

Es lo que se llama procedimiento de evento, es decir, este procedimiento está asociado al evento Click del Botón, aquí podemos ver que el procedimiento lleva un nombre simple o compuesto por el nombre del control, un guión bajo y el nombre del evento "Click", en general todos los procedimientos de evento se nombra de esta forma,

NombreDeControl_NombreDeEvento

Existe una lista en la parte superior derecha, esta tiene el elemento **Click**. Es la lista de eventos, si se la despliega se podrá ver que además del elemento Click aparecen unos cuantos más **DbIClick** (Doble Click) **Gotfocus** (Coger el foco), etc. Todos ellos son eventos programables del control botón, es decir, que se pueden incluir código que se ejecutará cuando ocurren dichos eventos. Por otra parte, todos los controles tienen un evento "por defecto", dicho de otra forma, cuando se programa un evento del control casi siempre será ese. El evento por defecto de un control es el que aparece cuando, en modo diseño, se hace doble clic sobre él, obviamente este se puede cambiar, por el que más conveniente.

3.3.2 SOLVER

La opción Solver de EXCEL sirve para resolver problemas de optimización lineal y no lineal; también se pueden indicar restricciones enteras sobre las

variables de decisión. Con Solver es posible resolver problemas que tengan hasta 200 variables de decisión, 100 restricciones explícitas y 400 simples (cotas superior e inferior o restricciones enteras sobre las variables de decisión).

La ventana **Parámetros de Solver** se utiliza para describir el problema de optimización a EXCEL. El campo **Celda Objetivo** contiene la celda donde se encuentra la función objetivo correspondiente al problema en cuestión. Si se desea hallar el máximo o el mínimo, se selecciona **Max** o **Min**. Si la casilla **Valores de** está seleccionada, Solver tratará de hallar un valor de la celda igual al valor del campo que se encuentra a la derecha de la selección. El cuadro de diálogo Cambiando las Celdas contendrá la ubicación de las variables de decisión para el problema. Por último, las restricciones se deben especificar en el campo **Sujetas a las siguientes restricciones** haciendo clic en **Agregar**. El botón **Cambiar** permite modificar las restricciones recién introducidas y **Eliminar** sirve para borrar las restricciones precedentes. **Restablecer Todo** borra el problema en curso y restablece todos los parámetros a sus valores por defecto. Con el botón **Opciones** se accede a las opciones de Solver, **Tiempo** permite especificar el número de segundos antes de que Solver se detenga. El campo **Iteraciones**, al igual que el campo anterior, permite especificar el número máximo de iteraciones (pasos del algoritmo solver) antes de que el programa se detenga. **Precisión** es el grado de exactitud del algoritmo solver (por ejemplo, lo cerca que tiene que estar el valor del lado derecho de una restricción antes de que se considere igual al lado izquierdo). El campo **Tolerancia** se utiliza para programas enteros. Especifica un porcentaje dentro del cual se garantiza la optimización de la solución. Si se intenta hallar la solución óptima, se pone el valor cero en este campo, aunque tal vez se desee establecer un valor más alto si el tiempo de ejecución es demasiado largo.

Si el modelo es un programa lineal o un programa entero lineal, es aconsejable seleccionar la casilla **Adoptar Modelo Lineal**. De este modo, el programa utiliza el algoritmo simplex en lugar de un algoritmo no lineal más largo y complicado.

Al seleccionar la casilla **Asumir No Negativos** todos los valores de las celdas cambiantes serán mayor o igual a cero. Al seleccionar **Mostrar Resultados de Iteraciones** se muestra la información iteración por iteración (esto ralentiza mucho el tiempo de procesamiento). La casilla **Usar Escala Automática** es útil si el modelo que se utiliza tiene una escala defectuosa (si las entradas son de órdenes de magnitud completamente diferentes). Por último, la parte inferior de la ventana contiene las opciones para el algoritmo no lineal, a saber, cómo calcula la no linealidad, cómo se calculan las tasas de cambio y el tipo de técnica de búsqueda empleado.

En términos generales, los valores por defecto de la mayoría de estos parámetros son perfectamente válidos.

3.3.3 CODIFICACIÓN DEL PROGRAMA

Es necesario decir que el sistema de unidades utilizado fue el *Sistema Técnico Británico*, en el capítulo anterior se dijo las partes que se simularon, empezaremos viendo la codificación del sistema de inyección de agua de formación para luego ver la codificación del sistema de crudo.

3.3.3.1 Codificación del simulador del sistema de inyección de agua de formación del Bloque 16

Se realizó dos archivos de programa para la simulación de inyección del agua de formación del bloque, un archivo para la simulación de NPF y otro para SPF.

3.3.3.1.1 *ENTRADAS y SALIDAS de la simulación*

Es imprescindible describir cuales fueron los datos de entrada (ENTRADAS), y cuales fueron los de salida (SALIDAS) del programa de simulación del sistema

de inyección de agua de formación del Bloque 16. Los datos que se ingresan en el programa son los siguientes:

1. Propiedades del fluido de trabajo: peso específico (lbf/ft^3), y viscosidad cinemática (ft^2/seg)
2. Presión (PSI) y caudal (BPD, Barriles Por Día) de inyección de agua de formación en el cabezal del pozo.
3. Estado de bombas (ENCENDIDA / APAGADA)
4. Estado de pozos de inyección (ABIERTO/CERRADO)

Los resultados que arroja el programa de simulación del sistema de inyección de agua de formación son los siguientes:

1. Presión de succión y de descarga de las bombas booster, media presión y de alta presión (PSI).
2. Caudal de trabajo de las bombas booster, media presión y de alta presión (BPD, Barriles Por Día).
3. ²⁹Presión de inyección en los pozos (PSI)
4. ²⁸Caudal de inyección en los pozos (BPD, Barriles Por Día)
5. Altura de tanques de almacenamiento de agua de formación ($\text{ft H}_2\text{O}$)

3.3.3.1.2 Codificación de Funciones

Para comenzar se hizo las funciones de varias operaciones que ayudan al análisis de pérdidas en fluidos. Estas funciones se las codificó en módulos del Editor Visual Basic de Excel, para que sea utilizada en la hoja de cálculo cuando se las necesite.

En el módulo "Funciones", se codificaron las funciones de cálculo de pérdidas de presión utilizadas para cada tramo.

²⁹ Estos valores de presión y caudal en los pozos, es el modificado por SOLVER para que el sistema se encuentra balanceado.

Para llamar en la hoja de cálculo a una función creada en un módulo se lo hace en la barra de fórmulas, por ejemplo la función velocidad, calcula la velocidad del fluido de acuerdo a la Ecuación 3.14, en esta ecuación la velocidad esta en función de la rapidez de flujo de peso W, del área de la sección A y del peso específico γ ,

$$v = \frac{W}{A \cdot \gamma} \quad 3.14$$

a continuación podemos ver cómo se llama a la función velocidad:

C51			
=velocidad(C49,C50,\$F\$4)			
	A	B	C
43	Tramo		1-3
44	PERDIDAS MAYORES		
45	Diámetro de tubería, D	in	18
46	Longitud de tubería, L	m	5.37
47	Material de tubería		Ac. Comercial
48	Rugosidad Relativa de tubería, ϵD		0.0001068
49	Rapidez de flujo, w	lb/seg	270.91
50	Area de tubería, A	ft ²	1.767
51	Velocidad, V	ft/seg	2.551
52	Número de Reynolds, Re		1142162.728
53	Factor de fricción, fr		0.013466994
54	Perdidas mayores de Presión	PSI	0.0067117

la función velocidad necesita los valores de la celdas C49, C50 y F4, para poder ser calculada, los valores de las celdas son la rapidez de flujo de peso, el área y el peso específico, respectivamente, que son los parámetros para el cálculo de la velocidad según la Ecuación 3.14. A continuación se muestra la codificación de la función velocidad.

Function velocidad(massflow, area, pesoesp)

velocidad = massflow / (area * pesoesp)

End Function

Para el análisis de pérdidas del sistema de inyección de agua de formación, las funciones que se codificaron fueron las siguientes:

La función área, esta como su nombre lo indica, calcula el área de la sección de análisis. Para que esta función pueda ser calculada necesita el valor del diámetro de la sección; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

Function area(diam)

Dim pi As Double

pi = 3.14159265359

area = (pi / 4) * ((diam / 12) ^ 2)

End Function

En esta función se crea una variable pi que representa el valor de π , esta variable es de tipo Double, en el cálculo del área a la variable diam que representa el diámetro se la divide para 12 que es el factor de convergencia de pulgadas a pies, pues el diámetro de tuberías viene en pulgadas. La unidad en la que fue calculada el área es ft^2 (pies al cuadrado).

La función velocidad, esta calcula la velocidad promedio del fluido en base a la Ecuación 3.14; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

Function velocidad(massflow, area, pesoesp)

velocidad = massflow / (area * pesoesp)

End Function

³⁰ $\pi=3.14159$

En esta función la variable massflow, area, pesoesp, representan la rapidez de flujo de peso, el área y el peso específico, respectivamente, estos son valores que se requieren para que dicha función pueda ser calculada. La unidad en la que fue calculada la velocidad es ft / seg (pies por segundo).

La función número de Reynolds, esta calcula el número de Reynolds en base a la Ecuación 3.15; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

Function Reynolds(vel, diam, kv)

Reynolds = (vel * (diam / 12)) / kv

End Function

En esta función la variable vel, diam, kv, representan la velocidad promedio del fluido, el diámetro de la tubería y viscosidad cinemática del fluido, respectivamente, estos son valores que se requieren para que dicha función pueda ser calculada. Al igual que en la función área a la variable diam se la divide para 12 que es el factor de convergencia de pulgadas a pies. El número de Reynolds es adimensional.

La función factor de fricción, como su nombre lo indica, ésta calcula el factor de fricción en base a la Ecuación 3.19; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

Function factor_friccion(eD, Re)

Dim a As Double, B As Double

Dim aux1 As Double, aux2 As Double

aux1 = ((7 / Re) ^ 0.9) + (0.27 * eD)

a = (2.457 * Log(1 / aux1)) ^ 16

B = (37530 / Re) ^ 16

$$\text{aux2} = 1 / ((a + B) ^ 1.5)$$

$$\text{factor_friccion} = 8 * (((8 / \text{Re}) ^ 12) + (\text{aux2})) ^ (1 / 12)$$

End Function

En esta función la variable eD, Re, representan la rugosidad relativa del material de la tubería y el número de Reynolds, respectivamente, estos son valores que se requieren para que dicha función pueda ser calculada. Aquí existen algunas variables que ayudan al cálculo, éstas no son más que partes de la Ecuación 3.19. El factor de fricción es adimensional.

La función pérdidas mayores, como su nombre lo indica, esta calcula las pérdidas mayores en tubería en base a la Ecuación 3.18; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

Function perdidas_mayores(longitud, diam, velocidad, kv, eD, pesoescf)

Dim f As Double

Dim rey As Double

'pérdidas

rey = Reynolds(velocidad, diam, kv)

f = factor_friccion(eD, rey)

perdidas_mayores = (f * (longitud * 3.28084) * (velocidad ^ 2) / (2 * (diam / 12) * 32)) * (pesoescf / 144)

End Function

En esta función la variable longitud, diam, velocidad, kv, eD, pesoescf representan la longitud de tubería del tramo, el diámetro, la velocidad del fluido, la viscosidad cinemática del fluido, la rugosidad relativa del material de la tubería, el peso específico del fluido, respectivamente, estos son valores que se requieren para que dicha función pueda ser calculada. Aquí existen dos

variables Re y f que son de tipo Double y que representan al número de Reynolds y al factor de fricción respectivamente, como podemos ver estas son calculadas mediante funciones ya enunciadas. La longitud es multiplicada por 3.28084 que es el factor de convergencia de metros a pies y al igual que casos anteriores el diámetro es dividido para el factor de convergencia 12, toda la expresión que representa las pérdidas mayores es multiplicada por el peso específico del fluido y dividido para 144, este factor hace que la unidad de pérdidas mayores este en PSI.

La función pérdidas menores, como su nombre lo indica, esta calcula las pérdidas menores en tubería en base a la Ecuación 3.20; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

```
Function perdidas_menores(n, k, velocidad, pesoescf)
perdidas_menores = (n * ((k * ((velocidad) ^ 2)) / (2 * 32))) * (pesoescf / 144)
End Function
```

En esta función la variable n , k , velocidad, pesoescf representan el número de tipo de accesorios, el coeficiente de pérdidas menores, la velocidad del fluido, el peso específico del fluido, respectivamente, estos son valores que se requieren para que dicha función pueda ser calculada, al igual que en la anterior función toda la expresión es multiplicada por el peso específico del fluido y dividido para 144, este factor hace que la unidad de pérdidas menores este en PSI.

La función reducción, esta calcula coeficiente de pérdidas menores K debido a reducción o contracción gradual en tubería para $\theta > 45^\circ \leq 180^\circ$ en base a la Ecuación 3.31; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

```
Function reduccion(angulo, diam1, diam2)
Dim B As Double, aux1 As Double, aux2 As Double, pi As Double
```

```

pi = 3.14159265359
B = (diam1 / diam2)
aux1 = (Sin((angulo * pi / 180) / 2)) ^ 0.5
aux2 = 0.5 * (1 - B ^ 2)
reduccion = aux1 * aux2 / B ^ 4

```

End Function

En esta función la variable angulo, diam1, diam2 representan el ángulo θ , el diámetro menor, diámetro mayor, respectivamente, estos son valores que se requieren para que dicha función pueda ser calculada. La variable pi tipo Double representa el valor de $\pi(3.14159)$, las otras variables son parte de la fórmula que calcula la función de contracción gradual. La reducción es adimensional.

La función reducción menor, esta calcula coeficiente de pérdidas menores K debido a reducción o contracción gradual en tubería para $\theta \leq 45^\circ$ en base a la Ecuación 3.30; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

Function Reduccion_menor(angulo, diam1, diam2)

Dim B As Double, aux1 As Double, pi As Double

```

pi = 3.14159265359
B = diam1 / diam2
aux1 = 0.8 * Sin((angulo * pi / 180) / 2)
Reduccion_menor = (aux1 * (1 - B ^ 2)) / B ^ 4

```

End Function

En esta función la variable angulo, diam1, diam2 representan el ángulo θ , el diámetro menor, diámetro mayor, respectivamente, estos son valores que se

requieren para que dicha función pueda ser calculada. La variable pi tipo Double representa el valor de $\pi(3.14159)$, las otras variables son parte de la fórmula que calcula la función de contracción gradual. La reducción es adimensional.

La función expansión, esta calcula coeficiente de pérdidas menores K debido a expansión o dilatación gradual un en tubería para $\theta >45^\circ \leq 180^\circ$ en base a la Ecuación 3.29; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

Function Expansion(diam1, diam2)

Dim B As Double

B = diam1 / diam2

Expansion = $((1 - B^2)^2) / B^4$

End Function

En esta función la variable diam1, diam2 representan el diámetro menor, diámetro mayor, respectivamente, estos son valores que se requieren para que dicha función pueda ser calculada. La variable B tipo Double forma parte de la fórmula que calcula la función de dilatación gradual. La expansión es adimensional.

La función válvula de bola, esta calcula coeficiente de pérdidas menores K debido a la válvula de bola con expansión y reducción para $\theta >45^\circ \leq 180^\circ$ en base a la Ecuación 3.23; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

Function valvula_bola(angulo, fr, diam1, diam2)

Dim k1 As Double, aux1 As Double, aux2 As Double

Dim B As Double, a1 As Double, b1 As Double, pi As Double

$$\pi = 3.14159265359$$

$$k1 = 3 * fr$$

$$B = (\text{diam1} / \text{diam2})$$

$$b1 = (1 - B^2)$$

$$a1 = (\text{Sin}((\text{angulo} * \pi / 180) / 2))^{0.5}$$

$$\text{aux1} = (0.5 * b1 * a1) / B^4$$

$$\text{aux2} = b1^2 / B^4$$

$$\text{valvula_bola} = (k1 / B^4) + \text{aux1} + \text{aux2}$$

End Function

En esta función la variable *angulo*, *fr*, *diam1*, *diam2* representan el ángulo θ , el factor de fricción, el diámetro menor, diámetro mayor, respectivamente, estos son valores que se requieren para que dicha función pueda ser calculada. La variable *pi* tipo Double representa el valor de $\pi(3.14159)$, las otras variables son parte de la fórmula que calcula la función de válvula de bola. Esta al igual que las tres anteriores es adimensional.

La función presión hidrostática, esta calcula las pérdidas debido a la energía potencial del fluido de acuerdo a la elevación, esta función se basa en la Ecuación 3.1; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

Function *presion_hidrostatica*(*h*, *pesoescf*)

$$\text{presion_hidrostatica} = ((h * 3.28084) * \text{pesoescf}) / 144$$

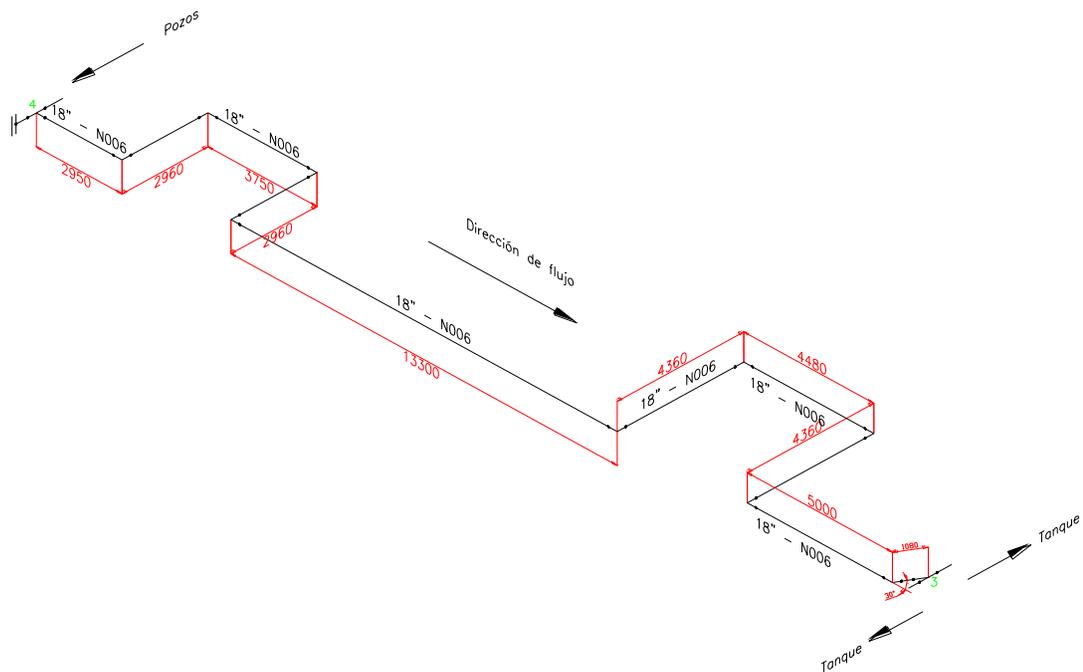
End Function

En esta función la variable *h*, *pesoescf* representan la elevación o altura, el peso específico respectivamente, estos son valores que se requieren para que dicha función pueda ser calculada. La expresión es multiplicada por el peso específico del fluido y dividido para 144, este factor hace que la unidad de energía potencial este en PSI.

3.3.3.1.3 Cálculos realizados

En el estudio de pérdidas de energía se utilizó el sistema de análisis por tramos, en el cual a la geografía del bloque en estudio se la divide en varios tramos. Un tramo es una parte de la tubería que conforma todo el sistema a analizar, el diámetro de esta parte de tubería es el mismo durante todo el trayecto, lo que facilita el estudio. Los número de cada tramo se puede ver en los planos que se adjuntan en el anexo.

Esto se puede explicar mejor con un ejemplo, cojamos el tramo 3-4 de la simulación del sistema de inyección de agua de formación de NPF, la gráfica de este tramo se presenta a continuación.



Esta línea representa parte de la tubería que transporta el agua de formación desde los tanques de almacenamiento hacia las bombas booster, este tramo tiene un diámetro de tubería de 18 in y existen 8 codos de 90°.

Para poder llevar a cabo el estudio de este tramo es necesario saber las propiedades del fluido (INPUT), estas son ingresadas a las celdas F4 y F6

mediante cajas de diálogo como se verá más adelante, estas celdas representan el peso específico y la viscosidad cinemática del fluido respectivamente.

	A	B	C	D	E	F	G
3			Ingrese las propiedades del fluido:				
4			Peso específico del fluido:				60.1 lbf/ft ³
5			Viscosidad cinemática del fluido:				3.35E-06 ft ² /seg
6							

La hoja de cálculo para el sistema de pérdidas de este tramo se presenta a continuación:

	A	B	E
43	Tramo		3-4
44	PERDIDAS MAYORES		
45	Diámetro de tubería, D	in	18
46	Longitud de tubería, L	m	45.2
47	Material de tubería		Ac. Comercial
48	Rugosidad Relativa de tubería, ϵ/D		0.0001068
49	Rapidez de flujo, w	lb/seg	524.55
50	Area de tubería, A	ft ²	1.767
51	Velocidad, V	ft/seg	4.939
52	Número de Reynolds, Re		2211507.358
53	Factor de fricción, fr		0.012926784
54	Perdidas mayores de Presión	PSI	0.2033006
55	PERDIDAS MENORES		
56	Codo 90° standard de 18"	PSI	1.0738
82	Perdidas menores de Presión	PSI	1.07379
83			
84	PERDIDAS DE PRESIÓN	PSI	1.2771
85	PRESIÓN HIDROSTÁTICA		
86	Diferencial de Altura	m	0.57
87	Presión Hidrostática +	PSI	0.780
88	Presión Hidrostática -	PSI	
89			
90	PRESIÓN DE ENTRADA	PSI	10.232
91	PRESIÓN DE SALIDA	PSI	9.735
92	PRESIÓN DE SUCCIÓN DE LAS BOMBAS	PSI	
93		BOMBA	
94	PRESIÓN DE DESCARGA DE LAS BOMBAS	PSI	
95		BOMBA	

,para el análisis de este tramo , se utilizaron algunas de las funciones de módulo ya enunciadas como son, la función del área de la sección, la función de la velocidad promedio de fluido, la función del número de Reynolds, la

función del factor de fricción, la función de las pérdidas mayores de presión, la función de las pérdidas menores de presión y la función de pérdidas por diferencia de altura o energía potencial.

A partir de los datos del tramo en análisis como el diámetro en pulgadas, la longitud en metros, el material y su rugosidad relativa (extraída de la Tabla 3.2), se comienza a calcular los parámetros de interés, en el caso de la rapidez de flujo para este tramo es la suma del flujo de cada bomba booster que este operando (la forma de cómo se obtuvo este caudal se verá con mayor detenimiento más adelante).

El área se calcula mediante la función del área, a la cuál se le ingresa el diámetro de la tubería, con esta área, la rapidez de flujo del tramo y el peso específico del fluido mediante la función que lleva su nombre se calcula la velocidad promedio del fluido para con ella, el diámetro y la viscosidad cinemática del fluido poder calcular el número de Reynolds mediante su función. El factor de fricción es calculado mediante la función *factor_friccion*, la cual necesita los valores de rugosidad relativa del material de la tubería y el número de Reynolds, todo lo anteriormente calculado para este tramo sirve para determinar las pérdidas mayores de presión que para este tramo es de 0.2033 PSI. Estos cálculos se pueden ver a continuación.

$$D = 18in$$

$$Area \text{ de tubería} = \frac{\pi \left(\frac{18}{12} \right)^2}{4} = 1.767 \text{ ft}^2$$

$$Rapidez \text{ de flujo} = 524.55 \text{ lbf/seg}$$

$$Velocidad = \frac{Rapidez \text{ de flujo}}{Area * \gamma}$$

$$Velocidad = \frac{524.55 \text{ lb/seg}}{1.767 \text{ ft}^2 * 60.1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}$$

$$Velocidad = 4.939 \frac{\text{ft}}{\text{seg}}$$

$$\nu = 3.35E - 6 \frac{\text{ft}^2}{\text{seg}}$$

$$\text{Número de Reynolds} = \frac{\text{Velocidad} * \frac{D}{12}}{\nu}$$

$$\text{Número de Reynolds} = \frac{4.939 \frac{\text{ft}}{\text{seg}} * \frac{18}{12} \text{ft}}{3.35E - 6 \frac{\text{ft}^2}{\text{seg}}} = 2211507.358$$

$$f = 8 * \left[\left(\frac{8}{N_R} \right)^{12} + \frac{1}{(A + B)^{1.5}} \right]^{\frac{1}{12}}$$

donde :

$$A = \left\{ 2.457 * \ln \left[\frac{1}{\left(\frac{7}{N_R} \right)^{0.9} + \left(0.27 \frac{\varepsilon}{D} \right)} \right] \right\}^{16}$$

$$B = \left(\frac{37.53}{N_R} \right)^{16}$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0.0001068$$

$$A = \left\{ 2.457 * \ln \left[\frac{1}{\left(\frac{7}{2211507.358} \right)^{0.9} + (0.27 * 0.0001068)} \right] \right\}^{16} = 2.15E22$$

$$B = \left(\frac{37.53}{2211507.358} \right)^{16} = 4.73E - 77$$

$$f = 8 * \left[\left(\frac{8}{2211507.358} \right)^{12} + \frac{1}{(2.15E22 + 4.73E - 77)^{1.5}} \right]^{\frac{1}{12}} = 0.012926$$

$$h_{L-Mayores} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$h_{L-Mayores} = 0.012926 * \frac{45.2 * 3.28084 \text{ ft}}{\frac{18}{12} \text{ ft}} * \frac{\left(4.939 \frac{\text{ft}}{\text{seg}}\right)^2}{2 * 32 \frac{\text{ft}}{\text{seg}^2}} * \frac{60.1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}{144 \frac{\text{in}^2}{\text{ft}^2}} = 0.2033 \text{ PSI}$$

Los 8 codos que existen en este tramo son accesorios que producen pérdidas, la misma que es calculada mediante la función de pérdidas menores de presión, la cual involucra la cantidad de este tipo de accesorio que en este caso es 8, el factor de pérdidas menores k (que puede ser extraído de la Tabla 3.3) que para un codo de 90° Standard es 0.75 y el peso específico del fluido. Como no hay más accesorios la pérdidas menor de presión es 0.9545 PSI

$$h_{L-menores} = K \cdot \left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

$$h_{L-menores} = 9 * \left(0.75 * \frac{\left(4.939 \frac{\text{ft}}{\text{seg}}\right)^2}{2 * 32 \frac{\text{ft}}{\text{seg}^2}} * \frac{60.1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}{144 \frac{\text{in}^2}{\text{ft}^2}}\right) = 1.07379 \text{ PSI}$$

Pérdidas Menores de Presión = Σ de todas las pérdidas que produce cada accesorio 3.42

$$\text{Pérdidas Menores de Presión} = \sum h_L = 1.07379 \text{ PSI}$$

, las pérdidas de presión son la suma de las pérdidas mayores con las pérdidas menores, lo que nos da 1.07379 PSI.

Pérdidas de Presión = Pérdidas Mayores Presión + Pérdidas Menores Presión 3.43

$$\text{Pérdidas de Presión} = (0.2033 + 1.07379) \text{ PSI} = 1.2771 \text{ PSI}$$

Existe una diferencia de altura de 0.57 m la cual en este caso produce una presión positiva, esta es calculada mediante la función presión hidrostática, la misma que necesita los valores de la diferencia de altura y el peso específico del fluido, esta presión para este tramo nos da 0.780 PSI.

$$z = 0.57m$$

$$PE = w \cdot z$$

$$PE = (0.57 * 3.28084) ft * \frac{60.1 \frac{lb}{ft^3}}{144 in^2} = 0.780 PSI$$

Como se ingresa la presión y el caudal en el cabezal de inyección de cada Well Pad, se realizó el cálculo de atrás hacia delante, es decir de acuerdo a la presión y caudal de cada pozo, se llega hasta a obtener la altura de los tanques de almacenamiento de agua de formación y todos los SALIDAS mencionados, es por ello que a pesar de que el fluido en la realidad se dirige en la dirección 3-4, para el cálculo se tomo la dirección de flujo de 4 a 3.

La presión de salida es 9.735 PSI, que es la presión en el punto 4 del tramo, es decir la presión de entrada en el tramo 4-5, finalmente la presión de entrada es la presión en el punto 3 del tramo y esta es igual a la presión de salida más las pérdidas de presión, más o menos dependiendo el caso la presión hidrostática, en este caso la presión de entrada es igual a 10.232 PSI.

$$\text{Presión de Entrada} = \text{Presión de Salida} + \text{Perdidas de Presión} \pm \text{Presión hidrostática}$$

3.44

$$\text{Presión de Entrada} = (9.735 + 1.2771 - 0.780) PSI = 10.232 PSI$$

Para poder continuar con la explicación de este proyecto es necesario saber como es la estructura simplificada del sistema de inyección de agua de formación tanto en NPF como SPF, estas gráficas se presentan a continuación, las mismas que contienen los componentes del sistema hasta llegar al pozo de inyección.

Figura 3.8: Estructura simplificada del sistema de inyección de agua de formación de NPF

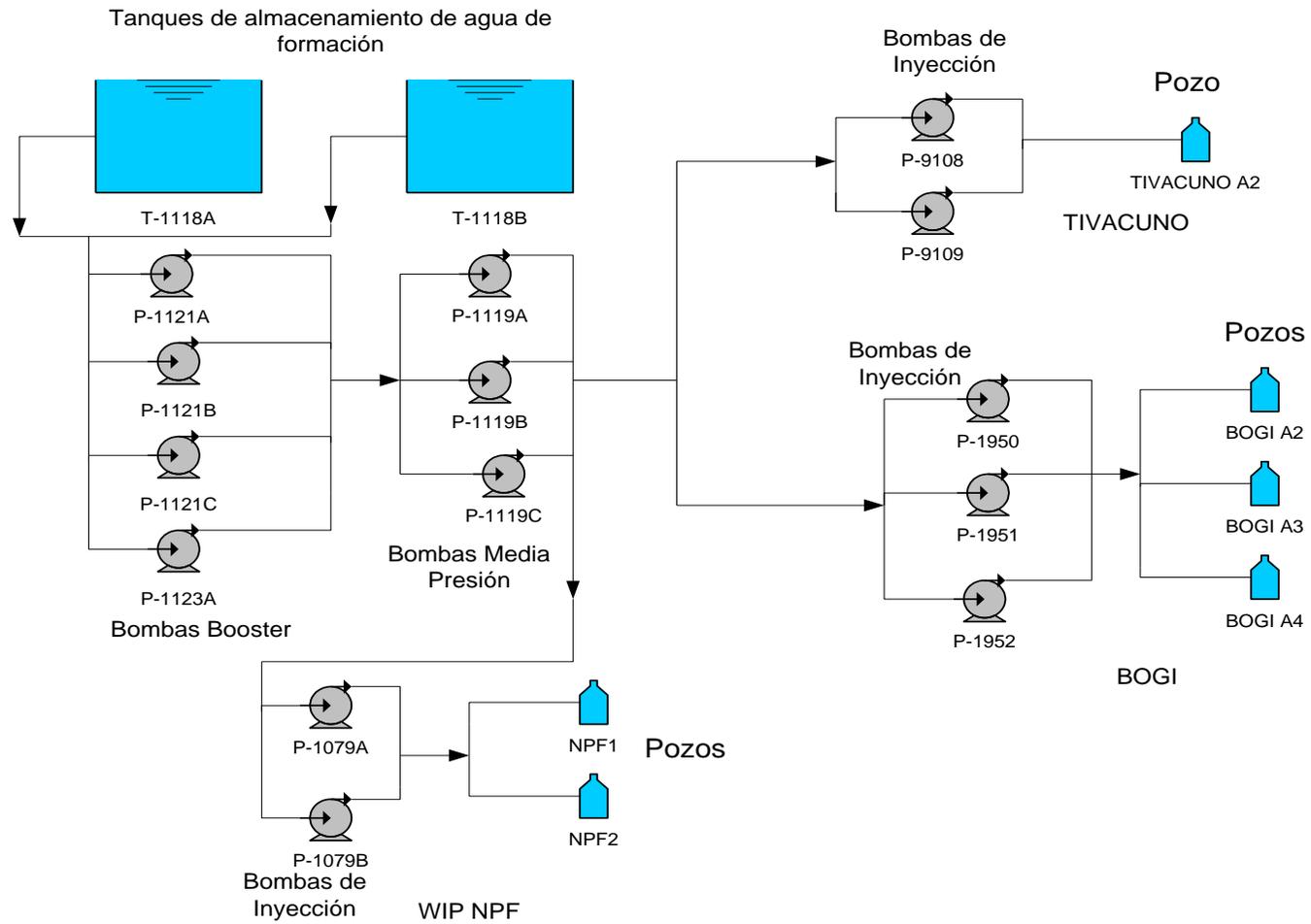


Figura 3.9: Estructura simplificada del sistema de inyección de agua de formación de SPF

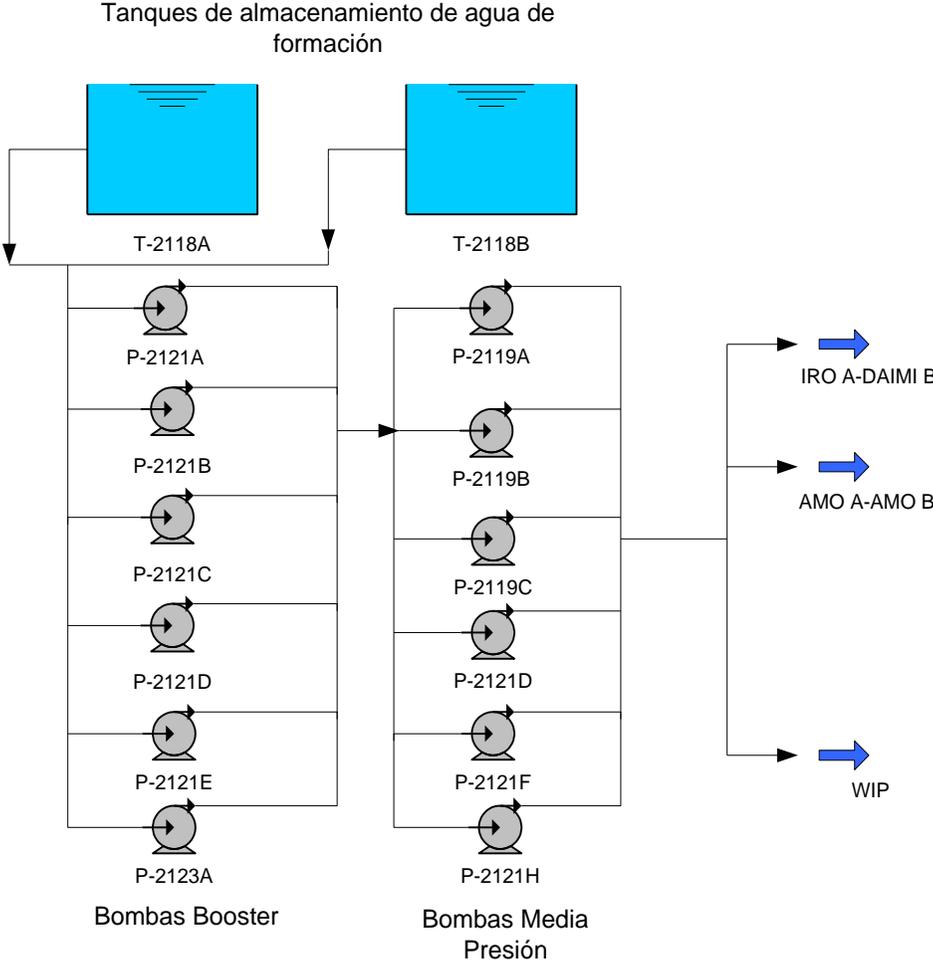


Figura 3.10: Estructura simplificada del sistema de inyección de agua de formación de SPF

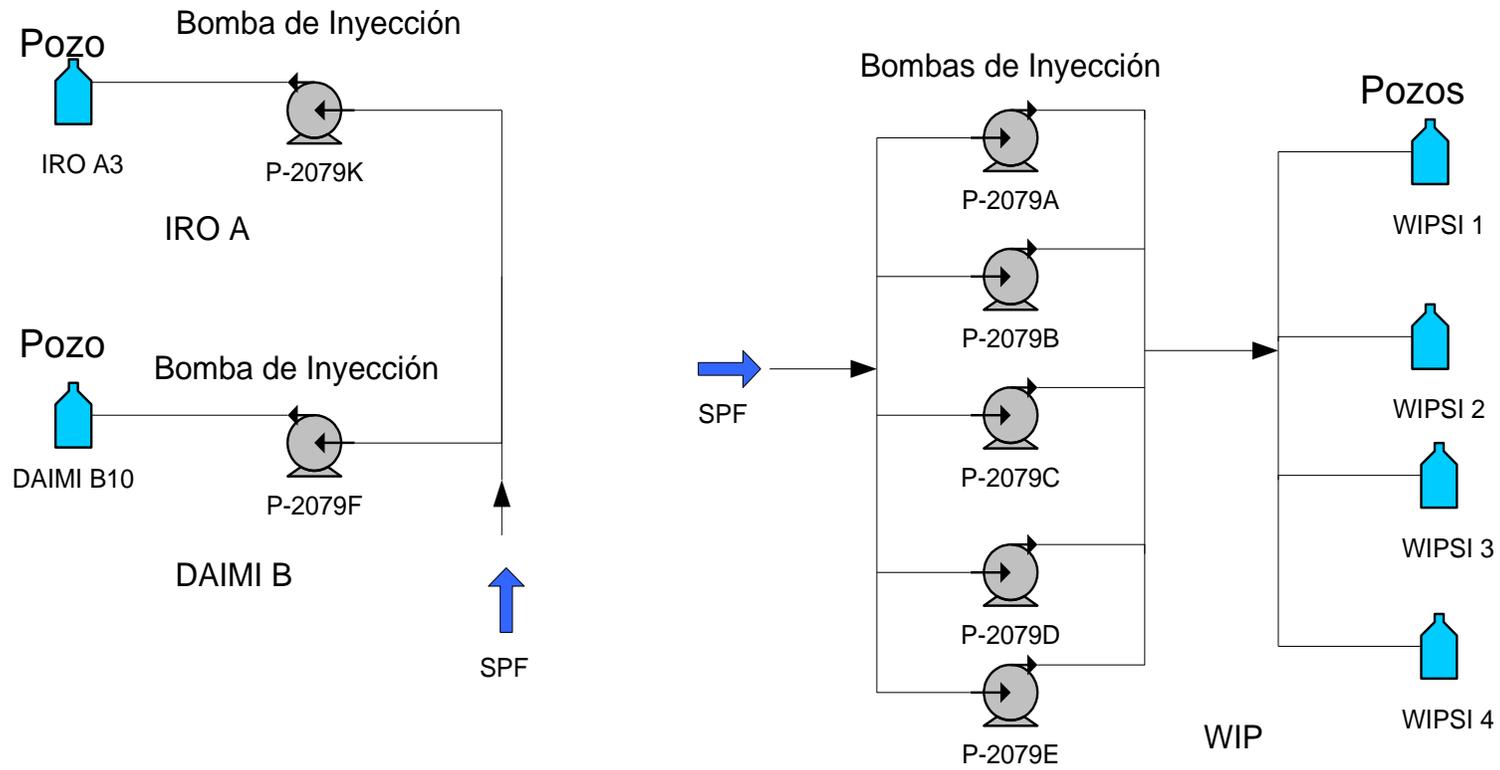
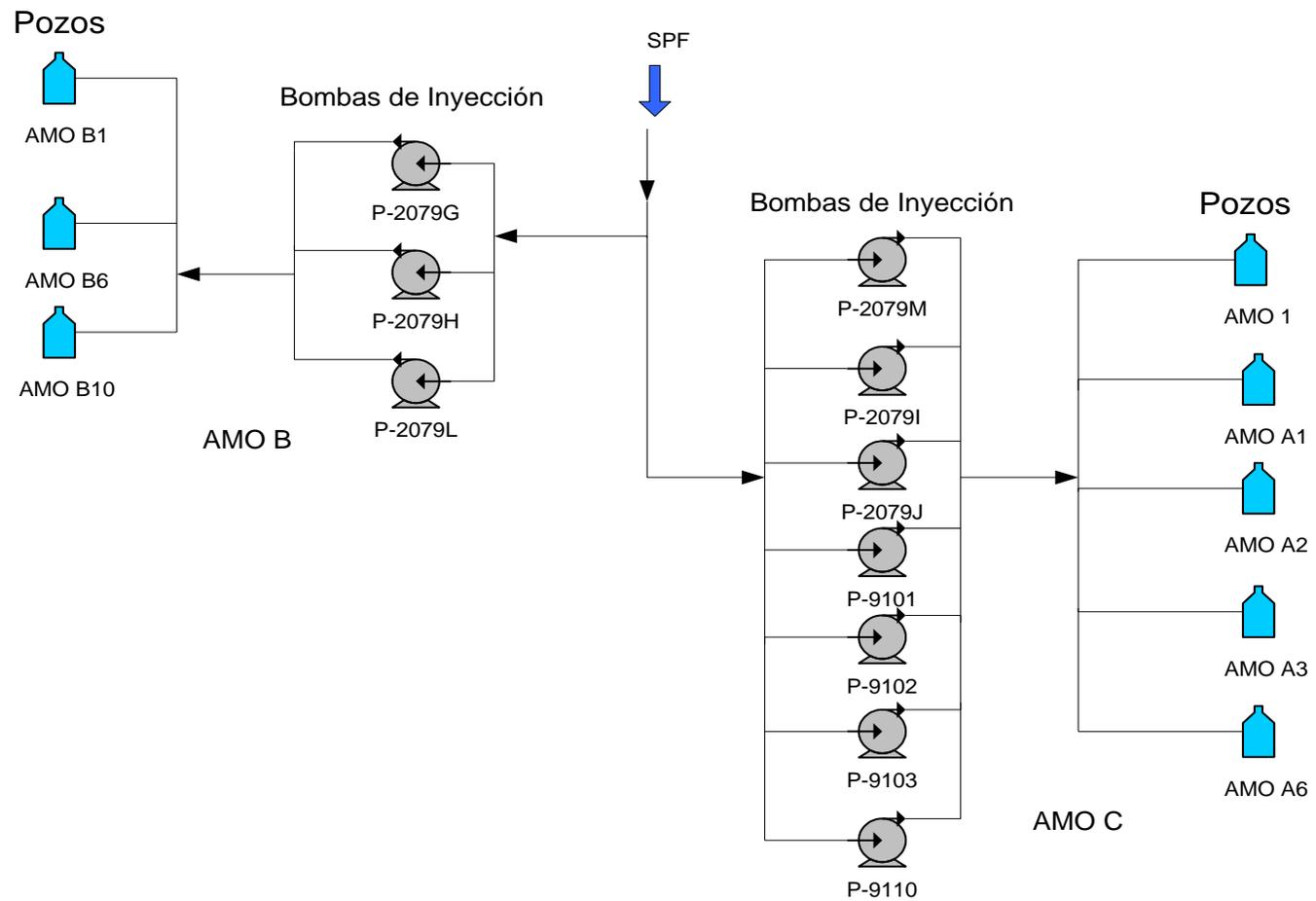


Figura 3.11: Estructura simplificada del sistema de inyección de agua de formación de SPF



Toda la geografía del sistema de inyección de agua se dividió en muchos tramos, y se calculó las pérdidas como se ya se explicó. Además estos cálculos se dividió en 2 hojas de Excel, una para las facilidades de producción (llamada "Simulación", tanto para el archivo de simulación del sistema de inyección de agua para NPF, como para el de SPF) y otra para los Well Pads (llamada "Well Pads", tanto para el archivo de simulación del sistema de inyección de agua para NPF, como para el de SPF).

Todo el sistema de inyección de agua, se calculó de atrás hacia adelante, esto quiere decir desde la presión y caudal en el cabezal del pozo que se ingreso, se llega a obtener primero la presión de descarga, la presión de succión y el caudal a la que trabajan las bombas de inyección de cada Well Pad, luego la presión de descarga, presión de succión y el caudal a la que trabajan las bombas de media presión y finalmente la presión de descarga, la presión de succión y el caudal a la que trabajan las bombas de baja presión. Con la presión de succión de las bombas booster y el peso específico se llegó a obtener la altura de los tanques de almacenamiento de agua, pues si se divide la presión (en PSI) para el peso específico (lbf / ft^3), y se multiplica a la presión por el factor de conversión de pulgadas a pies, se llega a obtener la altura de los tanques en ft de líquido.

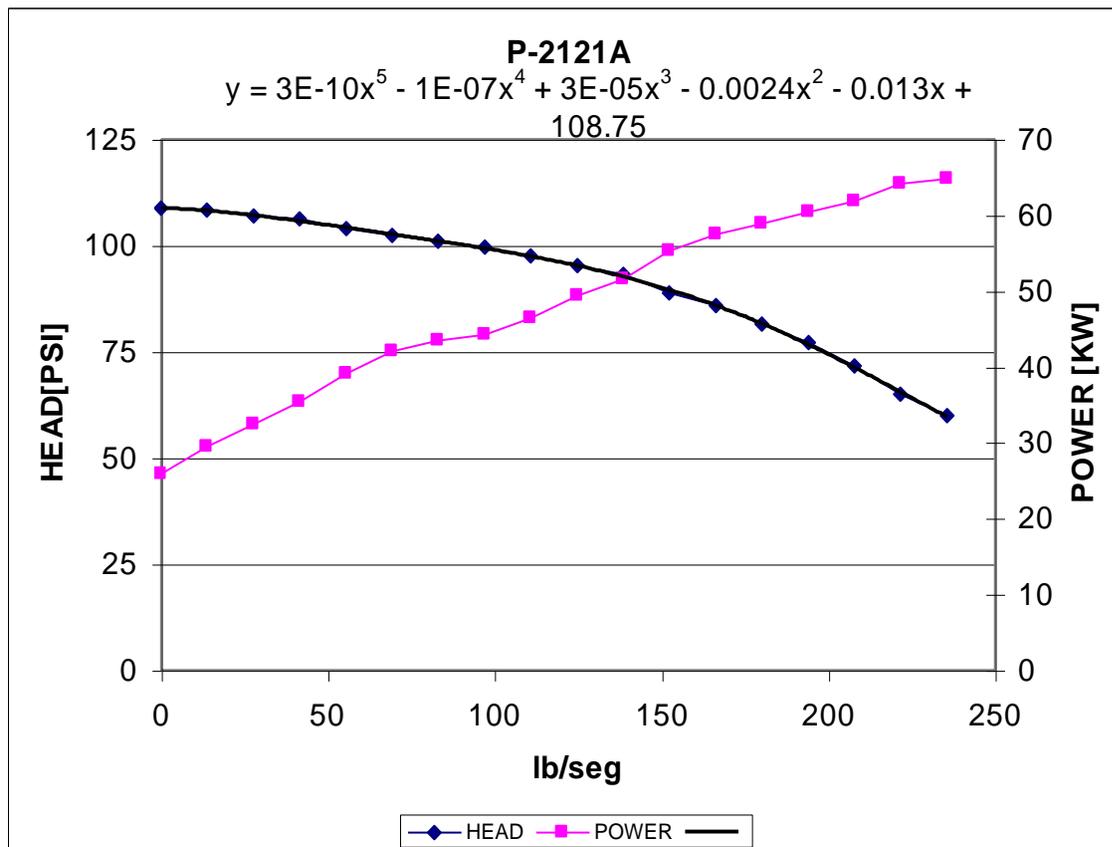
Mediante SOLVER se llegó a determinar el caudal, con la que debería trabajar cada bomba del sistema para que todo el sistema este completamente balanceado, es decir que todas las presiones de las tuberías que coinciden en un punto sean las mismas. La forma de utilización de este SOLVER se verá más adelante.

La presión a la que trabajan las bombas del sistema de inyección para su respectivo caudal calculado, se la obtuvo de la curva de funcionamiento de cada bomba que se adjunta en los anexos. Las funciones de estas curvas de funcionamiento se encuentran en una hoja de Excel llamada "Tablas NPF", para la simulación del sistema de inyección de agua en NPF, y "Tablas SPF", para la simulación del sistema de inyección de agua en SPF. A continuación se

presenta parte de la hoja "Tablas SPF", en la cual consta las funciones de las curvas de funcionamiento de las ³¹bombas P-2121A, P-2121B y P-2121C.

	B	C	D	E	F	G	H
68	Presión vs. Caudal						
69	x^5	x^4	x^3	x^2	x	c	
70	2.57E-10	-1.50E-07	2.74E-05	-0.002359911	-0.01338904	108.7534264	P-2121A
71	-1.31E-12	2.07E-09	-1.18E-06	0.000209695	-0.020566642	92.2844463	P-2121B
72	-6.65E-13	1.09E-09	-6.68E-07	0.000108064	-0.01416071	92.23756849	P-2121 C

Para entender de mejor manera esto de la curva de funcionamiento de una bomba, se presenta a continuación la curva de funcionamiento de la bomba P-2121A.



³¹ Las bombas P-2121A, P-2121B y P-2121C, son 3 de las 6 bombas de baja presión que tiene SPF.

En esta gráfica podemos observar, que la curva en azul relaciona la diferencia de presión de la bomba (en el eje Y), y la rapidez de flujo (en el eje X); con la función $y=f(x)$ se obtiene la diferencia de presión de la bomba (en PSI) ingresando un valor de rapidez de flujo (en lb / seg) en X. En la hoja de Excel “Tablas SPF” pegada anteriormente podemos ver que desde la celda B70 hasta la celda G70, se tiene los coeficientes de la curva de funcionamiento de la bomba P-2121A para una función de quinto orden, comparando los coeficientes de la gráfica de esta bomba con los de la hoja de Excel, vemos que son los mismos, pero los coeficientes que hay en la hoja de Excel tienen mayor número de decimales.

En la misma hoja de Excel llamada “Tablas SPF”, se llega a determinar de acuerdo al caudal calculado, la presión a la que trabaja la bomba, esto se puede constatar a continuación para el caso de la bomba P-2121A.

Q50		=SUMA(S50:X50)							
	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
48				x^5	x^4	x^3	x^2	x	c
49			$y=$	2.57E-10	-1.50E-07	2.74E-05	-2.36E-03	-1.34E-02	1.09E+02
50	Presión [PSI]:	79.73		5.65E+01	-1.77E+02	1.75E+02	-8.12E+01	-2.48E+00	1.09E+02
51	Másico [lb/seg]:	185.47							

Desde la celda S49 hasta las celda X49, se les asigno a cada una de ellas el valor de los coeficientes de la función de la curva de la bomba P-2121A; la celda Q51 tiene el valor de la rapidez de flujo calculado para que trabaje esta bomba; desde la celda S50 hasta la celda X50, se tiene el valor de los coeficientes por la rapidez de flujo elevado al número que le corresponde. Esto se puede ver a continuación.

$$y = 2.57E - 10 * X^5 - 1.5E - 7 * X^4 + 2.74E - 5 * X^3 - 2.36E - 3 * X^2 - 1.34E - 2 * X + 1.09E + 2$$

$$y = 2.57E - 10 * (185.47)^5 - 1.5E - 7 * (185.47)^4 + 2.74E - 5 * (185.47)^3 - 2.36E - 3 * (185.47)^2 - 1.34E - 2 * (185.47) + 1.09E + 2$$

$$y = 79.73$$

Finalmente la celda Q50 tiene el valor de presión a la que trabaja la bomba, de acuerdo a la rapidez de flujo de la celda Q51.

Si observamos los planos (en los anexos) de la geografía de SPF, podemos ver que el tramo 8-9, se divide mediante una te, en otro dos tramos, el tramo 9-10, y el tramo 9-13, a continuación se presenta parte de la hoja "Simulación" del archivo de simulación de SPF, donde se puede constatar lo antes mencionado.

J51		=K51+N51					
	A	B	J	K	L	M	N
45	Tramo		8-9	9-10	10-11	11-12	9-13
46	PERDIDAS MAYORES						
47	Diámetro de tubería, D	in	30	30	18	14	30
48	Longitud de tubería, L	m	1.56	1.69	2.6	4.12	1.69
49	Material de tubería		Ac. Comercial				
50	Rugosidad Relativa de tubería, εD		0.000059	0.000059	0.0001068	0.0001424	0.000059
51	Rapidez de flujo, w	lb/seg	1000.452286	401.12	401.12	401.12	599.33
52	Area de tubería, A	ft²	4.909	4.909	1.767	1.069	4.909
53	Velocidad, V	ft/seg	3.391	1.360	3.777	6.243	2.032
54	Número de Reynolds, Re		2530738.148	1014666.210	1691110.351	2174284.736	1516071.938
55	Factor de fricción, fr		0.011878801	0.012830252	0.013117201	0.013503331	0.012349182
56	Perdidas mayores de Presión	PSI	0.0018238	0.0003430	0.0069389	0.0397683	0.0007371

Lo interesante aquí, es ver que el caudal del tramo 8-9 es la suma de los caudales de los tramos 9-10 y 9-13. El caudal del tramo 9-10 es el que proviene de la bomba P-2121C, mientras el caudal del tramo 9-13 es el que proviene de las bombas P-2121B, Y P-2121A. En este ejemplo también se puede ver que los cálculos como ya se menciono anteriormente se hicieron de atrás hacia delante.

En estos cálculos se utilizó la función SI de Excel para poder asignar el valor de cero a la presión de succión y de descarga de las bombas del sistema de inyección. Por ejemplo el tramo 16-17, representa a la línea de succión de la bomba P-2121A, como podemos ver a continuación, en la celda R89, que representa la presión de succión de la bomba P-2121A, se utilizó la función SI, la cual hace dar el valor de cero a la presión de succión de la bomba, si la rapidez de flujo para este tramo es cero, es decir si la celda R51 es cero; caso contrario la presión de succión es igual a la presión de descarga de la bomba (celda C141) menos la presión calculada para esta bomba de la forma que se vio anteriormente, esto se puede constatar a continuación.

R89 =SI(R51=0,0,C141-Tablas SPF!Q50)

	A	B	R
45	Tramo		16-17
46	PERDIDAS MAYORES		
47	Diámetro de tubería, D	in	10
48	Longitud de tubería, L	m	4.37
49	Material de tubería		Ac. Comercial
50	Rugosidad Relativa de tubería, εD		0.000178
51	Rapidez de flujo, w	lb/seg	185.4729
52	Area de tubería, A	ft^2	0.545
53	Velocidad, V	ft/seg	5.658
54	Número de Reynolds, Re		1407513.133
55	Factor de fricción, fr		0.014253454
56	Perdidas mayores de Presión	PSI	0.0511985
57	PERDIDAS MENORES		

	A	B	R
69	Reducción 14"x12"	PSI	
70	Codo 90° standard de 10"	PSI	0.3132
71	Válvula Mariposa 10"	PSI	0.1042
72	Reducción 10"x8"	PSI	0.0772
73	Te 18" con flujo a través de la rama	PSI	
74	Reducción 24"x20"	PSI	
75	Válvula Mariposa 20"	PSI	
76	Expansión 20"x30"	PSI	
77	Te 10" con flujo a través del tramo	PSI	
78	Codo 90° standard de 30"	PSI	
79			
80	Perdidas menores de Presión	PSI	0.49447
81			
82	PERDIDAS DE PRESIÓN	PSI	0.5457
83	PRESIÓN HIDROSTÁTICA		
84	Diferencial de Altura	m	1.32
85	Presión Hidrostática +	PSI	1.807
86	Presión Hidrostática -	PSI	
87			
88	PRESIÓN DE ENTRADA	PSI	9.528
89	PRESIÓN DE SALIDA	PSI	10.79
90	PRESIÓN DE SUCCIÓN DE LAS BOMBAS	PSI	10.790
91	BOMBA		P-2121A

3.3.3.1.4 Codificación de sistema de ingreso (ENTRADAS)

Después de haber visto como se hicieron los cálculos del sistema de inyección de agua de formación, es necesario saber como se ingresaron sus ENTRADAS.

Al abrir el programa de simulación de inyección de agua de formación en NPF o en SPF, se abre una hoja de inicio (llamada como su nombre lo indica), a continuación podemos observarla.

SIMULACION DEL SISTEMA DE INYECCION DE AGUA DE FORMACION NPF



El botón de comando con texto de control “INICIO I>” y con nombre de control “inicio”, le permite al usuario ir hacia la hoja de Excel llamada “Ingreso Fluidos”, para poder ingresar los valores de las propiedades del fluido de trabajo. Este botón tiene la siguiente tipo de codificación.

Private Sub inicio_Click()

```
Worksheets("Ingreso Fluidos").pespecifico.Text = 60.1  
Worksheets("Ingreso Fluidos").visco.Text = 0.00000335  
Worksheets("Ingreso Fluidos").Activate
```

End Sub

Mediante el método Activate, se puede ir a la siguiente hoja de Excel; pespecifico y visco son los nombre de control de los cuadros de texto donde se ingresan el peso específico y viscosidad del fluido de trabajo. Mediante la propiedad text del objeto se da los valores de 60.1 lbf / ft³ y 0.00000335 ft² / seg de peso específico y viscosidad respectivamente, dichos valores el programa los da por defecto al usuario, para que él tenga en bien trabajar con ellos o no.

1. Ingreso de propiedades del fluido de trabajo

Los primeros valores a ingresar son las ³²propiedades del fluido de trabajo, este ingreso se lo hizo mediante cuadros de texto en una hoja de Excel llamada “Ingreso Fluidos” (tanto para el archivo de simulación del sistema de inyección de agua para NPF, como para el de SPF) y mediante un botón de comando, las mismas que tienen las siguientes propiedades de texto y nombre de control.

Tabla 3.4: Propiedades de cuadros de texto que permite ingreso de propiedades de fluido de trabajo

	Propiedad Name (Nombre de control)
Peso específico	pespecifico
Viscosidad Cinemática	visco

Tabla 3.5: Propiedades de botón de comando que permite ingreso de propiedades de fluido de trabajo

Propiedad Caption (Texto de control)	Propiedad Name (Nombre de control)
INGRESAR	Ingreso_pfluidos

³² Las propiedades del fluido de trabajo que el usuario debe ingresar es peso específico y viscosidad cinemática

La estructura de ingreso de las propiedades del fluido de trabajo, se muestra a continuación.

Ingrese las propiedades del fluido :

Peso Especifico:	<input type="text" value="60.1"/>	lbf / ft ³
Viscosidad Cinemática:	<input type="text" value="0.00000335"/>	ft ² / seg

El tipo de codificación para el ingreso de las propiedades del fluido de trabajo, es la siguiente.

Private Sub ingreso_pfluidos_Click()

```
If (Len(pespecifico.Value) = 0) Or (pespecifico.Value <= 0) Or (Len(visco.Value) = 0) Or (visco.Value <= 0) Then
```

```
MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente las propiedades del fluido")
```

```
Else
```

```
Worksheets("Simulacion").Range("F4").Value = pespecifico.Value
```

```
Worksheets("Simulacion").Range("F6").Value = visco.Value
```

```
Worksheets("Ingreso Daimi B").daimi_presion.Text = 2720
```

```
Worksheets("Ingreso Daimi B").daimi_caudal.Text = 40030
```

```
Worksheets("Ingreso Daimi B").onp2079F.Value = True
```

```
Worksheets("Ingreso Daimi B").ondaimib10.Value = True
```

```
Worksheets("Ingreso Daimi B").Activate
```

```
End If
```

```
End Sub
```

Lo primero que se hace es validar los valores de las propiedades de los fluidos (esto se verá mas adelante), es decir si el peso específico o viscosidad cinemática, es menor o igual a cero, o el cuadro de texto esta vacío, se advierte al usuario mediante un mensaje que dice "ERROR. Ingrese correctamente las propiedades del fluido", caso contrario si se ingreso correctamente estos valores, se envía estos hacia las celdas que corresponde, en esta función del botón de comando del archivo de simulación de agua de SPF llamada "ingreso_pfluidos", el ingreso del peso específico y la viscosidad cinemática se lo hace mediante cuadros de texto, con nombres de control llamados pespecifico y visco, respectivamente, al codificar lo siguiente, `Worksheets("Simulacion").Range("F4").Value = pespecifico.Value`, significa que la celda F4 de la hoja llamada "Simulacion", contendrá el valor que el usuario ingrese en el cuadro de texto con nombre de control pespecifico, y que como sabemos representa el peso específico del fluido. A continuación podemos ver las celdas F4 y F6 de la hoja de Excel llamada "Simulacion" del los archivo de NPF y SPF contienen los valores de las propiedades del fluido como se codificó en la función ingreso_pfluidos.

	C	D	E	F	G
3	Ingrese las propiedades del fluido:				
4	Peso específico del fluido:			60.1	lbf/ft ³
5					
6	Viscosidad cinemática del fluido:			3.35E-06	ft ² /seg

Estos programas como se mencionó anteriormente dan valores por defecto, en este caso después de haber ingresado las propiedades del fluido de trabajo, se ingresa los valores de presión (en PSI) y caudal (BPD) en el cabezal de inyección del pozo Daimi B10 del Well Pad Daimi B, es por ello que se le da el valor de 2720 PSI al cuadro de texto con nombre de control llamada "daimi_presion" y 40030 BPD al cuadro de texto con nombre de control llamada "daimi-caudal".

El estado de una bomba ENCENDIDA O APAGADA, o el estado de un pozo ABIERTO O CERRADO , se la hizo mediante una casilla de verificación, que al

estar activada, representa al estado ENCENDIDA O ABIERTO y al estar desactivada, representa al estado APAGADA O CERRADO. El usuario puede disponer y decidir en que estado quiere que estén las bombas booster, media presión y alta presión. En este caso se les da el estado de ENCENDIDA y ABIERTA a la bomba P-2079F y al pozo Daimi B10, respectivamente, que corresponde al estado por defecto que da el programa al usuario. Para dejar en el estado de ENCENDIDA y ABIERTA, a dicha bomba y pozo, se utilizó la propiedad True del objeto que representan la casilla de verificación, por ejemplo al codificar,

```
Worksheets("Ingreso Daimi B").onp2079F.Value = True
```

significa que el valor del objeto onp2079F, que representa al estado de la bomba de alta presión P-2079F del sistema de inyección de agua en SPF, y se encuentra en la hoja de Excel llamada "Ingreso Daimi B", es igual a True, lo que hace que esa casilla se active. Finalmente mediante el método Activate, se da paso a la siguiente hoja de ingreso, que en este caso corresponde a la hoja de Excel llamada "Ingreso Daimi B".

El botón de comando, tanto para el archivo de NPF como para el de SPF, tienen como evento a Click, es decir que al cliclar sobre este botón, se ejecuta la codificación que hay en ellos.

2. Ingreso de ENTRADAS en cada Well Pad

Luego de haber ingresado las propiedades del fluido de trabajo, se ingresa la presión y el caudal en el cabezal inyector de agua de formación, y el estado de las bombas de inyección y de los pozos de cada uno de los Well Pad. Este ingreso al igual que las propiedades del fluido de trabajo, se lo hace en una hoja de Excel para cada Well Pad; para el caso del archivo de simulación de NPF, este ingreso se lo hizo en las hojas de Excel llamadas "Ingreso Tivacuno", "Ingreso Bogi", e "Ingreso Wip"; y para el caso del archivo de simulación de SPF, se lo hizo en las hojas de Excel "Ingreso Daimi B", "Ingreso Iro A", "Ingreso Wip", "Ingreso Amo B", e "Ingreso Amo A".

La forma de ingreso es la misma para cada Well Pad, lo único que cambia es el número de bombas de inyección y de pozos.

Al igual que en el ingreso de las propiedades del fluido de trabajo, se utilizó cuadros de texto para el ingreso de la presión y del caudal de los cabezales de inyección de los pozos y además se utilizó casillas de verificación para el estado de dichas bombas y pozos. Existen 3 botones de comando en cada una de las hojas de Excel, el primer botón sirve para el ingreso de la presión y caudal del cabezal inyector, estado de las bombas de inyección y de los pozos, el segundo sirve para continuar a la siguiente hoja de Excel, y el tercer botón sirve para regresar a la hoja de Excel anterior, por si el usuario desea cambiar dichos valores. Las propiedades de texto y nombre de control, de los controles de ingreso de ENTRADAS de todos los Well Pads para el archivo de NPF, son los siguientes.

Tabla 3.6: Propiedad Name de cuadros de texto que representan el ingreso de la presión y caudal en los cabezales inyectoros de los pozos en NPF

Descripción del Pozo	Propiedad Name (Nombre de control)	Well Pad
Presión del Tivacuno A2	tivacuno_presion	Tivacuno
Caudal del Tivacuno A2	tivacuno_caudal	Tivacuno
Presión del Bogi A2	bogiA2_presion	Bogi
Caudal del Bogi A2	bogiA2_caudal	Bogi
Presión del Bogi A3	bogiA3_presion	Bogi
Caudal del Bogi A3	bogiA3_caudal	Bogi
Presión del Bogi A4	bogiA4_presion	Bogi
Caudal del Bogi A4	bogiA4_caudal	Bogi
Presión del NPF1	npf1_presion	NPF-Wip
Caudal del NPF1	npf1_caudal	NPF-Wip
Presión del NPF2	npf2_presion	NPF-Wip
Caudal del NPF2	npf2_caudal	NPF-Wip

Tabla 3.7: Propiedades del botón de comando que permite el ingreso de la presión y caudal en los cabezales inyectoros de los pozos en NPF

Propiedad Caption (Texto de control)	Propiedad Name (Nombre de control)	Well Pad
INGRESAR	Ingreso_tivacuno	Tivacuno
INGRESAR	Ingreso_bogi	Bogi
INGRESAR	Ingreso_wip	NPF-Wip

Tabla 3.8: Propiedades de botón de comando que permite continuar a la siguiente hoja de ingreso de ENTRADAS en el archivo de simulación de NPF

Propiedad Caption (Texto de control)	Propiedad Name (Nombre de control)	Well Pad
SIGUIENTE I>	siguiente_tivacuno	Tivacuno
SIGUIENTE I>	siguiente_bogi	Bogi
SIGUIENTE I>	siguiente_wip	NPF-Wip

Tabla 3.9: Propiedades de botón de comando que permite regresar a la hoja anterior en el archivo de simulación de NPF

Propiedad Caption (Texto de control)	Propiedad Name (Nombre de control)	Well Pad
<I REGRESO	regreso_tivacuno	Tivacuno
<I REGRESO	regreso_bogi	Bogi
<I REGRESO	regreso_wip	NPF-Wip

Las propiedades de las casillas de verificación, que representan el estado de las bombas y pozos de inyección para el archivo de NPF, se muestran a continuación.

Tabla 3.10: Propiedad Name de casillas de verificación que representan el estado de las bombas y pozos de inyección en NPF

Pozos	Propiedad Name (Nombre de control)	Well Pad
Tivacuno A2	ontivacunoA2	Tivacuno
Bogi A2	onbogiA2	Bogi
Bogi A3	onbogiA3	Bogi
Bogi A4	onbogiA4	Bogi
NPF1	onnpf1	NPF-Wip
NPF2	onnpf1	NPF-Wip
Bombas	Propiedad Name (Nombre de control)	Well Pad
P-9108	onp9108	Tivacuno
P-9109	onp9109	Tivacuno
P-1950	onp1950	Bogi
P-1951	onp1951	Bogi
P-1952	onp1952	Bogi
P-1079A	onp1079A	NPF-Wip
P-1079B	onp1079B	NPF-Wip

Las propiedades de texto y nombre de control, de los controles de ingreso de ENTRADAS de todos los Well Pads para el archivo de SPF, son los siguientes.

Tabla 3.11: Propiedad Name de cuadros de texto que representan el ingreso de la presión y caudal en los cabezales inyectoros de SPF

Descripción del Pozo	Propiedad Name (Nombre de control)	Well Pad
Presión del Daimi B10	daimi_presion	Daimi B
Caudal del Daimi B10	daimi_caudal	Daimi B
Presión del Iro A3	iro_presion	Iro A
Caudal del Iro A3	iro_caudal	Iro A
Presión del Wip 1	wip1_presion	Wip
Caudal del Wip 1	wip1_caudal	Wip
Presión del Wip 2	wip2_presion	Wip
Caudal del Wip 2	wip2_caudal	Wip
Presión del Wip 3	wip3_presion	Wip
Caudal del Wip 3	wip3_caudal	Wip
Presión del Wip 4	wip4_presion	Wip
Caudal del Wip 4	wip4_caudal	Wip
Presión del Amo B1	amob1_presion	Amo B
Caudal del Amo B1	amob1_caudal	Amo B
Presión del Amo B6	amob6_presion	Amo B
Caudal del Amo B6	amob6_caudal	Amo B
Presión del Amo B10	amob10_presion	Amo B
Caudal del Amo B10	amob10_caudal	Amo B
Presión del Amo 1	amo1_presion	Amo A
Caudal del Amo 1	amo1_caudal	Amo A
Presión del Amo A1	amoa1_presion	Amo A
Caudal del Amo A1	amoa1_caudal	Amo A
Presión del Amo A2	amoa2_presion	Amo A
Caudal del Amo A2	amoa2_caudal	Amo A
Presión del Amo A3	amoa3_presion	Amo A
Caudal del Amo A3	amoa3_caudal	Amo A
Presión del Amo A6	amoa6_presion	Amo A
Caudal del Amo A6	amoa6_caudal	Amo A

Tabla 3.12: Propiedades del botón de comando que permite el ingreso de la presión y caudal en los cabezales inyectoros de los pozos en SPF

Propiedad Caption (Texto de control)	Propiedad Name (Nombre de control)	Well Pad
INGRESAR	ingreso_daimi	Daimi B
INGRESAR	ingreso_iro	Iro A
INGRESAR	ingreso_wip	Wip
INGRESAR	ingreso_amob	Amo B
INGRESAR	ingreso_amo	Amo A

Tabla 3.13: Propiedades de botón de comando que permite continuar a la siguiente hoja de ingreso de ENTRADAS en el archivo de simulación de SPF

Propiedad Caption (Texto de control)	Propiedad Name (Nombre de control)	Well Pad
SIGUIENTE I>	siguiente_daimi	Daimi B
SIGUIENTE I>	siguiente_iro	Iro A
SIGUIENTE I>	siguiente_wip	Wip
SIGUIENTE I>	siguiente_amob	Amo B
SIGUIENTE I>	siguiente_amo	Amo A

Tabla 3.14: Propiedades de botón de comando que permite regresar a la hoja anterior en el archivo de simulación de SPF

Propiedad Caption (Texto de control)	Propiedad Name (Nombre de control)	Well Pad
<I REGRESO	regreso_daimi	Daimi B
<I REGRESO	regreso_iro	Iro A
<I REGRESO	regreso_wip	Wip
<I REGRESO	regreso_amob	Amo B
<I REGRESO	regreso_amo	Amo A

Las propiedades de las casillas de verificación, que representan el estado de las bombas y pozos de inyección para el archivo de SPF, se muestran a continuación.

Tabla 3.15: Propiedad Name de casillas de verificación que representan el estado de las bombas y pozos de inyección en SPF

Pozos	Propiedad Name (Nombre de control)	Well Pad
Daimi B10	ondaimib10	Daimi B
Iro A3	oniroA3	Iro A
Wip 1	onwip1	Wip
Wip 2	onwip2	Wip
Wip 3	onwip3	Wip
Wip 4	onwip4	Wip
Amo B1	onamob1	Amo B
Amo B6	onamob6	Amo B
Amo B10	onamob10	Amo B
Amo 1	onamo1	Amo A
Amo A1	onamoa1	Amo A
Amo A2	onamoa2	Amo A
Amo A3	onamoa3	Amo A
Amo A6	onamoa6	Amo A
Bombas	Propiedad Name (Nombre de control)	Well Pad
P-2079F	onp2079F	Daimi B
P-2079K	onp2079K	Iro A
P-2079A	onp2079A	Wip
P-2079B	onp2079B	Wip
P-2079C	onp2079C	Wip
P-2079D	onp2079D	Wip
P-2079E	onp2079E	Wip

Tabla 3.16: Propiedad Name de casillas de verificación que representan el estado de las bombas de inyección en SPF

Bombas	Propiedad Name (Nombre de control)	Well Pad
P-2079G	onp2079G	Amo B
P-2079H	onp2079H	Amo B
P-2079L	onp2079L	Amo B
P-9101	onp9101	Amo A
P-9102	onp9102	Amo A

Tabla 3.17: Propiedad Name de casillas de verificación que representan el estado de las bombas de inyección en SPF

Bombas	Propiedad Name (Nombre de control)	Well Pad
P-9103	onp9103	Amo A
P-9110	onp9110	Amo A
P-2079J	onp2079J	Amo A
P-2079I	onp2079I	Amo A
P-2079M	onp2079M	Amo A

La estructura de ingreso de la presión y caudal en el cabezal de los pozos de inyección en los Well Pads, se da a conocer a continuación para el caso del Well Pad de SPF Amo B.

Bombas de Inyección

AMO B

Ingrese la presión y el caudal en el cabezal de inyección de los pozos :

	Presión	PSI	Caudal	Unidad	ABIERTO O CERRADO
AMO B1:	2600	PSI	31233	BFD	<input checked="" type="checkbox"/>
AMO B6:	2600	PSI	28122	BFD	<input checked="" type="checkbox"/>
AMO B10:	2600	PSI	40645	BFD	<input checked="" type="checkbox"/>

BOMBAS:

	ENCENDER O APAGAR
P-2079 G:	<input checked="" type="checkbox"/>
P-2079 H:	<input checked="" type="checkbox"/>
P-2079 L:	<input checked="" type="checkbox"/>

El tipo de codificación para los botones de comando con nombre de control **INGRESAR**, es la que se muestra a continuación, la misma que es la codificación del botón para el Well Pad de Amo B.

Private Sub ingreso_amob_Click()

Dim QamobGH As Double, QamobL As Double, Qtotal As Double
 Dim ptotal As Double

QamobGH = Worksheets("Tablas SPF").Range("P173").Value
 QamobL = Worksheets("Tablas SPF").Range("P181").Value

Worksheets("Tablas SPF").Range("Q173").Value = amob1_caudal.Value
 Worksheets("Tablas SPF").Range("Q174").Value = amob6_caudal.Value
 Worksheets("Tablas SPF").Range("Q175").Value = amob10_caudal.Value

If onp2079G = True And onp2079H = True And onp2079L = True **Then**
 Qtotal = 2 * QamobGH + QamobL
 ptotal = Worksheets("Tablas SPF").Range("Z172").Value
End If

If onp2079G = True And onp2079H = True And onp2079L = False **Then**

Qtotal = 2 * QamobGH

ptotal = Worksheets("Tablas SPF").Range("Z169").Value

End If

If (onp2079G = True And onp2079H = False And onp2079L = True) Or
(onp2079G = False And onp2079H = True And onp2079L = True) **Then**

Qtotal = QamobGH + QamobL

ptotal = Worksheets("Tablas SPF").Range("Z169").Value

End If

If (onp2079G = True And onp2079H = False And onp2079L = False) Or
(onp2079G = False And onp2079H = True And onp2079L = False) **Then**

Qtotal = QamobGH

ptotal = Worksheets("Tablas SPF").Range("Z166").Value

End If

If onp2079G = False And onp2079H = False And onp2079L = True **Then**

Qtotal = QamobL

ptotal = Worksheets("Tablas SPF").Range("Z166").Value

End If

If onp2079G.Value = False And onp2079H.Value = False And onp2079L.Value
= False **Then**

If onamob1.Value = True Or onamob6.Value = True Or onamob10.Value =
True **Then**

MsgBox (" ERROR. Los pozos de AMO B están abiertos y todas sus bombas
de inyección están apagadas ")

Worksheets("Well Pads").Range("I727").Value = 0

Else

Worksheets("Well Pads").Range("I727").Value = 1

End If

Else

Worksheets("Well Pads").Range("I727").Value = 1

End If

If onp2079G.Value = True Or onp2079H.Value = True Or onp2079L.Value = True **Then**

If onamob1.Value = False And onamob6.Value = False And onamob10.Value = False **Then**

MsgBox (" ERROR. Existen bombas de inyección en AMO B que están encendidas y todos los pozos cerrados")

Worksheets("Well Pads").Range("I728").Value = 0

Else

Worksheets("Well Pads").Range("I728").Value = 1

End If

Else

Worksheets("Well Pads").Range("I728").Value = 1

End If

If Worksheets("Tablas SPF").Range("Q176").Value > Qtotal **Then**

MsgBox ("ERROR. No existe la capacidad de inyectar el caudal requerido")

Else

If onamob1.Value = True **Then**

If ((Len(amob1_presion.Value) = 0) Or amob1_presion.Value < (ptotal + 200) Or amob1_presion.Value > (ptotal + 1000)) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente la presión del AMO B1 ")

Worksheets("Well Pads").Range("I729").Value = 0

Else

Worksheets("Well Pads").Range("K344").Value = amob1_presion.Value

Worksheets("Well Pads").Range("I729").Value = 1

End If

If ((Len(amob1_caudal.Value) = 0) Or amob1_caudal < 5) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente el caudal del AMO B1 ")

Worksheets("Well Pads").Range("I730").Value = 0

Else

Worksheets("Well Pads").Range("M344").Value = amob1_caudal.Value

Worksheets("Well Pads").Range("I730").Value = 1

End If

End If

If onamob1.Value = False **Then**

Worksheets("Well Pads").Range("I729").Value = 1

Worksheets("Well Pads").Range("I730").Value = 1

End If

If onamob6.Value = True **Then**

If ((Len(amob6_presion.Value) = 0) Or amob6_presion.Value < (ptotal + 200)
Or amob6_presion.Value > (ptotal + 1000)) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente la presión del AMO B6 ")

Worksheets("Well Pads").Range("I731").Value = 0

Else

Worksheets("Well Pads").Range("K345").Value = amob6_presion.Value

Worksheets("Well Pads").Range("I731").Value = 1

End If

If ((Len(amob6_caudal.Value) = 0) Or amob6_caudal < 5) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente el caudal del AMO B6 ")

Worksheets("Well Pads").Range("I732").Value = 0

Else

Worksheets("Well Pads").Range("M345").Value = amob6_caudal.Value

Worksheets("Well Pads").Range("I732").Value = 1

End If

End If

If onamob6.Value = False **Then**

Worksheets("Well Pads").Range("I731").Value = 1

Worksheets("Well Pads").Range("I732").Value = 1

End If

If onamob10.Value = True **Then**

If ((Len(amob10_presion.Value) = 0) Or amob10_presion.Value < (ptotal + 200)

Or amob10_presion.Value > (ptotal + 1000)) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente la presión del AMO B10 ")

Worksheets("Well Pads").Range("I733").Value = 0

Else

Worksheets("Well Pads").Range("K346").Value = amob10_presion.Value

Worksheets("Well Pads").Range("I733").Value = 1

End If

If ((Len(amob10_caudal.Value) = 0) Or amob10_caudal < 5) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente el caudal del AMO B10 ")

Worksheets("Well Pads").Range("I734").Value = 0

Else

Worksheets("Well Pads").Range("M346").Value = amob10_caudal.Value

Worksheets("Well Pads").Range("I734").Value = 1

End If

End If

If onamob10.Value = False **Then**

Worksheets("Well Pads").Range("I733").Value = 1

Worksheets("Well Pads").Range("I734").Value = 1

End If

End If

If onamob1.Value = False And (amob1_presion.Value = True Or amob1_caudal.Value = True) **Then**

MsgBox ("ERROR. Esta ingresando un valor en el pozo AMO B1 que esta cerrado ")

Worksheets("Well Pads").Range("I735").Value = 0

Else

Worksheets("Well Pads").Range("I735").Value = 1

End If

If onamob6.Value = False And (amob6_presion.Value = True Or amob6_caudal.Value = True) **Then**

MsgBox ("ERROR. Esta ingresando un valor en el pozo AMO B6 que esta cerrado")

Worksheets("Well Pads").Range("I736").Value = 0

Else

Worksheets("Well Pads").Range("I736").Value = 1

End If

If onamob10.Value = False And (amob10_presion.Value = True Or amob10_caudal.Value = True) **Then**

MsgBox ("ERROR. Esta ingresando un valor en el pozo AMO B10 que esta cerrado ")

Worksheets("Well Pads").Range("I737").Value = 0

Else

Worksheets("Well Pads").Range("I737").Value = 1

End If

End Sub

La estructura de codificación es la misma para cada ingreso de Well Pad, la cual compone de 6 partes, de las cuales 3 forman parte de la validación que se verá más adelante.

La primera es la de determinar el caudal total máximo a la que pueden trabajar todas las bombas de inyección que se desea que estén operando en el Well Pad que se está ingresando. Por ejemplo en esta codificación lo primero que se hace es la de crear dos variables de tipo Double llamadas QamobGH y QamobL, las mismas que representan el caudal máximo en barriles por día de las bombas de inyección de Amo B. QamobL representa la rapidez de flujo máximo de la bomba P-2079L, y QamobGH representa la rapidez de flujo máximo que tiene cada una de las bombas P-2079G y P-2079H.

Dim QamobGH As Double, QamobL

QamobGH = Worksheets("Tablas SPF").Range("P173").Value

QamobL = Worksheets("Tablas SPF").Range("P181").Value

Las bombas de inyección de Amo B son las P-2079G, P-2079H y P-2079L (ver Tabla 2.5), en las graficas características de las bombas que se encuentran en los anexos, podemos constatar que las bombas P-2079G y P-2079H tienen las mismas características de trabajo, las cuales trabajan con una rapidez de flujo de 263.35 lb / seg cada una. La P-2079H trabaja con una rapidez de flujo máximo de 235.63 lb / seg.

Lo que se necesita es el caudal máximo de cada una de las bombas en barriles por día, es por ello que se hizo la conversión de lb / seg a BPD, de la siguiente manera.

$$\frac{lb}{seg} * \left(\frac{1}{\text{valor de peso específico} \frac{lb}{ft^3} * \frac{ft^3}{0.178BBLs} * \frac{1h}{3600seg} * \frac{1día}{24h}} \right)$$

$$= \frac{\frac{lb}{seg}}{(\text{valor de peso específico} * 6.499E - 5)} \Rightarrow BPD \quad \mathbf{3.45}$$

En la codificación podemos observar que las variables QamobGH y QamobL toman el valor de las celdas P173 y P181 de la hoja de Excel llamada "Tablas SPF", respectivamente, estas celdas contienen el valor del caudal en barriles por día máximo a la que pueden trabajar las bombas de inyección de Amo B, a continuación podemos ver las celdas mencionadas.

P173		= =263.35/(Simulacion!\$F\$4*0.00006499)	
	N	O	Q
167	P-2079G	Presión de descarga [PSI] :	1663.50
168		Flujo Másico [lb/seg] :	121.18
169			
170	P-2079H	Presión de descarga [PSI] :	1664.26
171		Flujo Másico [lb/seg] :	120.70
172			
173		67423.66	31233
174			28122
175			40645
176		195174.02	100000.00
177			
178	P-2079L	Presión de descarga [PSI] :	1666.89
179		Flujo Másico [lb/seg] :	148.71
180			
181		60326.70	

Aquí podemos observar que la celda P173 contiene el valor de 67423.66 (en BPD), la cual se obtuvo con la Ecuación 3.45, lo mismo que se puede constatar en la barra de fórmulas, donde la celda F4 de la hoja "Simulación" representa el peso específico y donde 263.35 es la rapidez de flujo máximo de cada una de las bombas P-2079G y P-2079H en lb / seg. La celda P181 contiene el valor de 60326.70 (en BPD).

A continuación en la codificación se procedió a que las celdas Q173, Q174 y Q175 de la hoja de Excel "Tablas SPF" adquieran los valores de caudal (en BPD) de los pozos Amo B1, Amo B6 y Amo B10 inmediatamente al haber sido ingresado en la hoja de Excel correspondiente al Well Pad, que en este caso es "Ingreso Amo B", esto se puede constatar a continuación.

```
Worksheets("Tablas SPF").Range("Q173").Value = amob1_caudal.Value  
Worksheets("Tablas SPF").Range("Q174").Value = amob6_caudal.Value  
Worksheets("Tablas SPF").Range("Q175").Value = amob10_caudal.Value
```

En el pedazo de la hoja "Tablas SPF" pegada en el documento anteriormente podemos observar que las celdas Q173, Q174 y Q175 contiene valores, que corresponden a lo que el usuario ingreso. La celda Q176 es la sumatoria de los valores de las celdas Q173, Q174 y Q175, es decir esta celda contiene el valor del caudal total (en BPD) ingresado en los pozos de AmoB.

Ahora bien, tenemos cual es el caudal en barriles por día máximo a la que pueden trabajar cada una de las bombas de inyección de Amo B, pero debemos tener el caudal de todas las bombas que el usuario decidió que operen, que puede ser una, dos o las tres operando al mismo tiempo. Para lo cual se codificó de la siguiente manera.

```
Dim Qtotal As Double, ptotal As Double
```

```
If onp2079G = True And onp2079H = True And onp2079L = True Then
```

```
Qtotal = 2 * QamobGH + QamobL
```

```
ptotal = Worksheets("Tablas SPF").Range("Z172").Value
```

```
End If
```

```
If (onp2079G = True And onp2079H = False And onp2079L = True) Or  
(onp2079G = False And onp2079H = True And onp2079L = True) Then
```

```
Qtotal = QamobGH + QamobL
```

```
ptotal = Worksheets("Tablas SPF").Range("Z169").Value
```

```
End If
```

Por ejemplo en esta parte de la codificación, se tomó dos casos; para cuando estén operando las tres bombas de inyección, la P-2079G, P-2079H y P-2079L; y para cuando estén operando dos bombas de inyección, la P-2079G y P-2079L, o la P-2079H y P-2079L.

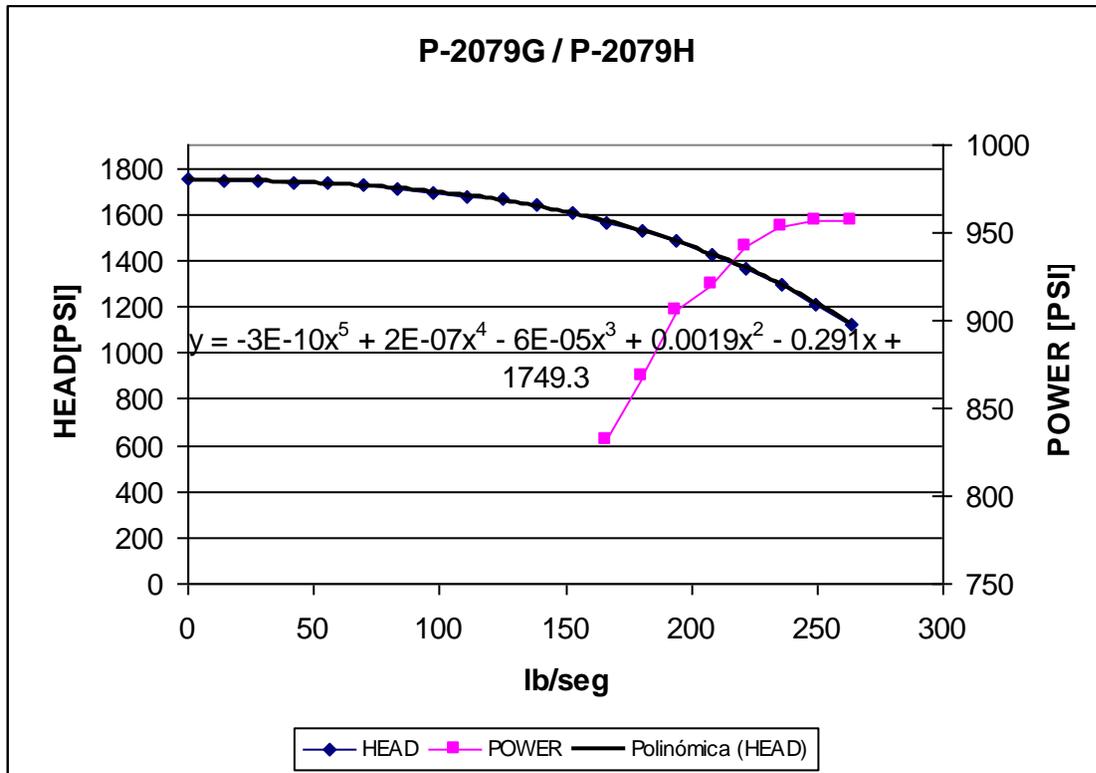
En el primer caso podemos ver que tiene la siguiente estructura: si las casillas de verificación de las tres bombas de inyección, representadas por onp2079G, onp2079H, y onp2079L, están activadas, es decir son igual a True; entonces, la variable de tipo Double Qtotal es igual a la suma de dos veces QamobGH más QamobL. Se toma dos veces el valor de la variable QamoGH, pues esta representa al caudal máximo de las bombas P-2079G y P-2079H.

El segundo caso tiene la misma estructura del caso anterior, con la diferencia que cambia la condición del if, para este caso, si las casillas de verificación de las bombas P-2079G y P-2079L, o las casillas de verificación de las bombas P-2079H y P-2079L, están activadas, es decir True: entonces Qtotal es igual a la suma de QamobGH y QamobL.

Dentro de la codificación anterior podemos observar que existe una variable de tipo Double llamada ptotal, está variable nos ayudará en la validación del ingreso de la presión. Por ejemplo en el primer caso ptotal toma el valor de la celda Z172 de la hoja "Tablas SPF". A continuación se muestra parte de la hoja "Tablas SPF".

Z172		=SUMA(AA172:AF172)					
	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF
165		x^5	x^4	x^3	x^2	x	c
166	-602.19	-3.29E-10	1.74E-07	-6.00E-05	1.86E-03	-2.91E-01	1.75E+03
167	390.59	-2.99E+03	4.04E+03	-3.57E+03	2.83E+02	-1.14E+02	1.75E+03
168							
169	1475.87	-9.34E+01	2.52E+02	-4.47E+02	7.08E+01	-5.68E+01	1.75E+03
170	195.29						
171							
172	1648.19	-1.23E+01	4.99E+01	-1.32E+02	3.15E+01	-3.79E+01	1.75E+03
173	130.20						
174							

Mediante la curva de funcionamiento de la bomba ³³P-2079G que se adjunta en los anexos, se llegó a determinar un valor de referencia de la presión a la que trabajarían las bombas que estén operando. A continuación se presenta la curva de funcionamiento de la bomba P-2079G.



En esta gráfica podemos observar, que la curva en azul relaciona la diferencia de presión de la bomba (en el eje Y), y la rapidez de flujo (en el eje X); con la función $y=f(x)$ se obtiene la diferencia de presión de la bomba (en PSI) ingresando un valor de rapidez de flujo (en lb / seg) en X. El valor de rapidez de flujo para determinar la presión de referencia, son las que se encuentran en las celdas de color gris, siendo el valor de referencia de presión, las que se encuentran en las celdas de color rojo, del último pedazo de la hoja "Tablas de SPF" visto en el documento; como podemos ver existen tres cálculos del valor de presión que corresponde para una, dos y tres bombas de inyección en

³³ La curva de funcionamiento de la bomba P-2079G es la misma curva para la bomba P-2079H

operación. La rapidez de flujo es la suma de los caudales ingresados para cada pozo del Well Pad, como el ingreso de los caudales es en BPD, se utilizó la ecuación 3.45 para transformar dichos valores en lb / seg. Para el primer caso de la celda en gris de rapidez de flujo, la sumatoria de caudales se la divide para uno, para el segundo caso de la celda Z170, la sumatoria se la divide para dos y finalmente para el tercer caso de la celda Z173, la sumatoria de caudales se la divide para tres.

Continuando con el ejemplo de la codificación, la variable p_{total} toma el valor de la celda Z172 de la hoja "Tablas SPF", pues la presión de 1648.19 PSI, para este caso, es para cuando se encuentren operando las tres bombas de inyección de Amo B. A continuación veremos como se obtuvo la presión de 1648.19 PSI.

$$y = -3.29 \times 10^{-10} X^5 + 1.74 \times 10^{-7} X^4 - 6.00 \times 10^{-5} X^3 + 1.86 \times 10^{-3} X^2 - 2.91 \times 10^{-1} X + 1.75 \times 10^3$$

$$y = -3.29 \times 10^{-10} * 130.2^5 + 1.74 \times 10^{-7} * 130.2^4 - 6 \times 10^{-5} * 130.2^3 + 1.86 \times 10^{-3} * 130.2^2 - 2.91 \times 10^{-1} * 130.2 + 1.75 \times 10^3$$

$$y = 1648.19$$

Lo que se hizo fue remplazar en el valor de X de la función de la curva de funcionamiento bomba P-2079G, la rapidez de flujo obtenido como ya se mencionó.

La segunda parte de la codificación del botón ingresar, tiene que ver con la de comparar la celda Q176 de la hoja de Excel "Tablas SPF", que representa a la celda que contiene el valor del caudal total (en BPD) ingresado en los pozos de AmoB; con la variable Q_{total} , que representa el caudal máximo (en BPD) a la que las bombas de inyección de Amo B que se encuentren operando trabajan. A continuación podemos ver esta codificación.

If Worksheets("Tablas SPF").Range("Q176").Value > Q_{total} **Then**
 MsgBox ("ERROR. No existe la capacidad de inyectar el caudal requerido")
Else...

Esto significa que si el caudal total (en BPD) ingresado en los pozos de AmoB, es mayor al caudal máximo (en BPD) al que las bombas pueden trabajar, se le advierte al usuario con un mensaje que dice "ERROR. No existe la capacidad de inyectar el caudal requerido", caso contrario se continua con la ejecución del programa. La tercera parte de la codificación del botón ingresar, es la continuación de la ejecución del programa. Esta parte del código corresponde a la de asignar el valor de presión y caudal en el cabezal del pozo a la celdas en la hoja de cálculo. A continuación se presenta la estructura del tipo de codificación de esta parte.

If onamob1.Value = True **Then**

If ((Len(amob1_presion.Value) = 0) Or amob1_presion.Value < (ptotal + 200)
Or amob1_presion.Value > (ptotal + 1000)) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente la presión del AMO B1 ")

Worksheets("Well Pads").Range("I729").Value = 0

Else

Worksheets("Well Pads").Range("K344").Value = amob1_presion.Value

Worksheets("Well Pads").Range("I729").Value = 1

End If

If ((Len(amob1_caudal.Value) = 0) Or amob1_caudal < 5) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente el caudal del AMO B1 ")

Worksheets("Well Pads").Range("I730").Value = 0

Else

Worksheets("Well Pads").Range("M344").Value = amob1_caudal.Value

Worksheets("Well Pads").Range("I730").Value = 1

End If

End If

Para este ejemplo se tomó el pozo Amo B1; si el pozo esta en estado ABIERTO, es decir si el objeto onamob1.Value, que representa a la casilla de verificación del pozo Amo B1, es igual a True; entonces se da comienzo al ingreso.

Se hizo un ingreso para presión, y otro para caudal; en ambos se trabajo de la misma manera. Lo primero que se hizo fue validar al valor ingresado tanto de presión como de caudal; por ejemplo en el caso de la presión, el objeto amob1_presion.Value, representa al valor de presión ingresado en el cuadro de texto, si este valor es menor ptotal + 200, o mayor ptotal + 1000, o el cuadro de texto está vacío, aparecerá en la pantalla un mensaje que advierte al usuario que dice "ERROR. Ingrese correctamente la presión del AMO B1 ". La variable ptotal de referencia, permitió que el programa trabaje en un cierto rango validado en el campo. Caso contrario si se ingreso correctamente, la celda de la hoja de cálculo que corresponde tanto a la presión y caudal del pozo, toman el valor que les corresponde, por ejemplo en el caso del caudal la celda M344 de la hoja de cálculo "Well Pads" toma el valor del caudal ingresado en el pozo Amo B1.

Como podemos ver en la codificación existen celdas que toman el valor de uno o cero, estas celdas toman el valor de cero cuando se ha ingresado de forma incorrecta, y toman el valor de uno cuando se ha ingresado correctamente. Estas celdas ayudaran en el botón de comando que permite ir hacia la siguiente hoja de Excel; cuando todas celdas tengan el valor de uno, el botón permitirá ir a la siguiente hoja, caso contrario si alguna celda tiene el valor de cero, significa que se ingreso incorrectamente, y aparece un mensaje que advierte al usuario y no permitirá ir a la siguiente.

En el caso de que el estado del pozo estuviera CERRADO, se da el valor de uno a las celdas que permiten ir a la siguiente hoja de Excel. Esto podemos constatarlo para el caso del pozo Amo B1 a continuación.

If onamob1.Value = False Then

Worksheets("Well Pads").Range("I729").Value = 1

```
Worksheets("Well Pads").Range("I730").Value = 1
```

End If

El tipo de codificación para los botones de comando con nombre de control **SIGUIENTE I>**, es la que se muestra a continuación, la misma que es la codificación del botón para el Well Pad de Amo B.

Private Sub siguiente_amob_Click()

```
Dim if1 As Integer, if2 As Integer, if3 As Integer, if4 As Integer, if5 As Integer
```

```
Dim if6 As Integer, if7 As Integer, if8 As Integer
```

```
Dim if9 As Double, if10 As Double, if11 As Double, if12 As Double
```

```
Dim if13 As Double, if14 As Double
```

```
Dim if15 As Integer, if16 As Integer, if17 As Integer
```

```
if1 = Worksheets("Well Pads").Range("I727").Value
```

```
if2 = Worksheets("Well Pads").Range("I728").Value
```

```
if3 = Worksheets("Well Pads").Range("I729").Value
```

```
if4 = Worksheets("Well Pads").Range("I730").Value
```

```
if5 = Worksheets("Well Pads").Range("I731").Value
```

```
if6 = Worksheets("Well Pads").Range("I732").Value
```

```
if7 = Worksheets("Well Pads").Range("I733").Value
```

```
if8 = Worksheets("Well Pads").Range("I734").Value
```

```
if15 = Worksheets("Well Pads").Range("I735").Value
```

```
if16 = Worksheets("Well Pads").Range("I736").Value
```

```
if17 = Worksheets("Well Pads").Range("I737").Value
```

```
if9 = Worksheets("Well Pads").Range("I359").Value
```

```
if10 = Worksheets("Well Pads").Range("J359").Value
```

```
if11 = Worksheets("Well Pads").Range("K359").Value
```

```
if12 = Worksheets("Well Pads").Range("L359").Value
```

```
if13 = Worksheets("Well Pads").Range("O359").Value
```

if14 = Worksheets("Well Pads").Range("P359").Value

If if1 = 0 Or if2 = 0 Or if3 = 0 Or if4 = 0 Or if5 = 0 Or if6 = 0 Or if7 = 0 Or if8 = 0
Or if15 = 0 Or if16 = 0 Or if17 = 0 **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese los valores del Well Pad")

End If

If if1 = 1 And if2 = 1 And if3 = 1 And if4 = 1 And if5 = 1 And if6 = 1 And if7 = 1
And if8 = 1 And if15 = 1 And if16 = 1 And if17 = 1 **Then**

If if9 < 0 Or if10 < 0 Or if11 < 0 Or if12 < 0 Or if13 < 0 Or if14 < 0 **Then**

MsgBox ("ERROR. No es posible ingresar estos valores. No existe solución
para este sistema. VUELVA A INGRESAR")

Else

Worksheets("Well Pads").Range("I727").Value = 0

Worksheets("Well Pads").Range("I728").Value = 0

Worksheets("Well Pads").Range("I729").Value = 0

Worksheets("Well Pads").Range("I730").Value = 0

Worksheets("Well Pads").Range("I731").Value = 0

Worksheets("Well Pads").Range("I732").Value = 0

Worksheets("Well Pads").Range("I733").Value = 0

Worksheets("Well Pads").Range("I734").Value = 0

Worksheets("Well Pads").Range("I735").Value = 0

Worksheets("Well Pads").Range("I736").Value = 0

Worksheets("Well Pads").Range("I737").Value = 0

Worksheets("Ingreso Amo A").amo1_presion.Text = 2650

Worksheets("Ingreso Amo A").amo1a1_presion.Text = 2650

Worksheets("Ingreso Amo A").amo2_presion.Text = 2600

Worksheets("Ingreso Amo A").amo3_presion.Text = 2600

```
Worksheets("Ingreso Amo A").amoa6_presion.Text = 2650  
Worksheets("Ingreso Amo A").amo1_caudal.Text = 17900  
Worksheets("Ingreso Amo A").amoa1_caudal.Text = 49100  
Worksheets("Ingreso Amo A").amoa2_caudal.Text = 39653  
Worksheets("Ingreso Amo A").amoa3_caudal.Text = 28687  
Worksheets("Ingreso Amo A").amoa6_caudal.Text = 31678
```

```
Worksheets("Ingreso Amo A").onamo1.Value = True  
Worksheets("Ingreso Amo A").onamo1.Value = True  
Worksheets("Ingreso Amo A").onamo2.Value = True  
Worksheets("Ingreso Amo A").onamo3.Value = True  
Worksheets("Ingreso Amo A").onamo6.Value = True  
Worksheets("Ingreso Amo A").onp9101.Value = True  
Worksheets("Ingreso Amo A").onp9102.Value = True  
Worksheets("Ingreso Amo A").onp9103.Value = True  
Worksheets("Ingreso Amo A").onp9110.Value = True  
Worksheets("Ingreso Amo A").onp2079J.Value = True  
Worksheets("Ingreso Amo A").onp2079I.Value = True  
Worksheets("Ingreso Amo A").onp2079M.Value = True
```

```
Worksheets("Ingreso Amo A").Activate
```

End If

End If

Lo primero que se hizo fue crear variables de tipo Integer, donde cada una tomará el valor de una celda. El valor que se asigna a dichas variables es cero o uno, que corresponden a los valores que se les dio a ciertas celdas en el botón de ingreso, cero para cuando existía un error, y uno para cuando se halla ingresado correctamente. Para el caso del ingreso de Amo B, estas variables son las siguientes.

```
Dim if1 As Integer, if2 As Integer, if3 As Integer, if4 As Integer, if5 As Integer
Dim if6 As Integer , if7 As Integer, if8 As Integer
Dim if15 As Integer, if16 As Integer, if17 As Integer
```

Pero existen otras variables que fueron creadas, estas son de tipo Double, las cuales toman el valor de las celdas que contienen el caudal calculado mediante SOLVER para las bombas del sistema (el cálculo de SOLVER se explicará más adelante). Para el caso del ingreso de Amo B, estas variables son las siguientes.

```
Dim if9 As Double, if10 As Double, if11 As Double, if12 As Double
Dim if13 As Double, if14 As Double
```

Ya creadas estas variables, y asignadas el valor de las celdas que les corresponde, lo primero que se hace es, mediante una estructura condicional if, verificar si las variables de tipo Integer, alguna tiene el valor de cero, lo cual correspondería a que se ha ingresado incorrectamente. En el caso de que alguna tuviera el valor de cero, se le advierte al usuario con un mensaje que dice "ERROR. Ingrese los valores del Well Pad". Esta codificación para el caso de Amo B, se puede constatar a continuación.

```
If if1 = 0 Or if2 = 0 Or if3 = 0 Or if4 = 0 Or if5 = 0 Or if6 = 0 Or if7 = 0 Or if8 = 0
Or if15 = 0 Or if16 = 0 Or if17 = 0 Then
MsgBox ("ERROR. Ingrese los valores del Well Pad")
End If
```

En el caso de que todas las variables de tipo Integer tuvieran el valor de uno, es decir se ha ingresado totalmente de forma correcta; entonces se procede a verificar, si las variables de tipo Double son menores que cero, lo cual nos diría que existe un caudal calculado por SOLVER que es negativo, por lo que no existiría solución para el sistema planteado por el usuario al ingresar. En el

caso de que alguna de las variables tipo Double fuera menor que cero, se le advierte al usuario mediante un mensaje en la pantalla, que dice "ERROR. No es posible ingresar estos valores. No existe solución para este sistema. VUELVA A INGRESAR". Esta codificación para el caso de Amo B, se puede constatar a continuación.

```
If if1 = 1 And if2 = 1 And if3 = 1 And if4 = 1 And if5 = 1 And if6 = 1 And if7 = 1  
And if8 = 1 And if15 = 1 And if16 = 1 And if17 = 1 Then
```

```
If if9 < 0 Or if10 < 0 Or if11 < 0 Or if12 < 0 Or if13 < 0 Or if14 < 0 Then  
MsgBox ("ERROR. No es posible ingresar estos valores. No existe solución  
para este sistema. VUELVA A INGRESAR")
```

Else...

Si no hubiera ninguna variable de tipo Double menor que cero, entonces se ejecutan cuatro condiciones. La primera es de dar el valor de cero para un nuevo ingreso, a las celdas que controlan el haber ingresado correctamente, por ejemplo la celda I727 de la hoja de cálculo "Well Pads" es una de estas celdas, y como podemos ver a continuación, a esta se le asigna dicho valor.

```
Worksheets("Well Pads").Range("I727").Value = 0
```

La segunda condición, es la de dar valores de presión y caudal en el cabezal del pozo a los cuadros de texto que corresponden a la siguiente hoja de ingreso de un Well Pad, dichos valores el programa arroja por ³⁴defecto. Para el caso de ingreso de Amo B, se les da los valores de presión y caudal para los pozos de Amo A. A continuación podemos ver por ejemplo como se les asigna el valor de presión al pozo Amo A6 y de caudal al pozo Amo 1.

```
Worksheets("Ingreso Amo A").amoA6_presion.Text = 2650
```

³⁴ Los valores que el programa da por defecto, son los valores a la que se encuentra trabajando todo el sistema de inyección de agua de formación del Bloque 16.

```
Worksheets("Ingreso Amo A").amo1_caudal.Text = 17900
```

La tercera condición, es la de activar las casillas de verificación, que representan el estado de encendidas y abiertos para las bombas y pozos, respectivamente. Esta activación corresponde al estado de bombas y pozos que el programa da por defecto para servicio del usuario. A continuación podemos ver como se activa la casilla de verificación de la bomba P-9101.

```
Worksheets("Ingreso Amo A").onp9101.Value = True
```

Y finalmente la cuarta condición, es mediante el método Activate, ir a la siguiente hoja de ingreso, para el caso de Amo B, la siguiente hoja de ingreso es la de Amo A, esto se puede constatar en la siguiente codificación.

```
Worksheets("Ingreso Amo A").Activate
```

```
End If
```

```
End If
```

```
End Sub
```

El tipo de codificación para los botones de comando con nombre de control <IREGRESO , es la que se muestra a continuación, la misma que es la codificación del botón para el Well Pad de Amo B.

```
Private Sub regreso_amob_Click()
```

```
Worksheets("Ingreso Wip").Activate
```

```
End Sub
```

Lo único que hace este botón, es regresar a la hoja anterior de ingreso mediante el método Activate. En este caso la hoja de ingreso anterior a la de Amo B, fue la de ingreso al Wip.

Los botones de comando que ayudan al ingreso de ENTRADAS para el Well Pad, tanto para el archivo de NPF como para el de SPF, tienen como evento a Click, es decir que al cliclar sobre estos botones, se ejecuta la codificación que hay en ellos.

Un ingreso importante, es el de el estado de las bombas y pozos mediante las casillas de verificación.

El tipo de codificación para las casillas de verificación que representan el estado de los pozos, se presenta a continuación para el caso del pozo Amo B10.

Private Sub onamob10_Click()

If onamob10.Value = False ***Then***

Worksheets("Well Pads").Range("I346").Value = 0

amob10_presion.Value = Null

amob10_caudal.Value = Null

End If

If onamob10.Value = True ***Then***

Worksheets("Well Pads").Range("I346").Value = 1

End If

End Sub

En el caso de que la casilla de verificación del pozo estuviera desactivada, es decir onamob10.Value igual a la propiedad False; entonces, se le da el valor de cero a la celda I346 de la hoja de cálculo Well Pads, que indica que el pozo esta cerrado, y además mediante la propiedad Null del objeto, se vacía los cuadros de texto donde se ingresa la presión y caudal del cabezal del pozo, para este caso el valor de los objetos amob10_presion y amob10_caudal,

fueron vaciados mediante Null. En el caso de que la casilla de verificación del pozo estuviera activada, es decir onamob10.Value igual a la propiedad True; entonces, se le da el valor de uno a la celda I346 de la hoja de cálculo Well Pads, que indica que el pozo esta abierto.

Para el caso del pozo Amo B10 estuviera abierta, es en la celda I346 de la hoja "Well Pad", donde mediante un valor de uno se indica que el pozo esta abierto y que el mismo puede ser tomado en cuenta para los cálculos, y mediante un valor de cero se indica que el pozo esta cerrado y que este no puede ser tomado en cuenta para los cálculos, como podemos constatar a continuación.

	H	I	J
343	Pozo	Abierto (1) o Cerrado(0)	
344	AMO B1	1	
345	AMO B6	1	
346	AMO B10	1	
347			

El tipo de codificación para las casillas de verificación que representan el estado de las bombas, se presenta a continuación para el caso de la bomba de inyección P-9109 del Well Pad Tivacuno.

Private Sub onp9109_Click()

If onp9109.Value = False Then

Worksheets("Well Pads").Range("I266").Value = 0

End If

If onp9109.Value = True Then

Worksheets("Well Pads").Range("I266").Value = 1

End If

End Sub

Para el caso de las casillas de verificación de las bombas, únicamente para cuando la casilla este activada, se le da el valor de uno a la celda que

representa en la hoja de cálculo el estado de la bomba, y para cuando la casilla este desactivada, se le da el valor de cero a la celda que representa en la hoja de cálculo el estado de la bomba. El valor de uno indica que la bomba esta encendida y que la misma puede ser tomado en cuenta para los cálculos, y el valor de cero indica que la bomba esta apagada y que esta no puede ser tomado en cuenta para los cálculos, como podemos constatar a continuación.

	G	H	I	J
264	Bombas:		Encendida (1) o Apagada (0)	
265	P-9108		1	
266	P-9109		1	
267				

Las casillas de verificación que representan el estado de las bombas y pozos, tanto para el archivo de NPF como para el de SPF, tienen como evento a Click, es decir que al ciclar sobre estas casillas, se ejecuta la codificación que hay en ellos.

3. *Ingreso de estado de bombas de media presión.*

Luego de haber ingresado la presión y caudal en el cabezal del pozo de cada Well Pad, se ingresa el estado de las bombas de media presión. Este ingreso al igual que los anteriores se lo hace en una hoja de Excel, esta hoja se llama “Ingreso Media Presion”, tanto para el archivo de NPF, como para el de SPF. El estado de las bombas de media presión se ingreso mediante casillas de verificación. Existen 3 botones de comando en esta hoja de ingreso, el primer botón sirve para el ingreso del estado de las bombas de media presión, el segundo sirve para continuar a la siguiente hoja de Excel, y el tercer botón sirve para regresar a la hoja de Excel anterior, por si el usuario desea cambiar algunos valores.

Las propiedades de texto y nombre de control, de los controles de ingreso del estado de las bombas de media presión para los archivos de NPF y SPF, son los siguientes.

Tabla 3.18: Propiedades del botón de comando que permite el ingreso del estado de las bombas de media presión

Propiedad Caption (Texto de control)	Propiedad Name (Nombre de control)	Archivo de Simulación
INGRESAR	Ingreso1	NPF
INGRESAR	Ingreso_SPF	SPF

Tabla 3.19: Propiedades de botón de comando que permite continuar a la siguiente hoja de Excel

Propiedad Caption (Texto de control)	Propiedad Name (Nombre de control)	Archivo de Simulación
SIGUIENTE I>	siguiente1	NPF
SIGUIENTE I>	siguiente1	SPF

Tabla 3.20: Propiedades de botón de comando que permite regresar a la hoja de Excel anterior

Propiedad Caption (Texto de control)	Propiedad Name (Nombre de control)	Archivo de Simulación
<I REGRESO	regreso3	NPF
<I REGRESO	regreso4	SPF

Tabla 3.21: Propiedad Name de casillas de verificación que representan el estado de las bombas de media presión

Bomba de Media Presión	Propiedad Name (Nombre de control)	Archivo de Simulación
P-1119A	onp1119a	NPF
P-1119B	onp1119b	NPF
P-1119C	onp1119c	NPF
P-2119A	onp2119a	SPF
P-2119B	onp2119b	SPF
P-2119C	onp2119c	SPF
P-2119D	onp2119d	SPF
P-2119F	onp2119f	SPF
P-2119H	onp2119h	SPF

La estructura de ingreso del estado de las bombas de media presión, se da a conocer a continuación para el caso de NPF.

NPF

Bombas de Media Presión

Ingrese estado de las bombas: ENCENDIDA O APAGADA

P - 1119A:	<input checked="" type="checkbox"/>
P - 1119B:	<input checked="" type="checkbox"/>
P - 1119C:	<input type="checkbox"/>

INGRESAR

SIGUIENTE >

< REGRESO

El tipo de codificación para los botones de comando con nombre de control **INGRESAR**, es la que se muestra a continuación, la misma que es la codificación del botón para la simulación de NPF.

Private Sub Ingreso1_Click()

Dim Qp1119a As Double, Qp1119bc As Double, Qtotal As Double

Dim Qpumps As Double

Qp1119a = Worksheets("Tablas NPF").Range("Y47").Value

Qp1119bc = Worksheets("Tablas NPF").Range("Y59").Value

Qtotal = Worksheets("Simulacion").Range("I229").Value

If onp1119a.Value = True And onp1119b.Value = True And onp1119c.Value = True **Then**

Qpumps = Qp1119a + Qp1119bc + Qp1119bc

End If

If (onp1119a.Value = True And onp1119b.Value = False And onp1119c.Value = True) Or (onp1119a.Value = True And onp1119b.Value = True And onp1119c.Value = False) **Then**

Qpumps = Qp1119a + Qp1119bc

End If

If onp1119a.Value = False And onp1119b.Value = True And onp1119c.Value = True **Then**

Qpumps = Qp1119bc + Qp1119bc

End If

If onp1119a.Value = True And onp1119b.Value = False And onp1119c.Value = False **Then**

Qpumps = Qp1119a

End If

If (onp1119a.Value = False And onp1119b.Value = True And onp1119c.Value = False) Or (onp1119a.Value = False And onp1119b.Value = False And onp1119c.Value = True) **Then**

Qpumps = Qp1119bc

End If

If onp1119a.Value = False And onp1119b.Value = False And onp1119c.Value = False **Then**

MsgBox ("ERROR. No se puede trabajar con todas las bombas de media presión apagadas")

Worksheets("Simulacion").Range("D437").Value = 0

Else

Worksheets("Simulacion").Range("D437").Value = 1

End If

If Qtotal > Qpumps **Then**

MsgBox ("ERROR. Las bombas de media presión escogidas no tienen toda la capacidad para trabajar con el caudal que se envía a cada Well Pad")

Worksheets("Simulacion").Range("D438").Value = 0

Else

Worksheets("Simulacion").Range("D438").Value = 1

End If

End Sub

La estructura de codificación para el ingreso del estado de las bombas de media presión, es la misma para la simulación de NPF, como para el de SPF. Esta codificación se compone de 3 partes. La primera es la de determinar el caudal total máximo a la que pueden trabajar todas las bombas de media presión que se desea que estén operando. Por ejemplo en esta codificación lo primero que se hace es la de crear dos variables de tipo Double llamadas Qp1119a y Qp1119bc, las mismas que representan el caudal máximo en barriles por día de las bombas de media presión de NPF. Qp1119a representa la rapidez de flujo máximo de la bomba P-1119A , y Qp1119bc representa la

rapidez de flujo máximo que tiene cada una de las bombas P-1119B y P-1119C.

Dim Qp1119a As Double, Qp1119bc

Qp1119a = Worksheets("Tablas NPF").Range("Y47").Value

Qp1119bc = Worksheets("Tablas NPF").Range("Y59").Value

Las bombas de media presión de NPF son las P-1119A, P-1119B y P-1119C (ver tabla 2.3), en las graficas características de las bombas que se encuentran en los anexos, podemos constatar que la bombas P-1119B y P-1119C tienen las mismas características de trabajo, las cuales trabajan con un caudal másico máximo de 554.43 lb / seg cada una. La P-1119A trabaja con un caudal másico máximo de 263.35 lb / seg. Lo que se necesita es el caudal máximo de cada una de las bombas en barriles por día, es por ello que se utilizó la Ecuación 3.45, para la conversión de lb/seg a BPD.

En la codificación podemos ver que las variables Qp1119a y Qp1119bc toman el valor de las celdas Y47 y Y59 de la hoja de Excel llamada "Tablas NPF", respectivamente, estas celdas contienen el valor del caudal en barriles por día máximo a la que pueden trabajar las bombas de media presión de NPF, a continuación podemos ver las celdas mencionadas.

	Y47	=	=263.35/(Simulacion!\$F\$4*0.00006499)
	W	X	Y
42			
43	P-1119 A	Presión de descarga [PSI] :	1314.62
44		Rapidez de flujo [lb/seg] :	144.62
45			
46			
47			67423.66
48			
49			
50			
51			
52	P-1119 B	Presión de descarga [PSI] :	1322.57
53		Rapidez de flujo [lb/seg] :	397.20
54			
55	P-1119 C	Presión de descarga [PSI] :	1460.98
56		Rapidez de flujo [lb/seg] :	0.00
57			
58			
59			141946.83
60			

Aquí podemos observar que la celda Y47 contiene el valor de 67423.66 (en BPD), la cual se obtuvo con la ecuación 3.45, lo mismo que se puede constatar en la barra de fórmulas, donde la celda F4 de la hoja "Simulación" representa el peso específico y donde 263.35 es la rapidez de flujo máximo de la bomba P-1119A en lb / seg. La celda Y59 contiene el valor de 141946.83 (en BPD).

Como ya se mencionó, los cálculos se hicieron de atrás hacia delante, es decir que primero se obtuvieron los valores de presiones y caudal en los Well Pads hasta llegar a las presiones y caudales en las bombas de media y baja presión. Mediante una variable tipo Double, llamada Qtotal, se le asigna a dicha variable el valor del caudal (en BPD), de todos los Well Pads es decir el caudal que las bombas de media presión repartirán hacia estas. Lo mencionado se puede constatar en la siguiente codificación de la simulación en NPF.

Dim Qtotal As Double

Qtotal = Worksheets("Simulacion").Range("I229").Value

Para llegar a determinar el caudal de todas las bombas de media presión que el usuario decidió que operen, que puede ser una, dos o las tres operando al mismo tiempo, se codificó de la siguiente manera.

Dim Qpumps As Double

If (onp1119a.Value = True And onp1119b.Value = False And onp1119c.Value = True) Or (onp1119a.Value = True And onp1119b.Value = True And onp1119c.Value = False) **Then**

Qpumps = Qp1119a + Qp1119bc

End If

En este ejemplo se tomó el caso para cuando estén operando dos bombas de media presión en NPF, la P-1119A y P-1119C, o la P-1119A y P-1119B.

Aquí podemos observar que la codificación tiene una estructura condicional if, que es la siguiente: si las casillas de verificación que representan el estado de las bombas P-1119A y P-1119C, o las casillas de verificación de las bombas P-1119A y P-1119B, están activadas, es decir True: entonces la variable Qpumps es igual a la suma de Qp1119a y Qp1119bc.

Qpumps es una variable de tipo Double, la cual como vemos representa el caudal de todas las bombas de media presión que se encuentran operando.

La segunda parte de la codificación con la que consta este botón de comando, es la de advertir al usuario de que no se puede trabajar con todas las bombas de media presión apagadas. Por ejemplo continuando para el caso de las bombas de media presión de NPF, se codificó de la siguiente manera.

```
If onp1119a.Value = False And onp1119b.Value = False And onp1119c.Value = False Then
```

```
MsgBox ("ERROR. No se puede trabajar con todas las bombas de media presión apagadas")
```

```
Worksheets("Simulacion").Range("D437").Value = 0
```

```
Else
```

```
Worksheets("Simulacion").Range("D437").Value = 1
```

```
End If
```

Los objetos onp1119a, onp1119b, y onp1119c, representan a las casillas de verificación de las bombas P-1119A, P-1119B, y P-1119C, respectivamente; si todas estas se encuentran desactivadas, es decir son igual a False, entonces se le advierte al usuario con un mensaje que dice "ERROR. No se puede trabajar con todas las bombas de media presión apagadas", y además se le asigna el valor de cero a la celda D437 de la hoja de cálculo "Simulación". En el caso de que alguna casilla de verificación, estuviese activada, se le asigna el valor de uno a dicha celda. Esta celda que toma el valor de uno o cero, dependiendo el caso, al igual que en el ingreso de ENTRADAS para cada Well Pad representa el haber ingresado correctamente o no. Este tipo de celdas

también ayudarán al botón de comando que permite ir hacia la siguiente hoja de Excel.

Finalmente la tercera parte de la codificación con la que consta este botón de comando, es la de advertir al usuario de que las bombas de media presión escogidas no tienen toda la capacidad para trabajar con el caudal que se enviará a los Well Pad. Continuando con el ejemplo de las bombas de media presión de NPF, se codificó de la siguiente manera.

If Qtotal > Qpumps **Then**

MsgBox ("ERROR. Las bombas de media presión escogidas no tienen toda la capacidad para trabajar con el caudal que se envía a cada Well Pad")

Worksheets("Simulacion").Range("D438").Value = 0

Else

Worksheets("Simulacion").Range("D438").Value = 1

End If

Esto significa que si el caudal (en BPD) ingresado para todos los Well Pads, es mayor al caudal máximo (en BPD) al que las bombas de media presión pueden trabajar, se le advierte al usuario con un mensaje que dice "ERROR. Las bombas de media presión escogidas no tienen toda la capacidad para trabajar con el caudal que se envía a cada Well Pad", y además se le asigna el valor de cero a la celda D438 de la hoja de cálculo "Simulación". En el caso de que el caudal ingresado para todos los Well Pads, sea menor que el caudal máximo al que las bombas de media presión pueden trabajar, se le da el valor de uno a dicha celda. Esta celda es la que representa el haber ingresado correctamente o no.

El tipo de codificación para los botones de comando con nombre de control **SIGUIENTE I**►, es la que se muestra a continuación, la misma que es la codificación del botón para la simulación de NPF.

Private Sub siguiente1_Click()

Dim if1 As Integer, if2 As Integer, if3 As Integer

Dim if4 As Double, if5 As Double, if6 As Double, if7 As Double, if8 As Double

if1 = Worksheets("Simulacion").Range("D437").Value

if2 = Worksheets("Simulacion").Range("D438").Value

if3 = Worksheets("Simulacion").Range("D439").Value

if4 = Worksheets("Simulacion").Range("M147").Value

if5 = Worksheets("Simulacion").Range("O147").Value

if6 = Worksheets("Simulacion").Range("P147").Value

if7 = Worksheets("Simulacion").Range("Q147").Value

if8 = Worksheets("Simulacion").Range("R147").Value

If if1 = 0 Or if2 = 0 Or if3 = 0 **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese el estado de las bombas de media presión")

End If

If if1 = 1 And if2 = 1 And if3 = 1 **Then**

If if4 < 0 Or if5 < 0 Or if6 < 0 Or if7 < 0 Or if8 < 0 **Then**

MsgBox ("ERROR. No es posible ingresar estos valores. No existe solución para este sistema. VUELVA A INGRESAR")

Else

Worksheets("Simulacion").Range("D437").Value = 0

Worksheets("Simulacion").Range("D438").Value = 0

Worksheets("Simulacion").Range("D439").Value = 0

Worksheets("Ingreso Baja Presion").onp1121a.Value = True

Worksheets("Ingreso Baja Presion").onp1121b.Value = False

Worksheets("Ingreso Baja Presion").onp1121c.Value = True

Worksheets("Ingreso Baja Presion").onp1123a.Value = False

Worksheets("Ingreso Baja Presion").Activate

End If

End If

End Sub

La codificación para este botón de comando, es igual a la del botón que permitía ir hacia la siguiente hoja de Excel en los ingresos de ENTRADAS de los Well Pas. Lo primero que se hizo fue crear variables de tipo Integer, donde cada una tomará el valor de una celda. El valor que se asigna a dichas variables es cero o uno, que corresponden a los valores que se les dio a ciertas celdas en el botón de ingreso, cero para cuando existía un error, y uno para cuando se halla ingresado correctamente. Para el caso de la simulación de NPF, estas variables son las siguientes.

Dim if1 As Integer, if2 As Integer, if3 As Integer

Pero existen otras variables que fueron creadas, estas son de tipo Double, las cuales toman el valor de las celdas que contienen el caudal calculado mediante SOLVER para las bombas del sistema. Para este caso, estas variables son las siguientes.

Dim if4 As Double, if5 As Double, if6 As Double, if7 As Double, if8 As Double

Ya creadas estas variables, y asignadas el valor de las celdas que les corresponde, lo primero que se hace es, mediante una estructura condicional if, verificar si las variables de tipo Integer, alguna tiene el valor de cero, lo cual correspondería a que se ha ingresado incorrectamente. En el caso de que alguna tuviera el valor de cero, se le advierte al usuario con un mensaje que dice "ERROR. Ingrese el estado de las bombas de media presión". La codificación para el caso de la simulación de NPF, se puede constatar a continuación.

If if1 = 0 Or if2 = 0 Or if3 = 0 **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese el estado de las bombas de media presión")

End If

En el caso de que todas las variables de tipo Integer tuvieran el valor de uno, es decir se ha ingresado totalmente de forma correcta; entonces se procede a verificar, si las variables de tipo Double son menores que cero, lo cual nos diría que existe un caudal calculado por SOLVER que es negativo, por lo que no existiría solución para el sistema planteado por el usuario al ingresar. En el caso de que alguna de las variables tipo Double fuera menor que cero, se le advierte al usuario mediante un mensaje en la pantalla, que dice "ERROR. No es posible ingresar estos valores. No existe solución para este sistema. VUELVA A INGRESAR" .Esta codificación para el caso de la simulación de NPF, se puede constatar a continuación.

If if1 = 1 And if2 = 1 And if3 = 1 **Then**

If if4 < 0 Or if5 < 0 Or if6 < 0 Or if7 < 0 Or if8 < 0 **Then**

MsgBox ("ERROR. No es posible ingresar estos valores. No existe solución para este sistema. VUELVA A INGRESAR")

Else...

Si no hubiera ninguna variable de tipo Double menor que cero, entonces se ejecutan tres condiciones. La primera es de dar el valor de cero para un nuevo ingreso, a las celdas que controlan el haber ingresado correctamente, por ejemplo la celda D437 de la hoja de cálculo "Simulacion" es una de estas celdas, y como podemos ver a continuación, a esta se le asigna dicho valor.

Worksheets("Simulacion").Range("D437").Value = 0

La segunda condición, es la de activar las casillas de verificación, que representan el estado de encendidas de las bombas de baja presión. Esta activación corresponde al estado de bombas que el programa da por defecto para servicio del usuario. A continuación podemos ver como se desactiva la casilla de verificación de la bomba P-1121B.

```
Worksheets("Ingreso Baja Presion").onp1121b.Value = False
```

Y finalmente la tercera condición, es mediante el método Activate, ir a la siguiente hoja de ingreso, que es la hoja de ingreso de estado de las bombas de baja presión, esto se puede constatar en la siguiente codificación.

```
Worksheets("Ingreso Baja Presion").Activate
```

End If

End If

End Sub

El tipo de codificación para los botones de comando con nombre de control **<IREGRESO** , es la que se muestra a continuación, la misma que es la codificación del botón para la simulación de NPF.

Private Sub regreso3_Click()

```
Worksheets("Ingreso Wip").Activate
```

End Sub

Este botón hace regresar a la hoja anterior de ingreso mediante el método Activate. En este caso la hoja de ingreso anterior es la de ingreso al Wip.

El estado de las bombas de media presión se lo realizó mediante casillas de verificación, las mismas que lo único que hacen es dar el valor de uno a la celda de la hoja de cálculo, para cuando las bombas estén encendidas, y cero para cuando estén apagadas. A continuación se presenta la codificación para el caso de la bomba de media presión de SPF P-2119C.

Private Sub onp2119c_Click()

If onp2119c.Value = False **Then**

Worksheets("Simulacion").Range("I399").Value = 0

End If

If onp2119c.Value = True **Then**

Worksheets("Simulacion").Range("I399").Value = 1

End If

End Sub

Estas casillas de verificación, tienen como evento a Click, es decir que al cliclar sobre estas casillas, se ejecuta la codificación que hay en ellos.

4. Ingreso de estado de bombas de baja presión

Luego de haber ingresado el estado de las bombas de media presión, se ingresa el estado de las bombas de baja presión. Este ingreso al igual que los anteriores se lo hace en una hoja de Excel, esta hoja se llama "Ingreso Baja Presion", tanto para el archivo de NPF, como para el de SPF. El estado de las bombas de baja presión se ingreso mediante casillas de verificación. Existen 4 botones de comando en esta hoja de ingreso, el primer botón sirve para el ingreso del estado de las bombas de baja presión, el segundo sirve para continuar a la siguiente hoja de Excel, el tercer botón sirve para regresar a la hoja de Excel anterior, por si el usuario desea cambiar dichos valores, y el cuarto botón sirve para regresar a la hoja de ingreso de propiedades del fluido de trabajo.

Las propiedades de texto y nombre de control, de los controles de ingreso del estado de las bombas de baja presión para los archivos de NPF y SPF, son los siguientes.

Tabla 3.22: Propiedades del botón de comando que permite el ingreso del estado de las bombas de baja presión

Propiedad Caption (Texto de control)	Propiedad Name (Nombre de control)	Archivo de Simulación
INGRESAR	ingreso2	NPF
INGRESAR	ingreso_baja	SPF

Tabla 3.23: Propiedades de botón de comando que permite continuar a la siguiente hoja de Excel

Propiedad Caption (Texto de control)	Propiedad Name (Nombre de control)	Archivo de Simulación
RESULTADOS I>	siguiente2	NPF
RESULTADOS I>	siguiente2	SPF

Tabla 3.24: Propiedades de botón de comando que permite regresar a la hoja de Excel anterior

Propiedad Caption (Texto de control)	Propiedad Name (Nombre de control)	Archivo de Simulación
<I REGRESO	regreso4	NPF
<I REGRESO	regreso2	SPF

Tabla 3.25: Propiedades de botón de comando que permite regresar a la hoja de ingreso de las propiedades del fluido de trabajo

Propiedad Caption (Texto de control)	Propiedad Name (Nombre de control)	Archivo de Simulación
<I INICIO DE INGRESO	inicio	NPF
<I INICIO DE INGRESO	inicio	SPF

Tabla 3.26: Propiedad Name de casillas de verificación que representan el estado de las bombas de baja presión

Bomba de Media Presión	Propiedad Name (Nombre de control)	Archivo de Simulación
P-1121A	onp1121a	NPF
P-1121B	onp1121b	NPF
P-1121C	onp1121c	NPF
P-1123A	onp1123a	NPF
P-2121A	onp2121a	SPF
P-2121B	onp2121b	SPF
P-2121C	onp2121c	SPF
P-2121D	onp2121d	SPF
P-2121E	onp2121e	SPF
P-2123A	onp2123a	SPF

La estructura de ingreso del estado de las bombas de baja presión, se da a conocer a continuación para el caso de NPF.

NPF

Bombas Booster

Ingrese estado de las bombas: ENCENDIDA O APAGADA

P - 1121A:

P - 1121B:

P - 1121C:

P - 1123A:

INGRESAR

SIGUIENTE >

< REGRESO

< INICIO DE INGRESO

El tipo de codificación para los botones de comando con nombre de control **INGRESAR**, es la que se muestra a continuación, la misma que es la codificación del botón para la simulación de NPF.

Private Sub ingreso2_Click()

Dim Qtotal As Double, Qp1121a As Double, Qp1121bc As Double

Dim Qp1123a As Double

Dim Qpumps As Double

Qtotal = Worksheets("Simulacion").Range("C147").Value

Qp1121a = Worksheets("Tablas NPF").Range("M47").Value

Qp1121bc = Worksheets("Tablas NPF").Range("M57").Value

Qp1123a = Worksheets("Tablas NPF").Range("M65").Value

If onp1121a.Value = True And onp1121b.Value = True And onp1121c.Value = True And onp1123a.Value = True **Then**

Qpumps = Qp1121a + 2 * Qp1121bc + Qp1123a

End If

If onp1121a.Value = True And onp1121b.Value = True And onp1121c.Value = True And onp1123a.Value = False **Then**

Qpumps = Qp1121a + 2 * Qp1121bc

End If

If (onp1121a.Value = True And onp1121b.Value = True And onp1121c.Value = False And onp1123a.Value = True) Or (onp1121a.Value = True And onp1121b.Value = False And onp1121c.Value = True And onp1123a.Value = True) **Then**

Qpumps = Qp1121a + Qp1121bc + Qp1123a

End If

If onp1121a.Value = False And onp1121b.Value = True And onp1121c.Value = True And onp1123a.Value = True **Then**
Qpumps = 2 * Qp1121bc + Qp1123a
End If

If (onp1121a.Value = True And onp1121b.Value = True And onp1121c.Value = False And onp1123a.Value = False) Or (onp1121a.Value = True And onp1121b.Value = False And onp1121c.Value = True And onp1123a.Value = False) **Then**
Qpumps = Qp1121a + Qp1121bc
End If

If onp1121a.Value = True And onp1121b.Value = False And onp1121c.Value = False And onp1123a.Value = True **Then**
Qpumps = Qp1121a + Qp1123a
End If

If onp1121a.Value = False And onp1121b.Value = True And onp1121c.Value = True And onp1123a.Value = False **Then**
Qpumps = 2 * Qp1121bc
End If

If (onp1121a.Value = False And onp1121b.Value = True And onp1121c.Value = False And onp1123a.Value = True) Or (onp1121a.Value = False And onp1121b.Value = False And onp1121c.Value = True And onp1123a.Value = True) **Then**
Qpumps = Qp1121bc + Qp1123a
End If

If onp1121a.Value = True And onp1121b.Value = False And onp1121c.Value = False And onp1123a.Value = False **Then**
Qpumps = Qp1121a

End If

If (onp1121a.Value = False And onp1121b.Value = True And onp1121c.Value = False And onp1123a.Value = False) Or (onp1121a.Value = False And onp1121b.Value = False And onp1121c.Value = True And onp1123a.Value = False) **Then**

Qpumps = Qp1121bc

End If

If onp1121a.Value = False And onp1121b.Value = False And onp1121c.Value = False And onp1123a.Value = True **Then**

Qpumps = Qp1123a

End If

If onp1121a.Value = False And onp1121b.Value = False And onp1121c.Value = False And onp1123a.Value = False **Then**

MsgBox ("ERROR. No se puede trabajar con todas las bombas de baja presión apagadas")

Worksheets("Simulacion").Range("F437").Value = 0

Else

Worksheets("Simulacion").Range("F437").Value = 1

End If

If Qtotal > Qpumps **Then**

MsgBox ("ERROR. Las bombas de baja presión escogidas no tienen toda la capacidad para trabajar con el caudal que se envía hacia las bombas de media presión")

Worksheets("Simulacion").Range("F438").Value = 0

Else

Worksheets("Simulacion").Range("F438").Value = 1

End If

If Qtotal <= 20 **Then**

MsgBox ("ERROR. No existe flujo para enviar hacia los Well Pads. Están todos los pozos cerrados y las bombas inyectoras apagadas. VUELVA A INGRESAR")

Worksheets("Ingreso Fluidos").pespecifico.Text = 60.1

Worksheets("Ingreso Fluidos").visco.Text = 0.00000335

Worksheets("Ingreso Fluidos").Activate

Worksheets("Simulacion").Range("F439").Value = 0

Else

Worksheets("Simulacion").Range("F439").Value = 1

End If

End Sub

La estructura de codificación para el ingreso del estado de las bombas de baja presión, es la misma para la simulación de NPF, como para el de SPF. Esta codificación se compone de 4 partes, tres de estas cuatro partes son las mismas que se codificaron para el botón con nombre de control INGRESAR del ingreso del estado de las bombas de media presión. La primera, es la de determinar el caudal total máximo a la que pueden trabajar todas las bombas de baja presión que se desea que estén operando. La segunda, es la de advertir al usuario de que no se puede trabajar con todas las bombas de baja presión apagadas, y la tercera parte, es la de advertir al usuario de que las bombas de baja presión escogidas no tienen toda la capacidad para trabajar con el caudal que se enviará a las bombas de media presión.

La cuarta parte de la codificación con la que cuenta este botón, es la de advertir al usuario de que no existe flujo para enviar hacia los Well Pads, pues los pozos y las bombas de inyección se encuentran cerrados y apagadas, la codificación para el caso de las bombas de baja presión de NPF, se presenta a continuación.

If Qtotal <= 20 **Then**

MsgBox ("ERROR. No existe flujo para enviar hacia los Well Pads. Están todos los pozos cerrados y las bombas inyectoras apagadas. VUELVA A INGRESAR")

Worksheets("Ingreso Fluidos").pespecifico.Text = 60.1

Worksheets("Ingreso Fluidos").visco.Text = 0.00000335

Worksheets("Ingreso Fluidos").Activate

Worksheets("Simulacion").Range("F439").Value = 0

Else

Worksheets("Simulacion").Range("F439").Value = 1

End If

Aquí podemos ver, que si la variable de tipo Double Qtotal, que representa el caudal que se enviará hacia las bombas de media presión y que fue la que el usuario ingreso para todos los Well Pads, es menor que 20 (en BPD), es decir las bombas de baja presión no pueden trabajar con un valor menor a este; entonces, se advertirá al usuario con un mensaje que dice "ERROR. No existe flujo para enviar hacia los Well Pads. Están todos los pozos cerrados y las bombas inyectoras apagadas. VUELVA A INGRESAR", además mediante el método Activate se irá hacia la hoja de ingreso de propiedades del fluido de trabajo, es por ellos que a los objetos que representan el valor de peso específico y viscosidad cinemática, se les da el valor de 60.1 lbf / ft³ y 0.00000335 ft² / seg, respectivamente. Estos valores son los que el programa arroja por defecto para servicio del usuario. Dentro de esta estructura condicional if, también existen celdas que toman que valor de uno o cero, dependiendo sea el caso, cuando se ha ingresado de forma correcta o incorrecta.

El tipo de codificación para los botones de comando con nombre de control **REULTADOS I**>, es la que se muestra a continuación, la misma que es la codificación del botón para la simulación de NPF.

Private Sub siguiente2_Click()

Dim if1 As Integer, if2 As Integer, if3 As Integer

Dim T1118a As Double, T1118b As Double

Dim if4 As Double, if5 As Double, if6 As Double, if7 As Double

if1 = Worksheets("Simulacion").Range("F437").Value

if2 = Worksheets("Simulacion").Range("F438").Value

if3 = Worksheets("Simulacion").Range("F439").Value

if4 = Worksheets("Simulacion").Range("O49").Value

if5 = Worksheets("Simulacion").Range("P49").Value

if6 = Worksheets("Simulacion").Range("Q49").Value

if7 = Worksheets("Simulacion").Range("R49").Value

If if1 = 0 Or if2 = 0 Or if3 = 0 **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese el estado de las bombas de baja presión")

End If

If if1 = 1 And if2 = 1 And if3 = 1 **Then**

If if4 < 0 Or if5 < 0 Or if6 < 0 Or if7 < 0 **Then**

MsgBox ("ERROR. No es posible ingresar estos valores. No existe solución para este sistema. VUELVA A INGRESAR")

Else

T1118a = Worksheets("Simulacion").Range("D10").Value

T1118b = Worksheets("Simulacion").Range("D11").Value

If (T1118a >= 40 Or T1118a < 5) And (T1118b >= 40 Or T1118b < 5) **Then**

MsgBox ("ERROR.VUELVA A INGRESAR. La altura de los tanques de almacenamiento de agua están fuera del rango permitido (0-40 ftH2O)")

Else

Worksheets("Simulacion").Range("F437").Value = 0

```
Worksheets("Simulacion").Range("F438").Value = 0
```

```
Worksheets("Simulacion").Range("F439").Value = 0
```

```
Worksheets("Resultados").Activate
```

```
End If
```

```
End If
```

```
End If
```

```
End Sub
```

Al igual que los casos anteriores de los botones que permiten ir a la siguiente hoja de Excel, lo primero que se hizo fue crear variables de tipo Integer, donde cada una tomará el valor de una celda. El valor que se asigna a dichas variables es cero o uno, que corresponden a los valores que se les dio a ciertas celdas en el botón de ingreso, cero para cuando existía un error, y uno para cuando se halla ingresado correctamente. Para este caso, estas variables son las siguientes.

```
Dim if1 As Integer, if2 As Integer, if3 As Integer
```

Pero existen otras variables que fueron creadas, estas son de tipo Double, las cuales toman el valor de las celdas que contienen el caudal calculado mediante SOLVER para las bombas del sistema. Para este caso, estas variables son las siguientes.

```
Dim if4 As Double, if5 As Double, if6 As Double, if7 As Double
```

Además existen dos variables más, las cuales son de tipo Double, las mismas que se les asigna el valor que se llegó a calcular de la altura de agua de formación en cada tanque de almacenamiento. Para este caso, estas variables son las siguientes.

```
Dim T1118a As Double, T1118b As Double
```

Ya creadas estas variables, y asignadas el valor de las celdas que les corresponde, lo primero que se hace es, mediante una estructura condicional if, verificar si las variables de tipo Integer, alguna tiene el valor de cero, lo cual correspondería a que se ha ingresado incorrectamente. En el caso de que alguna tuviera el valor de cero, se le advierte al usuario con un mensaje que dice "ERROR. Ingrese el estado de las bombas de baja presión". La codificación para el caso de la simulación de NPF, se puede constatar a continuación.

If if1 = 0 Or if2 = 0 Or if3 = 0 **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese el estado de las bombas de baja presión")

End If

En el caso de que todas las variables de tipo Integer tuvieran el valor de uno, es decir se ha ingresado totalmente de forma correcta; entonces se procede a verificar, si las variables de tipo Double que toman el valor de las celdas que contienen el caudal calculado mediante SOLVER, son menores que cero, lo cual nos diría que existe un caudal calculado por SOLVER que es negativo, por lo que no existiría solución para el sistema planteado por el usuario al ingresar; en el caso de que esto sucediera, se le advierte al usuario mediante un mensaje en la pantalla, que dice "ERROR. No es posible ingresar estos valores. No existe solución para este sistema. VUELVA A INGRESAR". Esta codificación para el caso de la simulación de NPF, se puede constatar a continuación.

If if1 = 1 And if2 = 1 And if3 = 1 **Then**

If if4 < 0 Or if5 < 0 Or if6 < 0 Or if7 < 0 **Then**

MsgBox ("ERROR. No es posible ingresar estos valores. No existe solución para este sistema. VUELVA A INGRESAR")

Else...

Si ninguna de las variables de tipo Double que toman el valor de las celdas que contienen el caudal calculado mediante SOLVER, es menor que cero, entonces se asigna el valor de las alturas de agua de formación en los tanques de almacenamiento, a las variables tipo Double que fueron creadas para esta asignación, que para este caso son T1118a y T 1118b, y se procede a verificar si estas dos variables son mayores o igual a 40 (ftH₂O), o menores que 5 (ftH₂O), pues el rango en el que trabajan dichos tanques es de 5 a 39 ftH₂O. En el caso de que las alturas de agua de los tanques de almacenamiento no estuvieran entre 5 y 39 ftH₂O, entonces se advierte al usuario con un mensaje que dice "ERROR. VUELVA A INGRESAR. La ³⁵altura de los tanques de almacenamiento de agua están fuera del rango permitido (0-40 ftH₂O)". Esta codificación para el caso de la simulación de NPF, se puede constatar a continuación.

```
T1118a = Worksheets("Simulacion").Range("D10").Value
```

```
T1118b = Worksheets("Simulacion").Range("D11").Value
```

```
If (T1118a >= 40 Or T1118a < 5) And (T1118b >= 40 Or T1118b < 5) Then  
MsgBox ("ERROR.VUELVA A INGRESAR. La altura de los tanques de  
almacenamiento de agua están fuera del rango permitido (0-40 ftH2O)")  
Else...
```

Caso contrario, si las alturas de agua de los tanques de almacenamiento estuvieran entre 5 y 39 ftH₂O, se ejecutan dos condiciones. La primera es de dar el valor de cero para un nuevo ingreso, a las celdas que controlan el haber ingresado correctamente, por ejemplo la celda F437 de la hoja de cálculo "Simulacion" es una de estas celdas, y como podemos ver a continuación, a esta se le asigna dicho valor.

```
Worksheets("Simulacion").Range("F437").Value = 0
```

³⁵ La altura de los tanques de almacenamiento de agua de formación es 40 ft.

Y la segunda condición, es mediante el método Activate, ir a la siguiente hoja de Excel, la cual va a ser la hoja principal donde se encuentran los resultados, esto se puede constatar en la siguiente codificación.

```
Worksheets("Resultados").Activate
```

```
End If
```

```
End If
```

```
End If
```

```
End Sub
```

El tipo de codificación para los botones de comando con nombre de control <I**REGRESO** , es la que se muestra a continuación, la misma que es la codificación del botón para la simulación de SPF.

```
Private Sub regreso2_Click()
```

```
Worksheets("Ingreso Media Presion").Activate
```

```
End Sub
```

Este botón hace regresar a la hoja anterior de ingreso mediante el método Activate. La hoja anterior es la de ingreso del estado de las bombas de media presión.

El tipo de codificación para los botones de comando con nombre de control <I **INICIO DE INGRESO** , es la que se muestra a continuación.

```
Private Sub inicio_Click()
```

```
Worksheets("Ingreso Fluidos").pespecifico.Text = 60.1
```

```
Worksheets("Ingreso Fluidos").visco.Text = 0.00000335
```

```
Worksheets("Ingreso Fluidos").Activate
```

```
End Sub
```

Este botón hace regresar a la hoja de ingreso de las propiedades del fluido de trabajo mediante el método Activate, y además que asigna a los objetos que representan el valor del peso específico y la viscosidad cinemática, el valor de 60.1 lbf / ft³ y 0.00000335 ft² / seg, respectivamente. Estos valores son los que el programa arroja por defecto.

El estado de las bombas de baja presión también se lo realizó mediante casillas de verificación, las mismas que dan el valor de uno a la celda de la hoja de cálculo, para cuando las bombas estén encendidas, y cero para cuando estén apagadas. A continuación se presenta la codificación para el caso de la bomba de baja presión de SPF P-2123A.

Private Sub onp2123a_Click()

```
If onp2123a.Value = False Then  
Worksheets("Simulacion").Range("I41").Value = 0  
End If  
If onp2123a.Value = True Then  
Worksheets("Simulacion").Range("I41").Value = 1  
End If
```

End Sub

Estas casillas de verificación, tienen como evento a Click.

3.3.3.1.5 Codificación del sistema de resultados (SALIDAS)

Los resultados de la simulación de las facilidades de NPF y SPF, se presentaron en hojas de Excel, una hoja llamada "Resultados" para la facilidad de producción, una hoja para cada Well Pad y que lleva el nombre de cada uno de estos, una hoja donde se presenta un esquema general de la facilidad y que lleva de nombre "Esquema General", y una hoja donde se presenta un resumen de todos los resultados y cuyo nombre es "Resumen Resultados".

En cada una de estas hojas de resultados, se presentaron las bombas que componen el sistema de inyección de agua con su respectiva presión de succión (en PSI), presión de descarga (en PSI) y caudal (en BPD, barriles por día).

La forma de comunicarse entre cada hoja de resultados es mediante un botón de comando, que contienen la siguiente codificación.

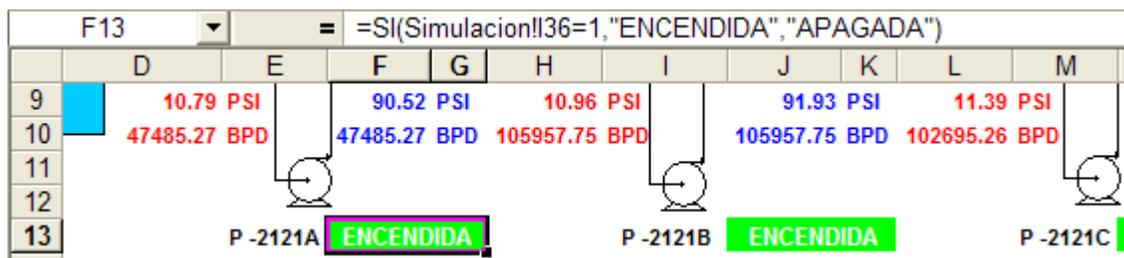
Private Sub nombre_botoncomando_Evento()

Worksheets("Nombre_hoja").Activate

End Sub

Mediante el método Activate, se puede ir a la hoja que se desee.

Para ³⁶dibujar lo que representa la tubería, se utilizó las herramientas de dibujo de Excel. Se aplicó la función SI de Excel, de tres formas diferentes. La primera fue para indicar el estado de las bombas y pozos inyectores, esto se puede constatar con un ejemplo a continuación.



En este ejemplo tenemos parte de la hoja de Excel llamada "Resultados", donde se encuentran los SALIDAS de las bombas de media y baja presión que se encuentran en las facilidades, en este caso podemos ver que la celda F13 representa el estado de la bomba de baja presión de SPF P-2121A. En la barra de fórmulas podemos observar que dice lo siguiente

$$F13 = SI(Simulacion!I36=1, "ENCENDIDA", "APAGADA")$$

³⁶ Los dibujos de tanques, cabezales de pozos, bombas, y válvulas se importaron del programa Visio a Excel.

, lo cual quiere decir que si la celda I36 de la hoja de cálculo “Simulacion” es igual a uno, entonces aparecerá en la celda F13 la palabra ENCENDIDA, caso contrario, si dicha celda no es igual a uno, aparecerá en la celda F13 la palabra APAGADA; a continuación se presenta parte de la hoja de cálculo “Simulación”, donde se presenta a la celda I36 que contiene el valor ingresado a través de las casillas de verificación y de la forma antes vista, uno si se encuentra la bomba encendida, y cero si se encuentra la bomba apagada.

	H	I	J
35		Encendida (1) o Apagada (0)	
36	P-2121 A	1	
37	P-2121 B	1	
38	P-2121 C	1	
39	P-2121 D	1	
40	P-2121 F	1	
41	P-2123 A	0	

La segunda forma que fue utilizada la función SI de Excel, fue para dar el valor de cero al caudal, cuando la presión en el punto de análisis fuera cero, esto se puede constatar con un ejemplo a continuación.

A24 =SI(A23=0,0,Simulacion!AP411/(Simulacion!\$F\$4*0.00006499))

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
20											
21			WIP								
22					P -2119H	ENCENDIDA			P -2119F	ENCENDIDA	
23			1222.51 PSI								
24			160000.00 BPD						IRO A -DAIMI B	1215.83 PSI	

La celda A24 de la hoja de Excel “Resultados”, contiene el caudal en barriles por día que se esta enviando hacia el Well Pad llamado Wip. En la barra de fórmulas podemos ver que si la celda A23 de esta misma hoja de Excel que representa la presión a la que se está enviando el fluido hacia el Wip, tiene un valor igual de cero, entonces la celda A24 tendrá un valor de cero; caso contrario, esta celda tendrá el valor de la celda AP411 de la hoja de cálculo “Simulación” en barriles por día utilizando la Ecuación 3.45. Los puntos en

donde se utiliza esta función SI para este propósito, es en la salida de las tuberías que conectan las facilidades con los Well Pads.

La tercera forma que fue utilizada la función SI de Excel, fue para indicar al usuario de que con la presión que existe en un determinado punto, las ³⁷bridas que se encuentran es este sufrirán ruptura o fuga de fluido, esto se puede constatar con un ejemplo a continuación.

WELL PAD		POZO	PRESIÓN DE INYECCIÓN PSI	CAUDAL BPD	
WIP - NPF	NPF1		3100.00	30000.00	=SI(E29>=3600,"PELIGRO. Con esta presión existirá ruptura o fuga de fluido en las bridas", "")
WIP - NPF	NPF2		3100.00	30000.00	
TIVACUNO	TIVACUNO A2		1400.00	19748.00	
BOGI	BOGI A2		1800.00	14057.00	
BOGI	BOGI A3		1793.61	21315.00	
BOGI	BOGI A4		1800.00	14057.00	

Aquí podemos ver que el mensaje “PELIGRO. Con esta presión existirá ruptura o fuga de fluido en las bridas”, se emitirá si se dan los siguientes valores:

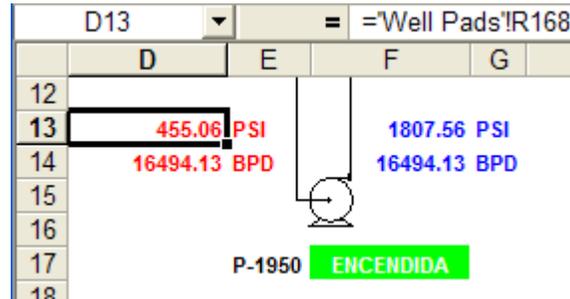
- Si la presión en las bridas que componen la línea que transporta fluido desde los tanques de almacenamiento hasta la descarga de las bombas booster, es mayor a 360 PSI.
- Si la presión en las bridas que componen la línea que transporta fluido desde la succión de las bombas de media presión hasta la succión de las bombas de inyección, es mayor a 1440 PSI.
- Si la presión en las bridas que componen la línea que transporta fluido desde la descarga de las bombas de alta presión hasta la inyección del fluido en el cabezal del pozo, es mayor a 3600 PSI.

Caso contrario la celda quedará vacía, como es el caso del ejemplo.

Los valores de los SALIDAS que se muestran en las hojas de resultados, son los que se calcularon en las hojas de cálculo respectivas, y que fueron

³⁷ La presión a la que pueden trabajar las bridas, se obtuvo de la norma B16.4

asignadas en la barra de fórmulas, esto se puede constatar con un ejemplo a continuación.

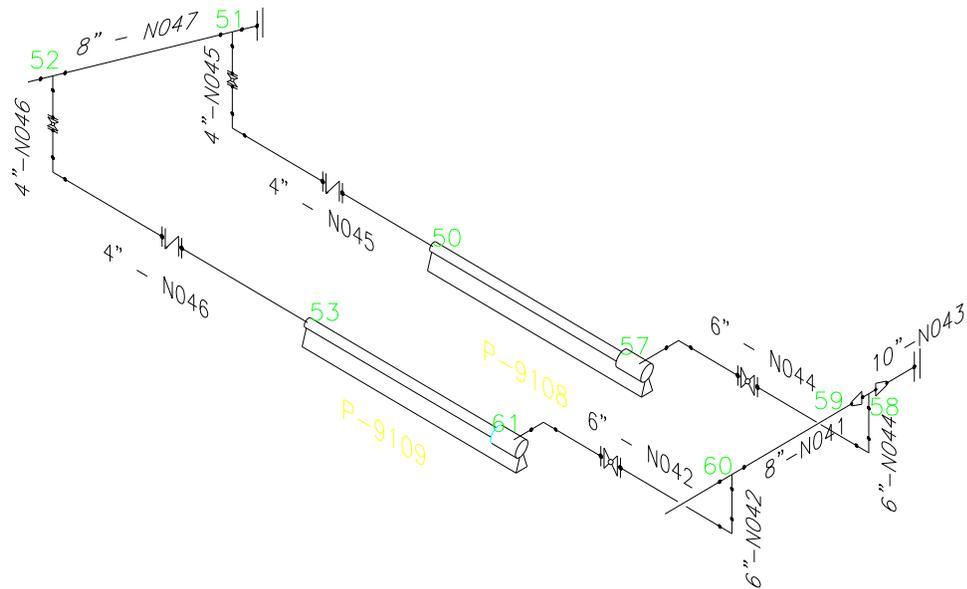


La celda D13 de la hoja de resultados “Bogi”, representa la presión de succión de la bomba P-1950, como vemos en la barra de fórmulas, la celda D13 es igual a la celda R168 de la hoja de cálculo “Well Pads”, cuya celda contiene el valor de presión de succión de dicha bomba calculada de la forma antes vista.

3.3.3.1.6 Codificación para SOLVER

Como ya se dijo se cálculo el sistema de inyección de agua, se hizo de atrás hacia adelante, es decir desde la presión y caudal del cabezal de inyección del pozo ingresado, hasta obtener la altura de los tanques de almacenamiento de agua.

El SOLVER ayudó a determinar el caudal o rapidez de flujo que debe pasar por una determinada tubería, esto es en el caso de que partan de un mismo nodo diferentes tuberías y lleguen estas a otro nodo en común. Esto se puede explicar mejor con un ejemplo, para el caso de Tivacuno se presenta la siguiente gráfica.



Aquí podemos ver, que del nodo 52 se divide parte de la rapidez de flujo hacia el trayecto del tramo 52-53 y 61-60, y la otra parte de la rapidez de flujo se divide hacia el trayecto del tramo 52-51, 51-50, 57-58, 58-59, y 59-60. La rapidez de flujo que llega al nodo 52 es el que proviene del pozo Tivacuno A2, y que fue ingresado por el usuario, esto se puede constatar en los planos que se adjuntan en los anexos. En esta gráfica podemos observar que el flujo que sale del nodo 52 se divide en dos trayectos y llega al nodo 60. La presión que llegue tanto por los dos trayectos al nodo 60 debe ser exactamente la misma, es por ello que la rapidez de flujo que va por el trayecto de la bomba P-9109 va ser distinto que la rapidez de flujo que va por el trayecto de la bomba P-9108, pues existe mayores accesorios y pérdidas de presión por el trayecto de la bomba P-9108. Con la ayuda de SOLVER se obtuvo la rapidez de flujo para cada uno de estos trayectos.

A continuación se presenta parte de la hoja de Excel donde se encuentra como se determinaron dichos flujos.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
137	Tramo		52-51	51-50	57-58	58-59	59-60	52-53	61-60
138	velocidad	ft/seg	1.84	7.36	3.272	1.178	1.840	7.34573	3.26477
139	reynolds		366229.29	732458.58	488305.72	292983.43	366229.29	730918.41	487278.94
140	factor de fricción		0.0161557	0.017114	0.016375	0.01618	0.0161557	0.0171152	0.0163778
141	Perdidas menores	PSI	0.06183984	0.88792	0.22243	0.016432	0.033128483	1.412071	0.221517276
142	Perdidas mayores	PSI	0.00537322	0.4124906	0.0515	0.0002420	0.005162507	0.489632431	0.049225911
143	Perdidas Totales	PSI	0.06721306	1.30040895	0.27396059	0.01667372	0.03829099	1.90170334	0.27074319
144	Presión diferencia de altura		1.0544	1.0544					
145	Rapidez de flujo	lb/seg	38.607	38.526					
146			m1	m2					
147					77.134				
148	Tramo		52-60	52-60					
149	Perdidas	PSI	0.64219014	1.11809					
150									
151	Presión Bomba	PSI	1057.74	1058.21					
152	Presión de entrada	PSI	1411.05	1411.05					
153									
154	Presiones	PSI	353.95	353.95					
155	P52-60=P-52-60	PSI	0.00						
156		PSI	0.0000						
157									
158	Rapidez de flujo total	lb/seg	77.13369345						

Para determinar estos flujos, se colocaron todos los tramos que intervienen en el análisis. Se crearon algunas funciones dentro de un módulo llamado “Caudal”, estas funciones son las siguientes: función velocidad, función número de Reynolds, y función factor de fricción, las cuales hacen y calculan exactamente lo mismo que las funciones del módulo “Funciones”, pero lo que cambia es el nombre de las funciones, para este módulo las funciones se llamaron VelocidadM, reynoldsM, y ffricciónM. Además también se crearon las funciones que calculan las pérdidas menores y las pérdidas mayores.

La función pérdidas mayores, como su nombre lo indica, ésta calcula las pérdidas mayores en tubería en base a la Ecuación 3.18; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

Function Pmayores(longitud, diam, vel, f, pesoescf)

$$P_{\text{mayores}} = (f * (\text{longitud} * 3.28084) * (\text{vel}^2) / (2 * (\text{diam} / 12) * 32)) * (\text{pesoescf} / 144)$$

End Function

Esta a diferencia de la función pérdidas_mayores del módulo funciones, no se calcula el factor de fricción f dentro de la función, al contrario a f se lo ingresa.

En esta función la variable longitud, diam, vel, f, pesoescf representan la longitud de tubería del tramo, el diámetro, la velocidad del fluido, el factor de fricción, y el peso específico del fluido, respectivamente, estos son valores que se requieren para que dicha función pueda ser calculada. La longitud es multiplicada por 3.28084 que es el factor de convergencia de metros a pies y al igual que casos anteriores el diámetro es dividido para el factor de convergencia 12, toda la expresión que representa las pérdidas mayores es multiplicada por el peso específico del fluido y dividido para 144, este factor hace que la unidad de pérdidas mayores sea en PSI.

La función pérdidas menores, ésta calcula parte de las pérdidas menores en tubería en base a la Ecuación 3.20; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

Function Pmenores(v, pesoesp)

Pmenores = (v ^ 2 / (2 * 32)) * (pesoesp / 144)

End Function

Pero en esta función no se tomó en cuenta a los accesorios, pues estos se los multiplica a esta función, ya que los factores de pérdidas por accesorios dependen de la rapidez de flujo. En esta función la variable v, pesoescf representan la velocidad del fluido, el peso específico del fluido, respectivamente, estos son valores que se requieren para que dicha función pueda ser calculada, al igual que en la anterior función toda la expresión es multiplicada por el peso específico del fluido y dividido para 144, este factor hace que la unidad de pérdidas menores este en PSI.

El diámetro y la longitud de la tubería, el área de la sección, y la rugosidad relativa del material, que son factores para el cálculo de las funciones vistas, fueron tomadas de las celdas de las hojas de cálculo.

La forma de calcular la velocidad, factor de fricción, número de Reynolds, etc. para estos tramos es mediante las funciones. Como podemos ver en la hoja de Excel las celdas C145 y D145, contienen el valor de la rapidez de flujo de los dos trayectos, D145 tiene el flujo del trayecto de la bomba P-9109, y C145 tiene el flujo para el trayecto de la bomba P-9108. A estas dos celdas se les da ³⁸valores iniciales, las cuales van a cambiar cuando se ejecute el SOLVER a los valores que deben ser para que la presión en el nodo 60 sea la misma.

La presión de entrada es la presión en el nodo 52, la cual va a ser la misma para los dos trayectos; la presión de la bomba, es la presión que entrega dicha bomba para el caudal que se requiere que trabaje dicha bomba; las pérdidas, es la suma de las pérdidas en cada tramo del trayecto; y finalmente presiones, es la presión final del trayecto, es decir la presión en el nodo 60, estas celdas presiones es igual a las pérdidas en el trayecto, más la presión de la bomba, menos la presión de entrada. La celda C156, es la diferencia entre las presiones que llegan al nodo 60 por cada trayecto, esta diferencia debe ser cero pues las presiones que llegan al mismo nodo deben ser las mismas. La celda E147 contiene el valor de rapidez de flujo en el nodo 52, este flujo se va a dividir en dos partes para cada trayecto.

El SOLVER se ejecutará mediante los botones de comando con nombre de control SIGUIENTE |> para cuando se desea encontrar la rapidez de flujo para los trayectos de las bombas del sistema, menos para el caso del ingreso del estado de las bombas de baja presión donde se ejecutará con el botón con nombre de control INGRESAR; y mediante los botones de comando con nombre de control INGRESAR para cuando se desea encontrar la rapidez de flujo para los trayectos de los pozos. A continuación se presenta el tipo de codificación para la ejecución del SOLVER mediante un botón de comando, para el caso del trayecto 52-60 en Tivacuno.

Dim ep9108 As Integer

Dim ep9109 As Integer

³⁸ Estos son valores de partida que se les da a las celdas.

ep9108 = Worksheets("Well Pads").Range("I265").Value

ep9109 = Worksheets("Well Pads").Range("I266").Value

If Not (ep9108 = 0 And ep9109 = 0) **Then**

Dim tiv As Variant, c1 As Double

tiv = Worksheets("Ingreso Tivacuno").Range("E147").Value

c1 = tiv / 2

Worksheets("Ingreso Tivacuno").Range("C145").Value = c1

Worksheets("Ingreso Tivacuno").Range("D145").Value = c1

Worksheets("Ingreso Tivacuno").Activate

SolverReset

SolverOptions precision:=0.001

SolverOK setCell:=Range("C156"), _

maxMinVal:=3, _

byChange:=Range("C145:D145")

SolverAdd cellRef:=Range("C158"), _

relation:=2, _

formulaText:=tiv

SolverSolve userFinish:=True

End If

Lo primero que se hace es crear dos variables de tipo Integer , llamadas en este caso ep9108 y ep9109, las cuales se les asigna el valor del estado de las bombas de inyección de Tivacuno, P-9108, y P9109. Si estas dos variables no son igual a cero, es decir las bombas no se encuentran apagadas (esto se hace para que el SOLVER no se ejecute e intente encontrar una solución que no existirá), entonces la variable tipo Double c1 toma el valor de la variable tipo

Variant *tiv* dividida para 2, la variable *tiv* representa la rapidez de flujo que se encuentra en el nodo 52, y *c1* representa el valor inicial que se da a las celdas C145 y D145, es por eso que se le divide al flujo en el nodo 52 para 2. Este valor inicial ayudará a que el SOLVER tenga un punto de partida para encontrar la solución, y además a que ayudará a encontrar mas rápido una solución. Mediante el método *Activate*, se va hacia la hoja donde se encuentra este análisis, que para todos los casos va ser en la hoja de ingreso de los trayectos que se estén analizando.

SolverReset, restablece todas las restricciones y selecciones de celda del cuadro de diálogo *Parámetros de Solver* y restaura los valores predeterminados de todos los valores de *Opciones de Solver*. Equivale a hacer clic en *Restablecer todo* del cuadro de diálogo *Parámetros de Solver*. Se llama automáticamente a la función *SolverReset* después de cada llamada a la función *SolverLoad*.

SolverOptions, permite especificar opciones avanzadas del modelo de Solver. Esta función y sus argumentos corresponden a las opciones del cuadro de diálogo *Opciones de Solver*. Aquí se utilizó la opción *precisión*, para darle una precisión de 0.001 al sistema de solución.

SolverOK, define un modelo básico de Solver. Equivale a hacer clic en *Solver* del menú *Herramientas* y, a continuación, especificar opciones del cuadro de diálogo *Parámetros de Solver*.

SetCell, es un tipo de dato *Variant*. Hace referencia a una celda de la hoja de cálculo activa. Corresponde al cuadro *Celda objetivo* del cuadro de diálogo *Parámetros de Solver*.

MaxMinVal, es un tipo de dato *Variant*. Corresponde a las opciones *Máx*, *Mín* y *Valor de* del cuadro de diálogo *Parámetros de Solver*.

Tabla 3.27: Propiedades para el Valor de la Celda Objetivo

Max, Min, Val	Especifica
1	Maximizar
2	Minimizar
3	Coincidencia con un valor específico

ValueOf, es un tipo de dato Variant. Si *MaxMinVal* tiene el valor 3, deberá especificar el valor con el cual coincide la celda objetivo. El valor que se desea que la celda objetivo tenga es cero. La celda objetivo es la diferencia entre las presiones que coinciden en un mismo nodo. En este caso la celda objetivo es C156.

ByChange, es un tipo de dato Variant. La celda o rango de celdas que se cambiarán a fin de obtener el resultado deseado en la celda objetivo. Para este análisis las celdas que se desea cambiar son las celdas que tienen el valor de la rapidez de flujo. Corresponde al cuadro Cambiando las celdas del cuadro de diálogo Parámetros de Solver.

SolverAdd, agrega una restricción al problema actual. Equivale a hacer clic en Solver del menú Herramientas y, a continuación, hacer clic en Agregar en el cuadro de diálogo Parámetros de Solver.

CellRef, es un tipo de dato Variant. Una referencia a una celda o un rango de celdas que constituye el lado izquierdo de una restricción.

Relation, es un tipo de dato Integer. La relación aritmética entre los lados izquierdo y derecho de la restricción. Si elige 4 o 5, *CellRef* debe hacer referencia a celdas ajustables (cambiantes) y no debe especificarse *FormulaText*.

FormulaText, es un tipo de dato Variant. El lado derecho de la restricción. Después de agregar las restricciones, podrá manipularlas con las funciones *SolverChange* y *SolverDelete*, que sirven para cambiar o borrar una restricción, respectivamente.

Tabla 3.28: Relación aritmética para restricciones

Relación	Relación Aritmética
1	<=
2	=
3	>=
4	Las celdas a las que hace referencia CellRef deben tener valores finales enteros.
5	Las celdas a las que hace referencia CellRef deben tener el valor final 0 (cero) o 1.

La restricción que se va a agregar para todos los análisis, es que la suma de las celdas que contienen el rapidez de flujo para cada trayecto, debe ser igual a la rapidez de flujo en el nodo de partida del fluido.

SolverSolve, inicia una ejecución de Solver para buscar soluciones. Equivale a hacer clic en Resolver del cuadro de diálogo Parámetros de Solver.

UserFinish, es un tipo de dato Variant. *True* para que se devuelvan los resultados sin mostrar el cuadro de diálogo Resultados de Solver. *False* o se omite para que se devuelvan los resultados y se muestre el cuadro de diálogo Resultados de Solver.

Luego de determinar mediante SOLVER cual es la rapidez de flujo para cada trayecto, estos valores se los asigna a cada celda de las hojas de cálculo que les corresponde. Para el caso del trayecto 52-60 de Tivacuno, con la siguiente codificación se realizó esta asignación.

Dim p9108 As Integer

Dim p9109 As Integer

Dim Q5253 As Double, Q5152 As Double, Q1 As Double,

Dim Q2 As Double, Qt As Double

p9108 = Worksheets("Well Pads").Range("I265").Value

```
p9109 = Worksheets("Well Pads").Range("I266").Value
Q1 = Worksheets("Ingreso Tivacuno").Range("C145").Value
Q2 = Worksheets("Ingreso Tivacuno").Range("D145").Value
Qt = Worksheets("Well Pads").Range("F282").Value
```

```
If p9108 = 1 And p9109 = 1 Then
```

```
Q5253 = Q2
```

```
Q5152 = Q1
```

```
End If
```

```
If p9108 = 1 And p9109 = 0 Then
```

```
Q5253 = 0
```

```
Q5152 = Qt
```

```
End If
```

```
If p9108 = 0 And p9109 = 1 Then
```

```
Q5253 = Qt
```

```
Q5152 = 0
```

```
End If
```

```
If p9108 = 0 And p9109 = 0 Then
```

```
Q5253 = 0
```

```
Q5152 = 0
```

```
End If
```

```
Worksheets("Well Pads").Range("E282").Value = Q5253
```

```
Worksheets("Well Pads").Range("D282").Value = Q5152
```

Se crea dos variables de tipo Integer, que representan el estado de las bombas P-9108 y P-9109, uno cuando están encendidas, y cero cuando están apagadas. Además se crean 5 variables de tipo Double, a las variables Q1 y Q2 se les asigna el valor de las celdas C145 y D145, respectivamente, cuyas

celdas tienen el valor calculado por SOLVER de la rapidez de flujo para cada trayecto. La variable Q_t se le asigna el valor de la rapidez de flujo en el nodo 52. Mediante la estructura condicional if, se les asigna a las variables Q5253 y Q5152 los valores de las variables Q1, Q2 y Q_t , según sea el caso, es decir según las bombas que se encuentran operando. Las variables Q5253 y Q5152, representan las celdas de la rapidez de flujo para cada trayecto en la hoja de cálculo.

3.3.3.2 Codificación del simulador del sistema de producción de crudo del Bloque 16

Se realizó un archivo del programa de simulación del sistema de producción de crudo tanto de NPF, como de SPF.

3.3.3.2.1 ENTRADAS y SALIDAS de la simulación

Los datos que se ingresan en el programa son los siguientes:

1. Presión (PSI) en el cabezal de producción de crudo del pozo.
2. Caudal (BPD) que produce cada pozo.
3. Grado API del crudo que produce el pozo.
4. Estado de pozos de producción de crudo (ABIERTO/ CERRADO)

Los resultados que arroja el programa de simulación del sistema de producción de crudo son los siguientes:

1. Presión del crudo (PSI) a la salida de cada Well Pad.
2. Caudal total de crudo (BPD) a la salida de cada Well Pad.
3. Presión del crudo (PSI) a la llegada de las facilidades de producción.
4. Caudal total de crudo (BPD) que llega a las facilidades de producción.

3.3.3.2.2 Codificación de Funciones

Al igual que en la simulación del sistema de inyección de agua de formación, en esta simulación también se comenzó realizando las funciones de varias operaciones que ayudan al análisis de pérdidas en fluidos. Estas funciones se las codificó en un módulo del Editor Visual Basic de Excel llamado "Funciones", para que sea utilizada en la hoja de cálculo cuando se las necesite.

Para el análisis de pérdidas del sistema de producción de crudo, se utilizaron algunas de las funciones de la simulación del sistema de inyección de agua, las cuales son las siguientes: función área, función velocidad, función Reynolds, función factor de fricción, función pérdidas mayores, función pérdidas menores, función presión hidrostática, función válvula de bola, función expansión, función reducción menor y función reducción.

Además de estas funciones se codificaron tres funciones más, las cuales son las siguientes:

La gravedad específica, ésta como su nombre lo indica, calcula la gravedad específica del fluido. Para que esta función pueda ser calculada necesita el valor del grado API del crudo del pozo de producción; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

Function gravedad_especifica(gAPI)

gravedad_especifica = 141.5 / (131.5 + gAPI)

End Function

Esta función calcula la gravedad específica del crudo en base a la Ecuación 3.36.

La función peso específico, ésta calcula el peso específico del crudo en base a la Ecuación 3.38; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

Function peso_especifico(sg)

Dim pESP As Double

pESP = 62.4

peso_especifico = sg * pESP

End Function

En esta función la variable sg representa la gravedad específica del crudo, la variable tipo Double pESP representa el peso específico del agua a 60°F, dicha variable adquiere el valor de 62.4 (lbf / ft³). Estas dos variables se requieren para que dicha función pueda ser calculada. La unidad en la que fue calculada el peso específico es lbf / ft³ (libras fuerza por pie al cubo).

La función densidad, ésta calcula la densidad del crudo en base a la Ecuación 3.40; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

Function densidad(sg)

Dim Den As Double

Den = 1.94

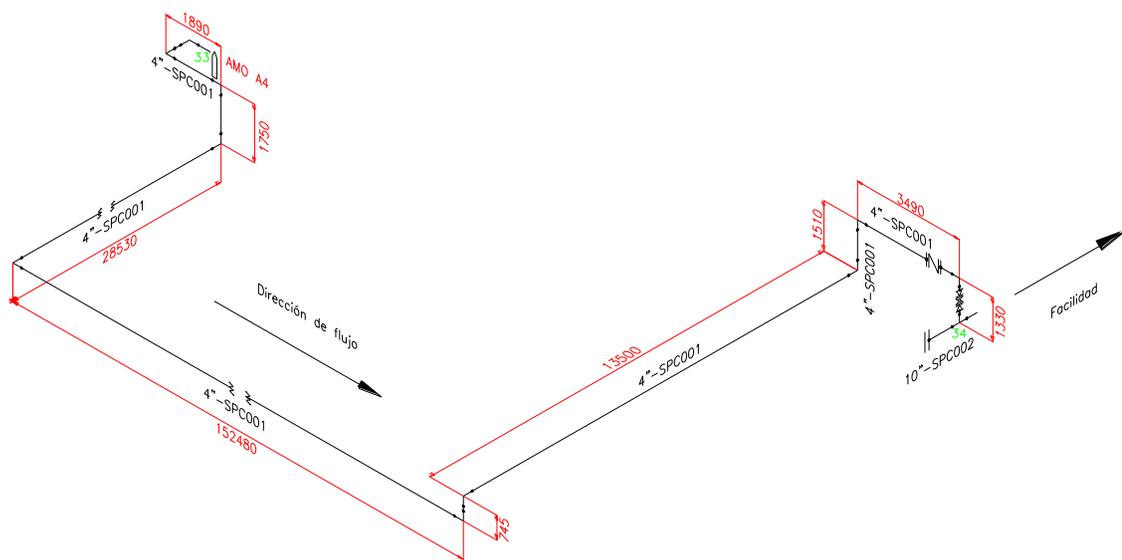
densidad = sg * Den

End Function

En esta función la variable sg representa la gravedad específica del crudo, la variable tipo Double Den representa la densidad del agua a 60°F, dicha variable adquiere el valor de 1.94 (Slugs / ft³). Estas dos variables se requieren para que dicha función pueda ser calculada. La unidad en la que fue calculada la densidad es Slugs / ft³ (Slugs por pie al cubo).

3.3.3.2.3 Cálculos realizados

Aquí también, para el estudio de pérdidas de energía se utilizó el sistema de análisis por tramos, en el cual a la geografía del bloque en estudio se la dividió en varios tramos. Por ejemplo, cojamos el tramo 33-34 de la simulación del sistema de producción de crudo del pozo Amo A4, la gráfica de este tramo se presenta a continuación.



Esta línea representa a la tubería que viene desde el cabezal del pozo Amo A4 hasta el manifold del Well Pad. Este tramo tiene un diámetro de tubería de 4 in y contiene una válvula check de 4 in, una válvula de bola 4 x 3 in, 7 codos de 90° cuadrangular de 4 in y 4 codos de 90° Standard de 4 in.

Para comenzar el estudio del tramo se debe tener en cuenta las propiedades del crudo que circula por dicho trayecto. Estas propiedades se las determinó con las funciones gravedad específica, peso específico y densidad. A

continuación se presenta parte de la hoja de cálculo donde se puede constatar lo antes mencionado.

	A	B	C
68			AMO A4
69			
70	Pozo Abierto(1) o Cerrado(0):		1
71	Ingrese el grado API del pozo	"	17
72	Ingrese el caudal del pozo	BPD	12862
73	Ingrese la presión del pozo	PSI	370
74	Crudo		
75	Gravedad Específica		0.952861953
76	Peso específico	lbf/ft ³	59.45858586
77	Densidad	slugs/ft ³	1.848552189
78	Viscosidad Cinemática	ft ² /seg	8.11446E-05

Aquí podemos observar que la celda C75 utiliza la función `gravedad_especifica`, la cual requiere del valor de grado API del crudo ingresado para el pozo, dicho valor fue asignado a la celda C71. En la barra de fórmulas se puede observar que si el estado del pozo Amo A4, representado por la celda C70 es CERRADO (es decir cero), la gravedad específica es cero, caso contrario la gravedad específica es el valor que calcule la función `gravedad_especifica`.

Para el caso del peso específico y densidad, de igual manera se utilizaron las funciones que ayudan a calcular dichos parámetros, a estas propiedades del crudo se les asigno el valor de cero en el caso de que el pozo se encuentre CERRADO. La viscosidad cinemática fue calculada por medio de la Ecuación 3.42 y al igual que las demás propiedades del crudo fue asignado el valor de cero en caso de que el pozo se encuentre CERRADO.

La hoja de cálculo para el sistema de pérdidas de este tramo se presenta a continuación:

	A	B	C
21	Tramo		33-34
22	PERDIDAS MAYORES		
23	Diámetro de tubería, D	in	4
24	Longitud de tubería, L	m	205.23
25	Material de tubería		Ac.Comercial
26	Rugosidad Relativa de tubería, ϵ/D		0.000446
27	Rapidez de flujo, w	lb/seg	49.70
28	Area de tubería, A	ft ²	0.087266463
29	Velocidad, V	ft/seg	9.578724233
30	Número de Reynolds, Re		39348.38143
31	Factor de fricción, fr		0.023435404
32	Perdidas mayores de Presión	PSI	28.02251071
33			
34	PERDIDAS MENORES		
35	Válvula Check 4"	PSI	1.38726648
36	Válvula Bola 4"x3"	PSI	0.833766885
37	Codo 90° cuadrangular de 4"	PSI	5.386775084
38	Codo 90° standard de 4"	PSI	1.775859918
50	Perdidas menores de Presión	PSI	9.383668368
51			
52	PERDIDAS DE PRESIÓN	PSI	37.40617908
53	PRESIÓN HIDROSTÁTICA		
54	Diferencial de Altura	m	0.825
55	Presión Hidrostática +	PSI	1.11761207
56	Presión Hidrostática -	PSI	
57			
58	PRESIÓN EN EL CABEZAL DEL POZO	PSI	450
59	CAUDAL EN EL CABEZAL DEL POZO	BPD	12862
60	POZO		A4
61			
62	PRESIÓN DE ENTRADA	PSI	450
63	PRESIÓN DE SALIDA	PSI	413.711433

Para el análisis de este tramo , se utilizaron algunas de las funciones de módulo ya enunciadas como son, la función del área de la sección, la función de la velocidad promedio de fluido, la función del número de Reynolds, la función del factor de fricción, la función de las pérdidas mayores de presión, la función de las pérdidas menores de presión y la función de pérdidas por diferencia de altura o energía potencial. A partir de los datos del tramo en análisis como el diámetro en pulgadas, la longitud en metros, el material y su rugosidad relativa (extraída de la Tabla 3.2), se comienza a calcular los parámetros de interés. Uno de los ENTRADAS es el caudal en BPD del crudo

en cada pozo, para este tramo el caudal es de 12862 BPD, utilizando la Ecuación 3.45 se llega a obtener la rapidez de flujo, w , en lb/seg, de la siguiente manera:

$$w = 12862 \text{ BPD} * 58.4585 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} * 0.00006499 \frac{1}{\text{BPD} * \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}} \left[\frac{\text{lb}}{\text{seg}} \right]$$

$$w = 49.70 \frac{\text{lb}}{\text{seg}}$$

El área se calcula mediante la función del área, a la cuál se le ingresa el diámetro de la tubería, con esta área, la rapidez de flujo del tramo y el peso específico del fluido mediante la función que lleva su nombre se calcula la velocidad promedio del fluido para con ella, el diámetro y la viscosidad cinemática del fluido poder calcular el número de Reynolds mediante su función. El factor de fricción es calculado mediante la función `factor_friccion`, la cual necesita los valores de rugosidad relativa del material de la tubería y el número de Reynolds, todo lo anteriormente calculado para este tramo sirve para determinar las pérdidas mayores de presión que para este tramo es de 28.0225 PSI. Estos cálculos se pueden ver a continuación.

$$D = 4 \text{ in}$$

$$\text{Area de tubería} = \frac{\pi \left(\frac{4}{12} \right)^2}{4} = 0.0872664 \text{ ft}^2$$

$$\text{Rapidez de flujo} = 49.70 \text{ lb/seg}$$

$$\text{Velocidad} = \frac{\text{Rapidez de flujo}}{\text{Area} * \gamma}$$

$$\text{Velocidad} = \frac{49.70 \text{ lb/seg}}{0.0872664 \text{ ft}^2 * 59.4586 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}$$

$$\text{Velocidad} = 9.5787 \frac{\text{ft}}{\text{seg}}$$

$$\nu = 8.1144E - 5 \frac{ft^2}{seg}$$

$$\text{Número de Reynolds} = \frac{\text{Velocidad} * \frac{D}{12}}{\nu}$$

$$\text{Número de Reynolds} = \frac{9.5787 \frac{ft}{seg} * \frac{4}{12} ft}{8.1144E - 5 \frac{ft^2}{seg}} = 39348.3814$$

$$f = 8 * \left[\left(\frac{8}{N_R} \right)^{12} + \frac{1}{(A + B)^{1.5}} \right]^{\frac{1}{12}}$$

donde :

$$A = \left\{ 2.457 * \ln \left[\frac{1}{\left(\frac{7}{N_R} \right)^{0.9} + \left(0.27 \frac{\varepsilon}{D} \right)} \right] \right\}^{16}$$

$$B = \left(\frac{37.53}{N_R} \right)^{16}$$

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0.000446$$

$$A = \left\{ 2.457 * \ln \left[\frac{1}{\left(\frac{7}{39348.3814} \right)^{0.9} + (0.27 * 0.000446)} \right] \right\}^{16} = 1.8439E20$$

$$B = \left(\frac{37.53}{39348.3814} \right)^{16} = 4.69059E - 49$$

$$f = 8 * \left[\left(\frac{8}{39348.3814} \right)^{12} + \frac{1}{(1.8439E20 + 4.69059E - 49)^{1.5}} \right]^{\frac{1}{12}} = 0.023435$$

$$h_{L-Mayores} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

$$h_{L-Mayores} = 0.023435 * \frac{205.23 * 3.28084 \text{ ft}}{\frac{4}{12} \text{ ft}} * \frac{\left(9.5787 \frac{\text{ft}}{\text{seg}}\right)^2}{2 * 32 \frac{\text{ft}}{\text{seg}^2}} * \frac{59.4586 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}{144 \frac{\text{in}^2}{\text{ft}^2}} = 28.0225 \text{ PSI}$$

Los accesorios que existen en este tramo producen pérdidas, la misma que es calculada mediante la función de pérdidas menores de presión, la cual involucra la cantidad del tipo de accesorio, el factor de pérdidas menores k y el peso específico del fluido.

La válvula check produce la siguiente pérdida de presión:

$$h_{L-menores} = K \cdot \left(\frac{v^2}{2g}\right)$$

$$h_{L-menores} = \left((100 * 0.023435) * \frac{\left(9.5787 \frac{\text{ft}}{\text{seg}}\right)^2}{2 * 32 \frac{\text{ft}}{\text{seg}^2}} * \frac{59.4586 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}}{144 \frac{\text{in}^2}{\text{ft}^2}} \right) = 1.3872 \text{ PSI}$$

La válvula de bola 4"x3", produce la siguiente pérdida de presión.

$$\beta = \frac{d1}{d2}$$

$$\beta = \frac{3}{4} = 0.75$$

$$K_{\text{válvula bola 4"x3"}} = \frac{3 * 0.023435 + 0.5 \cdot \sqrt{\sin \frac{90}{2} (1 - 0.75^2) + (1 - 0.75^2)^2}}{0.75^4}$$

$$K_{\text{válvula bola 4"x3"}} = 1.4085$$

$$h_{L-menores} = K \cdot \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

$$h_{L-menores} = \left(1.4085 * \frac{\left(9.5787 \frac{ft}{seg} \right)^2}{2 * 32 \frac{ft}{seg^2}} * \frac{59.4586 \frac{lb}{ft^3}}{144 \frac{in^2}{ft^2}} \right) = 0.8337 PSI$$

Los 7 codos de 90° cuadrangular producen la siguiente pérdida de presión.

$$h_{L-menores} = K \cdot \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

$$h_{L-menores} = 7 * \left(1.3 * \frac{\left(9.5787 \frac{ft}{seg} \right)^2}{2 * 32 \frac{ft}{seg^2}} * \frac{59.4586 \frac{lb}{ft^3}}{144 \frac{in^2}{ft^2}} \right) = 5.387 PSI$$

Los 4 codos de 90° Standard producen la siguiente pérdida de presión.

$$h_{L-menores} = K \cdot \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

$$h_{L-menores} = 4 * \left(0.75 * \frac{\left(9.5787 \frac{ft}{seg} \right)^2}{2 * 32 \frac{ft}{seg^2}} * \frac{59.4586 \frac{lb}{ft^3}}{144 \frac{in^2}{ft^2}} \right) = 1.7759 PSI$$

La perdida menor total de presión es la siguiente:

Pérdidas Menores de Presión = \sum de todas las pérdidas que produce cada accesorio

$$\text{Pérdidas Menores de Presión} = 1.3872 + 0.8337 + 5.387 + 1.7759 = 9.3837 PSI$$

, las pérdidas de presión son la suma de las pérdidas mayores con las pérdidas menores, lo que nos da 37.4062PSI.

$$\text{Pérdidas de Presión} = \text{Pérdidas Mayores Presión} + \text{Pérdidas Menores Presión}$$

$$\text{Pérdidas de Presión} = (28.0225 + 9.3837)PSI = 37.4062PSI$$

Existe una diferencia de altura de 0.825 m la cual en este caso produce una presión positiva, esta es calculada mediante la función presión hidrostática, la misma que necesita los valores de la diferencia de altura y el peso específico del fluido, esta presión para este tramo nos da 1.1176 PSI.

$$z = 0.825m$$

$$PE = w \cdot z$$

$$PE = (0.825 * 3.28084) ft * \frac{59.4586 \frac{lb}{ft^3}}{144in^2} = 1.1176PSI$$

Los cálculos se realizaron desde el pozo de cada Well Pad hasta la facilidad de producción. En este caso la presión de entrada es la presión en el punto 33 del tramo, la misma que es la presión en el cabezal del pozo Amo A4 y que fue ingresado por el usuario, esta presión es 450 PSI, y la presión de salida es la presión en el punto 34 del tramo, la misma que es la presión de entrada menos las pérdidas que se producen en el tramo, más o menos dependiendo el caso la presión hidrostática.

$$\text{Presión de Salida} = \text{Presión de Entrada} - \text{Perdidas de Presión} \pm \text{Presión hidrostática}$$

3.46

$$\text{Presión de Salida} = (450 - 37.4062 + 1.1176)PSI = 413.711PSI$$

En cada Well Pad de producción de crudo existen uno o más pozos, cada pozo puede producir un crudo de diferente ³⁹grado API.

La variación de 14 a 17 grados API en el crudo no es muy significativa al instante de obtener sus propiedades, como gravedad específica, peso específico, densidad y viscosidad cinemática, es decir es casi la misma. Las propiedades obtenidas de un crudo de 14 grados API con relación a las propiedades obtenidas de un crudo de 17 grados API, produce un error menor al 5%.

En el manifold del Well Pad se mezcla el crudo que produce cada pozo, es por ello que al instante de mezclarse cada fluido de crudo se sacó un promedio del peso específico, y de la viscosidad cinemática entre los dos tipos de fluidos, esto se lo pudo hacer por el poco error que produce obtener las propiedades con un crudo entre 14 y 17 grados API, y porque la temperatura del crudo que produce cada pozo es casi la misma, es decir produce un diferencial de ⁴⁰temperatura pequeño entre cada fluido producido por diferente pozo.

Para poder continuar con la explicación de este proyecto es necesario saber como es la estructura simplificada del sistema de producción de crudo tanto en NPF como SPF, estas gráficas se presentan a continuación, las mismas que contienen los componentes del sistema hasta llegar a cada facilidad.

³⁹ En el Bloque 16 el grado API del crudo que se obtiene de cada uno de sus pozos, oscila de 14 a 17 grados.

⁴⁰ Las temperaturas del crudo que produce cada pozo varia entre 190°F y 203 °F.

Figura 3.12: Estructura simplificada del sistema de producción de crudo de Capiron

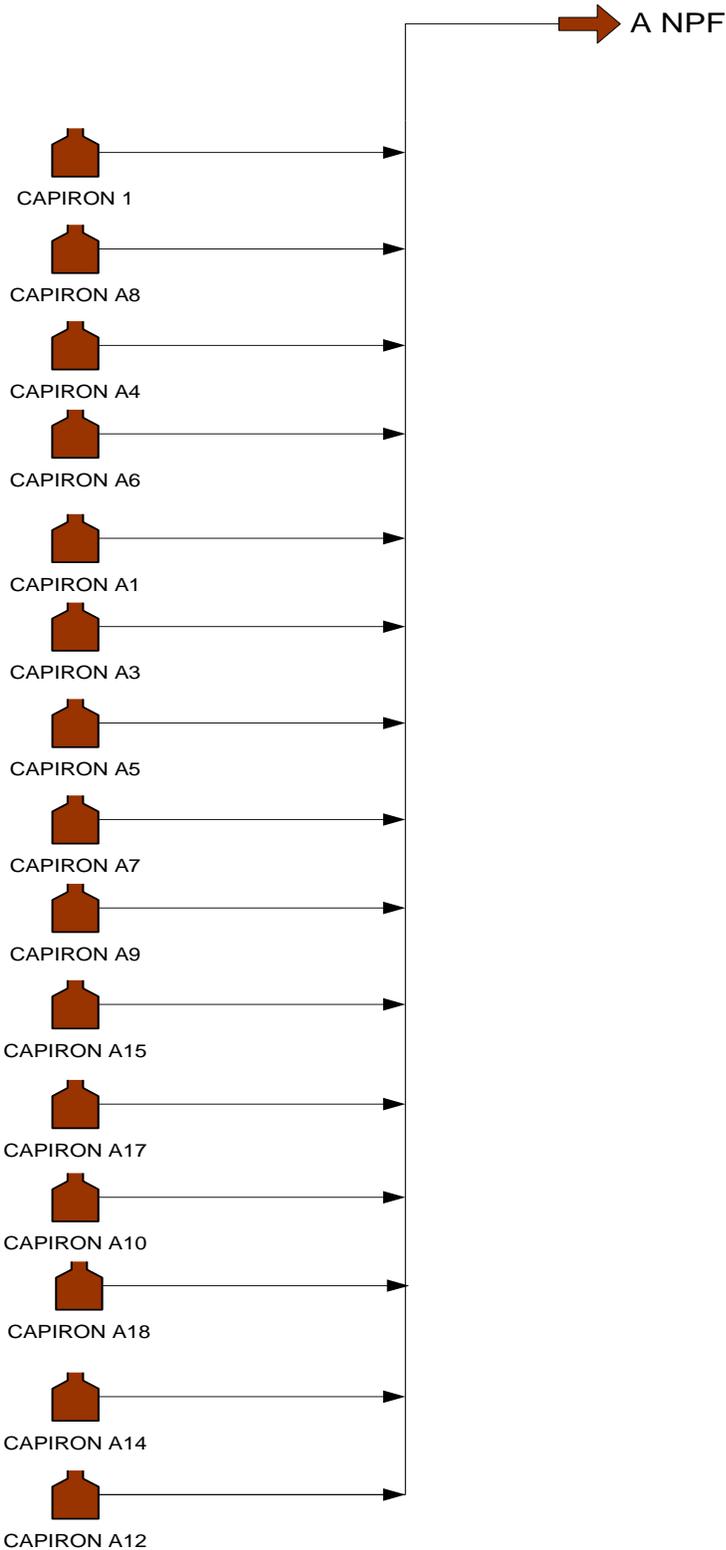


Figura 3.13: Estructura simplificada del sistema de producción de crudo de Amo A, Amo B, Amo C e Iro A

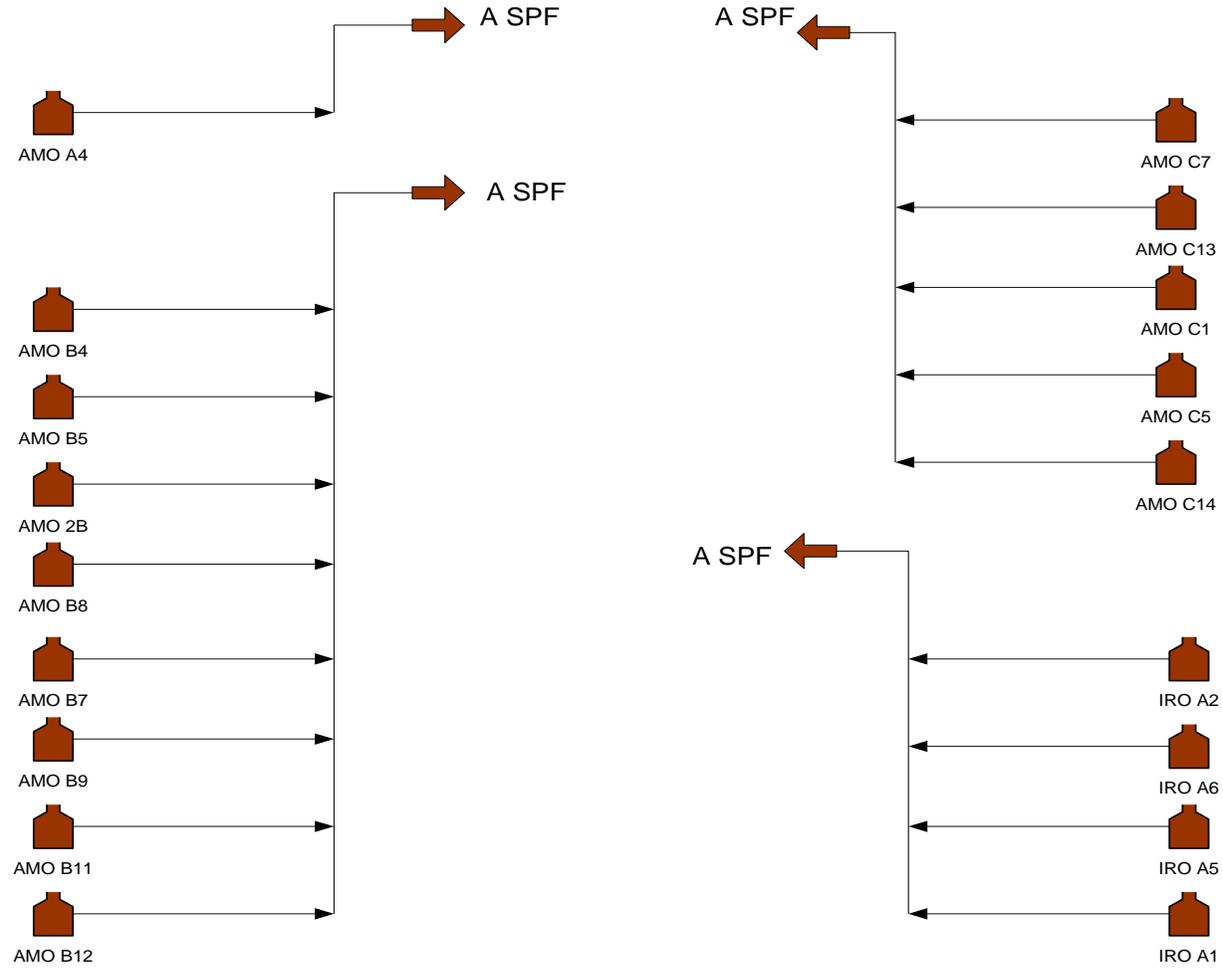


Figura 3.14: Estructura simplificada del sistema de producción de crudo de Iro 1 y Daimi B

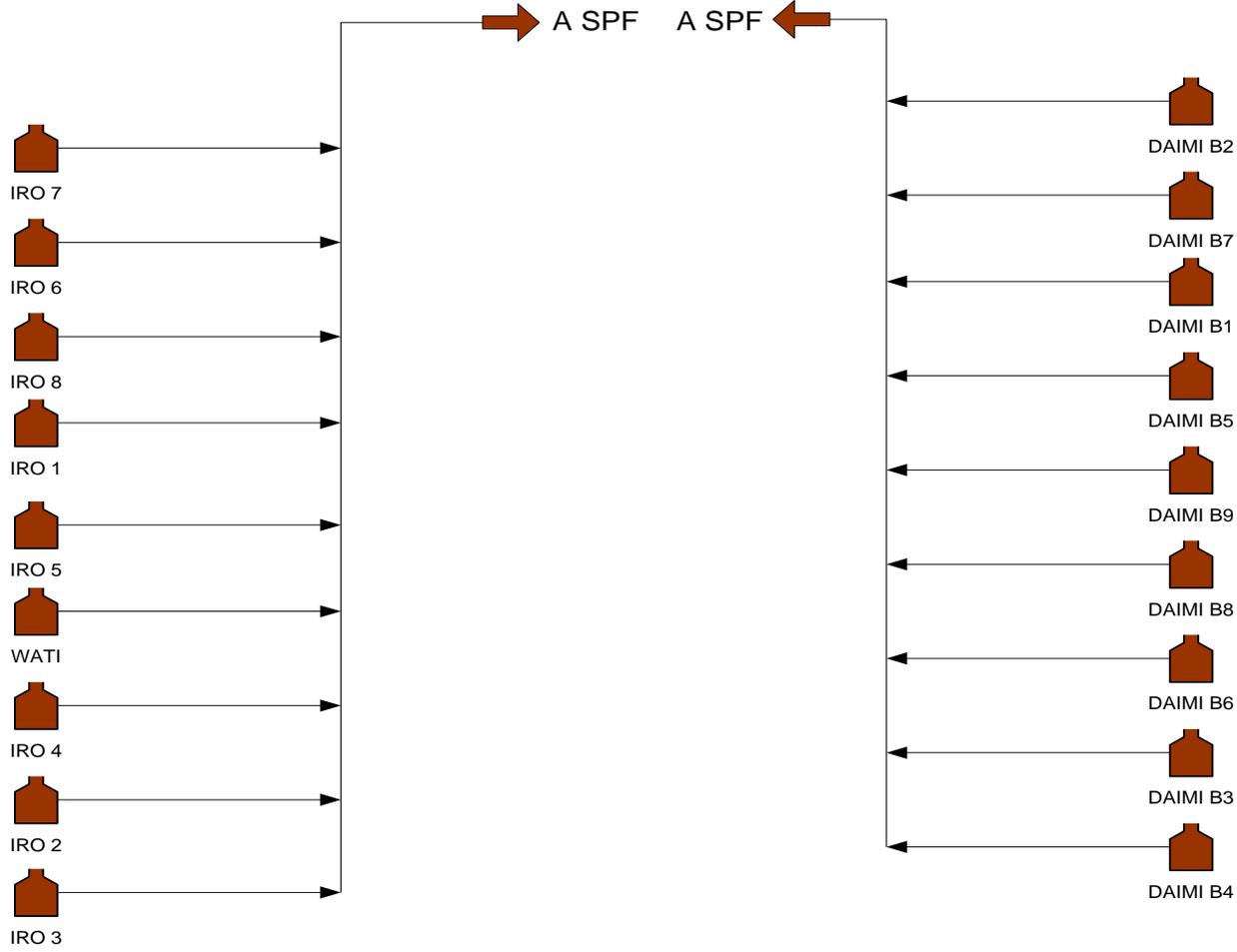


Figura 3.15: Estructura simplificada del sistema de producción de crudo de Ginta A

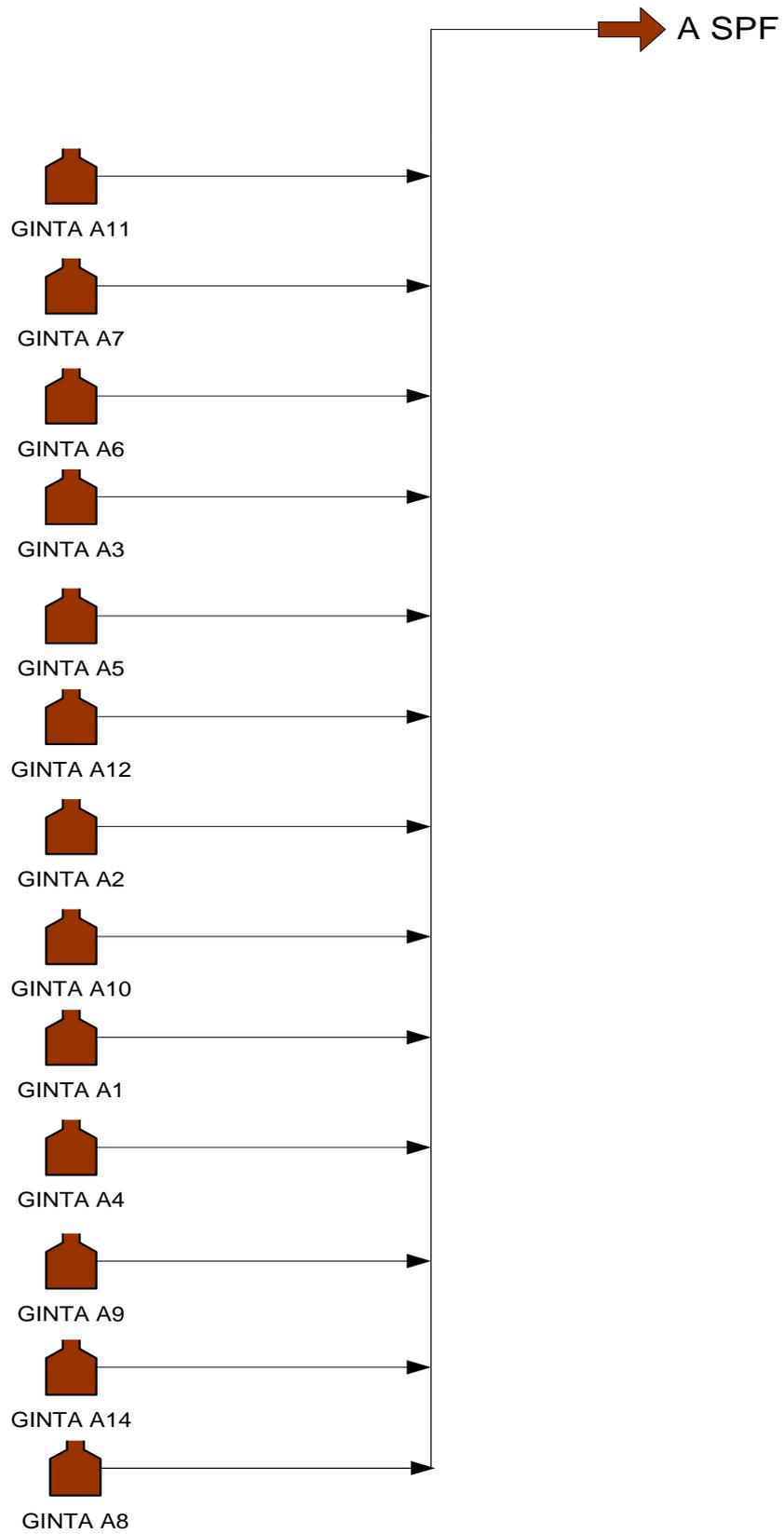
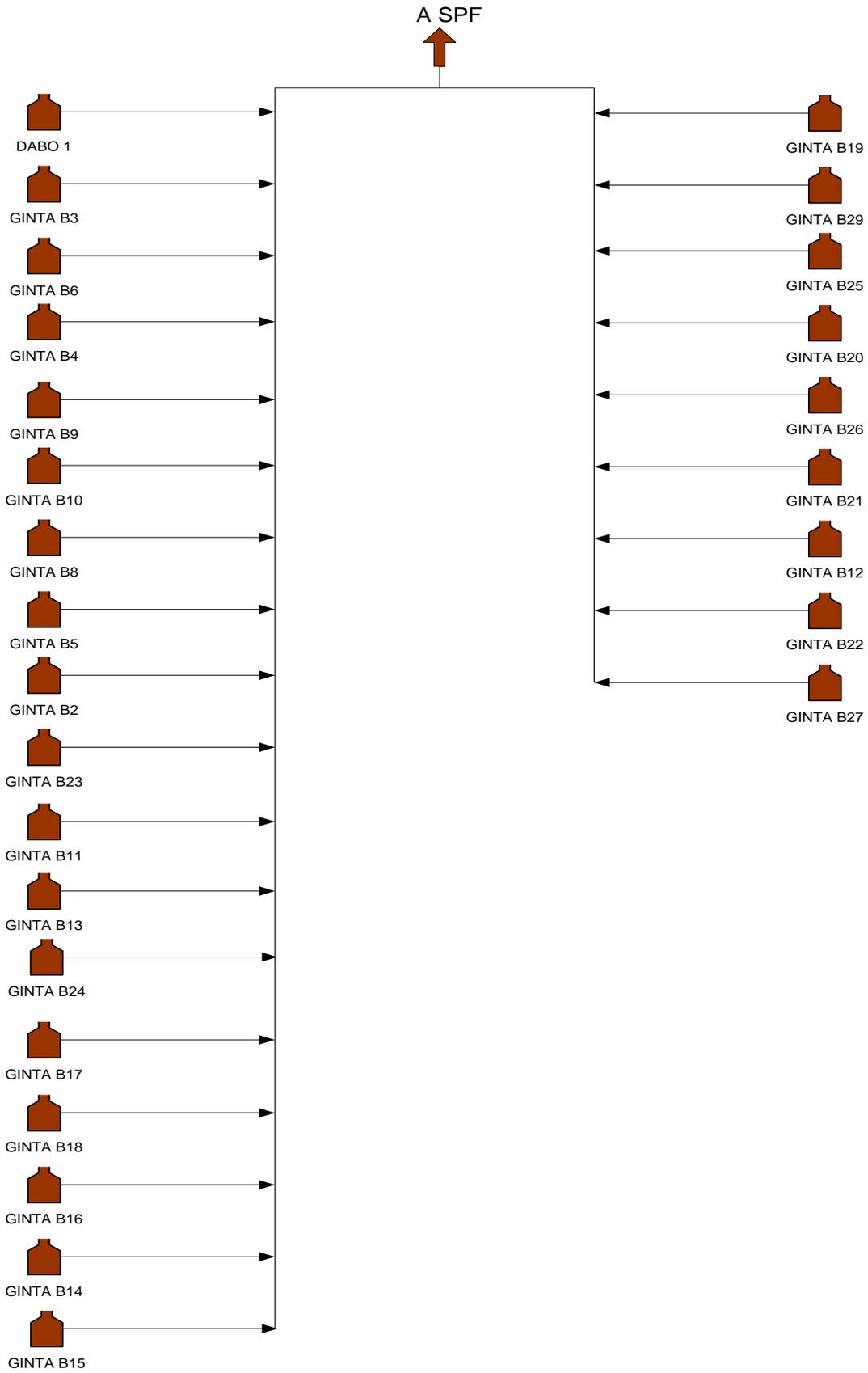


Figura 3.16: Estructura simplificada del sistema de producción de crudo de Ginta B



Toda la geografía del sistema de producción de crudo se dividió en muchos tramos, y se calculó las pérdidas como se ya se explicó. Estos cálculos se los realizó en una hoja de Excel para cada Well Pad de producción, estas llevan el nombre de: “Capiron”, “Amo A”, “Amo B”, “Amo C”, “Iro A”, “Iro 1”, “Daimi B”, “Ginta A” y “Ginta B”.

Todo el sistema de inyección de agua, se calculó desde cada Well Pad de producción hasta las facilidades, esto quiere decir desde la presión, caudal y grado API del crudo en el cabezal del pozo que se ingreso, se llega a obtener la presión y caudal de salida de cada Well Pad y la presión y caudal que llega a las facilidades de producción. Mediante SOLVER se llegó a determinar la presión en el cabezal del pozo de producción, es decir a la presión que debería trabajar cada pozo para que todo el sistema este completamente balanceado, es decir que todas las presiones de las tuberías que coinciden en un punto sean las mismas. La forma de utilización de este SOLVER se verá más adelante.

3.3.3.2.4 Codificación de sistema de ingreso (ENTRADAS)

Después de haber visto como se realizaron los cálculos del sistema de producción de crudo, es necesario saber como se ingresaron sus ENTRADAS.

Al abrir este programa de simulación, se abre una hoja de inicio (llamada como su nombre lo indica), a continuación podemos observarla.

SIMULACION

DEL

SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CRUDO

REPSOL-YPF

INICIO >

El botón de comando con texto de control “INICIO I>” y con nombre de control “inicio”, le permite al usuario ir a la siguiente hoja de Excel llamada “Ingreso Capiron”, para poder ingresar los valores de presión en el cabezal de producción, caudal y grado API del crudo de los pozos productores. Este botón tiene la siguiente tipo de codificación.

Private Sub inicio_Click()

```
Worksheets("Ingreso Capiron").capiron1_presion.Text = 350
Worksheets("Ingreso Capiron").capiron1_caudal.Text = 518
Worksheets("Ingreso Capiron").capiron1_api.Text = 17
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA1_presion.Text = 340
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA1_caudal.Text = 13607
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA1_api.Text = 17
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA3_presion.Text = 370
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA3_caudal.Text = 14708
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA3_api.Text = 17
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA4_presion.Text = 380
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA4_caudal.Text = 15298
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA4_api.Text = 17
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA5_presion.Text = 390
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA5_caudal.Text = 11978
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA5_api.Text = 17
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA6_presion.Text = 385
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA6_caudal.Text = 11087
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA6_api.Text = 16
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA7_presion.Text = 382
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA7_caudal.Text = 11538
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA7_api.Text = 17
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA8_presion.Text = 367
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA8_caudal.Text = 10285
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA8_api.Text = 17
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA9_presion.Text = 369
```

Worksheets("Ingreso Capiron").capironA9_caudal.Text = 13488
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA9_api.Text = 17
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA10_presion.Text = 353
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA10_caudal.Text = 711
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA10_api.Text = 17
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA12_presion.Text = 375
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA12_caudal.Text = 14510
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA12_api.Text = 16
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA14_presion.Text = 354
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA14_caudal.Text = 797
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA14_api.Text = 17
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA15_presion.Text = 359
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA15_caudal.Text = 1141
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA15_api.Text = 17
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA17_presion.Text = 368
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA17_caudal.Text = 10950
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA17_api.Text = 17
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA18_presion.Text = 357
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA18_caudal.Text = 1415
Worksheets("Ingreso Capiron").capironA18_api.Text = 17
Worksheets("Ingreso Capiron").oncapiron1.Value = True
Worksheets("Ingreso Capiron").oncapironA1.Value = True
Worksheets("Ingreso Capiron").oncapironA3.Value = True
Worksheets("Ingreso Capiron").oncapironA4.Value = True
Worksheets("Ingreso Capiron").oncapironA5.Value = True
Worksheets("Ingreso Capiron").oncapironA6.Value = True
Worksheets("Ingreso Capiron").oncapironA7.Value = True
Worksheets("Ingreso Capiron").oncapironA8.Value = True
Worksheets("Ingreso Capiron").oncapironA9.Value = True
Worksheets("Ingreso Capiron").oncapironA10.Value = True
Worksheets("Ingreso Capiron").oncapironA12.Value = True
Worksheets("Ingreso Capiron").oncapironA14.Value = True
Worksheets("Ingreso Capiron").oncapironA15.Value = True

Worksheets("Ingreso Capiron").oncapironA17.Value = True

Worksheets("Ingreso Capiron").oncapironA18.Value = True

Worksheets("Ingreso Capiron").Activate

End Sub

Mediante el método Activate, se puede ir a la siguiente hoja de Excel; mediante la propiedad text, se les asigna valores de presión, caudal y grado API a los pozos de producción del Well Pad y mediante la propiedad True se le da el estado de ABIERTO al pozo, estos valores el programa los da por ⁴¹defecto al usuario, para que él tenga en bien trabajar con ellos o no.

1. Ingreso de ENTRADAS en pozos de producción del Well Pad.

En cada pozo de producción de un Well Pad se ingresa la presión en el cabezal, el caudal, el grado API del crudo y el estado del pozo. Este ingreso se lo hace en una hoja de Excel para cada Well Pad, las mismas que se llaman: "Ingreso Capiron", "Ingreso Amo A", "Ingreso Amo B", "Ingreso Amo C", "Ingreso Iro A", "Ingreso Iro 1", "Ingreso Daimi B", "Ingreso Ginta A", e "Ingreso Ginta B".

La forma de ingreso es la misma para cada Well Pad, lo único que cambia es el número de pozos de producción que este tenga.

Se utilizó cuadros de texto para el ingreso, de la presión en el cabezal, del caudal del crudo y del grado API del crudo, y además se utilizó casillas de verificación para el estado de dichos pozos.

Existen 3 botones de comando en cada una de las hojas de Excel, el primer botón sirve para el ingreso de los ENTRADAS, el segundo sirve para continuar a la siguiente hoja de Excel, y el tercer botón sirve para regresar a la hoja de Excel anterior, por si el usuario desea cambiar algunos valores.

⁴¹ Los valores que el programa arroja por defecto, son los valores a la que esta trabajando el sistema de producción del crudo del Bloque 16.

El texto de control para el botón comando de ingreso de ENTRADAS es, INGRESAR, y el nombre de control es ingreso guión bajo y el nombre del Well Pad que corresponde, por ejemplo el nombre de control para el Well Pad de producción Amo A es ingreso_amoA.

El texto de control para el botón de comando que permite continuar a la siguiente hoja de Excel, es SIGUIENTE I>, excepto para la hoja de Excel “Ingreso Ginta B”, que el nombre es RESULTADOS I>, pues como su nombre lo indica la siguiente hoja de Excel es la de resultados. El nombre de control para estos botones de comando es siguiente guión bajo y el nombre del Well Pad y resultados guión bajo ginta B (resultados_gintaB), respectivamente, por ejemplo para el caso del Well Pad Iro 1 el nombre de control es siguiente_iro1.

Finalmente el texto de control para el botón de comando que permite regresar a la hoja de Excel anterior es, <I REGRESO, y el nombre de control es regreso guión bajo y el nombre del Well Pad, por ejemplo el nombre de control para el Well Pad Daimi B es regreso_daimiB.

Además de estos tres botones de comando, existen otros dos tipos de botones en el ingreso de Capiron, Ginta A, y Ginta B, estos permiten continuar o volver en el ingreso de ENTRADAS de dichos Well Pads. El texto de control para estos dos botones es, CONTINUAR V, e INICIO DE INGRESO, el nombre de control es continuar guión bajo y el nombre del Well Pad, e inicio guión bajo y el nombre del Well Pad, respectivamente, por ejemplo para el caso del Well Pad Capiron el nombre de control de dichos botones será continuar_capiron, e inicio_capiron.

El nombre de control de los cuadros de texto donde se ingresan la presión del cabezal, el caudal y grado API del crudo es, el nombre del pozo que corresponde al ingreso, guión bajo, y presión ,caudal o API, según cual sea el cuadro de texto de ingreso, es decir el cuadro de texto de ingreso del valor de presión, caudal o grado API del crudo. Por ejemplo el cuadro de texto de ingreso del caudal del crudo del pozo Amo 2B es, amo2B_caudal, el cuadro de texto de ingreso de la presión en el cabezal del pozo Ginta A12 es,

gintaA12_presion, el cuadro de texto de ingreso del grado API del crudo del pozo Daimi B1 es, daimiB1_api.

Para el caso de las casillas de verificación que representan el estado de los pozos, el nombre de control es, el nombre del pozo antecedido de las letras on, por ejemplo el nombre de control del pozo Amo A4 es, onamoA4.

La estructura de ingreso de la presión en el cabezal de pozo, el caudal y grado API del crudo, se da a conocer a continuación para el caso del Well Pad Iro A.

Pozos de Producción de Crudo

IRO A

	Ingrese la presión y el caudal en el cabezal del pozo de producción:		Ingrese el grado API del crudo:		ABIERTO O CERRADO	
IRO A1:	<input type="text" value="420"/>	PSI	<input type="text" value="2046"/>	BPD	<input type="text" value="16"/> °API	<input checked="" type="checkbox"/>
IRO A2:	<input type="text" value="424"/>	PSI	<input type="text" value="6804"/>	BPD	<input type="text" value="15"/> °API	<input checked="" type="checkbox"/>
IRO A5:	<input type="text" value="441"/>	PSI	<input type="text" value="13495"/>	BPD	<input type="text" value="15"/> °API	<input checked="" type="checkbox"/>
IRO A6:	<input type="text" value="448"/>	PSI	<input type="text" value="13970"/>	BPD	<input type="text" value="15"/> °API	<input checked="" type="checkbox"/>

El tipo de codificación para los botones de comando con nombre de control **INGRESAR**, es la que se muestra a continuación, la misma que es la codificación del botón para el Well Pad de Iro A.

Private Sub ingreso_iroA_Click()

If Not (oniroA1.Value = False And oniroA2.Value = False And oniroA5.Value = False And oniroA6.Value = False) **Then**

Dim bj As Double, alt As Double

bj = 300

alt = 450

If oniroA1.Value = True **Then**

If ((Len(iroA1_presion.Value) = 0) Or iroA1_presion.Value < 100 Or iroA1_presion.Value < bj Or iroA1_presion.Value > alt) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente la presión del Iro A1")

Worksheets("Iro A").Range("C437").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("C73").Value = iroA1_presion.Value

Worksheets("Iro A").Range("C437").Value = 1

End If

If ((Len(iroA1_caudal.Value) = 0) Or iroA1_caudal.Value <= 0) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente el caudal del Iro A1")

Worksheets("Iro A").Range("C438").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("C72").Value = iroA1_caudal.Value

Worksheets("Iro A").Range("C438").Value = 1

End If

If ((Len(iroA1_api.Value) = 0) Or iroA1_api.Value < 14 Or iroA1_api > 17)

Then

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente el grado API del crudo para el pozo Iro A1")

Worksheets("Iro A").Range("C439").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("C71").Value = iroA1_api.Value

Worksheets("Iro A").Range("C439").Value = 1

End If

End If

If oniroA1.Value = False **Then**

Worksheets("Iro A").Range("C73").Value = 0

Worksheets("Iro A").Range("C72").Value = 0

Worksheets("Iro A").Range("C71").Value = 0

Worksheets("Iro A").Range("C437").Value = 1

Worksheets("Iro A").Range("C438").Value = 1

Worksheets("Iro A").Range("C439").Value = 1

End If

If oniroA2.Value = True **Then**

If ((Len(iroA2_presion.Value) = 0) Or iroA2_presion.Value < 100 Or
iroA2_presion.Value < bj Or iroA2_presion.Value > alt) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente la presión del Iro A2")

Worksheets("Iro A").Range("C440").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("E73").Value = iroA2_presion.Value

Worksheets("Iro A").Range("C440").Value = 1

End If

If ((Len(iroA2_caudal.Value) = 0) Or iroA2_caudal.Value <= 0) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente el caudal del Iro A2")

Worksheets("Iro A").Range("C441").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("E72").Value = iroA2_caudal.Value

Worksheets("Iro A").Range("C441").Value = 1

End If

If ((Len(iroA2_api.Value) = 0) Or iroA2_api.Value < 14 Or iroA2_api > 17)

Then

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente el grado API del crudo para el
pozo Iro A2")

Worksheets("Iro A").Range("C442").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("E71").Value = iroA2_api.Value

Worksheets("Iro A").Range("C442").Value = 1

End If

End If

If oniroA2.Value = False **Then**

Worksheets("Iro A").Range("E73").Value = 0

Worksheets("Iro A").Range("E72").Value = 0

Worksheets("Iro A").Range("E71").Value = 0

Worksheets("Iro A").Range("C440").Value = 1

Worksheets("Iro A").Range("C441").Value = 1

Worksheets("Iro A").Range("C442").Value = 1

End If

If oniroA5.Value = True **Then**

If ((Len(iroA5_presion.Value) = 0) Or iroA5_presion.Value < 100 Or
iroA5_presion.Value < bj Or iroA5_presion.Value > alt) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente la presión del Iro A5")

Worksheets("Iro A").Range("C443").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("G73").Value = iroA5_presion.Value

Worksheets("Iro A").Range("C443").Value = 1

End If

If ((Len(iroA5_caudal.Value) = 0) Or iroA5_caudal.Value <= 0) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente el caudal del Iro A5")

Worksheets("Iro A").Range("C444").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("G72").Value = iroA5_caudal.Value

Worksheets("Iro A").Range("C444").Value = 1

End If

If ((Len(iroA5_api.Value) = 0) Or iroA5_api.Value < 14 Or iroA5_api > 17)

Then

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente el grado API del crudo para el pozo Iro A5")

Worksheets("Iro A").Range("C445").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("G71").Value = iroA5_api.Value

Worksheets("Iro A").Range("C445").Value = 1

End If

End If

If oniroA5.Value = False **Then**

Worksheets("Iro A").Range("G73").Value = 0

Worksheets("Iro A").Range("G72").Value = 0

Worksheets("Iro A").Range("G71").Value = 0

Worksheets("Iro A").Range("C443").Value = 1

Worksheets("Iro A").Range("C444").Value = 1

Worksheets("Iro A").Range("C445").Value = 1

End If

If oniroA6.Value = True **Then**

If ((Len(iroA6_presion.Value) = 0) Or iroA6_presion.Value < 100 Or iroA6_presion.Value < bj Or iroA6_presion.Value > alt) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente la presión del Iro A6")

Worksheets("Iro A").Range("C446").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("I73").Value = iroA6_presion.Value

Worksheets("Iro A").Range("C446").Value = 1

End If

If ((Len(iroA6_caudal.Value) = 0) Or iroA6_caudal.Value <= 0) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente el caudal del Iro A6")

Worksheets("Iro A").Range("C447").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("I72").Value = iroA6_caudal.Value

Worksheets("Iro A").Range("C447").Value = 1

End If

If ((Len(iroA6_api.Value) = 0) Or iroA6_api.Value < 14 Or iroA6_api > 17)

Then

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente el grado API del crudo para el pozo Iro A6")

Worksheets("Iro A").Range("C448").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("I71").Value = iroA6_api.Value

Worksheets("Iro A").Range("C448").Value = 1

End If

End If

If oniroA6.Value = False **Then**

Worksheets("Iro A").Range("I73").Value = 0

Worksheets("Iro A").Range("I72").Value = 0

Worksheets("Iro A").Range("I71").Value = 0

Worksheets("Iro A").Range("C446").Value = 1

Worksheets("Iro A").Range("C447").Value = 1

Worksheets("Iro A").Range("C448").Value = 1

End If

If oniroA1.Value = False And (iroA1_presion.Value = True Or iroA1_caudal.Value = True Or iroA1_api.Value = True) **Then**

MsgBox ("ERROR. Esta ingresando un valor en el pozo Iro A1 que esta cerrado")

Worksheets("Iro A").Range("C449").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("C449").Value = 1

End If

If oniroA2.Value = False And (iroA2_presion.Value = True Or iroA2_caudal.Value = True Or iroA2_api.Value = True) **Then**

MsgBox ("ERROR. Esta ingresando un valor en el pozo Iro A2 que esta cerrado")

Worksheets("Iro A").Range("C450").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("C450").Value = 1

End If

If oniroA5.Value = False And (iroA5_presion.Value = True Or iroA5_caudal.Value = True Or iroA5_api.Value = True) **Then**

MsgBox ("ERROR. Esta ingresando un valor en el pozo Iro A5 que esta cerrado")

Worksheets("Iro A").Range("C451").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("C451").Value = 1

End If

If oniroA6.Value = False And (iroA6_presion.Value = True Or iroA6_caudal.Value = True Or iroA6_api.Value = True) **Then**

MsgBox ("ERROR. Esta ingresando un valor en el pozo Iro A6 que esta cerrado")

Worksheets("Iro A").Range("C452").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("C452").Value = 1

End If

End If

End Sub

La estructura de codificación es la misma para cada ingreso de Well Pad, la cual se compone de 4 partes.

La primera parte de la codificación de este botón, es que si no están cerrados todos los pozos del Well Pad, se procede con la ejecución de la codificación que está dentro de esta condición. A continuación se presenta la estructura del tipo de codificación de esta parte.

If Not (oniroA1.Value = False And oniroA2.Value = False And oniroA5.Value = False And oniroA6.Value = False) **Then**

...

End If

La segunda parte, es la de asignar valores de ⁴²300 y 450 a las variables tipo Double bj y alt, respectivamente. Estos valores ayudaran en la validación del ingreso de la presión en el cabezal del pozo.

Dim bj As Double, alt As Double

bj = 300

alt = 450

La tercera parte de la codificación del botón ingresar, corresponde a la de asignar los valores de presión en el cabezal del pozo, de caudal y de grado API del crudo a las celdas en la hoja de cálculo. A continuación se presenta la estructura del tipo de codificación de esta parte.

⁴² Los valores de 300 y 450 PSI, son el rango de presión a la que operan los pozos en el cabezal de producción.

If oniroA6.Value = True **Then**

If ((Len(iroA6_presion.Value) = 0) Or iroA6_presion.Value < 100 Or iroA6_presion.Value < bj Or iroA6_presion.Value > alt) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente la presión del Iro A6")

Worksheets("Iro A").Range("C446").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("I73").Value = iroA6_presion.Value

Worksheets("Iro A").Range("C446").Value = 1

End If

If ((Len(iroA6_caudal.Value) = 0) Or iroA6_caudal.Value <= 0) **Then**

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente el caudal del Iro A6")

Worksheets("Iro A").Range("C447").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("I72").Value = iroA6_caudal.Value

Worksheets("Iro A").Range("C447").Value = 1

End If

If ((Len(iroA6_api.Value) = 0) Or iroA6_api.Value < 14 Or iroA6_api > 17)

Then

MsgBox ("ERROR. Ingrese correctamente el grado API del crudo para el pozo Iro A6")

Worksheets("Iro A").Range("C448").Value = 0

Else

Worksheets("Iro A").Range("I71").Value = iroA6_api.Value

Worksheets("Iro A").Range("C448").Value = 1

End If

End If

Para este ejemplo se tomó el pozo Iro A6; si el pozo está en estado ABIERTO, es decir si el objeto `oniroA6.Value`, que representa a la casilla de verificación del pozo Iro A6, es igual a `True`; entonces se da comienzo al ingreso.

Se hizo un ingreso para presión, otro para caudal, y otro para grado API del crudo; en estos tres se trabajó de la misma manera. Lo primero que se hizo fue validar al valor ingresado de presión, de caudal, y de grado API; por ejemplo en el caso de la presión, el objeto `iroA6_presion.Value`, representa al valor de presión ingresado en el cuadro de texto, si este valor es menor que la variable tipo `Double` `bj`, es decir si es menor que 300, o si este valor es mayor que la variable tipo `Double` `alt`, es decir es mayor que 450, o el cuadro de texto está vacío, aparecerá en la pantalla un mensaje que advierta al usuario que dice "ERROR. Ingrese correctamente la presión del IRO A6 ". Caso contrario si se ingresó correctamente, las celdas de la hoja de cálculo que corresponde a la presión en el cabezal, al caudal y al grado API del crudo, toman el valor que les corresponde, por ejemplo en el caso del caudal, la celda I72 de la hoja de cálculo "Iro A" toma el valor del caudal ingresado en el pozo Iro A6.

Como podemos ver en la codificación existen celdas que toman el valor de uno o cero, estas celdas toman el valor de cero cuando se ha ingresado de forma incorrecta, y toman el valor de uno cuando se ha ingresado correctamente. Estas celdas ayudan en el botón de comando que permite ir hacia la siguiente hoja de Excel; cuando todas las celdas tengan el valor de uno, el botón permitirá ir a la siguiente hoja, caso contrario si alguna celda tiene el valor de cero, significa que se ingresó incorrectamente, y aparece un mensaje que advierte al usuario y no permitirá ir a la siguiente.

En el caso de que el estado del pozo estuviera CERRADO, se da el valor de uno a las celdas que permiten ir a la siguiente hoja de Excel y se le da el valor de cero a las celdas de la hoja de cálculo que corresponden a la presión en el cabezal, al caudal y al grado API del crudo. Esto podemos constatarlo para el caso del pozo Iro A6 a continuación.

```

If oniroA6.Value = False Then
Worksheets("Iro A").Range("I73").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("I72").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("I71").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("C446").Value = 1
Worksheets("Iro A").Range("C447").Value = 1
Worksheets("Iro A").Range("C448").Value = 1
End If

```

El cuarto aspecto, es la de advertir al usuario que se esta ingresando valores de presión, caudal, o grado API, en el pozo que está CERRADO. Este aspecto se verá con mayor detenimiento más adelante.

El tipo de codificación para los botones de comando con nombre de control **SIGUIENTE I>**, o **RESULTADOS I>**, es la que se muestra a continuación, la misma que es la codificación del botón para el Well Pad de Iro A

```

Private Sub siguiente_iroA_Click()

```

```

If (oniroA1.Value = False And oniroA2.Value = False And oniroA5.Value =
False And oniroA6.Value = False) Then
Worksheets("Ingreso Iro 1").Activate
Else

```

```

Dim if1 As Integer, if2 As Integer, if3 As Integer, if4 As Integer, if7 As Integer
Dim if8 As Integer, if9 As Integer, if10 As Integer, if11 As Integer, if12 As
Integer
Dim if13 As Integer, if14 As Integer, if15 As Integer, if16 As Integer
Dim if17 As Double

```

```

if1 = Worksheets("Iro A").Range("C437").Value
if2 = Worksheets("Iro A").Range("C438").Value
if3 = Worksheets("Iro A").Range("C439").Value

```

if4 = Worksheets("Iro A").Range("C440").Value
if5 = Worksheets("Iro A").Range("C441").Value
if6 = Worksheets("Iro A").Range("C442").Value
if7 = Worksheets("Iro A").Range("C443").Value
if8 = Worksheets("Iro A").Range("C444").Value
if9 = Worksheets("Iro A").Range("C445").Value
if10 = Worksheets("Iro A").Range("C446").Value
if11 = Worksheets("Iro A").Range("C447").Value
if12 = Worksheets("Iro A").Range("C448").Value
if13 = Worksheets("Iro A").Range("C449").Value
if14 = Worksheets("Iro A").Range("C450").Value
if15 = Worksheets("Iro A").Range("C451").Value
if16 = Worksheets("Iro A").Range("C452").Value
if17 = Worksheets("Iro A").Range("J61").Value

If if1 = 0 Or if2 = 0 Or if3 = 0 Or if4 = 0 Or if7 = 0 Or if8 = 0 Or if9 = 0 Or if10 = 0 Or if11 = 0 Or if12 = 0 Or if13 = 0 Or if14 = 0 Or if15 = 0 Or if16 = 0 **Then**
MsgBox ("ERROR. Ingrese los valores del Well Pad")

End If

If if1 = 1 And if2 = 1 And if3 = 1 And if4 = 1 And if7 = 1 And if8 = 1 And if9 = 1
And if10 = 1 And if11 = 1 And if12 = 1 And if13 = 1 And if14 = 1 And if15 = 1
And if16 = 1 **Then**

Worksheets("Iro A").Range("C437").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("C438").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("C439").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("C440").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("C441").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("C442").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("C443").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("C444").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("C445").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("C446").Value = 0

Worksheets("Iro A").Range("C447").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("C448").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("C449").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("C450").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("C451").Value = 0
Worksheets("Iro A").Range("C452").Value = 0

procedimiento1

Worksheets("Ingreso Iro 1").iro1_presion.Text = 370
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro1_caudal.Text = 12621
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro1_api.Text = 15
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro2_presion.Text = 362
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro2_caudal.Text = 6884
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro2_api.Text = 16
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro3_presion.Text = 366
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro3_caudal.Text = 10855
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro3_api.Text = 16
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro4_presion.Text = 354
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro4_caudal.Text = 954
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro4_api.Text = 15
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro5_presion.Text = 359
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro5_caudal.Text = 1456
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro5_api.Text = 15
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro6_presion.Text = 371
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro6_caudal.Text = 14812
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro6_api.Text = 16
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro7_presion.Text = 360
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro7_caudal.Text = 2146
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro7_api.Text = 15
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro8_presion.Text = 362
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro8_caudal.Text = 4599
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro8_api.Text = 15

```

Worksheets("Ingreso Iro 1").wati_presion.Text = 367
Worksheets("Ingreso Iro 1").wati_caudal.Text = 5384
Worksheets("Ingreso Iro 1").wati_api.Text = 16
Worksheets("Ingreso Iro 1").oniro1.Value = True
Worksheets("Ingreso Iro 1").oniro2.Value = True
Worksheets("Ingreso Iro 1").oniro3.Value = True
Worksheets("Ingreso Iro 1").oniro4.Value = True
Worksheets("Ingreso Iro 1").oniro5.Value = True
Worksheets("Ingreso Iro 1").oniro6.Value = True
Worksheets("Ingreso Iro 1").oniro7.Value = True
Worksheets("Ingreso Iro 1").oniro8.Value = True
Worksheets("Ingreso Iro 1").onwati.Value = True
If if17 < 100 Then
MsgBox ("ERROR. No existe solución para el sistema planteado")
Else
Worksheets("Ingreso Iro 1").Activate
End If
End If
End If

End Sub.

```

En este botón se comenzó codificando, que si están cerrados todos los pozos del Well Pad, mediante el método Activate se va a la siguiente hoja de Excel; caso contrario se procede a ejecutar 3 aspectos. A continuación se presenta la estructura del tipo de codificación de esta parte.

```

If (oniroA1.Value = False And oniroA2.Value = False And oniroA5.Value =
False And oniroA6.Value = False) Then
Worksheets("Ingreso Iro 1").Activate
Else
...
End If

```

Lo primero que se hizo fue crear variables de tipo Integer, donde cada una tomará el valor de una celda. El valor que se asigna a dichas variables es cero o uno, que corresponden a los valores que se les dio a ciertas celdas en el botón de ingreso, cero para cuando existía un error, y uno para cuando se halla ingresado correctamente. Para el caso del ingreso de Iro A, estas variables son las siguientes.

```
Dim if1 As Integer, if2 As Integer, if3 As Integer, if4 As Integer, if7 As Integer  
Dim if8 As Integer, if9 As Integer, if10 As Integer, if11 As Integer, if12 As  
Integer
```

```
Dim if13 As Integer, if14 As Integer, if15 As Integer, if16 As Integer
```

Pero existe otra variable que fue creada, esta es de tipo Double, la cual toma el valor de la presión a la salida del Well Pad de producción. Para el caso del ingreso de Iro A, esta variable es la siguiente.

```
Dim if17 As Double
```

Ya creadas estas variables, y asignadas el valor de las celdas que les corresponde, lo segundo que se hace es, mediante una estructura condicional if, verificar si las variables de tipo Integer, alguna tiene el valor de cero, lo cual correspondería a que se ha ingresado incorrectamente. En el caso de que alguna tuviera el valor de cero, se le advierte al usuario con un mensaje que dice "ERROR. Ingrese los valores del Well Pad". Esta codificación para el caso de Iro A, se puede constatar a continuación.

```
If if1 = 0 Or if2 = 0 Or if3 = 0 Or if4 = 0 Or if7 = 0 Or if8 = 0 Or if9 = 0 Or if10 =  
0 Or if11 = 0 Or if12 = 0 Or if13 = 0 Or if14 = 0 Or if15 = 0 Or if16 = 0 Then  
MsgBox ("ERROR. Ingrese los valores del Well Pad")  
End If
```

El tercer aspecto es que en el caso de que todas las variables de tipo Integer tuvieran el valor de uno, es decir se ha ingresado totalmente de forma

correcta; entonces se procede a ejecutar 5 condiciones. Esta codificación para el caso de Iro A, se puede constatar a continuación.

If if1 = 1 And if2 = 1 And if3 = 1 And if4 = 1 And if7 = 1 And if8 = 1 And if9 = 1
And if10 = 1 And if11 = 1 And if12 = 1 And if13 = 1 And if14 = 1 And if15 = 1
And if16 = 1 **Then...**

La primera condición es de dar el valor de cero para un nuevo ingreso, a las celdas que controlan el haber ingresado correctamente, por ejemplo la celda C437 de la hoja de cálculo "Iro A" es una de estas celdas, y como podemos ver a continuación, a esta se le asigna dicho valor.

```
Worksheets("Iro A").Range("C437").Value = 0
```

La segunda condición es la de ejecutar la función llamada procedimiento1, en la cual se ejecutan los SOLVER del sistema de cálculo, esto se explicará más adelante con mayor detenimiento.

La tercera condición, es la de dar valores de presión en el cabezal del pozo, de caudal y de grado API del crudo a los cuadros de texto que corresponden a la siguiente hoja de ingreso de un Well Pad, dichos valores el programa arroja por defecto. Para el caso de ingreso de Iro A, se les da los valores de estos ENTRADAS para los pozos de Iro 1. A continuación podemos ver por ejemplo como se les asigna dichos valores al pozo Iro 3.

```
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro3_presion.Text = 366
```

```
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro3_caudal.Text = 10855
```

```
Worksheets("Ingreso Iro 1").iro3_api.Text = 16
```

La cuarta condición, es la de activar las casillas de verificación, que representan el estado de abierto de los pozos. Esta activación corresponde al estado de los pozos que el programa da por defecto para servicio del usuario. A continuación podemos ver como se activa la casilla de verificación del pozo Iro 7.

Worksheets("Ingreso Iro 1").oniro7.Value = True

Y finalmente la quinta condición, es si la variable tipo Double que representa la presión de salida del Well Pad de producción es menor que 100, entonces se le advierte al usuario mediante el siguiente mensaje "ERROR. No existe solución para el sistema planteado", esto se puede asegurar pues las presiones en los cabezales de los pozos no es menor a 300. En el caso que dicha variable tipo Double sea mayor a 100, entonces mediante el método Activate se va a la siguiente hoja de ingreso, para el caso de Iro A, la siguiente hoja de ingreso es la de Iro 1, esto se puede constatar en la siguiente codificación.

If if17 < 100 **Then**

MsgBox ("ERROR. No existe solución para el sistema planteado")

Else

Worksheets("Ingreso Iro 1").Activate

End If

El tipo de codificación para los botones de comando con nombre de control <IREGRESO , es la que se muestra a continuación, la misma que es la codificación del botón para el Well Pad de Iro A.

Private Sub regreso_iroA_Click()

Worksheets("Ingreso Amo C").Activate

End Sub

Lo único que hace este botón, es regresar a la hoja anterior de ingreso mediante el método Activate. En este caso la hoja de ingreso anterior a la de Iro A, fue la de ingreso a Amo C.

Los botones de comando que ayudan al ingreso de ENTRADAS para el Well Pad, tienen como evento a Click, es decir que al ciclar sobre estos botones, se ejecuta la codificación que hay en ellos.

Un ingreso importante, es el de el estado de los pozos de producción de crudo mediante las casillas de verificación.

El tipo de codificación para estas casillas de verificación que representan el estado de los pozos, se presenta a continuación para el caso del pozo Amo C5.

Private Sub onamoC5_Click()

If onamoC5.Value = False **Then**

Worksheets("Amo C").Range("E86").Value = 0

amoC5_presion.Value = Null

amoC5_caudal.Value = Null

amoC5_api.Value = Null

End If

If onamoC5.Value = True **Then**

Worksheets("Amo C").Range("E86").Value = 1

End If

End Sub

En el caso de que la casilla de verificación del pozo estuviera desactivada, es decir onamoC5.Value igual a la propiedad False; entonces, se le da el valor de cero a la celda E86 de la hoja de cálculo "Amo C", que indica que el pozo esta cerrado, y además mediante la propiedad Null del objeto, se vacía los cuadros de texto donde se ingresa la presión del cabezal del pozo, el caudal , y el grado API del crudo, para este caso el valor de los objetos amoC5_presion, amoC5_caudal, y amo C5_api, fueron vaciados mediante Null. En el caso de que la casilla de verificación del pozo estuviera activada, es decir onamoC5.Value igual a la propiedad True; entonces, se le da el valor de uno a la celda E86 de la hoja de cálculo "Amo C", que indica que el pozo esta abierto.

Para el caso del pozo Amo C5, es en la celda E86 de la hoja "Amo C", donde mediante un valor de uno se indica que el pozo esta abierto y que el mismo puede ser tomado en cuenta para los cálculos, y mediante un valor de cero se indica que el pozo esta cerrado y que este no puede ser tomado en cuenta para los cálculos.

Las casillas de verificación que representan el estado de los pozos, tienen como evento a Click, es decir que al ciclar sobre estas casillas, se ejecuta la codificación que hay en ellos.

Los botones de comando con texto de control CONTINUAR V, e INICIO DE INGRESO, que permiten continuar o volver dentro de las hojas de Excel "Ingreso Capiron", "Ingreso Ginta A", e "Ingreso Ginta B" tienen la siguiente estructura de codificación, la misma que es para el caso de Capiron.

Private Sub continuar_capiron_Click()

```
Worksheets("Ingreso Capiron").Range("A47").Activate  
End Sub
```

Private Sub inicio_capiron_Click()

```
Worksheets("Ingreso Capiron").Range("A1").Activate  
End Sub
```

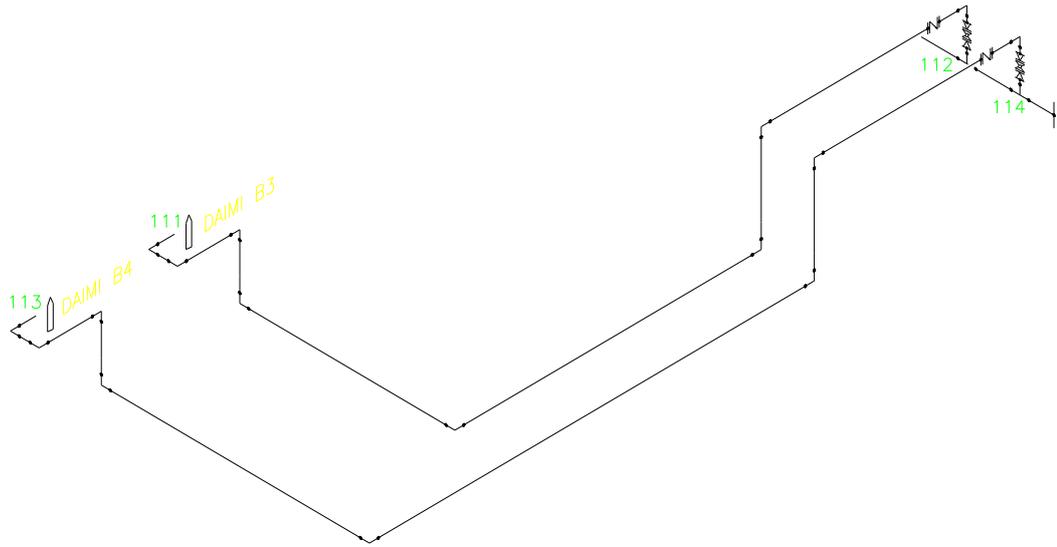
Como podemos observar mediante el método Activate, se va hacia las celdas A47 y A1 de la hoja de Excel "Ingreso Capiron" para poder ingresar los ENTRADAS del Well Pad.

3.3.3.2.5 Codificación para SOLVER

La ejecución del SOLVER se realizó en una función llamada procedimiento1. El SOLVER ayudó a determinar cual es la presión exacta en el cabezal del pozo, si bien es cierto este valor es un INPUT, el usuario ingresa valores de

presión que pueden o no dejar al sistema de cálculo completamente ⁴³balanceado.

Esto se puede explicar mejor con un ejemplo, para el caso de Daimi B se presenta la siguiente gráfica.



Aquí podemos ver, que la presión que debe llegar al nodo 112 debe ser la misma que viene del nodo 113, como la que viene del nodo 111, es por ello que se debe modificar la presión en el cabezal del pozo Daimi B3. Para esta simulación no se modifica la rapidez de flujo pues no se puede exigir al pozo de producción de crudo dar más o menos caudal de lo que pueden dar, pero si se puede regular la presión que entregan las bombas electrosumergibles. Ahora bien porque se modifica la presión del Daimi B3 y no la del Daimi B4, pues se hace la modificación de atrás hacia delante, además las presiones en todos los pozos de un Well Pad es casi la misma.

⁴³ El término Balanceado fue explicado en la Codificación para SOLVER del sistema de inyección de agua de formación.

A continuación se presenta parte de la hoja de Excel donde se encuentra como se determinó dicha presión.

	A	B	C	D	E
123	Tramo		111-112	114-112	113-114
124	velocidad	ft/seg	0.170543294	1.881725555	11.76078472
125	reynolds		710.137879	19588.64172	48971.6043
126	factor de fricción		0.090123343	0.02640662	0.022529404
127	Perdidas menores	PSI	0.00405204	0.030103491	12.57585197
128	Perdidas mayores	PSI	0.025030031	0.003587062	30.83529976
129	Perdidas Totales	PSI	0.029082071	0.033690553	43.41115173
130	Rapidez de flujo, w lb/seg		0.896985503	61.85674701	
131	Presión de entrada	PSI	323.5842398	367	
132			mB3	mB4	
133	Rapidez de flujo ORIGINAL	lb/seg	0.896985503	61.85674701	
134	Caudal ORIGINAL	BPD	229	15792	
135	Presión ORIGINAL	PSI	339	367	
136	Caudal	BPD	16021		
137	Peso específico	lbf/seg	60.27030717		
138	Viscosidad Cinemática	ft ² /seg	8.00517E-05		
139	Rapidez de flujo	lb/seg	62.75373252		
140					
141	Tramo		111-112	113-112	
142	Perdidas	PSI	0.029082071	43.44484228	
143	Presión diferencia de altura	PSI	0.302098553	0.302098553	
144	Presiones	PSI	323.8572563	323.8572563	
145	P111-112=P113-112	PSI	0.00000		
146					
147					
148	Rapidez de flujo total	lb/seg	62.75373252		

Para determinar esta presión, se colocaron todos los tramos que intervienen en el análisis. Se utilizaron algunas de las funciones del módulo "Funciones", estas funciones son las siguientes: función velocidad, función número de Reynolds, función factor de fricción y función de pérdidas mayores. Además también se creó la función que calcula parte de las pérdidas menores.

La función pérdidas menores, ésta calcula parte de las pérdidas menores en tubería en base a la Ecuación 3.20; la codificación de dicha función se la presenta a continuación:

Function Pmenores(v, pesoesp)

$$Pmenores = (v^2 / (2 * 32)) * (\text{pesoesp} / 144)$$

End Function

Pero en esta función se tomó en cuenta a los accesorios, pues estos se los multiplica a esta función, ya que los factores de pérdidas por accesorios dependen del rapidez de flujo. En esta función la variable v , ρ representan la velocidad del fluido, el peso específico del fluido, respectivamente, estos son valores que se requieren para que dicha función pueda ser calculada, al igual que en la anterior función toda la expresión es multiplicada por el peso específico del fluido y dividido para 144, este factor hace que la unidad de pérdidas menores este en PSI.

El diámetro y la longitud de la tubería, el área de la sección, y la rugosidad relativa del material, que son factores para el cálculo de las funciones vistas, fueron tomadas de las celdas de las hojas de cálculo.

La forma de calcular la velocidad, factor de fricción, número de Reynolds, etc. para estos tramos es mediante las funciones. Como podemos ver la celda C131 contiene el valor de presión del cabezal del pozo Daimi B3 a modificar, por otro lado la presión en el cabezal del Daimi B4 se encuentra en la celda D131. Las pérdidas de presión que produce los tramos 111-112, y 113-112, se encuentra en las celdas C142, y D142, respectivamente, la presión que produce la diferencia de altura del tramo se encuentra en las celdas C143, y D143. La presión de entrada, menos las pérdidas de presión, más la presión por diferencia de altura del tramo, nos da la presión de salida, la misma que se encuentra en las celdas C144, y D144 para los tramos 111-112, y 113-112, respectivamente.

La celda C145, es la diferencia entre las presiones que llegan al nodo 112 por cada trayecto, esta diferencia debe ser cero pues las presiones que llegan al mismo nodo deben ser las mismas.

El SOLVER se ejecutará mediante los botones de comando con nombre de control SIGUIENTE |>. A continuación se presenta el tipo de codificación para la ejecución del SOLVER mediante un botón de comando, para el caso del trayecto 111-112, y 113-112 en Daimi B.

Dim daimiB1 As Integer, daimiB2 As Integer, daimiB3 As Integer

Dim daimiB4 As Integer, daimiB5 As Integer

Dim daimiB6 As Integer, daimiB7 As Integer, daimiB8 As Integer

Dim daimiB9 As Integer

daimiB1 = Worksheets("Daimi B").Range("C83").Value

daimiB2 = Worksheets("Daimi B").Range("E83").Value

daimiB3 = Worksheets("Daimi B").Range("G83").Value

daimiB4 = Worksheets("Daimi B").Range("I83").Value

daimiB5 = Worksheets("Daimi B").Range("K83").Value

daimiB6 = Worksheets("Daimi B").Range("M83").Value

daimiB7 = Worksheets("Daimi B").Range("O83").Value

daimiB8 = Worksheets("Daimi B").Range("Q83").Value

daimiB9 = Worksheets("Daimi B").Range("S83").Value

If daimiB3 = 1 And daimiB4 = 1 **Then**

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("C137").Value = (Worksheets("Daimi B").Range("G89").Value + Worksheets("Daimi B").Range("I89").Value) / 2

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("C138").Value = (Worksheets("Daimi B").Range("G91").Value + Worksheets("Daimi B").Range("I91").Value) / 2

Dim c1 As Double, c111 As Double

c1 = Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("C135").Value

c111 = Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("D135").Value

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("C131").Value = c1

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("D131").Value = c111

Worksheets("Ingreso Daimi B").Activate

SolverReset

SolverOptions precision:=0.0000001

SolverOK setCell:=Range("C145"), _

maxMinVal:=3, _

byChange:=Range("C131")

SolverSolve userFinish:=True

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("H135").Value = Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("D144").Value

End If

If daimiB3 = 1 And daimiB4 = 0 **Then**

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("C137").Value = Worksheets("Daimi B").Range("G89").Value

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("C138").Value = Worksheets("Daimi B").Range("G91").Value

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("C131").Value = Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("C135").Value

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("D131").Value = Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("D135").Value

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("H135").Value = Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("C144").Value

End If

If daimiB3 = 0 And daimiB4 = 1 **Then**

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("C137").Value = Worksheets("Daimi B").Range("I89").Value

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("C138").Value = Worksheets("Daimi B").Range("I91").Value

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("C131").Value = Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("C135").Value

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("D131").Value = Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("D135").Value

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("H135").Value = Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("D144").Value

End If

If daimiB3 = 0 And daimiB4 = 0 **Then**

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("C137").Value = 0

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("C138").Value = 0

Worksheets("Ingreso Daimi B").Range("H135").Value = 0

End If

Lo primero que se hizo fue crear algunas variables tipo Integer, a estas variables se les asignó los valores de las celdas que contienen el valor de uno, o cero, cuyos valores representan el estado de los pozos del Well Pad, el valor de uno si el pozo se encuentra ABIERTO, y cero si se encuentra CERRADO, esto se puede constatar en la siguiente codificación.

Dim daimiB1 As Integer, daimiB2 As Integer, daimiB3 As Integer

Dim daimiB4 As Integer, daimiB5 As Integer

Dim daimiB6 As Integer, daimiB7 As Integer, daimiB8 As Integer

Dim daimiB9 As Integer

Se comenzó con la codificación para el sistema de cálculo SOLVER de los dos últimos pozos, para este caso son los pozos Daimi B4, y Daimi B3, son 4 estructuras condicional if las que fueron utilizadas para la codificación de estos dos últimos pozos.

La primera estructura condicional if, es la de si los dos pozos se encuentran abiertos, es decir si las variables daimiB3 y daimiB4 son igual a uno,

entonces la celda C137 que representa el peso específico del crudo para este análisis, es igual al promedio del peso específico del crudo que proviene de los pozos Daimi B3 y Daimi B4, los mismos que están representados por las celdas G89 e I89 de la hoja de cálculo “Daimi B”, respectivamente. De igual manera la celda C138 que representa la viscosidad cinemática del crudo para este análisis, es igual al promedio de la viscosidad cinemática del crudo que proviene de los pozos Daimi B3 y Daimi B4, los mismos que están representados por las celdas G91 e I91 de la hoja de cálculo “Daimi B”, respectivamente.

Se crearon dos variables tipo Double llamadas c1 y c111, las mismas que toman los valores de las celdas de presión del cabezal de los pozos Daimi B3 y Daimi B4, respectivamente, cuyos valores fueron ingresados por el usuario. Las celdas de C131 y D131, que representan a la presión de entrada de los tramos 111-112 y 113-112, toman el valor de estas dos variables tipo Double. Dentro de esta primera estructura condicional if se ejecuta el sistema SOLVER, donde se modifica la presión de entrada del tramo 111-112, cuyo valor esta representada por la celda C131, y que como vimos tiene un valor asignado de partida. El valor de la celda objetivo C145 es cero, es decir que la presión que llega por los dos tramos al nodo 112 es la misma.

Además dentro de esta estructura condicional if , se le asigna a la celda H135, que representa a la presión de entrada del siguiente tramo, es decir la presión en el nodo 112, el valor de la celda D144, que representa la presión de salida del tramo 113-112.

La segunda estructura condicional if, es si el pozo daimiB3 es igual a uno, y el pozo daimiB4 es igual a cero, es decir el pozo Daimi B3 está ABIERTO y el pozo Daimi B4 está CERRADO; entonces el peso específico y la viscosidad cinemática del crudo para este análisis, es igual al peso específico y viscosidad cinemática del crudo que proviene del Daimi B3. Además dentro de esta estructura, se les asigna a las celdas C131 y D131, los valores de presión del cabezal del pozo ingresado por el usuario, por otro lado se le asigna a la celda H135 el valor de presión de salida del tramo 111-112.

La tercera estructura condicional if, es si el pozo daimiB3 es igual a cero y daimiB4 es igual a uno, es decir el pozo Daimi B3 está CEERADO y el pozo Daimi B4 está ABIERTO; entonces el peso específico y la viscosidad cinemática del crudo para este análisis, es igual al peso específico y viscosidad cinemática del crudo que proviene del Daimi B4. Además dentro de esta estructura, se les asigna a las celdas C131 y D131, los valores de presión del cabezal del pozo ingresado por el usuario, por otro lado se le asigna a la celda H135 el valor de presión de salida del tramo 113-112.

La cuarta estructura condicional if, es si el pozo daimiB3 es igual a cero y daimiB4 es igual a cero, es decir el pozo Daimi B3 está CEERADO y el pozo Daimi B4 está CERRADO; entonces el peso específico y la viscosidad cinemática del crudo para este análisis, es igual a cero. Además se le asigna a la celda H135 el valor de cero.

De la misma manera se procede con los siguientes sistemas de cálculo SOLVER donde se compara la presión del crudo que circula por el manifold, con la presión que proviene del pozo.

3.3.3.2.6 Codificación del sistema de resultados (SALIDAS)

Los resultados de la simulación, se presentaron en hojas de Excel, una hoja llamada "Resultados" para la facilidad de producción del norte (NPF), una hoja llamada "Resultados II" para la facilidad de producción del sur (SPF); una hoja para cada Well Pad de producción y que lleva el nombre de cada uno de estos antecedido de la letra R y el punto (R.), por ejemplo la hoja de resultados del Well Pad Amo B se llama "R. Amo B", y además una hoja donde se presenta un resumen de todos los resultados y cuyo nombre es "Resumen Resultados".

En cada una de estas hojas de resultados, se presentaron los pozos que componen el sistema de producción de crudo del Bloque 16, con su respectiva presión en el cabezal (en PSI), caudal (en BPD, barriles por día), y grado API del crudo.

La forma de comunicarse entre cada hoja de resultados es mediante un botón de comando, que contienen la siguiente codificación.

Private Sub nombre_botoncomando_Evento()

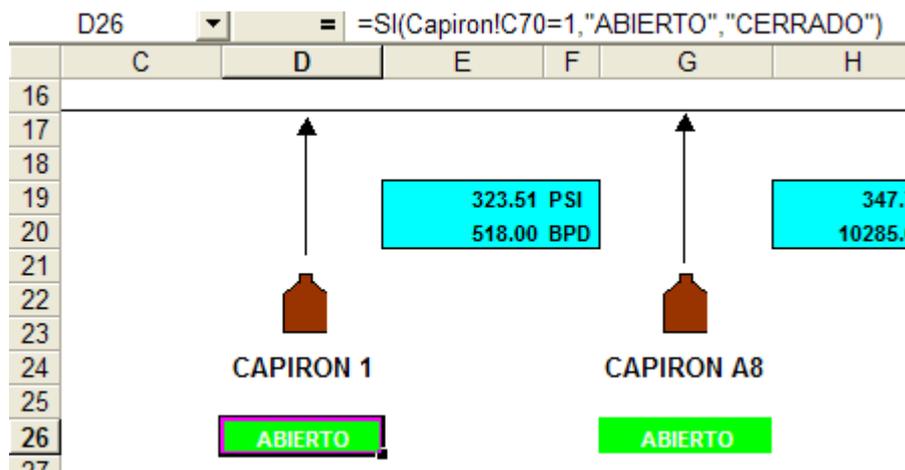
Worksheets("Nombre_hoja").Activate

End Sub

Mediante el método Activate, se puede ir a la hoja que se desee.

Para ⁴⁴dibujar lo que representa la tubería, se utilizó las herramientas de dibujo de Excel.

Se aplico la función SI de Excel, de dos formas diferentes. La primera fue para indicar el estado de los pozos de producción, esto se puede constatar con un ejemplo a continuación.



En este ejemplo tenemos parte de la hoja de Excel llamada “R. Capiron”, donde se encuentran la presión en el cabezal, el caudal, y el estado de los pozos de producción del Well Pad, en este caso podemos ver que la celda D26 representa el estado del pozo Capiron 1. En la barra de fórmulas podemos observar que dice lo siguiente

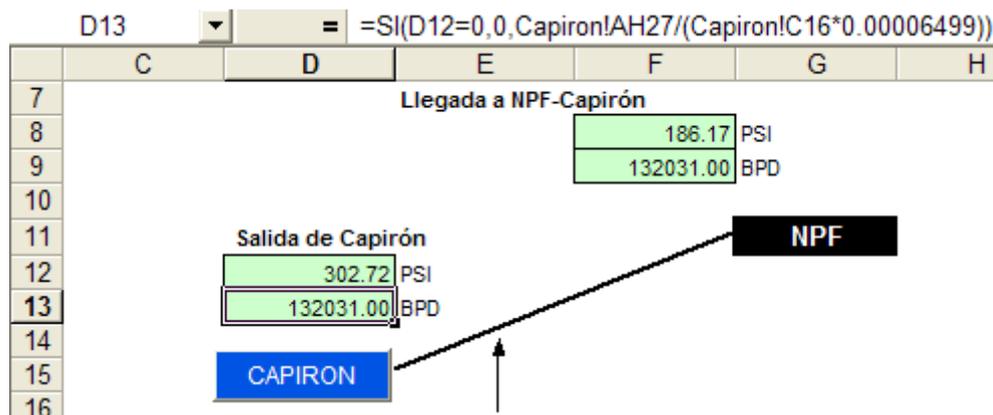
D26 = SI(Capiron!C70=1, “ABIERTO”, “CERRADO”)

⁴⁴ Los dibujos de cabezales de pozos se importaron del programa Visio hacia Excel.

, lo cual quiere decir que si la celda C70 de la hoja de cálculo “Capiron” es igual a uno, entonces aparecerá en la celda D26 la palabra ABIERTO, caso contrario, si dicha celda no es igual a uno, aparecerá en la celda D26 la palabra CERRADO; a continuación se presenta parte de la hoja de cálculo “Capiron”, donde se presenta a la celda C70 que contiene el valor ingresado a través de las casillas de verificación y de la forma antes vista, uno si se encuentra el pozo abierto, y cero si se encuentra el pozo cerrado.

	A	B	C
68			CAPIRON 1
69			
70	Pozo Abierto(1) o Cerrado(0):		1
71	Ingrese el grado API del pozo	*	17
72	Ingrese el caudal del pozo	BPD	518
73	Ingrese la presión del pozo	PSI	350
74	Crudo		
75	Gravedad Específica		0.95286
76	Peso específico	lb/ft^3	59.4586
77	Densidad	slugs/ft^3	1.84855
78	Viscosidad Cinemática	ft^2/seg	8.11E-05

La segunda forma que fue utilizada la función SI de Excel, fue para dar el valor de cero al caudal, cuando la presión en el punto de análisis fuera cero, esto se puede constatar con un ejemplo a continuación.



La celda D13 de la hoja de Excel “Resultados”, contiene el caudal en barriles por día que esta saliendo del Well Pad Capiron. En la barra de fórmulas podemos ver que si la celda D12 de esta misma hoja de Excel que

representa la presión de salida del Well Pad, tiene un valor igual de cero, entonces la celda D13 tendrá un valor de cero; caso contrario, esta celda tendrá el valor de la celda AH27 de la hoja de cálculo “Capiron” en barriles por día utilizando la Ecuación 3.45. Los puntos en donde se utiliza esta función SI para este propósito, es en la salida de los Well Pads de producción y a la llegada a las facilidades.

Los valores de los SALIDAS que se muestran en las hojas de resultados, son los que se calcularon en las hojas de cálculo respectivas, y que fueron asignadas en la barra de fórmulas, esto se puede constatar con un ejemplo a continuación.

	D	E	F
5		Salida de Amo A	
6		411.47 PSI	
7		12862.00 BPD	
8			
9		AMO A	

La celda E6 de la hoja de resultados “Resultados II”, representa la presión de salida de Amo A, como vemos en la barra de fórmulas, la celda E6 es igual a la celda L63 de la hoja de cálculo “Amo A”, cuya celda contiene el valor de presión de salida del Well Pad calculada de la forma antes vista.

En las hojas de cálculo las presiones en el cabezal de los dos últimos pozos del Well Pad es asignada mediante la función procedimiento2, la cual les da los valores de presión de acuerdo a que si los pozos se encuentran abiertos o cerrados.

3.4 VALIDACIÓN DEL PROGRAMA

Para poder trabajar con el verdadero rango a la que los parámetros del fluido lo están haciendo, se debe validar. Parte de la validación que se realizó en este estudio se la hizo en el campo (Bloque 16), pues en algunos casos las

bombas y otros accesorios no trabajan de acuerdo a lo que el fabricante dispone.

Dentro de la codificación fueron muy útiles la función Len y la propiedad Null. La función Len nos indica el número de bytes que contiene una cadena del tipo de variable definido por el usuario, en este caso ayudó para determinar el número de bytes que contiene cada cuadro de texto, si el cuadro de texto esta vacío, su número de bytes es cero, es por ello que se validó con `Len(nombre_objeto.value)=0`, pues nos indica que no se a ingresado ningún valor en le cuadro de texto. La propiedad Null, le da un valor nulo al objeto a la que fue aplicada esta propiedad, para este estudio ayudó para vaciar los cuadros de texto. La propiedad lógica False, nos da un valor lógico de falso al objeto, esto ayudó para desactivar las casillas de verificación que representan el estado de las bombas y pozos.

Dentro de la codificación podemos apreciar que los valores de presión y caudal a la que las bombas trabajan fueron validadas, la mayoría de estos valores fueron determinados en el campo (Bloque 16) y otros fueron determinados de acuerdo a lo que dice el fabricante, es decir a lo que las curvas de funcionamiento determinan.

Para la validación de los programas se tuvo que hacer algunas correcciones, como cambiar de diferencia de alturas en algunos tramos, hacer nuevas mediciones de tubería, en otros casos volver a determinar el factor de pérdidas para algunos accesorios, volver a revisar toda la geografía que compone el bloque, especialmente en el lugar donde la presión y el caudal no era el misma a la que en realidad se estaba trabajando en las facilidades.

3.4.1 VALIDACIÓN EN LA SIMULACION DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN

3.4.1.1 Validación en ingreso de propiedades del fluido de trabajo

En la validación del ingreso de las propiedades del fluido de trabajo, se utilizó la propiedad Len, para cuando al presionar el botón de ingreso, aparezca un mensaje de advertencia que diga que se esta ingresando incorrectamente, pues el cuadro de texto donde se ingresa el peso específico o el cuadro de texto donde se ingresa la viscosidad, se encuentran vacíos; además de ello se validó para que los valores de las propiedades del fluido de trabajo no sean menores o iguales a cero. Lo mencionado se codificó dentro la condición de la estructural condicional if, del botón de ingreso, con la siguiente estructura de codificación.

```
(Len(pespecifico.Value) = 0) Or (pespecifico.Value <= 0) Or (Len(visco.Value) = 0) Or (visco.Value <= 0)
```

3.4.1.2 Validación en ingreso de ENTRADAS de cada Well Pad

En este ingreso se validó para dos botones de comando, el primero es el botón con nombre de control **INGRESAR**, y el segundo es el botón con nombre de control **SIGUIENTE I>**.

Para el botón de comando con nombre de control **INGRESAR**, se validaron 3 aspectos fundamentalmente. El primero, es la de advertir al usuario, de que no se puede inyectar fluido hacia los pozos, si no se encuentran encendida alguna de las bombas de inyección del Well Pad. Esto se puede constatar en la siguiente codificación para el ingreso de Amo B.

```
If onp2079G.Value = False And onp2079H.Value = False And onp2079L.Value = False Then  
If onamob1.Value = True Or onamob6.Value = True Or onamob10.Value = True Then
```

MsgBox (" ERROR. Los pozos de AMO B están abiertos y todas sus bombas de inyección están apagadas ")

Worksheets("Well Pads").Range("I727").Value = 0

Else

Worksheets("Well Pads").Range("I727").Value = 1

End If

Else

Worksheets("Well Pads").Range("I727").Value = 1

End If

Los objetos onp2079G, onp2079H, y onp2079L, representan a las casillas de verificación, las cuales dan el estado de encendidas o apagadas a las bombas P-2079G, P-2079H, y P-2079L, respectivamente; si todas las bombas se encuentran apagadas, es decir los objetos que representan a las casillas de verificación son igual a False; entonces se verifica si algún pozo del Well Pad se encuentra abierto, si esto ocurre, se le advierte al usuario mediante un mensaje que dice " ERROR. Los pozos de AMO B están abiertos y todas sus bombas de inyección están apagadas ", además se le da el valor de cero a una celda; caso contrario si todos los pozos se encuentra cerrados se le da un valor de uno a una celda. En el caso de que alguna bomba estuviera encendida, se le da el valor de uno a una celda.

El valor de uno o cero, que se les asigna a dichas celdas, corresponde al ver ingresado correctamente o no, lo cual como ya se explicó ayudará al botón de comando que permite ir hacia la siguiente hoja de Excel.

El segundo aspecto, es la de advertir al usuario, de que las bombas de inyección no pueden inyectar fluido hacia los pozos, si estos se encuentran cerrados. Esto se puede constatar en la siguiente codificación para el ingreso de Amo B.

If onp2079G.Value = True Or onp2079H.Value = True Or onp2079L.Value = True **Then**

If onamob1.Value = False And onamob6.Value = False And onamob10.Value = False **Then**

MsgBox (" ERROR. Existen bombas de inyección en AMO B que están encendidas y todos los pozos cerrados")

Worksheets("Well Pads").Range("I728").Value = 0

Else

Worksheets("Well Pads").Range("I728").Value = 1

End If

Else

Worksheets("Well Pads").Range("I728").Value = 1

End If

Si alguna de las bombas de inyección del Well Pad se encuentra encendida; entonces se verifica si todos los pozos del Well Pad se encuentran cerrados, si esto ocurre, se le advierte al usuario mediante un mensaje que dice " ERROR. Existen bombas de inyección en AMO B que están encendidas y todos los pozos cerrados", además se le da el valor de cero a una celda; caso contrario si algún pozo se encuentra abierto se le da un valor de uno a una celda. En el caso de que todas las bombas estuvieran apagadas, se le da el valor de uno a una celda.

El valor de uno o cero, que se les asigna a dichas celdas, corresponde al ver ingresado correctamente o no.

El tercer aspecto, tiene que ver con el de advertir al usuario, cuando se halla ingresado un valor de presión o caudal en un pozo que se encuentre cerrado. Esto se puede constatar en la siguiente codificación para el ingreso del pozo Amo B10.

If onamob10.Value = False And (amob10_presion.Value = True Or amob10_caudal.Value = True) **Then**

MsgBox ("ERROR. Esta ingresando un valor en el pozo AMO B10 que esta cerrado ")

Worksheets("Well Pads").Range("I737").Value = 0

Else

Worksheets("Well Pads").Range("I737").Value = 1

End If

Esta codificación significa que, si el pozo Amo B10 se encuentra apagado, y existe un valor ingresado en los cuadros de texto de presión o caudal del pozo en mención, entonces se advierte al usuario mediante el mensaje "ERROR. Esta ingresando un valor en el pozo AMO B10 que esta cerrado ", además se le da el valor de cero a una celda; caso contrario si no existe ningún valor ingresado en los cuadros de texto de presión o caudal del pozo, se le da el valor de uno a una celda. El valor de uno o cero, que se les asigna a dichas celdas, corresponde al ver ingresado correctamente o no.

Además de estos tres aspectos fundamentales, se validó en el ingreso de presión y caudal, para esto se utilizó la propiedad Len para que no pueda dejar vacíos los cuadros de texto de ingreso de presión y caudal, y además se validó para que la presión y caudal estén dentro de rangos obtenidos en el campo.

Para el botón de comando con nombre de control **SIGUIENTE I >**, como ya se vio se validaron dos aspectos fundamentalmente; el primero es mediante las celdas de control que contienen valor de cero o uno, advertir al usuario que se ha ingresado incorrectamente; y la segunda es la de advertir de que no existe solución calculada por SOLVER, para el sistema ingresado.

3.4.1.3 Validación en el ingreso del estado de las bombas de media presión

En este ingreso también se validó para los dos botones de comando con nombre de control **INGRESAR**, y nombre de control **SIGUIENTE I >**.

Para el botón de comando con nombre de control **INGRESAR**, se validaron 2 aspectos fundamentalmente. El primero, es la de advertir al usuario, de que

no se puede trabajar con todas las bombas de media presión apagadas. Como ya se vio esto se lo hizo mediante una estructura condicional if.

El segundo aspecto que se validó, fue la de advertir al usuario, de que no se puede trabajar con las bombas de media presión escogidas, pues estas no tienen la capacidad de manejar el caudal que se desea enviar a cada Well Pad. Aquí también se utilizó una estructura condicional if, para poder lograr esta validación.

La validación para el botón de comando con nombre de control **SIGUIENTE I>**, al igual que para el botón que permite ir a la siguiente hoja de ingreso de ENTRADAS de un Well Pad, se validó dos aspectos; el primero es mediante las celdas de control que contienen valor de cero o uno, advertir al usuario que se ha ingresado incorrectamente; y la segunda es la de advertir de que no existe solución calculada por SOLVER, para el sistema ingresado.

3.4.1.4 Validación en el ingreso del estado de las bombas de baja presión

Para este ingreso se validó para dos botones de comando, el botón con nombre de control **INGRESAR**, y el botón con nombre de control **RESULTADOS I>**.

Para el botón de comando con nombre de control **INGRESAR**, se validaron 3 aspectos. El primero, es la de advertir al usuario, de que no se puede trabajar con todas las bombas de baja presión apagadas. El segundo aspecto que se validó, fue la de advertir al usuario, de que no se puede trabajar con las bombas de baja presión escogidas, pues estas no tienen la capacidad de manejar el caudal que se desea enviar a las bombas de media presión. Y la tercera condición, es la de advertir, de que están todos los pozos y bombas de inyección cerrados y apagadas y que se debe volver a ingresar.

Para el botón de comando con nombre de control **RESULTADOS I>**, se validó 3 aspectos; el primero es mediante las celdas de control que contienen valor de cero o uno, advertir al usuario que se ha ingresado incorrectamente; la segunda es la de advertir de que no existe solución calculada por SOLVER, para el sistema ingresado; y la tercera es la de advertir que las alturas de los tanques de almacenamiento de agua de formación están fuera de rango.

3.4.1.5 Validación para SOLVER

En el SOLVER se utilizó la función ⁴⁵SolverReset para validar, pues esta función restablece todas las restricciones y selecciones de celda del cuadro de diálogo Parámetros de Solver y restaura los valores predeterminados de todos los valores de Opciones de Solver.

3.4.2 VALIDACIÓN EN LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CRUDO

3.4.2.1 Validación en ingreso de ENTRADAS de cada Well Pad

En este ingreso se validó para dos botones de comando, el primero es el botón con nombre de control **INGRESAR**, y el segundo es el botón con nombre de control **SIGUIENTE I>**, o **RESULTADOS I>**.

Para el botón de comando con nombre de control **INGRESAR**, se validó un aspecto, que es la de advertir al usuario, cuando se halla ingresado un valor de presión, caudal, o grado API en un pozo que se encuentre cerrado. Esto se puede constatar en la siguiente codificación para el ingreso del pozo Iro A2.

⁴⁵ Lo que representa esta función se puede ver en el subcapítulo de Codificación de SOLVER, para el sistema de inyección de agua de formación.

```

If oniroA2.Value = False And (iroA2_presion.Value = True Or
iroA2_caudal.Value = True Or iroA2_api.Value = True) Then
MsgBox ("ERROR. Esta ingresando un valor en el pozo Iro A2 que esta
cerrado")
Worksheets("Iro A").Range("C450").Value = 0
Else
Worksheets("Iro A").Range("C450").Value = 1
End If

```

Esta codificación significa que, si el pozo Iro A2 se encuentra apagado, y existe un valor ingresado en los cuadros de texto de presión, caudal, o grado API del pozo en mención, entonces se advierte al usuario mediante el mensaje "ERROR. Esta ingresando un valor en el pozo Iro A2 que esta cerrado ", además se le da el valor de cero a una celda; caso contrario si no existe ningún valor ingresado en los cuadros de texto de presión, caudal, o grado API del pozo, se le da el valor de uno a una celda. El valor de uno o cero, que se les asigna a dichas celdas, corresponde al ver ingresado correctamente o no.

Además de estos tres aspectos fundamentales, se validó en el ingreso de presión, caudal, y grado API del crudo, para esto se utilizó la propiedad Len para que no pueda dejar vacíos los cuadros de texto de ingreso, y además se validó para que dichos ENTRADAS estén dentro de rangos obtenidos en el campo.

Para el botón de comando con nombre de control **SIGUIENTE** |>, o **RESULTADOS** |>, como ya se vio se validaron dos aspectos fundamentalmente; el primero es mediante las celdas de control que contienen valor de cero o uno, advertir al usuario que se ha ingresado incorrectamente; y la segunda es la de advertir de que no existe solución para el sistema planteado, pues la presión de salida del Well Pad es menor 100 PSI.

3.4.2.2 Validación para SOLVER

En el SOLVER se utilizó la función ⁴⁶SolverReset para validar, pues esta función restablece todas las restricciones y selecciones de celda del cuadro de diálogo Parámetros de Solver y restaura los valores predeterminados de todos los valores de Opciones de Solver.

3.4.3 VALIDACIÓN PARA NO INGRESAR CARACTERES EN LOS CUADROS DE TEXTO DE INGRESO DE ENTRADAS PARA LOS SIMULADORES

Cuando el usuario al ingresar los ENTRADAS tanto en la simulación del sistema de inyección de agua de formación, como la simulación del sistema de producción de crudo, puede cometer errores, uno de ellos es ingresar uno o varios caracteres. Es por ello que se codificó dentro de cada cuadro de texto de ingreso de ENTRADAS para no cometer este error; esto se puede constatar para el caso de ingreso de caudal para el pozo Amo B4, esta estructura de codificación se muestra a continuación.

```
Private Sub amoB4_caudal_KeyPress(ByVal KeyAscii As MSForms.ReturnInteger)
```

```
If KeyAscii >= 46 Or KeyAscii <= 57 Then
```

```
Chr (KeyAscii)
```

```
End If
```

```
If KeyAscii < 46 Or KeyAscii > 57 Then
```

```
KeyAscii = 0
```

```
End If
```

⁴⁶ Lo que representa esta función se puede ver en el subcapítulo de Codificación de SOLVER, para el sistema de inyección de agua de formación.

If KeyAscii = 47 **Then**

KeyAscii = 0

End If

End Sub

Como podemos ver en esta función se utilizó el evento KeyPress. El evento KeyPress se produce cuando el usuario presiona una tecla que genera un carácter escribible (una tecla ANSI) en el formulario que se está ejecutando mientras el formulario o un control del mismo tiene la capacidad para recibir clics del Mouse o entradas por teclado en cualquier momento. El evento se puede producir antes o después de que se suelte la tecla. KeyAscii representa el código ANSI del carácter o número ingresado en el cuadro de texto.

Dentro de esta función existen 3 estructuras condicional if. La primera estructura hace de que si el código ANSI esta dentro de ⁴⁷46 y 57, entonces lo ingresado se quede en el cuadro de texto. El código ANSI de los números va desde 48 a 57, el código ANSI 46 representa al punto (.), y el código ANSI 47 representa a la línea inclinada (/).

La segunda estructura condicional if hace que si el código ANSI no esta dentro de 46 y 57, entonces se borra lo ingresado en el cuadro de texto mediante el código ANSI cero, que representa al espacio vacío.

Finalmente la tercera estructura condicional if hace que si el código ANSI es igual a ⁴⁸47, entonces se borra lo ingresado en el cuadro de texto mediante el código ANSI cero, que representa al espacio vacío.

3.5 IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA

La implementación se realizó dentro del bloque, donde se corrió a los programa con los valores a la que se encontraba trabajando en ese momento

⁴⁷ La primera estructura condicional if, condiona que se ingrese los números (0-9), el punto (.), y el carácter /

⁴⁸ La tercera estructura condicional if, condiona que no se ingrese el carácter /

las facilidades y sus sistemas de inyección de agua y producción de crudo, y se comparó con los datos que arrojaba el programa.

Dentro de la implementación se tuvo que hacer algunas otras correcciones que dentro de la validación no se tomó en cuenta. Se realizaron 6 corridas para cada programa, la comparación de los datos que arrojaron estas corridas, con los datos de campo, y el error que estas arrojaron, se detalla en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4

PRUEBAS DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN

ANÁLISIS DE DATOS DE LAS PLANTAS

En este estudio se analizó y se comparó los datos del sistema de inyección de agua de formación y del sistema de producción de crudo del Bloque 16. Todos estos datos se obtuvieron de los manómetros e indicadores que se encuentran en toda la geografía en análisis del bloque.

ANÁLISIS DE DATOS DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN

Primeramente es necesario saber cuales son los valores de peso específico y viscosidad cinemática del agua de formación, los cuales se presentan en la siguiente tabla, estos dos valores son los que el programa de simulación del sistema de inyección tanto de NPF y SPF arroja por defecto.

Tabla 4.1: Propiedades del agua de formación del Bloque 16

Propiedad del agua de formación	Valor	Unidad
Peso específico	60.1	lbf / ft ³
Viscosidad cinemática	3.35 x 10 ⁻⁶	ft ² / seg

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

La temperatura promedio a la que se encuentra el agua de formación es de 200°F.

Para poder analizar los datos se debe hacer por separado el análisis de cada facilidad de producción, primero se analizó los datos de la facilidad de producción del norte (NPF).

Análisis de datos de NPF

La presión y caudal de inyección de agua en los pozos, y el ⁴⁹estado en que se encuentran estos, es lo primero a analizar. Existen tres Well Pads de inyección de agua de formación en NPF, que son, Bogi, Wip y Tivacuno, cuyos cabezales de inyección de los pozos se encuentran con los siguientes valores.

Tabla 4.2: Datos de los cabezales de inyección de los pozos de NPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Estado Pozo
BOGI	BOGI A2	1550	22325	ABIERTO
	BOGI A3	1550	23571	ABIERTO
	BOGI A4	1600	18127	ABIERTO
TIVACUNO	TICACUNO A2	1400	19748	ABIERTO
WIP	NPF1	2950	24818	ABIERTO
	NPF2	2950	25010	ABIERTO

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

Estos valores forman parte de los ENTRADAS del programa de simulación, los cuales también el programa arroja por defecto para disposición del usuario.

Como ya se explicó, para que exista la presión y el caudal del agua en los cabezales de inyección de los pozos, esta agua debe pasar por un sistema de bombeo desde los tanques de almacenamiento, cuyo bombeo consiste en bombas de baja, media y alta presión.

⁴⁹ El estado de un pozo es ABIERTO o CERRADO.

Parte de los datos que se tomó en cuenta fue la presión de succión y de descarga de las bombas de baja, media y alta presión. A continuación se presenta en la siguiente tabla los valores de presión de succión y de descarga de las bombas de inyección o alta presión, y el ⁵⁰estado en que se encuentran las bombas.

Tabla 4.3: Datos de bombas de alta presión de NPF

Well Pad	Bomba	Presión de Succión PSI	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
BOGI	P-1950	530	1650	ENCENDIDA
	P-1951	510	1600	ENCENDIDA
	P-1952	510	1600	ENCENDIDA
TIVACUNO	P-9108	530	1440	ENCENDIDA
	P-9109	0	0	APAGADA
WIP	P-1079A	950	3010	ENCENDIDA
	P-1079B	950	3050	ENCENDIDA

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

A continuación se presenta en la siguiente tabla los valores de presión de succión y de descarga de las bombas de media presión, y el estado en que se encuentran estas bombas.

Tabla 4.4: Datos de bombas de media presión de NPF

Bomba	Presión de Succión PSI	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
P-1119 A	88	1300	ENCENDIDA
P-1119 B	87	1310	ENCENDIDA
P-1119 C	0	0	APAGADA

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

⁵⁰ El estado de una bomba es ENCENDIDA o APAGADA.

En la siguiente tabla se presenta los valores de presión de descarga de las bombas de baja presión, y el estado en que se encuentran estas bombas.

Tabla 4.5: Datos de bombas de baja presión de NPF

Bomba	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
P-1121 A	91	ENCENDIDA
P-1121 B	0	APAGADA
P-1121 C	92	ENCENDIDA
P-1123A	0	APAGADA

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

La presión de succión de las bombas de baja presión esta de acuerdo a la altura de los tanques de almacenamiento de agua, cuya altura en ftH₂O (pies de agua) es de 28 para cada tanque.

Análisis de datos de SPF

Al igual que en el caso de NPF, la presión y caudal de inyección de agua en los pozos, y el estado en que se encuentran estos, es lo primero a analizar. Existen cinco Well Pads de inyección de agua de formación en SPF, que son, Amo A, Amo B, Wip, Iro A y Daimi B, cuyos cabezales de inyección de los pozos se encuentran con los siguientes valores.

Tabla 4.6: Datos de los cabezales de inyección de los pozos de SPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Estado Pozo
AMO A	AMO 1	2650	26208	ABIERTO
	AMO A1	2650	51781	ABIERTO
	AMO A2	2600	27620	ABIERTO
	AMO A3	2600	27487	ABIERTO
	AMO A6	2650	33923	ABIERTO

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

Tabla 4.7: Datos de los cabezales de inyección de los pozos de SPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Estado Pozo
AMO B	AMO B1	2600	31233	ABIERTO
	AMO B6	2600	28122	ABIERTO
	AMO B10	2600	40645	ABIERTO
WIP	WIP1	2800	58730	ABIERTO
	WIP2	2780	38270	ABIERTO
	WIP3	2800	47080	ABIERTO
	WIP4	2790	15920	ABIERTO
DAIMI B	DAIMI B10	2720	40030	ABIERTO
IRO A	IRO A3	2600	49998	ABIERTO

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

Estos valores forman parte de los ENTRADAS del programa de simulación, los cuales también el programa arroja por defecto para disposición del usuario.

Lo segundo a analizar es la presión de succión y de descarga de las bombas de alta presión, y el estado en que estas bombas se encuentran, a continuación se presenta en la siguiente tabla dichos valores.

Tabla 4.8: Datos de bombas de alta presión de SPF

Well Pad	Bomba	Presión de Succión PSI	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
AMO A	P-9101	1060	2700	ENCENDIDA
	P-9102	1100	2680	ENCENDIDA
	P-9103	1100	2680	ENCENDIDA
	P-9110	1060	2660	ENCENDIDA
	P-2079 J	1100	2640	ENCENDIDA
	P-2079 I	1080	2650	ENCENDIDA
	P-2079 M	1080	2640	ENCENDIDA

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

Tabla 4.9: Datos de bombas de alta presión de SPF

Well Pad	Bomba	Presión de Succión PSI	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
AMO B	P-2079 L	1000	2800	ENCENDIDA
	P-2079 H	1060	2650	ENCENDIDA
	P-2079 G	1010	2650	ENCENDIDA
WIP	P-2079 A	1200	2800	ENCENDIDA
	P-2079 B	1190	2850	ENCENDIDA
	P-2079 C	1190	2850	ENCENDIDA
	P-2079 D	0	0	APAGADA
	P-2079 E	1180	2820	ENCENDIDA
DAIMI B	P-2079F	1200	2800	ENCENDIDA
IRO A	P-2079K	1140	2690	ENCENDIDA

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

La presión de succión y de descarga de las bombas de media presión, y el estado en que se encuentran estas bombas, es lo siguiente a analizar, a continuación se presenta dichos valores.

Tabla 4.10: Datos de bombas de media presión de SPF

Bomba	Presión de Succión PSI	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
P-2119 A	100	1260	ENCENDIDA
P-2119 B	100	1250	ENCENDIDA
P-2119 C	99	1250	ENCENDIDA
P-2119 D	98	1260	ENCENDIDA
P-2119 F	99	1260	ENCENDIDA
P-2119 H	98	1280	ENCENDIDA

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

En la siguiente tabla se presenta los valores de presión de descarga de las bombas de baja presión, y el estado en que se encuentran estas bombas.

Tabla 4.11: Datos de bombas de baja presión de SPF

Bomba	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
P-2121 A	95	ENCENDIDA
P-2121 B	97	ENCENDIDA
P-2121 C	100	ENCENDIDA
P-2121 D	90	ENCENDIDA
P-2121 E	90	ENCENDIDA
P-2123 A	0	APAGADA

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

La presión de succión de las bombas de baja presión esta de acuerdo a la altura de los tanques de almacenamiento de agua, cuya altura en ftH₂O (pies de agua) es de 28 para cada tanque.

ANÁLISIS DE DATOS DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CRUDO

Dentro del análisis de datos del sistema de producción de crudo es importante analizar la presión y el caudal en el cabezal del pozo, el grado API del crudo y el estado en que se encuentran los pozos. Es por ello que los valores de dichos parámetros se presentan en las siguientes tablas.

En NPF existen dos Well Pads de producción de crudo, pero para este estudio solo se analizó Capiron, pues el Well Pad Tivacuno pertenece a Petroecuador; a continuación se presenta los valores de los parámetros ya mencionados, para los pozos de Capiron.

Tabla 4.12: Datos de pozos de producción de crudo de NPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Grado API	Estado Pozo
CAPIRON	CAPIRON 1	350	518	17	ABIERTO
	CAPIRON A1	340	13607	17	ABIERTO
	CAPIRON A3	370	14708	17	ABIERTO
	CAPIRON A4	380	15298	17	ABIERTO
	CAPIRON A5	390	11978	17	ABIERTO
	CAPIRON A6	385	11087	16	ABIERTO
	CAPIRON A7	382	11538	17	ABIERTO
	CAPIRON A8	367	10285	17	ABIERTO
	CAPIRON A9	369	13488	17	ABIERTO
	CAPIRON A10	353	711	17	ABIERTO
	CAPIRON A12	375	14510	16	ABIERTO
	CAPIRON A14	354	797	17	ABIERTO
	CAPIRON A15	359	1141	17	ABIERTO
	CAPIRON A17	368	10950	17	ABIERTO
	CAPIRON A18	357	1415	17	ABIERTO

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

La presión del crudo de salida de Capiron y de llegada a la facilidad de producción del norte es de 300 PSI y de 120 PSI, respectivamente.

En SPF existen ocho Well Pads de producción de crudo, los cuales son, Amo A, Amo B, Amo C, Daimi B, Iro A, Iro 1, Ginta A y Ginta B, los mismos que tienen los siguientes valores de presión, caudal y grado API en sus cabezales de pozo.

Tabla 4.13: Datos de pozos de producción de crudo de SPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Grado API	Estado Pozo
AMO A	AMO A4	370	12862	17	ABIERTO
AMO B	AMO 2B	340	369	17	ABIERTO
	AMO B4	348	2949	16	ABIERTO
	AMO B5	339	589	17	ABIERTO
	AMO B7	360	18117	16	ABIERTO
	AMO B8	342	11471	16	ABIERTO
	AMO B9	376	21657	16	ABIERTO
	AMO B11	335	994	16	ABIERTO
	AMO B12	370	16460	16	ABIERTO
AMO C	AMO C1	393	14149	17	ABIERTO
	AMO C5	407	12869	16	ABIERTO
	AMO C7	386	9079	16	ABIERTO
	AMO C13	373	7420	16	ABIERTO
	AMO C14	370	2308	15	ABIERTO
IRO A	IRO A1	420	2046	16	ABIERTO
	IRO A2	424	6804	15	ABIERTO
	IRO A5	441	13495	15	ABIERTO
	IRO A6	448	13970	15	ABIERTO
IRO 1	IRO 1	370	12621	15	ABIERTO
	IRO 2	362	6884	16	ABIERTO
	IRO 3	366	10855	16	ABIERTO
	IRO 4	354	954	15	ABIERTO
	IRO 5	359	1456	15	ABIERTO
	IRO 6	371	14812	16	ABIERTO
	IRO 7	360	2146	15	ABIERTO
	IRO 8	362	4599	15	ABIERTO
	WATI	367	5384	16	ABIERTO
DAIMI B	DAIMI B1	370	13070	15	ABIERTO
	DAIMI B2	352	11713	15	ABIERTO
	DAIMI B3	339	229	15	ABIERTO
	DAIMI B4	367	15792	15	ABIERTO
	DAIMI B5	355	11856	15	ABIERTO
	DAIMI B6	351	7000	15	ABIERTO
	DAIMI B7	345	2000	16	ABIERTO
	DAIMI B8	373	15475	16	ABIERTO
	DAIMI B9	351	8452	16	ABIERTO

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

Tabla 4.14: Datos de pozos de producción de crudo de SPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Grado API	Estado Pozo
GINTA A	GINTA A1	342	1065	15	ABIERTO
	GINTA A2	363	10871	15	ABIERTO
	GINTA A3	348	4116	15	ABIERTO
	GINTA A4	340	1910	15	ABIERTO
	GINTA A5	366	13102	14	ABIERTO
	GINTA A6	339	100	14	ABIERTO
	GINTA A7	330	85	15	ABIERTO
	GINTA A8	365	11837	14	ABIERTO
	GINTA A9	340	471	16	ABIERTO
	GINTA A10	372	14959	14	ABIERTO
	GINTA A11	336	233	15	ABIERTO
	GINTA A12	341	1271	15	ABIERTO
	GINTA A14	347	2544	15	ABIERTO
	GINTA B	DABO 1	355	1059	15
GINTA B2		388	12769	14	ABIERTO
GINTA B3		361	1181	16	ABIERTO
GINTA B4		387	11848	15	ABIERTO
GINTA B5		352	311	15	ABIERTO
GINTA B6		355	1511	16	ABIERTO
GINTA B8		386	13534	15	ABIERTO
GINTA B9		391	14579	15	ABIERTO
GINTA B10		393	14636	14	ABIERTO
GINTA B11		360	3481	14	ABIERTO
GINTA B12		358	1333	15	ABIERTO
GINTA B13		390	14296	15	ABIERTO
GINTA B14		390	16379	15	ABIERTO
GINTA B15		358	3803	14	ABIERTO
GINTA B16		357	1362	15	ABIERTO
GINTA B17		358	3549	15	ABIERTO
GINTA B18		387	11199	16	ABIERTO
GINTA B19		350	2828	15	ABIERTO
GINTA B20		353	2927	15	ABIERTO
GINTA B21		353	2167	15	ABIERTO
GINTA B22		357	3275	15	ABIERTO
GINTA B23		351	2527	15	ABIERTO
GINTA B24		347	1750	15	ABIERTO
GINTA B25		345	701	15	ABIERTO
GINTA B26		343	566	14	ABIERTO
GINTA B27		396	17700	14	ABIERTO
GINTA B29		368	6007	15	ABIERTO

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

La presión del crudo que llega desde los Well Pads Amo A, Amo B, y Amo C a la facilidad de producción es de 260 PSI; mientras la presión que llega desde los Well Pads Iro A, Iro 1, Ginta A, Ginta B y Daimi B a la facilidad es de 95 PSI. Por otro lado la presión que sale de cada Well Pad es la que se muestra a continuación.

Tabla 4.15: Datos de presión de salida de Well Pads de SPF

Well Pad	Presión de Salida del Well Pad PSI
AMO A	335
AMO B	305
AMO C	350
IRO A	410
IRO 1	350
GINTA A	325
GINTA B	330
DAIMI B	265

Fuente: REPSOL – YPF ECUADOR

COMPARACION DE DATOS DE CAMPO CONTRA DATOS DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN

Para poder comparar los ⁵¹datos de campo, con los valores de los parámetros que ⁵²arrojan los programas de simulación, es necesario conocer dichos valores.

VALORES QUE ARROJA LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN

Los valores de peso específico y viscosidad cinemática del agua, los valores de presión y caudal de inyección de agua en los pozos, el estado en que se encuentran los pozos, y el estado en que se encuentran las bombas de baja,

⁵¹ Los datos obtenidos en el Bloque 16.

⁵² SALIDAS de los programas de simulación.

media y alta presión, son los ENTRADAS de la simulación del sistema de inyección de agua, los valores de estos parámetros son los datos de campo obtenidos en el bloque, y que se vieron en el ⁵³ subcapítulo anterior.

Los valores que arroja esta simulación son, presión de succión y presión de descarga de las bombas de baja, media y alta presión, presión y caudal de inyección de agua modificada por SOLVER para que el sistema este balanceado, y el valor de altura de los tanques de almacenamiento.

Para poder analizar los valores que arroja la simulación del sistema de inyección de agua de formación, se debe hacer por separado el análisis de cada facilidad.

Valores que arroja la Simulación del Sistema de Inyección de Agua de Formación de NPF

Los valores de presión y caudal de inyección de agua en los pozos modificado por SOLVER, y el estado en que se encuentran estos, es lo primero a analizar; a continuación en la siguiente tabla se presenta dichos valores.

Tabla 4.16: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de los cabezales de inyección de los pozos de NPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Estado Pozo
BOGI	BOGI A2	1573.61	22325.07	ABIERTO
	BOGI A3	1570.15	23571.00	ABIERTO
	BOGI A4	1576.39	18126.93	ABIERTO
TIVACUNO	TICACUNO A2	1400	19748	ABIERTO
WIP	NPF1	2950	24914	ABIERTO
	NPF2	2950	24914	ABIERTO

⁵³ Subcapítulo “Análisis de datos del sistema de inyección de agua de formación”.

Los siguientes valores a conocer son la presión de succión y de descarga de las bombas de inyección o alta presión, y el estado en que se encuentran las bombas, estos valores se presentan a continuación.

Tabla 4.17: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de bombas de alta presión de NPF

Well Pad	Bomba	Presión de Succión PSI	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
BOGI	P-1950	491.96	1588.84	ENCENDIDA
	P-1951	491.69	1591.16	ENCENDIDA
	P-1952	492.70	1590.84	ENCENDIDA
TIVACUNO	P-9108	564.17	1419.15	ENCENDIDA
	P-9109	0	0	APAGADA
WIP	P-1079A	850.46	3016.87	ENCENDIDA
	P-1079B	850.45	3016.06	ENCENDIDA

En la siguiente tabla se presenta los valores que arroja la simulación, de presión de succión y presión de descarga de las bombas de media presión, y el estado en que se encuentran estas bombas.

Tabla 4.18: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de bombas de media presión de NPF

Bomba	Presión de Succión PSI	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
P-1119 A	95.43	1410.05	ENCENDIDA
P-1119 B	92.98	1415.55	ENCENDIDA
P-1119 C	0	0	APAGADA

Finalmente los valores de presión de descarga de las bombas de baja presión, y el estado en que se encuentran las bombas, se da a conocer a continuación.

Tabla 4.19: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de bombas de baja presión de NPF

Bomba	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
P-1121 A	97.65	ENCENDIDA
P-1121 B	0	APAGADA
P-1121 C	97.93	ENCENDIDA
P-1123A	0	APAGADA

El valor que arroja la simulación, de altura de los tanques de almacenamiento es de 30 ftH₂O (pies de agua) cada uno.

Valores que arroja la Simulación del Sistema de Inyección de Agua de Formación de SPF

Al igual que para el caso de NPF, los primeros valores que se da a conocer son la presión y caudal de inyección de agua en los pozos modificado por SOLVER, y el estado en que se encuentran estos.

Tabla 4.20: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de los cabezales de inyección de los pozos de SPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Estado Pozo
AMO A	AMO 1	2605.04	26208.17	ABIERTO
	AMO A1	2611.42	51781.44	ABIERTO
	AMO A2	2635.31	27620.10	ABIERTO
	AMO A3	2630.44	27486.72	ABIERTO
	AMO A6	2621.62	33922.57	ABIERTO
AMO B	AMO B1	2599.85	31294.48	ABIERTO
	AMO B6	2604.57	28304.61	ABIERTO
	AMO B10	2595.57	40400.92	ABIERTO
WIP	WIP1	2779.39	57105.30	ABIERTO
	WIP2	2795.22	38629.72	ABIERTO
	WIP3	2790.69	46369.75	ABIERTO
	WIP4	2804.70	17895.23	ABIERTO

Tabla 4.21: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de los cabezales de inyección de los pozos de SPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Estado Pozo
DAIMI B	DAIMI B10	2720	40030	ABIERTO
IRO A	IRO A3	2600	49998	ABIERTO

La presión de succión y de descarga de las bombas de inyección o alta presión, y el estado en que se encuentran las bombas, son los siguientes valores a conocer, los mismos que se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 4.22: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de bombas de alta presión de SPF

Well Pad	Bomba	Presión de Succión PSI	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
AMO A	P-9101	1122.97	2650.84	ENCENDIDA
	P-9102	1122.47	2650.84	ENCENDIDA
	P-9103	1122.27	2651.92	ENCENDIDA
	P-9110	1122.37	2650.84	ENCENDIDA
	P-2079 J	1112.38	2651.47	ENCENDIDA
	P-2079 I	1112.03	2651.45	ENCENDIDA
	P-2079 M	1112.13	2651.37	ENCENDIDA
AMO B	P-2079 L	954.68	2621.57	ENCENDIDA
	P-2079 H	955.46	2619.72	ENCENDIDA
	P-2079 G	956.24	2619.75	ENCENDIDA
WIP	P-2079 A	1184.45	2817.21	ENCENDIDA
	P-2079 B	1183.95	2819.96	ENCENDIDA
	P-2079 C	1187.49	2816.31	ENCENDIDA
	P-2079 D	0	0	APAGADA
	P-2079 E	1193.69	2813.24	ENCENDIDA
DAIMI B	P-2079F	1184.32	2754.42	ENCENDIDA
IRO A	P-2079K	1156.32	2632.74	ENCENDIDA

A continuación se presenta los valores que arroja la simulación, de presión de succión y presión de descarga de las bombas de media presión, y el estado en que se encuentran dichas bombas.

Tabla 4.23: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de bombas de media presión de SPF

Bomba	Presión de Succión PSI	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
P-2119 A	92.41	1253.21	ENCENDIDA
P-2119 B	89.00	1259.12	ENCENDIDA
P-2119 C	88.87	1259.12	ENCENDIDA
P-2119 D	88.54	1271.70	ENCENDIDA
P-2119 F	92.38	1253.85	ENCENDIDA
P-2119 H	94.23	1258.87	ENCENDIDA

Los valores de presión de descarga de las bombas de baja presión, y el estado en que se encuentran las bombas, se da a conocer a continuación.

Tabla 4.24: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de bombas de baja presión de SPF

Bomba	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
P-2121 A	90.53	ENCENDIDA
P-2121 B	91.94	ENCENDIDA
P-2121 C	93.49	ENCENDIDA
P-2121 D	85.62	ENCENDIDA
P-2121 E	85.62	ENCENDIDA
P-2123 A	0	APAGADA

Finalmente el valor de altura de los tanques de almacenamiento que arroja la simulación de SPF, es de 27.8 ftH₂O (pies de agua) cada uno.

VALORES QUE ARROJA LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN CRUDO

Los valores, de presión y caudal en el cabezal del pozo productor, de grado API del crudo, y el estado de los pozos, son los ENTRADAS de la simulación del sistema de producción de crudo, los valores de estos parámetros son los datos de campo obtenidos en el bloque, y que se vieron en el ⁵⁴subcapítulo anterior.

Los valores que arroja esta simulación son, presión en el cabezal del pozo productor modificada por SOLVER para que el sistema este balanceado, presión del crudo a la salida de cada Well Pad, y presión del crudo a la llegada a la facilidad de producción. A continuación se presentan los valores de los parámetros antes mencionados, para el caso del Well Pad de producción de NPF.

Tabla 4.25: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de pozos de producción de crudo de NPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Grado API	Estado Pozo
CAPIRON	CAPIRON 1	323.97	518	17	ABIERTO
	CAPIRON A1	360.02	13607	17	ABIERTO
	CAPIRON A3	364.05	14708	17	ABIERTO
	CAPIRON A4	364.38	15298	17	ABIERTO
	CAPIRON A5	358.01	11978	17	ABIERTO
	CAPIRON A6	352.59	11087	16	ABIERTO
	CAPIRON A7	358.35	11538	17	ABIERTO
	CAPIRON A8	347.85	10285	17	ABIERTO
	CAPIRON A9	365.93	13488	17	ABIERTO

⁵⁴ Subcapítulo “Análisis de datos del sistema de producción de crudo”.

Tabla 4.26: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de pozos de producción de crudo de NPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Grado API	Estado Pozo
	CAPIRON A10	339.26	711	17	ABIERTO
	CAPIRON A12	375.00	14510	16	ABIERTO
	CAPIRON A14	339.38	797	17	ABIERTO
	CAPIRON A15	339.38	1141	17	ABIERTO
	CAPIRON A17	357.28	10950	17	ABIERTO
	CAPIRON A18	339.71	1415	17	ABIERTO

Los valores que arroja el programa, de presión de salida del crudo de Capiron y de llegada a la facilidad de producción del norte, es de 303.19 PSI y 186.64 PSI, respectivamente.

En las siguientes tablas se presenta la presión en los cabezales de los pozos producción de SPF modificada por SOLVER para que el sistema este balanceado.

Tabla 4.27: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de pozos de producción de crudo de SPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Grado API	Estado Pozo
AMO A	AMO A4	370	12862	17	ABIERTO
AMO B	AMO 2B	340.06	369	17	ABIERTO
	AMO B4	340.07	2949	16	ABIERTO
	AMO B5	339.46	589	17	ABIERTO
	AMO B7	381.03	18117	16	ABIERTO
	AMO B8	355.88	11471	16	ABIERTO
	AMO B9	383.70	21657	16	ABIERTO
	AMO B11	341.87	994	16	ABIERTO
	AMO B12	370.00	16460	16	ABIERTO
AMO C	AMO C1	395.29	14149	17	ABIERTO
	AMO C5	391.72	12869	16	ABIERTO
	AMO C7	371.48	9079	16	ABIERTO
	AMO C13	376.88	7420	16	ABIERTO
	AMO C14	370.00	2308	15	ABIERTO
IRO A	IRO A1	420.00	2046	16	ABIERTO
	IRO A2	427.06	6804	15	ABIERTO
	IRO A5	444.21	13495	15	ABIERTO
	IRO A6	448.56	13970	15	ABIERTO
IRO 1	IRO 1	365.79	12621	15	ABIERTO
	IRO 2	357.87	6884	16	ABIERTO
	IRO 3	366.00	10855	16	ABIERTO
	IRO 4	351.61	954	15	ABIERTO
	IRO 5	351.66	1456	15	ABIERTO
	IRO 6	359.63	14812	16	ABIERTO
	IRO 7	350.62	2146	15	ABIERTO
	IRO 8	352.02	4599	15	ABIERTO
	WATI	355.19	5384	16	ABIERTO
DAIMI B	DAIMI B1	331.33	13070	15	ABIERTO
	DAIMI B2	326.48	11713	15	ABIERTO
	DAIMI B3	323.58	229	15	ABIERTO
	DAIMI B4	367.00	15792	15	ABIERTO
	DAIMI B5	329.36	11856	15	ABIERTO
	DAIMI B6	331.74	7000	15	ABIERTO
	DAIMI B7	308.89	2000	16	ABIERTO
	DAIMI B8	361.41	15475	16	ABIERTO
	DAIMI B9	335.25	8452	16	ABIERTO

Tabla 4.28: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de pozos de producción de crudo de SPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Grado API	Estado Pozo
GINTA A	GINTA A1	347.21	1065	15	ABIERTO
	GINTA A2	360.56	10871	15	ABIERTO
	GINTA A3	347.98	4116	15	ABIERTO
	GINTA A4	347.63	1910	15	ABIERTO
	GINTA A5	365.11	13102	14	ABIERTO
	GINTA A6	345.38	100	14	ABIERTO
	GINTA A7	344.88	85	15	ABIERTO
	GINTA A8	365.00	11837	14	ABIERTO
	GINTA A9	347.11	471	16	ABIERTO
	GINTA A10	372.30	14959	14	ABIERTO
	GINTA A11	344.40	233	15	ABIERTO
	GINTA A12	345.96	1271	15	ABIERTO
	GINTA A14	348.13	2544	15	ABIERTO
	GINTA B	DABO 1	355.68	1059	15
GINTA B2		389.56	12769	14	ABIERTO
GINTA B3		357.85	1181	16	ABIERTO
GINTA B4		379.70	11848	15	ABIERTO
GINTA B5		366.84	311	15	ABIERTO
GINTA B6		360.02	1511	16	ABIERTO
GINTA B8		389.52	13534	15	ABIERTO
GINTA B9		389.91	14579	15	ABIERTO
GINTA B10		391.85	14636	14	ABIERTO
GINTA B11		370.43	3481	14	ABIERTO
GINTA B12		350.47	1333	15	ABIERTO
GINTA B13		397.00	14296	15	ABIERTO
GINTA B14		409.11	16379	15	ABIERTO
GINTA B15		372.06	3803	14	ABIERTO
GINTA B16		369.70	1362	15	ABIERTO
GINTA B17		371.33	3549	15	ABIERTO
GINTA B18		388.04	11199	16	ABIERTO
GINTA B19		350.85	2828	15	ABIERTO
GINTA B20		351.22	2927	15	ABIERTO
GINTA B21		350.82	2167	15	ABIERTO
GINTA B22		351.65	3275	15	ABIERTO
GINTA B23		369.12	2527	15	ABIERTO
GINTA B24		369.54	1750	15	ABIERTO
GINTA B25		349.94	701	15	ABIERTO
GINTA B26		350.10	566	14	ABIERTO
GINTA B27		382.21	17700	14	ABIERTO
GINTA B29		354.61	6007	15	ABIERTO

La presión del crudo que llega desde los Well Pads Amo A, Amo B, y Amo C a la facilidad de producción es de 342.99 PSI; mientras la presión que llega desde los Well Pads Iro A, Iro 1, Ginta A, Ginta B y Daimi B a la facilidad es de 106.35 PSI. Por otro lado la presión que sale de cada Well Pad es la que se muestra a continuación.

Tabla 4.29: Valores de presión de salida de Well Pads de SPF que arroja el programa de simulación

Well Pad	Presión de Salida del Well Pad PSI
AMO A	331.92
AMO B	317.33
AMO C	350.29
IRO A	400.09
IRO 1	352.73
GINTA A	340.53
GINTA B	327.97
DAIMI B	284.06

ERROR ENTRE DATOS DE CAMPO Y DATOS DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN

Una vez que se conoce los datos obtenidos en el Bloque, y los valores que arroja el programa, a estos dos se los debe comparar para poder determinar cual es el error que el programa de simulación tiene contra los datos que se manejan en el campo.

Para determinar el error relativo, se utilizó la siguiente fórmula

$$e_{relativo} = \frac{X_{Calculado} - X_{Verdadero}}{X_{Verdadero}} \quad \mathbf{4.1}$$

, donde $X_{Calculado}$ es el valor que arroja el programa de simulación, y $X_{Verdadero}$ es el valor obtenido en el campo. El error relativo se expresa en porcentaje.

Error entre datos de campo y datos de la Simulación del Sistema de inyección de agua de formación

Al igual que los casos anteriores, el análisis de error se lo debe hacer por separado para cada facilidad de producción, primero se comparó los datos de la facilidad de producción del norte (NPF).

Error entre datos de campo y datos de la Simulación del Sistema de inyección de agua de formación de NPF

A pesar que los valores de presión y caudal en los cabezales de inyección de los pozos, con los que se trabaja en el campo son ingresados en el programa, estos valores sufren ligeras modificaciones. Al instante de que el operador toma la lectura de los instrumentos de medición de presión y caudal, este aproxima el valor real de la lectura, además los instrumentos tienen un rango de apreciación, por lo que los datos de campo no son exactos, es por ello que se los modifica mediante SOLVER para que el sistema se encuentre totalmente balanceado. El error relativo que existe entre los datos de campo de presión y caudal en los cabezales de inyección de los pozos, con los valores que arroja el programa es el siguiente.

Tabla 4.30: Error entre datos de campo de los cabezales de inyección de los pozos de NPF, con los valores que arroja la simulación

Well Pad	Pozo	Error Relativo Presión en el cabezal del pozo %	<i>Error Relativo</i> Caudal %
BOGI	BOGI A2	1.5	3.1×10^{-4}
	BOGI A3	1.3	0.0
	BOGI A4	-1.4	-3.9×10^{-4}
TIVACUNO	TICACUNO A2	0.0	0.0
WIP	NPF1	0.0	0.39
	NPF2	0.0	-0.38

Como podemos ver existen pequeñas modificaciones de presión y caudal en los cabezales de inyección de los pozos, en algunos casos no se modificaron estos valores pues el error relativo es cero. Por ejemplo para el caso de la presión en el cabezal del pozo Bogi A2, el error relativo entre el dato de campo y el valor que arroja el programa es 1.5 %, este valor se calculó de la siguiente manera.

$$e_{relativo} = \frac{X_{Calculado} - X_{Verdadero}}{X_{Verdadero}}$$

$$e_{relativo} = \frac{1573.61 - 1550}{1550} = 0.015 \Rightarrow 1.5\%$$

De igual manera se calculó para todos los demás casos.

Dentro de los SALIDAS de esta simulación se encuentra la presión de succión y de descarga de las bombas de alta presión, el error relativo entre los datos de campo y los valores de estos parámetros que arroja el programa de simulación es la siguiente.

Tabla 4.31: Error entre datos de campo de las bombas de alta presión de NPF, con los valores que arroja la simulación

Well Pad	Bomba	Error Relativo Presión de Succión %	Error Relativo Presión de Descarga %
BOGI	P-1950	-7.2	-3.7
	P-1951	-3.6	-0.55
	P-1952	-3.4	-0.57
TIVACUNO	P-9108	6.4	-1.4
	P-9109	-	-
WIP	P-1079A	-10.5	0.23
	P-1079B	-10.5	-1.1

Es necesario saber cual es el error relativo que existe entre los datos de campo de presión de succión y de descarga de las bombas de media presión,

con los valores que arroja el programa, estos valores se muestran a continuación.

Tabla 4.32: Error entre datos de campo de las bombas de media presión de NPF, con los valores que arroja la simulación

Bomba	Error Relativo Presión de Succión %	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
P-1119 A	8.4	-7.8
P-1119 B	6.8	-7.5
P-1119 C	-	-

El error relativo que existe entre los datos de campo de presión de descarga de las bombas de baja presión, con los valores que arroja el programa, se muestra a continuación.

Tabla 4.33: Error entre datos de campo de las bombas de baja presión de NPF, con los valores que arroja la simulación

Bomba	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
P-1121 A	7.3
P-1121 B	-
P-1121 C	6.4
P-1123A	-

Finalmente el error relativo que existe entre los datos de campo de la altura de los tanques de almacenamiento de agua, con los valores que arroja el programa es la siguiente.

Tabla 4.34: Error entre datos de campo de la altura de almacenamiento de los tanques de NPF, con los valores que arroja la simulación

Tanque de Almacenamiento	<i>Error Relativo</i> Altura %
T-1118A	7.1
T-1118B	7.1

*Error entre datos de campo y datos de la Simulación del Sistema de
inyección de agua de formación de SPF*

Al igual que para el caso de NPF, el error relativo que existe entre los datos de campo de presión y caudal en los cabezales de inyección de los pozos, con los valores que arroja el programa, es lo primero a determinar.

Tabla 4.35: Error entre datos de campo de los cabezales de inyección de los pozos de SPF, con los valores que arroja la simulación

Well Pad	Pozo	Error Relativo Presión en el cabezal del pozo %	Error Relativo Caudal %
AMO A	AMO 1	-1.7	6.5×10^{-4}
	AMO A1	-1.5	8.5×10^{-4}
	AMO A2	1.4	3.6×10^{-4}
	AMO A3	1.2	-1.0×10^{-3}
	AMO A6	-1.1	-1.3×10^{-5}
AMO B	AMO B1	-5.8×10^{-3}	0.20
	AMO B6	0.18	0.65
	AMO B10	-0.17	-0.60
WIP	WIP1	-0.74	-2.8
	WIP2	0.55	0.94
	WIP3	-0.33	-1.5
	WIP4	0.53	12.4
DAIMI B	DAIMI B10	0.0	0.0
IRO A	IRO A3	0.0	0.0

También es necesario determinar el error relativo entre los datos de campo de la presión de succión y de descarga de las bombas de alta presión, con los valores que arroja el programa de simulación. Estos errores se muestran a continuación.

Tabla 4.36: Error entre datos de campo de las bombas de alta presión de SPF, con los valores que arroja la simulación

Well Pad	Bomba	<i>Error Relativo</i> Presión de Succión %	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
AMO A	P-9101	5.9	-1.8
	P-9102	2.0	-1.1
	P-9103	2.0	-1.0
	P-9110	5.9	-0.34
	P-2079 J	1.1	0.43
	P-2079 I	3.0	0.055
	P-2079 M	3.0	0.43
AMO B	P-2079 L	-4.5	-6.4
	P-2079 H	-9.8	-1.1
	P-2079 G	-5.3	-1.1
WIP	P-2079 A	-1.3	0.62
	P-2079 B	-0.51	-1.1
	P-2079 C	-0.21	-1.2
	P-2079 D	-	-
	P-2079 E	1.2	-0.24
DAIMI B	P-2079F	-1.3	-1.6
IRO A	P-2079K	1.4	-2.1

Dentro de los SALIDAS de esta simulación se encuentra la presión de succión y de descarga de las bombas de media presión, el error relativo entre los datos de campo y los valores que arroja el programa de simulación es la siguiente.

Tabla 4.37: Error entre datos de campo de las bombas de media presión de SPF, con los valores que arroja la simulación

Bomba	<i>Error Relativo</i> Presión de Succión %	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
P-2119 A	-7.6	-0.54
P-2119 B	-11.0	0.73
P-2119 C	-10.2	0.73
P-2119 D	-9.7	0.93
P-2119 F	-6.7	-0.49
P-2119 H	-3.8	-1.7

El error relativo que existe entre los datos de campo de presión de descarga de las bombas de baja presión, con los valores que arroja el programa, se muestra a continuación.

Tabla 4.38: Error entre datos de campo de las bombas de baja presión de SPF, con los valores que arroja la simulación

Bomba	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
P-2121 A	-4.7
P-2121 B	-5.2
P-2121 C	-6.5
P-2121 D	-4.9
P-2121 E	-4.9
P-2123 A	-

Finalmente el error relativo que existe entre los datos de campo de la altura de los tanques de almacenamiento de agua, con los valores que arroja el programa es la siguiente.

Tabla 4.39: Error entre datos de campo de la altura de almacenamiento de los tanques de SPF, con los valores que arroja la simulación

Tanque de Almacenamiento	<i>Error Relativo</i> Altura %
T-2118A	-0.71
T-2118B	-0.71

Error entre datos de campo y datos de la Simulación del Sistema de producción de crudo

Los valores de presión en los cabezales de producción de los pozos, con los que se trabaja en el campo son ingresados en el programa, estos valores al igual que para el caso del sistema de inyección de agua sufren ligeras modificaciones por el motivo ya antes visto.

El error relativo que existe entre los datos de campo de la presión en los cabezales de producción de los pozos de NPF, con los valores que arroja el programa es la siguiente.

Tabla 4.40: Error entre datos de campo de presión en los cabezales de los pozos de producción de NPF, con los valores que arroja la simulación

Well Pad	Pozo	<i>Error Relativo</i> Presión en el cabezal del pozo %
CAPIRON	CAPIRON 1	-7.4
	CAPIRON A1	5.9
	CAPIRON A3	-1.6
	CAPIRON A4	-4.1
	CAPIRON A5	-8.2
	CAPIRON A6	-8.4
	CAPIRON A7	-6.2
	CAPIRON A8	-5.2
	CAPIRON A9	-0.83
	CAPIRON A10	-3.9
	CAPIRON A12	0.0
	CAPIRON A14	-4.1
	CAPIRON A15	-5.5
	CAPIRON A17	-2.9
	CAPIRON A18	-4.8

El error relativo entre el dato de campo de presión del crudo en la salida de Capiron, con el valor que arroja el programa, es de 1.1 %; mientras que el error relativo entre el dato de campo de presión de llegada a la facilidad de producción del norte, con el valor que arroja el programa es de 55.5%.

También es importante determinar el error relativo que existe entre los datos de campo de la presión en los cabezales de producción de los pozos de SPF, con los valores que arroja el programa de simulación, estos valores se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 4.41: Error entre datos de campo de presión en los cabezales de los pozos de producción de SPF, con los valores que arroja la simulación

Well Pad	Pozo	<i>Error Relativo</i> Presión en el cabezal del pozo %
AMO A	AMO A4	0.0
AMO B	AMO 2B	0.018
	AMO B4	-2.3
	AMO B5	0.14
	AMO B7	5.8
	AMO B8	4.1
	AMO B9	2.0
	AMO B11	2.1
	AMO B12	0.0
AMO C	AMO C1	0.58
	AMO C5	-3.8
	AMO C7	-3.8
	AMO C13	1.0
	AMO C14	0.0
IRO A	IRO A1	0.0
	IRO A2	0.72
	IRO A5	0.73
	IRO A6	0.13
IRO 1	IRO 1	-1.1
	IRO 2	-1.1
	IRO 3	0.0
	IRO 4	-0.68
	IRO 5	-2.0
	IRO 6	-3.1
	IRO 7	-2.6
	IRO 8	-2.8
	WATI	-3.2
DAIMI B	DAIMI B1	-10.5
	DAIMI B2	-7.3
	DAIMI B3	-4.5
	DAIMI B4	0.0
	DAIMI B5	-7.2
	DAIMI B6	-5.5
	DAIMI B7	-10.5
	DAIMI B8	-3.1
	DAIMI B9	-4.5

Tabla 4.42: Error entre datos de campo de presión en los cabezales de los pozos de producción de SPF, con los valores que arroja la simulación

Well Pad	Pozo	<i>Error Relativo</i> Presión en el cabezal del pozo %
GINTA A	GINTA A1	1.5
	GINTA A2	-0.67
	GINTA A3	-5.7×10^{-3}
	GINTA A4	2.2
	GINTA A5	-0.24
	GINTA A6	1.9
	GINTA A7	4.5
	GINTA A8	0.0
	GINTA A9	2.1
	GINTA A10	0.081
	GINTA A11	2.5
	GINTA A12	1.5
	GINTA A14	0.33
	GINTA B	DABO 1
GINTA B2		0.40
GINTA B3		-0.87
GINTA B4		-1.9
GINTA B5		4.2
GINTA B6		1.4
GINTA B8		0.91
GINTA B9		-0.28
GINTA B10		-0.29
GINTA B11		2.9
GINTA B12		-2.1
GINTA B13		1.8
GINTA B14		4.9
GINTA B15		3.9
GINTA B16		3.6
GINTA B17		3.7
GINTA B18		0.27
GINTA B19		0.24
GINTA B20		-0.50
GINTA B21		-0.62
GINTA B22		-1.5
GINTA B23		5.2
GINTA B24		6.5
GINTA B25		1.4
GINTA B26	2.1	
GINTA B27	-3.5	
GINTA B29	-3.6	

Finalmente el error relativo entre de los datos de campo de presión del crudo en la salida de los Well Pads, con los valores que arroja el programa, es el siguiente.

Tabla 4.43: Error entre datos de campo de presión del crudo en la salida de los Well Pads de SPF, con los valores que arroja la simulación

Well Pad	<i>Error Relativo</i> Presión de Salida del Well Pad %
AMO A	-0.92
AMO B	4.0
AMO C	0.083
IRO A	-2.4
IRO 1	0.78
GINTA A	0.91
GINTA B	-0.62
DAIMI B	7.2

Por otro lado el error relativo que se produce entre los datos de la presión del crudo que llega desde los Well Pads Amo A, Amo B, y Amo C a la facilidad de producción, con los valores que arroja el programa, es de 31.9 %; mientras que el error relativo entre los datos de la presión que llega desde los Well Pads Iro A, Iro 1, Ginta A, Ginta B y Daimi B a la facilidad, con los valores que arroja el programa, es de 11.9%.

COMPARACIÓN DE LOS DATOS DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN CON LOS PROGRAMAS COMERCIALES

Un aspecto muy importante para las pruebas de los programas de simulación, es comparar los valores que arrojan estos programas, con los valores que arroja un programa comercial. El programa comercial con el que se comparó fue el Pipesim, pues este programa es el más utilizado por la empresa para las simulaciones de estos sistemas.

Para poder hacer esta comparación, se debe conocer cuales son los valores que arrojó el Pipesim, en los siguientes párrafos se da a conocer dichos valores.

VALORES QUE ARROJA EL PIPESIM DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN

Los ENTRADAS del Pipesim, son los mismos que tiene la simulación realizada en este proyecto de grado.

Valores que arroja el Pipesim del Sistema de Inyección de Agua de Formación de NPF

Los valores de presión y caudal de inyección de agua en los pozos, y el estado en que se encuentran estos, se presentan a continuación.

Tabla 4.44: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de los cabezales de inyección de los pozos de NPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Estado Pozo
BOGI	BOGI A2	1555	22325	ABIERTO
	BOGI A3	1560	23571	ABIERTO
	BOGI A4	1575	18127	ABIERTO
TIVACUNO	TICACUNO A2	1400	19748	ABIERTO
WIP	NPF1	2950	24914	ABIERTO
	NPF2	2950	24914	ABIERTO

Los siguientes valores que se da conocer son la presión de succión y de descarga de las bombas de inyección o alta presión, y el estado en que se encuentran las bombas.

Tabla 4.45: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de bombas de alta presión de NPF

Well Pad	Bomba	Presión de Succión PSI	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
BOGI	P-1950	510	1600	ENCENDIDA
	P-1951	500	1600	ENCENDIDA
	P-1952	500	1590	ENCENDIDA
TIVACUNO	P-9108	555	1425	ENCENDIDA
	P-9109	0	0	APAGADA
WIP	P-1079A	910	3015	ENCENDIDA
	P-1079B	910	3016	ENCENDIDA

En la siguiente tabla se presenta los valores de presión de succión y presión de descarga de las bombas de media presión, y el estado en que se encuentran estas bombas.

Tabla 4.46: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de bombas de media presión de NPF

Bomba	Presión de Succión PSI	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
P-1119 A	91	1380	ENCENDIDA
P-1119 B	90	1400	ENCENDIDA
P-1119 C	0	0	APAGADA

Finalmente los valores de presión de descarga de las bombas de baja presión, y el estado de estas, se da a conocer a continuación.

Tabla 4.47: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de bombas de baja presión de NPF

Bomba	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
P-1121 A	94	ENCENDIDA
P-1121 B	0	APAGADA
P-1121 C	94	ENCENDIDA
P-1123A	0	APAGADA

El valor de altura de los tanques de almacenamiento es de 28 ftH₂O (pies de agua) cada uno.

Valores que arroja el Pipesim del Sistema de Inyección de Agua de Formación de SPF

Los valores de presión y caudal de inyección de agua en los pozos, y el estado en que se encuentran estos, se presentan a continuación.

Tabla 4.48: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de los cabezales de inyección de los pozos de SPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Estado Pozo
AMO A	AMO 1	2615	26208	ABIERTO
	AMO A1	2620	51781	ABIERTO
	AMO A2	2610	27620	ABIERTO
	AMO A3	2610	27487	ABIERTO
	AMO A6	2615	33923	ABIERTO
AMO B	AMO B1	2600	31295	ABIERTO
	AMO B6	2600	28305	ABIERTO
	AMO B10	2600	40400	ABIERTO
WIP	WIP1	2780	58730	ABIERTO
	WIP2	2780	38270	ABIERTO
	WIP3	2790	47080	ABIERTO
	WIP4	2800	15920	ABIERTO
DAIMI B	DAIMI B10	2720	40030	ABIERTO
IRO A	IRO A3	2600	49998	ABIERTO

Los siguientes valores que se da conocer son la presión de succión y de descarga de las bombas de inyección o alta presión, y el estado en que se encuentran las bombas.

Tabla 4.49: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de bombas de alta presión de SPF

Well Pad	Bomba	Presión de Succión PSI	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
AMO A	P-9101	1100	2680	ENCENDIDA
	P-9102	1100	2680	ENCENDIDA
	P-9103	1100	2690	ENCENDIDA
	P-9110	1110	2650	ENCENDIDA
	P-2079 J	1110	2650	ENCENDIDA
	P-2079 I	1100	2640	ENCENDIDA
	P-2079 M	1100	2640	ENCENDIDA
AMO B	P-2079 L	1050	2700	ENCENDIDA
	P-2079 H	1050	2620	ENCENDIDA
	P-2079 G	1010	2650	ENCENDIDA
WIP	P-2079 A	1185	2810	ENCENDIDA
	P-2079 B	1185	2825	ENCENDIDA
	P-2079 C	1190	2820	ENCENDIDA
	P-2079 D	0	0	APAGADA
	P-2079 E	1185	2818	ENCENDIDA
DAIMI B	P-2079F	1185	2770	ENCENDIDA
IRO A	P-2079K	1155	2700	ENCENDIDA

En las siguientes tablas se presentan los valores de presión de succión y presión de descarga de las bombas de media presión, y el estado en que se encuentran estas bombas.

Tabla 4.50: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de bombas de media presión de SPF

Bomba	Presión de Succión PSI	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
P-2119 A	98	1250	ENCENDIDA
P-2119 B	98	1260	ENCENDIDA

Tabla 4.51: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de bombas de media presión de SPF

Bomba	Presión de Succión PSI	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
P-2119 C	99	1260	ENCENDIDA
P-2119 D	97	1270	ENCENDIDA
P-2119 F	96	1255	ENCENDIDA
P-2119 H	99	1270	ENCENDIDA

Los valores de presión de descarga de las bombas de baja presión, y el estado en que se encuentran las bombas, se da a conocer a continuación.

Tabla 4.52: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de bombas de baja presión de SPF

Bomba	Presión de Descarga PSI	Estado Bomba
P-2121 A	92	ENCENDIDA
P-2121 B	92	ENCENDIDA
P-2121 C	92	ENCENDIDA
P-2121 D	92	ENCENDIDA
P-2121 E	92	ENCENDIDA
P-2123 A	0	APAGADA

Finalmente el valor de altura de los tanques de almacenamiento es de 28 ftH₂O (pies de agua) cada uno.

VALORES QUE ARROJA EL PIPESIM DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE PRODUCCIÓN DE CRUDO

Al igual que para el caso del sistema de inyección de agua, para el sistema de producción de crudo los ENTRADAS del Pipesim, son los mismos que tiene la simulación realizada en este proyecto de grado.

La presión y caudal en el cabezal del pozo de producción, el grado API del crudo que proviene del pozo, y el estado es los pozos, para el Well Pad Capiron de NPF, se presenta a continuación.

Tabla 4.53: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de pozos de producción de crudo de NPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Grado API	Estado Pozo
CAPIRON	CAPIRON 1	340	518	17	ABIERTO
	CAPIRON A1	345	13607	17	ABIERTO
	CAPIRON A3	364	14708	17	ABIERTO
	CAPIRON A4	368	15298	17	ABIERTO
	CAPIRON A5	380	11978	17	ABIERTO
	CAPIRON A6	355	11087	16	ABIERTO
	CAPIRON A7	370	11538	17	ABIERTO
	CAPIRON A8	350	10285	17	ABIERTO
	CAPIRON A9	360	13488	17	ABIERTO
	CAPIRON A10	350	711	17	ABIERTO
	CAPIRON A12	370	14510	16	ABIERTO
	CAPIRON A14	340	797	17	ABIERTO
	CAPIRON A15	345	1141	17	ABIERTO
	CAPIRON A17	370	10950	17	ABIERTO
	CAPIRON A18	345	1415	17	ABIERTO

Los valores de presión de salida del crudo de Capiron y de llegada a la facilidad de producción del norte, es de 302 PSI y 180 PSI, respectivamente.

La presión y caudal en el cabezal del pozo de producción, el grado API del crudo que proviene del pozo, y el estado es los pozos, para los Well Pads que conforman SPF, se presenta a continuación.

Tabla 4.54: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de pozos de producción de crudo de SPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Grado API	Estado Pozo
AMO A	AMO A4	370	12862	17	ABIERTO
AMO B	AMO 2B	340	369	17	ABIERTO
	AMO B4	340	2949	16	ABIERTO
	AMO B5	339	589	17	ABIERTO
	AMO B7	380	18117	16	ABIERTO
	AMO B8	340	11471	16	ABIERTO
	AMO B9	378	21657	16	ABIERTO
	AMO B11	340	994	16	ABIERTO
	AMO B12	370	16460	16	ABIERTO
AMO C	AMO C1	395	14149	17	ABIERTO
	AMO C5	400	12869	16	ABIERTO
	AMO C7	360	9079	16	ABIERTO
	AMO C13	377	7420	16	ABIERTO
	AMO C14	350	2308	15	ABIERTO
IRO A	IRO A1	419	2046	16	ABIERTO
	IRO A2	429	6804	15	ABIERTO
	IRO A5	449	13495	15	ABIERTO
	IRO A6	440	13970	15	ABIERTO
IRO 1	IRO 1	370	12621	15	ABIERTO
	IRO 2	358	6884	16	ABIERTO
	IRO 3	360	10855	16	ABIERTO
	IRO 4	351	954	15	ABIERTO
	IRO 5	360	1456	15	ABIERTO
	IRO 6	380	14812	16	ABIERTO
	IRO 7	345	2146	15	ABIERTO
	IRO 8	361	4599	15	ABIERTO
	WATI	370	5384	16	ABIERTO
DAIMI B	DAIMI B1	365	13070	15	ABIERTO
	DAIMI B2	359	11713	15	ABIERTO
	DAIMI B3	323	229	15	ABIERTO
	DAIMI B4	377	15792	15	ABIERTO
	DAIMI B5	330	11856	15	ABIERTO
	DAIMI B6	361	7000	15	ABIERTO
	DAIMI B7	325	2000	16	ABIERTO
	DAIMI B8	360	15475	16	ABIERTO
	DAIMI B9	348	8452	16	ABIERTO

Tabla 4.55: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de pozos de producción de crudo de SPF

Well Pad	Pozo	Presión en el cabezal del pozo PSI	Caudal BPD	Grado API	Estado Pozo
GINTA A	GINTA A1	347	1065	15	ABIERTO
	GINTA A2	361	10871	15	ABIERTO
	GINTA A3	350	4116	15	ABIERTO
	GINTA A4	350	1910	15	ABIERTO
	GINTA A5	365	13102	14	ABIERTO
	GINTA A6	339	100	14	ABIERTO
	GINTA A7	334	85	15	ABIERTO
	GINTA A8	360	11837	14	ABIERTO
	GINTA A9	347	471	16	ABIERTO
	GINTA A10	377	14959	14	ABIERTO
	GINTA A11	310	233	15	ABIERTO
	GINTA A12	341	1271	15	ABIERTO
	GINTA A14	355	2544	15	ABIERTO
	GINTA B	DABO 1	360	1059	15
GINTA B2		390	12769	14	ABIERTO
GINTA B3		350	1181	16	ABIERTO
GINTA B4		386	11848	15	ABIERTO
GINTA B5		350	311	15	ABIERTO
GINTA B6		360	1511	16	ABIERTO
GINTA B8		389	13534	15	ABIERTO
GINTA B9		390	14579	15	ABIERTO
GINTA B10		392	14636	14	ABIERTO
GINTA B11		367	3481	14	ABIERTO
GINTA B12		351	1333	15	ABIERTO
GINTA B13		395	14296	15	ABIERTO
GINTA B14		400	16379	15	ABIERTO
GINTA B15		360	3803	14	ABIERTO
GINTA B16		360	1362	15	ABIERTO
GINTA B17		370	3549	15	ABIERTO
GINTA B18		390	11199	16	ABIERTO
GINTA B19		351	2828	15	ABIERTO
GINTA B20		355	2927	15	ABIERTO
GINTA B21		350	2167	15	ABIERTO
GINTA B22		360	3275	15	ABIERTO
GINTA B23		350	2527	15	ABIERTO
GINTA B24		360	1750	15	ABIERTO
GINTA B25		350	701	15	ABIERTO
GINTA B26		350	566	14	ABIERTO
GINTA B27		395	17700	14	ABIERTO
GINTA B29	368	6007	15	ABIERTO	

La presión del crudo que llega desde los Well Pads Amo A, Amo B, y Amo C a la facilidad de producción es de 340 PSI; mientras la presión que llega desde los Well Pads Iro A, Iro 1, Ginta A, Ginta B y Daimi B a la facilidad es de 110 PSI. Por otro lado la presión que sale de cada Well Pad es la que se muestra a continuación.

Tabla 4.56: Valores de presión de salida de Well Pads de SPF que arroja el Pipesim

Well Pad	Presión de Salida del Well Pad PSI
AMO A	332
AMO B	310
AMO C	350
IRO A	405
IRO 1	355
GINTA A	360
GINTA B	329
DAIMI B	268

ERROR ENTRE DATOS DE CAMPO Y DATOS DEL PIPESIM

Ahora que se conoce los valores que arrojó el Pipesim, se puede determinar que error existe entre los valores obtenidos en el programa comercial y los datos de campo

Error entre datos de campo y datos del Pipesim para la Simulación del Sistema de inyección de agua de formación

El análisis de error se lo debe hacer por separado para cada facilidad de producción, primero se comparó los datos de la facilidad de producción del norte (NPF). Estas comparaciones se la hizo mediante la ecuación 4.1

Error entre datos de campo y datos del Pipesim para la Simulación del Sistema de inyección de agua de formación de NPF

El error relativo que existe entre los datos de campo de presión y caudal en los cabezales de inyección de los pozos, con los valores que arroja el Pipesim es el siguiente.

Tabla 4.57: Error entre datos de campo de los cabezales de inyección de los pozos de NPF, con los valores que arroja el Pipesim

Well Pad	Pozo	Error Relativo Presión en el cabezal del pozo %	Error Relativo Caudal %
BOGI	BOGI A2	0.33	0.0
	BOGI A3	0.65	0.0
	BOGI A4	-1.5	0.0
TIVACUNO	TICACUNO A2	0.0	0.0
WIP	NPF1	0.0	0.39
	NPF2	0.0	-0.38

El error relativo entre los datos de presión de succión y de descarga de las bombas de alta presión de NPF, y los valores que arroja el Pipesim, se presenta a continuación.

Tabla 4.58: Error entre datos de campo de las bombas de alta presión de NPF, con los valores que arroja el Pipesim

Well Pad	Bomba	Error Relativo Presión de Succión %	Error Relativo Presión de Descarga %
BOGI	P-1950	-3.8	-3.0
	P-1951	-1.9	0.0
	P-1952	-1.9	-0.63
TIVACUNO	P-9108	4.7	-1.0
	P-9109	-	-

Tabla 4.59: Error entre datos de campo de las bombas de alta presión de NPF, con los valores que arroja el Pipesim

Well Pad	Bomba	<i>Error Relativo</i> Presión de Succión %	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
WIP	P-1079A	-4.2	0.17
	P-1079B	-4.2	-1.1

Es necesario saber cual es el error relativo que existe entre los datos de campo de presión de succión y de descarga de las bombas de media presión, con los valores que arroja el Pipesim, estos valores se muestran a continuación.

Tabla 4.60: Error entre datos de campo de las bombas de media presión de NPF, con los valores que arroja el Pipesim

Bomba	<i>Error Relativo</i> Presión de Succión %	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
P-1119 A	3.4	6.1
P-1119 B	3.4	6.9
P-1119 C	-	-

El error relativo que existe entre los datos de campo de presión de descarga de las bombas de baja presión, con los valores que arroja el Pipesim, es:

Tabla 4.61: Error entre datos de campo de las bombas de baja presión de NPF, con los valores que arroja el Pipesim

Bomba	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
P-1121 A	3.3
P-1121 B	-
P-1121 C	2.2
P-1123A	-

Finalmente el error relativo que existe entre los datos de campo de la altura de los tanques de almacenamiento de agua, con los valores que arroja el Pipesim es la siguiente.

Tabla 4.62: Error entre datos de campo de la altura de almacenamiento de los tanques de NPF, con los valores que arroja el Pipesim

Tanque de Almacenamiento	Error Relativo Altura %
T-1118A	0.0
T-1118B	0.0

Error entre datos de campo y datos de la Simulación del Sistema de inyección de agua de formación de SPF

Al igual que para el caso de NPF, el error relativo que existe entre los datos de campo de presión y caudal en los cabezales de inyección de los pozos, con los valores que arroja el Pipesim, es lo primero a determinar.

Tabla 4.63: Error entre datos de campo de los cabezales de inyección de los pozos de SPF, con los valores que arroja el Pipesim

Well Pad	Pozo	Error Relativo Presión en el cabezal del pozo %	Error Relativo Caudal %
AMO A	AMO 1	-1.3	0.0
	AMO A1	-1.1	0.0
	AMO A2	0.38	0.0
	AMO A3	0.38	0.0
	AMO A6	-1.3	0.0
AMO B	AMO B1	0.0	0.19
	AMO B6	0.0	0.65
	AMO B10	0.0	-0.60
WIP	WIP1	-0.71	0.0
	WIP2	0.0	0.0
	WIP3	-0.35	0.0
	WIP4	0.35	0.0
DAIMI B	DAIMI B10	0.0	0.0
IRO A	IRO A3	0.0	0.0

También es necesario determinar el error relativo entre los datos de campo de la presión de succión y de descarga de las bombas de alta presión, con los valores que arroja el Pipesim. Estos errores se muestran a continuación.

Tabla 4.64: Error entre datos de campo de las bombas de alta presión de SPF, con los valores que arroja el Pipesim

Well Pad	Bomba	<i>Error Relativo</i> Presión de Succión %	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
AMO A	P-9101	3.8	-0.74
	P-9102	0.0	0.0
	P-9103	0.0	0.38
	P-9110	4.7	-0.37
	P-2079 J	0.91	0.38
	P-2079 I	1.9	-0.38
	P-2079 M	1.9	0.0
AMO B	P-2079 L	5.0	-3.6
	P-2079 H	-0.94	-1.1
	P-2079 G	0.0	0.0
WIP	P-2079 A	-1.3	0.36
	P-2079 B	-0.42	-0.88
	P-2079 C	0.0	-1.0
	P-2079 D	-	-
	P-2079 E	0.42	-0.072
DAIMI B	P-2079F	-1.3	-1.1
IRO A	P-2079K	1.3	-0.37

El error relativo de la presión de succión y de descarga de las bombas de media presión, con los valores que arroja el Pipesim es el siguiente.

Tabla 4.65: Error entre datos de campo de las bombas de media presión de SPF, con los valores que arroja el Pipesim

Bomba	<i>Error Relativo</i> Presión de Succión %	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
P-2119 A	-2.0	-0.79
P-2119 B	-2.0	0.8

Tabla 4.66: Error entre datos de campo de las bombas de media presión de SPF, con los valores que arroja el Pipesim

Bomba	<i>Error Relativo</i> Presión de Succión %	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
P-2119 C	0.0	0.8
P-2119 D	-1.0	0.79
P-2119 F	-3.0	-0.39
P-2119 H	1.0	-0.78

El error relativo que existe entre los datos de campo de presión de descarga de las bombas de baja presión, con los valores que arroja el Pipesim, se muestra a continuación.

Tabla 4.67: Error entre datos de campo de las bombas de baja presión de SPF, con los valores que arroja el Pipesim

Bomba	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
P-2121 A	-3.2
P-2121 B	-5.2
P-2121 C	-8.0
P-2121 D	2.2
P-2121 E	2.2
P-2123 A	-

Finalmente el error relativo que existe entre los datos de campo de la altura de los tanques de almacenamiento de agua, con los valores que arroja el Pipesim es la siguiente.

Tabla 4.68: Error entre datos de campo de la altura de almacenamiento de los tanques de SPF, con los valores que arroja el Pipesim

Tanque de Almacenamiento	<i>Error Relativo</i> Altura %
T-2118A	0.0
T-2118B	0.0

Error entre datos de campo y datos del Pipesim para el Sistema de producción de crudo

El error relativo que existe entre los datos de campo de la presión en los cabezales de producción de los pozos de NPF, con los valores que arroja el Pipesim es el siguiente.

Tabla 4.69: Error entre datos de campo de presión en los cabezales de los pozos de producción de NPF, con los valores que arroja el Pipesim

Well Pad	Pozo	<i>Error Relativo</i> Presión en el cabezal del pozo %
CAPIRON	CAPIRON 1	-2.9
	CAPIRON A1	1.5
	CAPIRON A3	-1.6
	CAPIRON A4	-3.2
	CAPIRON A5	-2.6
	CAPIRON A6	-7.8
	CAPIRON A7	-3.1
	CAPIRON A8	-4.6
	CAPIRON A9	-2.4
	CAPIRON A10	-0.85
	CAPIRON A12	-1.3
	CAPIRON A14	-3.9
	CAPIRON A15	-3.9
	CAPIRON A17	0.54
	CAPIRON A18	-3.4

El error relativo entre el dato de campo de presión del crudo en la salida de Capiron, con el valor que arroja el Pipesim, es de 0.67%; mientras que el error relativo entre el dato de campo de presión de llegada a la facilidad de producción del norte, con el valor que arroja el Pipesim es de 50%.

También es importante determinar el error relativo que existe entre los datos de campo de la presión en los cabezales de producción de los pozos de SPF, con los valores que arroja el Pipesim, estos valores se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 4.70: Error entre datos de campo de presión en los cabezales de los pozos de producción de SPF, con los valores que arroja el Pipesim

Well Pad	Pozo	<i>Error Relativo</i> Presión en el cabezal del pozo %
AMO A	AMO A4	0.0
AMO B	AMO 2B	0.0
	AMO B4	-2.3
	AMO B5	0.0
	AMO B7	5.6
	AMO B8	-0.58
	AMO B9	0.53
	AMO B11	1.5
	AMO B12	0.0
AMO C	AMO C1	0.51
	AMO C5	-1.7
	AMO C7	-6.7
	AMO C13	1.1
	AMO C14	-5.4
IRO A	IRO A1	-0.24
	IRO A2	1.2
	IRO A5	1.8
	IRO A6	-1.8
IRO 1	IRO 1	0.0
	IRO 2	-1.1
	IRO 3	-1.6
	IRO 4	-0.85
	IRO 5	0.28
	IRO 6	2.4
	IRO 7	-4.2
	IRO 8	-0.28
	WATI	0.82
DAIMI B	DAIMI B1	-1.4
	DAIMI B2	2.0
	DAIMI B3	-4.7
	DAIMI B4	2.7
	DAIMI B5	-7.0
	DAIMI B6	2.8
	DAIMI B7	-5.8
	DAIMI B8	-3.5
	DAIMI B9	-0.85

Tabla 4.71: Error entre datos de campo de presión en los cabezales de los pozos de producción de SPF, con los valores que arroja el Pipesim

Well Pad	Pozo	<i>Error Relativo</i> Presión en el cabezal del pozo %
GINTA A	GINTA A1	1.5
	GINTA A2	-0.55
	GINTA A3	0.57
	GINTA A4	2.9
	GINTA A5	-0.27
	GINTA A6	0.0
	GINTA A7	1.2
	GINTA A8	-1.4
	GINTA A9	2.0
	GINTA A10	1.3
	GINTA A11	-7.7
	GINTA A12	0.0
	GINTA A14	2.3
	GINTA B	DABO 1
GINTA B2		0.52
GINTA B3		-3.0
GINTA B4		-0.26
GINTA B5		-0.57
GINTA B6		1.4
GINTA B8		0.78
GINTA B9		-0.26
GINTA B10		-0.25
GINTA B11		1.9
GINTA B12		-1.9
GINTA B13		1.3
GINTA B14		2.6
GINTA B15		0.56
GINTA B16		0.84
GINTA B17		3.4
GINTA B18		0.78
GINTA B19		0.29
GINTA B20		0.57
GINTA B21		-0.85
GINTA B22		0.84
GINTA B23		-0.28
GINTA B24		3.7
GINTA B25		1.4
GINTA B26		2.0
GINTA B27		-0.25
GINTA B29		0.0

Finalmente el error relativo entre de los datos de campo de presión del crudo en la salida de los Well Pads, con los valores que arroja el Pipesim, es el siguiente.

Tabla 4.72: Error entre datos de campo de presión del crudo en la salida de los Well Pads de SPF, con los valores que arroja el Pipesim

Well Pad	<i>Error Relativo</i> Presión de Salida del Well Pad %
AMO A	-0.89
AMO B	1.6
AMO C	0.0
IRO A	-1.2
IRO 1	1.4
GINTA A	10.8
GINTA B	-0.30
DAIMI B	1.1

Por otro lado el error relativo que se produce entre los datos de la presión del crudo que llega desde los Well Pads Amo A, Amo B, y Amo C a la facilidad de producción, con los valores que arroja el Pipesim, es de -23.5%; mientras que el error relativo entre los datos de la presión que llega desde los Well Pads Iro A, Iro 1, Ginta A, Ginta B y Daimi B a la facilidad, con los valores que arroja el Pipesim, es de -13.6%.

Como podemos ver los errores producidos por el Pipesim, son más bajos de los que producen los programas de simulación efectuados para este proyecto de grado, esto se debe principalmente a que este programa comercial trabaja con un sistema de resolución de problemas de optimización lineal y no lineal mucho más exacto al que se trabaja en este proyecto cuyo sistema de resolución es el SOLVER. Pero de todas maneras si se compara los errores producidos por el Pipesim, con los errores producidos por los programas efectuados para este proyecto de grado, no existe mucha diferencia entre estos dos.

ANÁLISIS DE ERROR

En este subcapítulo analizaremos los errores antes vistos, y además los errores que producen los programas de simulación.

Los valores de ingreso (ENTRADAS) en los programas de simulación tienen un error (incertidumbre), este error se va incrementando o acumulando a medida que se vayan sumando otros valores con error.

Al realizar el proceso de medición, el valor obtenido y asignado a la medida diferirá probablemente del “valor verdadero” debido a causas diversas. El llamado “valor verdadero” es en realidad un concepto puramente teórico y absolutamente inaccesible. En el proceso de medición únicamente se pretende estimar de forma aproximada el valor de la magnitud medida. Para ello se debe dar un número con sus unidades y una estimación del error. Dicho de otra manera el resultado de cualquier medida es siempre incierto y a lo más que se puede aspirar es a estimar su grado de incertidumbre. Se llama error de una medida a la discrepancia entre el “valor verdadero” de la magnitud y el valor medido. Cada instrumento tiene una variación mínima de la magnitud que puede detectar, esta mínima cantidad se denomina *apreciación nominal* del instrumento, y el error absoluto o incertidumbre es la apreciación nominal del instrumento dividido para dos.

El error absoluto o incertidumbre del diámetro de las tuberías, de las medidas de longitud de las tuberías y de la rugosidad relativa, se presenta en el siguiente cuadro.

Tabla 4.73: Error absoluto del diámetro, longitud y rugosidad relativa de la tubería

Error Absoluto		
Diámetro de tubería, dD	± in	0.00001
Longitud de tubería, dL	± m	0.001
Rugosidad Relativa de tubería , dεD		1E-12
Pérdidas o incremento diferencia de altura	± in	0.001

Como ya se mencionó el error absoluto o incertidumbre se puede acumular, es por ello que es necesario conocer como se propaga este error.

4.4.1 PROPAGACION DE ERROR

Hay magnitudes que no se miden directamente, sino que se derivan de otras que sí son medidas en forma directa (las cuales tienen una incertidumbre).

Por ejemplo dado una valor medido X , con una incertidumbre de $\pm dX$; y un valor medido Y , con una incertidumbre $\pm dY$, el error de la suma $Q=X+Y$, viene dado por $dQ \approx dX+dY$

Sin embargo:

El máximo valor posible de Q , $Q \pm dQ$ se alcanza cuando se equivoca simultáneamente dX en X , y dY en Y , lo que es altamente improbable si las medidas son aleatorias e independientes. Una sobreestimación (o subestimación) de X no viene necesariamente acompañada de una sobreestimación (o subestimación) de Y . Si las medidas son independientes, la hipótesis pesimista es exagerada, los errores se cancelan parcialmente, y los errores se propagan cuadráticamente. La fórmula general para la propagación de errores para medidas independientes, es la siguiente:

Sean las medidas de X, Y, \dots, W ; con errores absolutos e incertidumbre dX, dY, \dots, dW ; usadas para calcular

$$Q = f(X, Y, \dots, W)$$

Si los errores son independientes y aleatorios, entonces el error de Q es la suma en cuadratura.

$$dQ = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial X} dX\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial Y} dY\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial W} dW\right)^2} \quad 4.2$$

A continuación en la siguiente tabla, se presenta las fórmulas de acumulación de error, para suma, producto, y potenciación, de valores medidos con incertidumbre.

Tabla 4.74: Fórmulas de acumulación de errores

Función	Errores	Error
$Q=k * X$	$X \pm dX$	$dQ=k*dX$ 4.3
$Q= \pm X \pm Y \pm \dots$	$X \pm dX ; Y \pm dY$	$dQ = \sqrt{(dX)^2 + (dY)^2 + \dots}$ 4.4
$Q=k * X^\alpha * Y^\beta \dots$	$X \pm dX ; Y \pm dY$	$\frac{dQ}{ Q } = \sqrt{\left(\alpha \frac{dX}{ X }\right)^2 + \left(\beta \frac{dY}{ Y }\right)^2 + \dots}$ 4.5

El error absoluto o incertidumbre de la rapidez de flujo y de las presiones de las bombas, provienen de la incertidumbre de ingreso en cada pozo.

Para poder calcular la acumulación de errores, se creó un módulo llamado “Errores” para cada programa de simulación, el cual contiene las funciones de propagación de errores en el área, velocidad, número de Reynolds, factor de fricción, pérdidas menores y mayores, pérdidas o incremento por diferencia de alturas, y de algunos accesorios. Estas funciones se presentan a continuación.

Función Error en el área, esta calcula el error absoluto en el área, debido a la incertidumbre o error absoluto en la medida del diámetro, esta función fue calculada en base a la ecuación 4.5

Function error_area(diam, area, dD)

Dim ndD As Double, ndiam As Double

ndD = dD / 12

ndiam = diam / 12

error_area = area * (((2 * ndD) / ndiam) ^ 2) ^ (1 / 2)

End Function

En esta función las variables diam, area, y dD, representan el diámetro de la tubería, el área de la sección y el error absoluto del diámetro, respectivamente. Dentro de esta función se crearon dos variables tipo Double, que son ndD y ndiam, las cuales son el error absoluto del diámetro y el valor del diámetro en pies, respectivamente. La unidad del error absoluto del área es \pm pies.

Función Error en la velocidad, esta calcula el error absoluto en la velocidad promedio del fluido, debido al error absoluto del área y de la rapidez de flujo, esta función fue calculada en base a la ecuación 4.5

Function error_velocidad(fm, area, velocidad, dfm, darea)

error_velocidad = (velocidad) * ((dfm / fm) ^ 2 + (darea / area) ^ 2) ^ (1 / 2)

End Function

En esta función las variables fm, area, velocidad, dfm, y darea, representan la rapidez de flujo, el área de la sección, la velocidad del fluido, el error absoluto de la rapidez de flujo y el error absoluto del área, respectivamente. La unidad del error absoluto de la velocidad es \pm ft/seg (pies por segundo).

Función Error en el número de Reynolds, esta calcula el error absoluto en el número de Reynolds, debido al error absoluto de la velocidad del fluido y del diámetro de la tubería, esta función fue calculada en base a la ecuación 4.5

Function error_reynolds(diam, velocidad, Reynolds, dD, dv)

Dim ndD As Double, ndiam As Double

ndD = dD / 12

ndiam = diam / 12

error_reynolds = (Reynolds) * ((dv / velocidad) ^ 2 + (ndD / ndiam) ^ 2) ^ (1 / 2)

End Function

En esta función las variables diam, velocidad, Reynolds, dD, y dv, representan el diámetro de la tubería, la velocidad promedio del fluido, el número de Reynolds, el error absoluto del diámetro y el error absoluto de la velocidad, respectivamente. Al igual que para el caso del área se crearon dos variables tipo Double, que son ndD y ndiam, las cuales representan el error absoluto del diámetro y el valor del diámetro en pies, respectivamente.

Función Error en el factor de fricción, esta calcula el error absoluto en el factor de fricción, debido al error absoluto de la rugosidad relativa y en el número de Reynolds, esta función fue calculada en base a la ecuación 4.5

Function error_ffriccion(eD, Re, ffriccion, deD, dRe)

error_ffriccion = (ffriccion) * ((deD / eD) ^ 2 + (dRe / Re) ^ 2) ^ (1 / 2)

End Function

En esta función las variables eD, Re, ffriccion, deD, y dRe, representan la rugosidad relativa de la tubería, el número de Reynolds, el error absoluto de la rugosidad relativa, y el error absoluto en el número de Reynolds, respectivamente.

Función Error en las pérdidas mayores, esta calcula el error absoluto en las pérdidas mayores, debido al error absoluto en la velocidad promedio del fluido, en el factor de fricción y en el diámetro de la tubería, esta función fue calculada en base a la ecuación 4.5

Function error_pmayores(Pmayores, fr, v, diam, dfr, dv, dD)

Dim ndD As Double, ndiam As Double

$$ndD = dD / 12$$

$$ndiam = diam / 12$$

$$\text{error_pmayores} = P\text{mayores} * ((dfr / fr) ^ 2 + ((2 * dv) / v) ^ 2 + (ndD / ndiam) ^ 2) ^ (1 / 2)$$

End Function

En esta función las variables Pmayoes, fr, v, diam, dfr, dv, y dD, representan las pérdidas mayores, el factor de fricción, la velocidad promedio del fluido, el diámetro de la tubería, el error absoluto en el factor de fricción, el error absoluto en la velocidad promedio del fluido, y el error absoluto en el diámetro de la tubería, respectivamente. Al igual que para el caso del área se crearon dos variables tipo Double, que son ndD y ndiam, las cuales representan el error absoluto del diámetro y el valor del diámetro en pies, respectivamente. La unidad del error absoluto de las pérdidas mayores es \pm PSI.

Función Error en las pérdidas menores, esta calcula el error absoluto en las pérdidas menores, debido al error absoluto en la velocidad promedio del fluido, esta función fue calculada en base a la ecuación 4.5

Function error_pmenores(Pmenores, v, dv)

$$\text{error_pmenores} = P\text{menores} * (((2 * dv) / v) ^ 2) ^ (1 / 2)$$

End Function

En esta función las variables Pmenores, v, y dv, representan las pérdidas menores, la velocidad promedio del fluido, y el error absoluto en la velocidad, respectivamente. La unidad del error absoluto de las pérdidas menores es \pm PSI.

Para las pérdidas menores existen accesorios como la expansión o dilatación gradual en la tubería, reducción o contracción gradual en la tubería y la válvula de bola, que dependen del diámetro de cada sección, es por ello que

se creó funciones que calculan el error absoluto en el coeficiente de pérdidas de los tres accesorios antes mencionados, estas funciones se presentan a continuación.

Función Error en el accesorio expansión, esta calcula el error absoluto en el coeficiente de pérdidas del accesorio de expansión o dilatación gradual en la tubería, debido al error absoluto de los diámetros de cambio de sección, esta función fue calculada en base a la ecuación 4.5

Function error_expansion(expansion, diam1, diam2)

Dim ddiam1 As Double, ddiam2 As Double

ddiam1 = 0.00001

ddiam2 = 0.00001

error_expansion = expansion * ((ddiam1 / diam1) ^ 2 + (ddiam2 / diam2) ^ 2) ^ (1 / 2)

End Function

En esta función las variables expansion, diam1, y diam2, representan el coeficiente de pérdidas por expansión, el diámetro menor en la expansión, y el diámetro mayor en la expansión, respectivamente. Dentro de esta función se crearon dos variables tipo Double, que son ddiam1 y ddiam2, las cuales representan el error absoluto en el diámetro menor de la expansión de la tubería, y el error absoluto en el diámetro mayor de la expansión de la tubería, respectivamente.

Función Error en el accesorio reducción, esta calcula el error absoluto en el coeficiente de pérdidas del accesorio de reducción o contracción gradual en la tubería, debido al error absoluto de los diámetros de cambio de sección, esta función fue calculada en base a la ecuación 4.5

Function error_reduccion(reduccion, diam1, diam2)

Dim ddiam1 As Double, ddiam2 As Double

ddiam1 = 0.00001

ddiam2 = 0.00001

error_reduccion = reduccion * ((ddiam1 / diam1) ^ 2 + (ddiam2 / diam2) ^ 2) ^ (1 / 2)

End Function

En esta función las variables reduccion, diam1, y diam2, representan el coeficiente de pérdidas por reducción, el diámetro menor en la reducción, y el diámetro mayor en la reducción, respectivamente. Al igual que en la función anterior se crearon dos variables tipo Double, que son ddiam1 y ddiam2, las cuales representan el error absoluto en el diámetro menor de la reducción de la tubería, y el error absoluto en el diámetro mayor de la reducción de la tubería, respectivamente.

Función Error en el accesorio válvula de bola, esta calcula el error absoluto en el coeficiente de pérdidas del accesorio válvula de bola con cambio de sección, debido al error absoluto de los diámetros de cambio de sección y del factor de fricción, esta función fue calculada en base a la ecuación 4.5

Function error_vBola(vBola, diam1, diam2, fr, dfr)

Dim ddiam1 As Double, ddiam2 As Double

ddiam1 = 0.00001

ddiam2 = 0.00001

error_vBola = vBola * ((ddiam1 / diam1) ^ 2 + (ddiam2 / diam2) ^ 2 + ((2 * dfr) / fr) ^ 2) ^ (1 / 2)

End Function

En esta función las variables v_{Bola} , $diam1$, $diam2$, fr , y dfr , representan el coeficiente de pérdidas en la válvula de bola con cambio de sección, el diámetro menor, el diámetro mayor, el factor de fricción, y el error absoluto en el factor de fricción, respectivamente. Al igual que en las dos funciones anteriores se crearon dos variables tipo Double, que son $ddiam1$ y $ddiam2$, las cuales representan el error absoluto en el diámetro menor, y el error absoluto en el diámetro mayor, respectivamente.

Se creó también tres funciones que calculan el error absoluto en las pérdidas menores causada por estos accesorios, esta función se presenta a continuación.

Función Error en las pérdidas menores, esta calcula el error absoluto en las pérdidas menores causada por la expansión, reducción y válvula de bola con cambio de sección, debido al error absoluto en la velocidad promedio del fluido y el coeficiente de pérdidas menores, esta función fue calculada en base a la ecuación 4.5

Function error_pmenoresII($P_{menores}$, v , k , dv , dk)

$error_pmenoresII = P_{menores} * (((2 * dv) / v) ^ 2 + (dk / k) ^ 2) ^ (1 / 2)$

End Function

En esta función las variables $P_{menores}$, v , k , dv , y dk , representan el valor de pérdidas menores, la velocidad promedio del fluido, el coeficiente de pérdidas menores, el error absoluto en la velocidad, y el error absoluto en el coeficiente de pérdidas del accesorio, respectivamente. La unidad del error absoluto de las pérdidas menores es $\pm PSI$.

Existen accesorios como la válvula de bola full port, la válvula mariposa, la válvula check, y otros, que dependen del factor de fricción para calcular las pérdidas menores causadas por el accesorio. A continuación se presenta la función que calcula el error absoluto para las pérdidas menores causadas por este tipo de accesorios.

Función Error en las pérdidas menores, esta calcula el error absoluto en las pérdidas menores, debido al error absoluto en la velocidad promedio del fluido y en el factor de fricción, esta función fue calculada en base a la ecuación 4.5

Function error_pmenoresl(Pmenores, v, fr, dv, dfr)

$$\text{error_pmenoresl} = \text{Pmenores} * (((2 * \text{dv}) / \text{v}) ^ 2 + (\text{dfr} / \text{fr}) ^ 2) ^ (1 / 2)$$

End Function

En esta función las variables Pmenores, v, fr, dv, y dfr, representan el valor de pérdidas menores, la velocidad promedio del fluido, el factor de fricción, el error absoluto en la velocidad, y el error absoluto en el factor de fricción, respectivamente. La unidad del error absoluto de las pérdidas menores es \pm PSI.

Función Error por diferencia de altura, esta calcula el error absoluto en las pérdidas o incremento de presión por diferencia de altura, debido al error absoluto en la diferencia de altura, esta función fue calculada en base a la ecuación 4.3

Function error_phidrostatica(pespcf, dh)

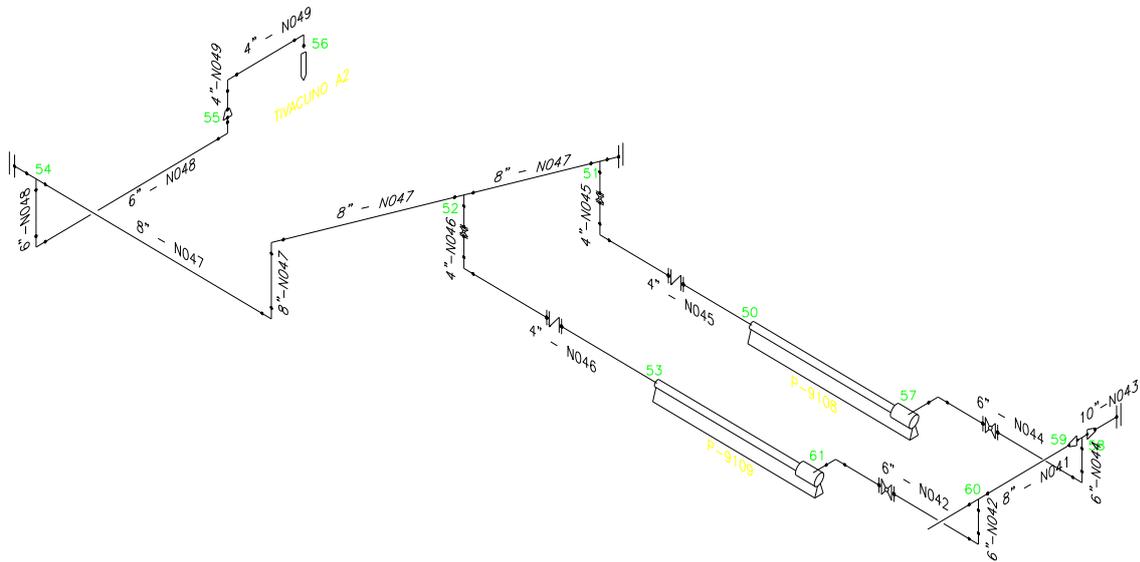
$$\text{error_phidrostatica} = (3.28084 * \text{pespcf} / 144) * \text{dh}$$

End Function

En esta función las variables pespcf, y dh, representan el peso específico del fluido, y el error absoluto de la diferencia de altura, respectivamente. La unidad del error absoluto de las pérdidas o incremento de presión por diferencia de altura es \pm metros.

Pero es necesario hacer un ejemplo de cálculo de la propagación de errores en los programas de simulación, para poder entender como fueron utilizadas las funciones antes vistas. A continuación se ejemplariza para el caso de los

tramos 55-56, 54-55, y 52-54 de la simulación del sistema de inyección de agua en NPF.



Al igual que para los cálculos del sistema de inyección de agua, los cálculos de propagación de errores para los programas de simulación se realizó de atrás hacia delante. Se comenzó con la incertidumbre que producen los valores de ingreso en cada pozo del Well Pad, para el caso del sistema de inyección de agua se ingresa el caudal y la presión en el cabezal del pozo, para todos los caudales de ingreso la incertidumbre o error absoluto es de ± 10 BPD, pero para la presión la incertidumbre no es la misma para todos los pozos, para el caso del Tivacuno A2 el error absoluto de la presión es de ± 10 PSI. A continuación se presenta parte de la hoja de cálculo de los tramos 55-56, 54-55, y 52-54.

	A	B	F	G	H
204	Tramo		52-54	54-55	55-56
205	Error Absoluto PERDIDAS MAYORES				
206	Error Absoluto Diámetro de tubería, dD	in	0.00001	0.00001	0.00001
207	Error Absoluto Longitud de tubería, dL	m	0.001	0.001	0.001
208	Error Absoluto Rugosidad Relativa de tubería, dεD		1E-12	1E-12	1E-12
209	Error Absoluto Rapidez de flujo, dw	lb/seg	0.0391	0.0391	0.0391
210	Error Absoluto Area de tubería, dA	ft^2	8.72665E-07	6.54498E-07	4.36332E-07
211	Error Absoluto Velocidad, dV	ft/seg	0.001861849	0.003309985	0.007447668
212	Error Absoluto Número de Reynolds, dRe		370.52	494.03	741.07
213	error absoluto Factor de fricción, dfr		7.739E-06	7.973E-06	8.477E-06
214	Error Absoluto Perdidas mayores de Presión	PSI	0.00015285	0.001264243	0.00086048
215	Error Absoluto PERDIDAS MENORES				
216	Codo 90° standard de 4"	PSI			
217	Codo 90° standard de 8"	PSI	0.0000670		
218	Válvula de Bola 4"	PSI			
219	Válvula Check 4"	PSI			
220	Te 8" con flujo a través de la rama	PSI	0.0002678	0.0004233	
221	Te 8" con flujo a través del tramo	PSI			
222	Codo 90° standard de 6"	PSI		0.0002116	
223	Reducción 6"x4"	PSI		0.00033368	
224	Válvula de choque 4"	PSI			0.001470

238	Error Absoluto Perdidas menores de Presión	PSI	0.0003348	0.0009686	0.0014704
239					
240	Error Absoluto PERDIDAS DE PRESIÓN	PSI	0.000488	0.002233	0.002331
241	Error PERDIDAS DE PRESIÓN	%	0.104743	0.107717	0.113236
242					
243	Error Absoluto PRESIÓN HIDROSTÁTICA				
244	Error Absoluto diferencia de altura, dh	m	0.001	0.001	0.001
245	Error Absoluto Presión Hidrostática	PSI	0.00137	0.00137	0.00137
246	Error Presión Hidrostática	%	0.04808	0.08264	0.01250
247					
248					
249	PRESIÓN DE ENTRADA	%	1.18320	1.03038	0.84002
250	PRESIÓN DE SALIDA	%	1.03038	0.84002	0.71
251					
252	PRESIÓN DE SUCCIÓN DE LAS BOMBAS	±PSI			
253	PRESIÓN DE SUCCIÓN DE LAS BOMBAS	%			
254	CAUDAL DE SUCCIÓN DE LAS BOMBAS	±BPD			
255	CAUDAL DE SUCCIÓN DE LAS BOMBAS	%			
256	BOMBA				
257	PRESIÓN DE DESCARGA DE LAS BOMBAS	±PSI			
258	PRESIÓN DE DESCARGA DE LAS BOMBAS	%			
259	CAUDAL DE DESCARGA DE LAS BOMBAS	±BPD			
260	CAUDAL DE DESCARGA DE LAS BOMBAS	%			
261	BOMBA				
262	PRESIÓN DE INYECCIÓN AL POZO	±PSI			10
263	CAUDAL DE INYECCIÓN AL POZO	±BPD			10
264		POZO			Tivacuno A2
265	PRESIÓN DE INYECCIÓN AL POZO	%			0.71
266	CAUDAL DE INYECCIÓN AL POZO	%			0.051

El error relativo (%) de la presión y del caudal de inyección del pozo, es igual a la incertidumbre de la presión o del caudal, dividido para el valor de presión o caudal de inyección dependiendo sea el caso, multiplicado por cien; por

ejemplo para el caso de presión de inyección del Tivacuno A2, el error relativo es la siguiente:

$$\text{error relativo presión/caudal} = \frac{\text{Incertidumbre}}{\text{Valor presión/caudal}} * 100\% \quad \mathbf{4.6}$$

$$\text{error relativo} = \frac{10 \text{ PSI}}{1400 \text{ PSI}} * 100\% = 0.71\%$$

El error absoluto de la rapidez de flujo se calcula en base a la ecuación 3.45, es decir este error es igual a la incertidumbre del caudal de inyección del pozo, multiplicado por el peso específico del fluido, por el factor de conversión 0.00006499; para el caso del tramo 55-56 el error absoluto de la rapidez de flujo es la siguiente:

$$\text{error absoluto rapidez de flujo} = \text{Incertidumbre Caudal} * \gamma * 0.00006499 \quad \mathbf{4.7}$$

$$\text{error absoluto rapidez de flujo} = 10 * 60.1 * 0.00006499$$

$$\text{error absoluto rapidez de flujo} = \pm 0.0391 \text{ lb / seg}$$

En la tabla 4.41 se encuentran los valores de error absoluto del diámetro de la tubería, de la longitud de la geografía, de la rugosidad relativa del material de la tubería y de la diferencia de altura. El error absoluto del área, velocidad, número de Reynolds, factor de fricción, y las pérdidas mayores se calcularon en base a las funciones del módulo “Errores”, esto se puede ver a continuación.

$$ndD = \frac{dD}{12}$$

$$ndiam = \frac{diam}{12}$$

$$\text{error absoluto area} = \text{area} * \sqrt{2 \left(\frac{ndD}{ndiam} \right)^2} \quad \mathbf{4.8}$$

$$ndD = \frac{0.00001}{12} = \pm 8.33 \times 10^{-7} \text{ ft}$$

$$ndiam = \frac{4}{12} = \pm 0.333 \text{ ft}$$

$$\text{error absoluto area} = 0.0873 \text{ ft}^2 * \sqrt{2 \left(\frac{8.33 \times 10^{-7}}{0.333} \right)^2} = \pm 4.36 \times 10^{-7} \text{ ft}^2$$

$$\text{error absoluto velocidad} = \text{velocidad} * \sqrt{\left(\frac{dw}{w} \right)^2 + \left(\frac{darea}{area} \right)^2} \quad \mathbf{4.9}$$

$$\text{error absoluto velocidad} = 14.707 \frac{\text{ft}}{\text{seg}} * \sqrt{\left(\frac{0.0391}{77.134} \right)^2 + \left(\frac{4.36 \times 10^{-7}}{0.0873} \right)^2} = \pm 0.00745 \frac{\text{ft}}{\text{seg}}$$

, donde w es la rapidez de flujo, y dw es su error absoluto.

$$\text{error absoluto \# Reynolds} = \# \text{ Reynolds} * \sqrt{\left(\frac{d\text{velocidad}}{\text{velocidad}} \right)^2 + \left(\frac{ndD}{ndiam} \right)^2} \quad \mathbf{4.10}$$

$$\text{error absoluto \# Reynolds} = 1463376.99 * \sqrt{\left(\frac{0.00745}{14.707} \right)^2 + \left(\frac{8.33 \times 10^{-7}}{0.333} \right)^2} = \pm 741.07$$

$$\text{error absoluto factor fricción} = \text{factor fricción} * \sqrt{\left(\frac{deD}{eD} \right)^2 + \left(\frac{dRe}{Re} \right)^2} \quad \mathbf{4.11}$$

$$\text{error absoluto factor fricción} = 0.0167 * \sqrt{\left(\frac{1 \times 10^{-12}}{0.000446} \right)^2 + \left(\frac{741.07}{1463376.99} \right)^2} = \pm 8.48 \times 10^{-6}$$

$$\text{error absoluto Pérdidas Mayores} = \text{Pérdidas Mayores} * \sqrt{\left(\frac{dfr}{fr} \right)^2 + \left(2 \frac{d\text{velocidad}}{\text{velocidad}} \right)^2 + \left(\frac{ndD}{ndiam} \right)^2}$$

4.12

$$\text{error absoluto Pérdidas Mayores} = 0.76 \text{ PSI} * \sqrt{\left(\frac{dfr}{0.017} \right)^2 + \left(2 \frac{0.00745}{14.707} \right)^2 + \left(\frac{8.33 \times 10^{-7}}{0.333} \right)^2}$$

$$\text{error absoluto Pérdidas Mayores} = \pm 0.00086 \text{ PSI}$$

Para este tramo existe un accesorio que es una válvula de choque de 4 pulgadas, para este se aplica la función de error en pérdidas menores donde el accesorio depende el factor de fricción, este error es el siguiente

$$\text{error válvula choque} = \text{pérdida menor} * \sqrt{\left(2 \frac{d\text{velocidad}}{\text{velocidad}}\right)^2 + \left(\frac{dfr}{fr}\right)^2} \quad \mathbf{4.13}$$

$$\text{error válvula choque} = 1.299\text{PSI} * \sqrt{\left(2 \frac{0.00745}{14.707}\right)^2 + \left(\frac{8.48 \times 10^{-6}}{0.0167}\right)^2} = \pm 0.00147\text{PSI}$$

$$\text{error absoluto pérdidas_menores} = \sum \text{error absoluto de cada accesorio} \quad \mathbf{4.14}$$

Como no existe otro accesorio el error absoluto total de pérdidas menores es igual 0.00147PSI. El error absoluto de pérdidas de presión es la suma del error absoluto de pérdidas menores más pérdidas mayores, esto se muestra a continuación.

$$\text{error absoluto pérdidas de presión} = \text{error absoluto pérdidas mayores} + \text{error absoluto pérdidas menores}$$

4.15

$$\text{error absoluto pérdidas de presión} = 0.00086\text{PSI} + 0.00147\text{PSI}$$

$$\text{error absoluto pérdidas de presión} = \pm 0.00233 \text{ PSI}$$

Para el caso del sistema de inyección de agua, es necesario determinar el error relativo de las pérdidas de presión, este error es igual al error relativo, dividido para el valor de pérdidas de presión, multiplicado por cien, este valor para el tramo 55-56 es el siguiente:

$$\text{error relativo pérdidas presión} = \frac{\text{error absoluto pérdidas presión}}{\text{Valor pérdidas presión}} * 100\% \quad \mathbf{4.16}$$

$$\text{error relativo pérdidas presión} = \frac{0.00233}{2.058} * 100\% = 0.11\%$$

También se debe determinar el error absoluto de pérdida o incremento de presión por diferencia de altura, dicho error es el siguiente:

$$\text{error absoluto diferencia de altura} = 3.28084 * \gamma * dH * \frac{1}{144} \quad \mathbf{4.17}$$

, donde dH, es la incertidumbre en la medida de la diferencia de altura; el valor de 3.28084 es el factor de convergencia de metros a pies, y el valor 1/144 es el factor de convergencia de pies al cuadrado a pulgadas al cuadrado; estas convergencias se las hace para que este error se encuentre en PSI. A continuación se muestra cual es este error para el tramo 55-56.

$$\text{error absoluto diferencia de altura} = 3.28084 * 60.1 * 0.001 * \frac{1}{144} = \pm 0.00137 \text{PSI}$$

Al igual que para las pérdidas de presión, para las pérdidas o incremento por diferencia de altura se debe determinar el error relativo, este error es el siguiente:

$$\text{error relativo diferencia de altura} = \frac{\text{error absoluto diferencia de altura}}{\text{Valor diferencia de altura}} * 100\%$$

4.18

$$\text{error relativo diferecia de altura} = \frac{0.00137}{10.954} * 100\% = 0.013\%$$

El error relativo de la presión de salida en el tramo, es el error relativo que hay en la ⁵⁵presión del pozo, que para el tramo 55-56 es 0.71%; el error relativo en la presión de entrada va ser la suma del error relativo en la presión de salida, más el error relativo en pérdidas de presión, y más el error

⁵⁵ Este error relativo, es el error debido a la incertidumbre en la medida de presión de inyección de agua en el pozo, cuyo valor es un INPUT del programa.

relativo en pérdidas o incremento de presión por diferencia de alturas, esto se puede constatar a continuación.

error relativo Presión Entrada = error relativo Presión Salida + error relativo pérdidas de presión + error relativo en diferencia de altura

4.19

error relativo Presión Entrada = 0.71% + 0.11% + 0.013% = 0.84%

El error relativo de entrada en el tramo 55-56, es el error relativo en el tramo 54-55, este proceso de tramos se repite hasta llegar el error relativo en la altura de los tanques de almacenamiento de agua para el sistema de inyección de agua de formación.

Para el caso del sistema de producción de crudo, se trabaja de igual manera, pero a diferencia del sistema de inyección, este parte de la incertidumbre en la presión y caudal en el del pozo de producción, y se llega a determinar el error relativo de la presión que llega a la facilidad de producción. Otro caso que cambia en la propagación de errores en el sistema de producción es que se trabajo con el error absoluto para la presión de salida y de entrada, no como se lo hizo en el sistema de inyección donde se trabajo con el error relativo, la única diferencia es que se acumula el error absoluto, y en los puntos donde se desea el error relativo se aplica la fórmula para determinar este de acuerdo al error absoluto acumulado hasta ese punto.

Al igual que para los cálculos del sistema de inyección de agua, y el sistema de producción de crudo, el error relativo, o el error absoluto en la presión de salida, en un tramo que se divide en dos , la presión de entrada es la misma para cada tramo. Pero en un punto donde se encuentran dos tramos se escoge el mayor ⁵⁶error de presión, para que sea este el error en el punto.

⁵⁶ Se escoge el mayor error de presión, aplicando una teoría pesimista

Dentro del análisis del tramo 55-56, no se utilizó las fórmulas para cálculo de error absoluto en el coeficiente de pérdidas menores para los accesorios de expansión, reducción, y válvula de bola con cambio de sección, estas fórmulas son las siguientes:

$$\text{error absoluto coeficiente e pérdidas expansión} = \text{expansión} * \sqrt{\left(\frac{\text{ddiam1}}{\text{diam1}}\right)^2 + \left(\frac{\text{ddiam2}}{\text{diam2}}\right)^2}$$

4.20

$$\text{error absoluto coeficiente e pérdidas reducción} = \text{reducción} * \sqrt{\left(\frac{\text{ddiam1}}{\text{diam1}}\right)^2 + \left(\frac{\text{ddiam2}}{\text{diam2}}\right)^2}$$

4.21

$$\text{error absoluto coeficiente e pérdidas V.Bola} = \text{V.Bola} * \sqrt{\left(\frac{\text{ddiam1}}{\text{diam1}}\right)^2 + \left(\frac{\text{ddiam2}}{\text{diam2}}\right)^2 + \left(2 \frac{\text{dfr}}{\text{fr}}\right)^2}$$

4.22

, donde diam1 es el diámetro menor en el cambio de sección, y diam2 es el diámetro mayor en el cambio de sección; mientras que ddiam1 y ddiam2, es la incertidumbre o error absoluto en el diámetro menor y en el diámetro mayor, respectivamente. Pero además es necesario conocer cual es el error absoluto que produce estos accesorios, este error se muestra a continuación.

$$\text{error pérdida menor accesorio} = \text{pérdida menor} * \sqrt{\left(2 \frac{\text{dvelocidad}}{\text{velocidad}}\right)^2 + \left(\frac{\text{dk}}{\text{k}}\right)^2}$$

4.23

, donde k, es el coeficiente de pérdida de este tipo de accesorio, y dk, es su error absoluto.

Ahora que se sabe como se calculó la propagación de errores en los programas de simulación, se puede mostrar cual es el *error relativo máximo* que se puede tener en los SALIDAS de los programas.

4.4.2 ERROR EN LOS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN

4.4.2.1 Error en la simulación del sistema de inyección de agua de formación de NPF

Lo primero en determinar en el cálculo de error del programa, es el error relativo en la presión y en el caudal de inyección en el cabezal de los pozos, esto se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4.75: Error en el programa de simulación en la presión y caudal en los cabezales de inyección de los pozos de NPF

Well Pad	Pozo	Error Relativo Presión en el cabezal del pozo %	Error Relativo Caudal %
BOGI	BOGI A2	0.64	0.045
	BOGI A3	1.6	0.042
	BOGI A4	1.6	0.055
TIVACUNO	TICACUNO A2	0.71	0.051
WIP	NPF1	0.85	0.040
	NPF2	0.85	0.040

Luego de haber determinado el error relativo en la presión y caudal de inyección del pozo, se debe determinar el error relativo en la presión de succión y de descarga en las bombas de alta presión, este error es el siguiente.

Tabla 4.76: Error en el programa de simulación de la presión de succión y de descarga de las bombas de alta presión de NPF

Well Pad	Bomba	<i>Error Relativo</i> Presión de Succión %	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
BOGI	P-1950	3.2	2.5
	P-1951	3.1	2.4
	P-1952	3.1	2.4
TIVACUNO	P-9108	2.2	1.5
	P-9109	-	-
WIP	P-1079A	2.3	1.6
	P-1079B	2.3	1.6

Lo tercero en determinar es el error relativo en la presión de succión y de descarga de las bombas de media presión, el valor de estos errores se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 4.77: Error en el programa de simulación de la presión de succión y de descarga de las bombas de media presión de NPF

Bomba	<i>Error Relativo</i> Presión de Succión %	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
P-1119 A	7.5	7.3
P-1119 B	7.0	6.8
P-1119 C	-	-

El error relativo de la presión de descarga de las bombas de baja presión, se presenta a continuación.

Tabla 4.78: Error en el programa de simulación de la presión de descarga de las bombas de baja presión de NPF

Bomba	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
P-1121 A	9.4
P-1121 B	-
P-1121 C	8.2
P-1123A	-

Finalmente se debe determinar el error relativo que existe en la altura de los tanques de almacenamiento de agua, este error es el siguiente.

Tabla 4.79: Error en el programa de simulación de la altura de los tanques de almacenamiento de agua de NPF

Tanque de Almacenamiento	<i>Error Relativo</i> Altura %
T-1118A	10.9
T-1118B	10.9

4.4.2.2 Error en la simulación del sistema de inyección de agua de formación de SPF

Al igual que para el caso de NPF, lo primero en determinar es el error relativo en la presión y en el caudal de inyección en el cabezal de los pozos, esto se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4.80: Error en el programa de simulación en la presión y caudal en los cabezales de inyección de los pozos de SPF

Well Pad	Pozo	<i>Error Relativo</i> Presión en el cabezal del pozo %	<i>Error Relativo</i> Caudal %
AMO A	AMO 1	0.96	0.038
	AMO A1	0.96	0.019
	AMO A2	0.95	0.036
	AMO A3	0.48	0.036
	AMO A6	0.48	0.029
AMO B	AMO B1	0.96	0.032
	AMO B6	0.96	0.035
	AMO B10	0.96	0.025
WIP	WIP1	0.45	0.018
	WIP2	0.89	0.026
	WIP3	0.45	0.022
	WIP4	0.89	0.056

Tabla 4.81: Error en el programa de simulación en la presión y caudal en los cabezales de inyección de los pozos de SPF

Well Pad	Pozo	Error Relativo Presión en el cabezal del pozo %	Error Relativo Caudal %
DAIMI B	DAIMI B10	0.92	0.025
IRO A	IRO A3	0.96	0.020

Luego de haber determinado el error relativo en la presión y caudal de inyección del pozo, se debe determinar el error relativo en la presión de succión y de descarga en las bombas de alta presión, este error es el siguiente.

Tabla 4.82: Error en el programa de simulación de la presión de succión y de descarga de las bombas de alta presión de SPF

Well Pad	Bomba	Error Relativo Presión de Succión %	Error Relativo Presión de Descarga %
AMO A	P-9101	2.4	1.7
	P-9102	2.4	1.7
	P-9103	2.4	1.7
	P-9110	2.4	1.7
	P-2079 J	2.2	1.5
	P-2079 I	2.2	1.5
	P-2079 M	2.2	1.5
AMO B	P-2079 L	2.5	1.8
	P-2079 H	2.6	1.9
	P-2079 G	2.6	1.9
WIP	P-2079 A	1.4	1.3
	P-2079 B	1.5	1.4
	P-2079 C	1.4	1.3
	P-2079 D	-	-
	P-2079 E	1.5	1.4
DAIMI B	P-2079F	1.6	1.4
IRO A	P-2079K	1.4	1.0

El error relativo en la presión de succión y de descarga de las bombas de media presión, se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 4.83: Error en el programa de simulación de la presión de succión y de descarga de las bombas de media presión de SPF

Bomba	<i>Error Relativo</i> Presión de Succión %	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
P-2119 A	4.6	4.5
P-2119 B	4.4	4.3
P-2119 C	4.4	4.3
P-2119 D	4.5	4.4
P-2119 F	4.6	4.5
P-2119 H	4.6	4.5

Lo cuarto en determinar, es el error relativo de la presión de descarga de las bombas de baja presión, este error se muestra a continuación.

Tabla 4.84: Error en el programa de simulación de la presión de descarga de las bombas de baja presión de SPF

Bomba	<i>Error Relativo</i> Presión de Descarga %
P-2121 A	8.4
P-2121 B	7.3
P-2121 C	7.7
P-2121 D	6.8
P-2121 E	6.8
P-2123 A	-

Finalmente se debe determinar el error relativo que existe en la altura de los tanques de almacenamiento de agua, este error es el siguiente.

Tabla 4.85 Error en el programa de simulación de la altura de los tanques de almacenamiento de agua de SPF

Tanque de Almacenamiento	<i>Error Relativo</i> Altura %
T-2118A	12.6
T-2118B	12.6

4.4.3 ERROR EN EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CRUDO

Lo primero en determinar para este programa de simulación, es el error relativo en la presión del cabezal del pozo productor, para luego determinar el error relativo de la presión del crudo en la salida de cada Well Pad, y finalmente determinar el error relativo en la presión del crudo de llegada a la facilidad de producción. A continuación se presenta en la siguiente tabla el error relativo de la presión en los cabezales de los pozos productores de NPF.

Tabla 4.86: Error en el programa de simulación de la presión en los cabezales de los pozos de NPF

Well Pad	Pozo	<i>Error Relativo</i> Presión en el cabezal del pozo %
CAPIRON	CAPIRON 1	1.5
	CAPIRON A1	0.7
	CAPIRON A3	0.7
	CAPIRON A4	1.4
	CAPIRON A5	1.4
	CAPIRON A6	1.4
	CAPIRON A7	1.4
	CAPIRON A8	1.4
	CAPIRON A9	1.4
	CAPIRON A10	1.5
	CAPIRON A12	1.3
	CAPIRON A14	1.5
	CAPIRON A15	1.5
	CAPIRON A17	1.4
	CAPIRON A18	1.5

El error relativo de la presión del crudo en la salida de Capiron, es de 1.7%; mientras que el error relativo de la presión del crudo a la llegada a la facilidad de producción del norte, es de 2.8%. Por otro lado el error relativo de la presión en los cabezales de los pozos productores de SPF, se muestra en las siguientes tablas

Tabla 4.87: Error en el programa de simulación de la presión en los cabezales de los pozos de SPF

Well Pad	Pozo	<i>Error Relativo</i> Presión en el cabezal del pozo %
AMO A	AMO A4	1.4
AMO B	AMO 2B	1.5
	AMO B4	1.5
	AMO B5	1.5
	AMO B7	1.3
	AMO B8	1.4
	AMO B9	1.3
	AMO B11	1.5
	AMO B12	1.4
AMO C	AMO C1	1.3
	AMO C5	1.3
	AMO C7	1.3
	AMO C13	1.3
	AMO C14	1.4
IRO A	IRO A1	1.2
	IRO A2	1.2
	IRO A5	1.1
	IRO A6	1.1
IRO 1	IRO 1	0.14
	IRO 2	0.14
	IRO 3	0.14
	IRO 4	0.14
	IRO 5	0.14
	IRO 6	0.14
	IRO 7	0.14
	IRO 8	0.14
	WATI	0.14
DAIMI B	DAIMI B1	1.5
	DAIMI B2	1.5
	DAIMI B3	1.5
	DAIMI B4	1.4
	DAIMI B5	1.5
	DAIMI B6	1.5
	DAIMI B7	1.6
	DAIMI B8	1.4
	DAIMI B9	1.5

Tabla 4.88: Error en el programa de simulación de la presión en los cabezales de los pozos de SPF

Well Pad	Pozo	<i>Error Relativo</i> Presión en el cabezal del pozo %
GINTA A	GINTA A1	0.14
	GINTA A2	0.14
	GINTA A3	0.14
	GINTA A4	0.14
	GINTA A5	0.14
	GINTA A6	0.14
	GINTA A7	0.14
	GINTA A8	0.14
	GINTA A9	0.14
	GINTA A10	0.13
	GINTA A11	0.15
	GINTA A12	0.14
	GINTA A14	0.14
	GINTA B	DABO 1
GINTA B2		0.13
GINTA B3		0.14
GINTA B4		0.13
GINTA B5		0.14
GINTA B6		0.14
GINTA B8		0.13
GINTA B9		0.13
GINTA B10		0.13
GINTA B11		0.13
GINTA B12		0.14
GINTA B13		0.13
GINTA B14		0.12
GINTA B15		0.13
GINTA B16		0.14
GINTA B17		0.13
GINTA B18		0.13
GINTA B19		0.14
GINTA B20		0.14
GINTA B21		0.14
GINTA B22		0.14
GINTA B23		0.14
GINTA B24		0.14
GINTA B25		0.14
GINTA B26		0.14
GINTA B27		0.13
GINTA B29		0.14

Finalmente el error relativo de la presión del crudo a la salida de cada Well Pad, se muestra a continuación.

Tabla 4.89: Error en el programa de simulación de la presión del crudo a la salida de los Well Pads de SPF

Well Pad	<i>Error Relativo</i>
	Presión de Salida del Well Pad %
AMO A	1.6
AMO B	1.6
AMO C	1.4
IRO A	1.2
IRO 1	0.15
GINTA A	0.16
GINTA B	0.19
DAIMI B	1.8

El error relativo que se produce en la presión del crudo que llega desde los Well Pads Amo A, Amo B, y Amo C a la facilidad de producción, es de 1.5 %; mientras que el error relativo en la presión del crudo que llega desde los Well Pads Iro A, Iro 1, Ginta A, Ginta B y Daimi B a la facilidad, es de 4.9%.

Ahora que se conocen todos los tipos de errores que involucran las simulaciones, se puede decir que el error relativo que pueden producir los programas es bajo, considerando que el error de inicio se acumula considerablemente, además hay que tomar en cuenta que el error absoluto de inicio para el caso de la presión, es tomado de instrumentos de medición para valores altos de presión, como son los valores de inyección de los pozos, y se llega a determinar errores donde el valor de presión es bajo. Para el caso del caudal el error relativo que producen los programas es aun más bajo, pues sus instrumentos de medición nos dan un error absoluto o incertidumbre muy pero muy bajo.

Por otro lado, el error relativo entre los valores obtenidos en el campo, con los valores que arrojan los programas, en la mayoría de puntos de análisis, están dentro de lo permitido, esto quiere decir que no es mayor al error que

puede producir las simulaciones. Pero existen puntos donde esto no sucede, es decir que el error relativo entre los valores obtenidos en el campo, con los valores que arrojan los programas, es mayor al error que puede producir las simulaciones, es en estos puntos donde se debe tomar en cuenta y consideración por parte de la compañía, pues pueden existir valores críticos⁵⁷, puede ocurrir que existen daños en la tubería, como es material dentro de esta o puede estar desgastada, o puede ocurrir que están fallando algunos instrumentos de medición del bloque. En el capítulo 6, se da a conocer que se pudo concluir acerca de los cálculos que se obtuvieron en este capítulo.

⁵⁷ Valores críticos hay donde existen grandes errores relativos producidos entre los datos de campo con los valores que arrojan los programas de simulación

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN

COSTOS Y GASTOS DEL PROYECTO

Los costos y gastos de este proyecto fueron financiados en su totalidad por REPSOL - YPF ECUADOR.

Parte del proyecto de grado se realizó en las oficinas de REPSOL – YPF en la ciudad de Quito, los gastos que conllevó realizar el proyecto de grado en las oficinas de la compañía, se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5.1: Gastos que conllevó realizar el proyecto de grado en las oficinas de REPSOL-YPF

DESCRIPCIÓN	VALOR (\$)
Material logístico (papel, copias, CDs, impresiones, etc.)	100
Utilización de oficinas, computadoras, e Internet	80
VALOR TOTAL (\$)	180

La otra parte de este proyecto de grado se lo realizó en el campo, se efectuaron tres viajes hacia el Bloque 16, estos viajes se los realizó en avión hasta la ciudad del Coca, y mediante barco y bus hasta las facilidades de producción. La permanencia total en el bloque para la realización de este proyecto fue de 63 días, durante los mismos la empresa brindó todas las comodidades como hospedaje, comida, lavandería, material logístico, etc. A

continuación en la siguiente tabla se presenta de forma desglosada los gastos que se realizó en los viajes y permanencia en el Bloque 16.

Tabla 5.2: Gastos del proyecto de viajes y permanencias en el Bloque 16

DESCRIPCIÓN	#	VALOR (\$)
Viaje en avión Quito-Coca	6	270
Viaje en Barco Coca-Pompeya	6	60
Vieja en Bus Pompeya-Facilidades	6	60
Hospedaje	63 días	630
Servicio de lavandería	63 días	315
Comida (Desayuno, Almuerzo, Merienda)	63 días	1890
Servicio Básicos	63 días	315
Material logístico (papel, copias, CDs, etc.)		150
Equipo de Seguridad (camisa, pantalón, botas, casco, gafas, guantes)		140
Utilización de oficinas, computadoras, e Internet	63 días	150
VALOR TOTAL (\$)		6820

El valor total de gastos del proyecto es la suma entre los gastos que se realizó en el bloque, más los gastos realizados en las oficinas de la compañía, este valor es de 7000\$.

EVALUACIÓN FINANCIERA

Como se pudo ver en el subcapítulo anterior, el gasto del proyecto no es un valor o costo muy significativo para la empresa, pues esta, está acostumbrada a manejar grandes cantidades de dinero (millones de dólares), además que estos gastos están dentro del presupuesto de la compañía, que es la de brindar todas la comodidades y servicios en el Bloque 16, a sus trabajadores, pasantes y estudiantes que efectúan tesis de grado.

Los programas de simulación pueden remplazar sin ningún problema a los programas comerciales, si así lo dispone la compañía, esto reducirá notablemente los gastos que la empresa pueda tener, pues los programas comerciales son muy costosos. La compañía trabaja habitualmente con el programa comercial Pipesim, la licencia por un año de utilización de este programa de simulación es de 85000\$, si comparamos este valor con los 7000\$ que le costó a la compañía la realización de este proyecto de grado, la empresa podría ahorrar 78000\$.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- El sistema de inyección de agua de formación, de NPF, como el de SPF, están trabajando dentro de lo establecido por la compañía, es decir estas presiones no causaran ruptura en las tuberías, ni existirá fuga de agua en las bridas que conectan a los accesorios con la geografía del sistema; además el nivel o altura de los tanques de almacenamiento de agua de formación se encuentra dentro del rango permitido que es de 22 a 32 ftH₂O, por lo que se puede concluir que las plantas de producción pueden trabajar sin ningún problema con el caudal de agua de formación separada del crudo que se maneja actualmente.
- Como podemos ver en el capítulo 4, el error relativo entre el valor obtenido en el campo con el valor que arroja el programa, de la presión de succión de las bombas P-1079A, P-1079B, P-1119A, P-2079H, P-2119B, P-2119C, es mayor al error relativo que los programas pueden producir, esto se puede deber a que los instrumentos de medición que se encuentran a lo largo de la geografía del sistema estén ligeramente dañados o en mal estado, por lo que los datos en estos son erróneos.
- La tuberías que transportan crudo que conectan los Well Pads con las facilidades de producción pueden encontrarse desgastadas, sucias o con material de crudo pesado seco, dichos factores producen una

rugosidad relativa mayor en la tubería, por lo que existe una mayor pérdida de presión en estos tramos, es por ello que el error entre el valor obtenido en el campo con el valor que arroja el programa, es mayor al error relativo que los programas pueden producir.

- El incremento de producción de crudo que tiene REPSOL-YPF, no tienen pérdidas de presión significativas, y además los parámetros trabajan dentro de los rangos de seguridad con los que trabaja la compañía, por lo que el diseño de las plantas pueden trabajar sin ningún problema con el caudal de crudo que se maneja actualmente.
- Existiría problemas en el futuro en el sistema de inyección de agua de formación, pues si se sigue incrementando la producción de crudo también se incrementará el caudal de agua de formación, y como podemos ver en los anexos en las graficas de curva de funcionamiento de la bomba y curva del sistema, existen bombas en SPF, como las bombas booster P-2121D, y P-2121E , bombas de media presión como las P-2119B, P-2119C, y P-2119D, y las bombas de alta presión como las P-2079K, P-2079A, P-2079B, y P-2079C, que se encuentran trabajando cerca de su punto de cierre.
- El costo de este proyecto de grado es muy inferior al costo de los programas comerciales, el costo de este proyecto de grado fue de 7000\$, mientras que el costo de adquirir la licencia por una año de utilización del programa Pipesim es de 85000\$, por lo que la compañía podría reducir gastos, al no adquirir o comprar las licencias temporales de dichos programas.

6.2 RECOMENDACIONES

- Es recomendable que se revise las tuberías que componen el sistema de inyección de agua de formación, pues desde que fueron construidas las facilidades de producción ha pasado un tiempo muy considerable, por lo que las tuberías pudieran encontrarse desgastadas debido a las sales que componen el agua de formación, y por ende la presión que pueden aguantar estas es menor a la que la norma dicta, y podría ser necesario que se reduzca la presión y el caudal en ciertos tramos de la geografía de este sistema.
- Se deberían revisar todos los instrumentos de medición como manómetros y turbinas contadoras de caudal, que se encuentran a lo largo de la geografía, del sistema de inyección de agua de formación, como del sistema de producción de crudo, pues algunos instrumentos podrían encontrarse dañados y no mostrarían el valor real del parámetro, esta revisión es fundamental porque los valores de algunos parámetros es importante para el manejo de la producción de crudo, y si estos valores no son totalmente correctos no se tendría el valor real de dicha producción.
- Las tuberías que conectan los Well Pads con las facilidades de producción dentro del sistema de producción de crudo, se deberían revisar, puesto que el estudio dio valores críticos en la presión de llegada a las facilidades.
- En el futuro, cuando se haya incrementado considerablemente la producción de crudo, se debería revisar que presión pueden aguantar las tuberías y accesorios del sistema de producción, pues podría existir ruptura y problemas en dichas tuberías y accesorios.

- Para futuro se debería hacer algunos arreglos o modificaciones dentro del sistema de inyección, como es la de aumentar el número de pozos inyectoros, aumentar el número de bombas, o cambiar algunas bombas, o cambiar el impeler o el número de giro de dichas bombas, estos cambios ayudarán a manejar un caudal mayor de agua debido al incremento de la producción de crudo.
- A pesar de que el error que producen los programas es bajo, la compañía debería adquirir programas comerciales en caso de que se requiera una simulación de estos sistemas con valores de SALIDAS con mayor exactitud que los valores que arrojan los programas de simulación efectuados en este proyecto de grado.

CAPÍTULO 7

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

- MOTT, R.L. Mecánica de fluidos aplicada. Traducido del inglés por Carlos Roberto Cordero Pedraza. 4ta. ed. México, Prentice Hall. 1996. 567p.
- HODGE B.K. y TAYLOR R.P. Analysis and design of energy systems. No tiene traducción. 3a. ed. New Jersey, Prentice Hall. 1999. 475p.
- SMITH C.R., TRACY G.W. y FARRAR R.L. Applied reservoir engineering. No tiene traducción. Primera ed. Tulsa. 1992. v.1444p.
- BEVINGTON P. y ROBINSON D.K. Data reduction and error analysis for the physical sciences. No tiene traducción. 2da. ed. New York, McGraw Hill. 1993. 560p.
- SPIEGEL y MURRAY. Estadística. Traducido del inglés por Julián Torres. 2da. ed. Madrid, MaGraw Hill. 1995. 340p.
- GARCÍA J., RODRÍGUEZ J.I. y BRAZÁLEZ A. Aprenda Visual Basic 6.0 como si estuviera en primero. Primera ed. San Sebastián, s.e. 1999. 99p.
- DOBRIN M.B. Introducción a la Prospección Geofísica. Primera ed. Madrid, Paraninfo. 1975. 200p.

- <http://www.cybercursos.net>, Macros en MS Excel, 20 de Agosto del 2000.
- <http://www.uv.es/~diaz/mn/node6.html>, Métodos numéricos, propagación de errores, 10 de Agosto del 2003.
- <http://www.monografias.com/trabajos5/petpe/petpe.shtml>, Petróleo y petroquímica, 6 de Octubre del 2002.
- <http://www.monografias.com/trabajos11/pope/pope.shtml>, Perforación y terminación de pozos petroleros, 18 de Septiembre del 2004.
- <http://www.monografias.com/trabajos11/cuadun/cuadun.shtml>, Origen y composición del petróleo, 23 de Mayo del 2004.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN DE LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO.....	ii
LEGALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTOS.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN	1
1.1 ANTECEDENTES.....	1
1.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	2
1.3 ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN DEL PROBLEMA.....	3
1.4 META.....	4
1.5 OBJETIVO	4
1.5.1 GENERAL.....	4
1.5.2 ESPECÍFICOS.....	4
1.6 JUSTIFICACIÓN.....	5
1.7 METODOLOGÍA A EMPLEAR	6

CAPÍTULO 2

RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN	7
2.1 INTRODUCCIÓN	7
2.1.1 PROSPECCIÓN	7
2.1.1.1 Geología del Petróleo.....	7
2.1.1.2 Exploración Petrolera.....	9
2.1.2 PERFORACIÓN	11
2.1.2.1 Introducción.....	11
2.1.2.2 Perforación multilateral.....	13
2.1.3 EXTRACCIÓN DE HIDROCARBUROS POR BOMBEO ELECTROSUMERGIBLE.....	15

2.1.4	<i>DISPOSICIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN</i>	16
2.2	CARACTERIZACIÓN DEL BLOQUE 16.....	17
2.2.1	<i>WELL – PADS</i>	20
2.2.1.1	Sistema de extracción de crudo	22
2.2.1.2	Sistema de inyección de agua de formación	25
2.2.2	<i>FACILIDADES DE PRODUCCIÓN</i>	25
2.2.2.1	Proceso de Producción de Crudo en las Facilidades	29
2.2.2.2	Suministro Eléctrico.....	30
2.3	INFORMACIÓN RECOPIADA PARA EL ESTUDIO.....	30
2.3.1	<i>INFORMACIÓN DE TUBERÍAS QUE CONECTAN FACILIDADES CON WELL PADS</i>	31
2.3.2	<i>INFORMACION DE BOMBAS DEL SISTEMA DE INYECCION DE AGUA DE FORMACIÓN</i>	37
2.3.3	<i>INFORMACIÓN DE POZOS DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN Y POZOS DE EXTRACCIÓN DE CRUDO</i>	43

CAPÍTULO 3

DISEÑO E IMPLEMENACIÓN DEL PROGRAMA DE

SIMULACIÓN 45

3.1	DETERMINACIÓN DEL LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN.....	45
3.1.1	<i>INTRODUCCIÓN (PROGRAMAS SECUENCIALES, INTERACTIVOS Y ORIENTADOS A EVENTOS)</i>	46
3.1.2	<i>PROGRAMA PARA EL ENTORNO WINDOWS</i>	47
3.1.2.1	Modo de Diseño y Modo de Ejecución	47
3.1.2.2	Formularios y Controles.....	48
3.1.2.3	Objetos y Propiedades	48
3.1.2.4	Nombres de objetos.....	49
3.1.2.5	Eventos.....	50
3.1.2.6	Métodos.....	50
3.1.2.7	Conjuntos	51
3.1.2.8	Objetos de Objetos	52
3.1.3	<i>DECLARACIÓN DE VARIABLES</i>	52

3.2	DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE SIMULACIÓN.....	54
3.2.1	<i>ECUACIÓN GENERAL DE LA ENERGÍA</i>	54
3.2.1.1	Conservación de la Energía – Ecuación de Bernoulli.....	54
3.2.2	<i>PÉRDIDAS DE ENERGÍA EN FLUIDOS</i>	57
3.2.2.1	Número de Reynolds.....	58
3.2.2.2	Pérdidas de energía debido a la fricción (Pérdidas Mayores)	59
3.2.2.3	Pérdidas por accesorios (Pérdidas Menores)	61
3.2.2.4	Sistema de línea de tubería en serie.....	65
3.2.2.5	Sistema de línea de tubería en paralelo.....	66
3.2.2.6	Bombas Centrifugas.....	66
3.2.2.6.1	Bombas operando en serie	67
3.2.2.6.2	Bombas operando en paralelo	67
3.2.2.6.3	Bombas multietapas	67
3.2.2.6.4	Cabeza de succión positiva neta (NPSH)	68
3.2.3	<i>DETERMINACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL CRUDO</i>	68
3.2.3.1	Gravedad Específica	68
3.2.3.2	Peso Específico.....	69
3.2.3.3	Densidad	69
3.2.3.4	Viscosidad Cinemática	70
3.3	DISEÑO Y CODIFICACIÓN DEL PROGRAMA	71
3.3.1	<i>ESTRUCTURAS, OPERADORES, CONTROLES Y FUNCIONES DE VISUAL BASIC</i>	71
3.3.1.1	Estructura Condicional if	71
3.3.1.2	Operadores Lógicos	72
3.3.1.2.1	Operador Lógico And (Y).....	73
3.3.1.2.2	Operador Lógico Or (O).....	73
3.3.1.3	La Función MsgBox.....	74
3.3.1.4	Procedimientos y funciones	74
3.3.1.5	Controles.....	75
3.3.1.5.1	Cuadro de Texto	75
3.3.1.5.2	Etiqueta.....	75
3.3.1.5.3	Botón	75

3.3.1.5.4	Casillas de verificación (CheckBox)	75
3.3.1.6	Cambiar las propiedades de los objetos.....	76
3.3.1.6.1	Cambiar el texto del control. Propiedad Caption	76
3.3.1.6.2	Cambiar el nombre de un control. Propiedad Name	76
3.3.1.6.3	Escribir código para el evento Click del Botón	77
3.3.1.6.4	End Sub	77
3.3.2	<i>SOLVER</i>	77
3.3.3	<i>CODIFICACIÓN DEL PROGRAMA</i>	79
3.3.3.1	Codificación del simulador del sistema de inyección de agua de formación del Bloque 16	79
3.3.3.1.1	ENTRADAS y SALIDAS de la simulación	79
3.3.3.1.2	Codificación de Funciones	80
3.3.3.1.3	Cálculos realizados	89
3.3.3.1.4	Codificación de sistema de ingreso (ENTRADAS)	104
3.3.3.1.5	Codificación del sistema de resultados (SALIDAS).....	164
3.3.3.1.6	Codificación para SOLVER	168
3.3.3.2	Codificación del simulador del sistema de producción de crudo del Bloque 16.....	178
3.3.3.2.1	ENTRADAS y SALIDAS de la simulación	178
3.3.3.2.2	Codificación de Funciones	179
3.3.3.2.3	Cálculos realizados	181
3.3.3.2.4	Codificación de sistema de ingreso (ENTRADAS)	195
3.3.3.2.5	Codificación para SOLVER	218
3.3.3.2.6	Codificación del sistema de resultados (SALIDAS).....	226
3.4	<i>VALIDACIÓN DEL PROGRAMA</i>	229
3.4.1	<i>VALIDACIÓN EN LA SIMULACION DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN</i>	231
3.4.1.1	Validación en ingreso de propiedades del fluido de trabajo	231
3.4.1.2	Validación en ingreso de ENTRADAS de cada Well Pad...	231
3.4.1.3	Validación en el ingreso del estado de las bombas de media presión	234
3.4.1.4	Validación en el ingreso del estado de las bombas de baja presión	235

3.4.1.5	Validación para SOLVER	236
3.4.2	<i>VALIDACIÓN EN LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CRUDO</i>	236
3.4.2.1	Validación en ingreso de ENTRADAS de cada Well Pad....	236
3.4.2.2	Validación para SOLVER	238
3.4.3	<i>VALIDACIÓN PARA NO INGRESAR CARACTERES EN LOS CUADROS DE TEXTO DE INGRESO DE ENTRADAS PARA LOS SIMULADORES</i>	238
3.5	IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA	239

CAPÍTULO 4

PRUEBAS DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN 241

4.1	ANÁLISIS DE DATOS DE LAS PLANTAS.....	241
4.1.1	<i>ANÁLISIS DE DATOS DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN</i>	241
4.1.1.1	Análisis de datos de NPF	242
4.1.1.2	Análisis de datos de SPF	244
4.1.2	<i>ANÁLISIS DE DATOS DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CRUDO</i>	247
4.2	COMPARACION DE DATOS DE CAMPO CONTRA DATOS DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN	251
4.2.1	<i>VALORES QUE ARROJA LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN</i>	251
4.2.1.1	Valores que arroja la Simulación del Sistema de Inyección de Agua de Formación de NPF	252
4.2.1.2	Valores que arroja la Simulación del Sistema de Inyección de Agua de Formación de SPF	254
4.2.2	<i>VALORES QUE ARROJA LA SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN CRUDO</i>	257
4.2.3	<i>ERROR ENTRE DATOS DE CAMPO Y DATOS DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN</i>	261
4.2.3.1	Error entre datos de campo y datos de la Simulación del Sistema de inyección de agua de formación	262

4.2.3.1.1	Error entre datos de campo y datos de la Simulación del Sistema de inyección de agua de formación de NPF	262
4.2.3.1.2	Error entre datos de campo y datos de la Simulación del Sistema de inyección de agua de formación de SPF	265
4.2.3.2	Error entre datos de campo y datos de la Simulación del Sistema de producción de crudo.....	267
4.3	COMPARACIÓN DE LOS DATOS DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN CON LOS PROGRAMAS COMERCIALES	271
4.3.1	<i>VALORES QUE ARROJA EL PIPESIM DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN.....</i>	<i>272</i>
4.3.1.1	Valores que arroja el Pipesim del Sistema de Inyección de Agua de Formación de NPF	272
4.3.1.2	Valores que arroja el Pipesim del Sistema de Inyección de Agua de Formación de SPF	274
4.3.2	<i>VALORES QUE ARROJA EL PIPESIM DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE PRODUCCIÓN DE CRUDO</i>	<i>276</i>
4.3.3	<i>ERROR ENTRE DATOS DE CAMPO Y DATOS DEL PIPESIM.....</i>	<i>280</i>
4.3.3.1	Error entre datos de campo y datos del Pipesim para la Simulación del Sistema de inyección de agua de formación	280
4.3.3.1.1	Error entre datos de campo y datos del Pipesim para la Simulación del Sistema de inyección de agua de formación de NPF	281
4.3.3.1.2	Error entre datos de campo y datos de la Simulación del Sistema de inyección de agua de formación de SPF	283
4.3.3.2	Error entre datos de campo y datos del Pipesim para el Sistema de producción de crudo.....	286
4.4	ANÁLISIS DE ERROR.....	290
4.4.1	<i>PROPAGACION DE ERROR.....</i>	<i>291</i>
4.4.2	<i>ERROR EN LOS PROGRAMAS DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DE AGUA DE FORMACIÓN.....</i>	<i>308</i>
4.4.2.1	Error en la simulación del sistema de inyección de agua de formación de NPF	308

4.4.2.2	Error en la simulación del sistema de inyección de agua de formación de SPF.....	310
4.4.3	<i>ERROR EN EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE PRODUCCIÓN DE CRUDO.....</i>	<i>313</i>

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROGRAMA DE

SIMULACIÓN 318

5.1	COSTOS Y GASTOS DEL PROYECTO	318
5.2	EVALUACIÓN FINANCIERA	319

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 321

6.1	CONCLUSIONES	321
6.2	RECOMENDACIONES.....	3233

CAPÍTULO 7

BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS 325

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN..... 1

Tabla 1.1: Producción total de crudo y agua de formación diaria del diseño original y del diseño actual.....	2
--	---

CAPÍTULO 2

RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN 7

Tabla 2.1: Especificación del crudo del Bloque 16.....	18
Tabla 2.2: Especificación de sales del agua de formación que se inyecta en el Bloque 16.....	31
Tabla 2.3: Características de bombas de inyección de agua de formación de baja y media presión.....	40
Tabla 2.4: Características de bombas de inyección de agua de formación de alta presión.....	41
Tabla 2.5: Características de bombas de inyección de agua de formación de alta presión.....	42
Tabla 2.6: Pozos productores de crudo del Bloque 16.....	43
Tabla 2.7: Pozos inyectores de agua de formación del Bloque 16.....	44

CAPÍTULO 3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DE

SIMULACIÓN 45

Tabla 3.1: Rugosidad relativa de acero comercial y tubing.....	61
Tabla 3.2: Tabla de verdad con el operador AND.....	73
Tabla 3.3: Tabla de verdad con el operador OR.....	73
Tabla 3.4: Propiedades de cuadros de texto que permite ingreso de propiedades de fluido de trabajo.....	105

Tabla 3.5: Propiedades de botón de comando que permite ingreso de propiedades de fluido de trabajo.....	105
Tabla 3.6: Propiedad Name de cuadros de texto que representan el ingreso de la presión y caudal en los cabezales inyectoros de los pozos en NPF	109
Tabla 3.7: Propiedades del botón de comando que permite el ingreso de la presión y caudal en los cabezales inyectoros de los pozos en NPF.....	110
Tabla 3.8: Propiedades de botón de comando que permite continuar a la siguiente hoja de ingreso de ENTRADAS en el archivo de simulación de NPF	110
Tabla 3.9: Propiedades de botón de comando que permite regresar a la hoja anterior en el archivo de simulación de NPF.....	110
Tabla 3.10: Propiedad Name de casillas de verificación que representan el estado de las bombas y pozos de inyección en NPF	111
Tabla 3.11: Propiedad Name de cuadros de texto que representan el ingreso de la presión y caudal en los cabezales inyectoros de SPF	112
Tabla 3.12: Propiedades del botón de comando que permite el ingreso de la presión y caudal en los cabezales inyectoros de los pozos en SPF	113
Tabla 3.13: Propiedades de botón de comando que permite continuar a la siguiente hoja de ingreso de ENTRADAS en el archivo de simulación de SPF.....	113
Tabla 3.14: Propiedades de botón de comando que permite regresar a la hoja anterior en el archivo de simulación de SPF.....	113
Tabla 3.15: Propiedad Name de casillas de verificación que representan el estado de las bombas y pozos de inyección en SPF	114
Tabla 3.16: Propiedad Name de casillas de verificación que representan el estado de las bombas de inyección en SPF	115
Tabla 3.17: Propiedad Name de casillas de verificación que representan el estado de las bombas de inyección en SPF	115
Tabla 3.18: Propiedades del botón de comando que permite el ingreso del estado de las bombas de media presión	139
Tabla 3.19: Propiedades de botón de comando que permite continuar a la siguiente hoja de Excel.....	139

Tabla 3.20: Propiedades de botón de comando que permite regresar a la hoja de Excel anterior	139
Tabla 3.21: Propiedad Name de casillas de verificación que representan el estado de las bombas de media presión.....	140
Tabla 3.22: Propiedades del botón de comando que permite el ingreso del estado de las bombas de baja presión.....	152
Tabla 3.23: Propiedades de botón de comando que permite continuar a la siguiente hoja de Excel	152
Tabla 3.24: Propiedades de botón de comando que permite regresar a la hoja de Excel anterior	152
Tabla 3.25: Propiedades de botón de comando que permite regresar a la hoja de ingreso de las propiedades del fluido de trabajo	152
Tabla 3.26: Propiedad Name de casillas de verificación que representan el estado de las bombas de baja presión.....	153
Tabla 3.27: Propiedades para el Valor de la Celda Objetivo.....	175
Tabla 3.28: Relación aritmética para restricciones.....	176

CAPÍTULO 4

PRUEBAS DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓN 241

Tabla 4.1: Propiedades del agua de formación del Bloque 16	241
Tabla 4.2: Datos de los cabezales de inyección de los pozos de NPF	242
Tabla 4.3: Datos de bombas de alta presión de NPF	243
Tabla 4.4: Datos de bombas de media presión de NPF.....	243
Tabla 4.5: Datos de bombas de baja presión de NPF.....	244
Tabla 4.6: Datos de los cabezales de inyección de los pozos de SPF	244
Tabla 4.7: Datos de los cabezales de inyección de los pozos de SPF	245
Tabla 4.8: Datos de bombas de alta presión de SPF	245
Tabla 4.9: Datos de bombas de alta presión de SPF	246
Tabla 4.10: Datos de bombas de media presión de SPF.....	246
Tabla 4.11: Datos de bombas de baja presión de SPF	247
Tabla 4.12: Datos de pozos de producción de crudo de NPF	248
Tabla 4.13: Datos de pozos de producción de crudo de SPF	249
Tabla 4.14: Datos de pozos de producción de crudo de SPF	250

Tabla 4.15: Datos de presión de salida de Well Pads de SPF	251
Tabla 4.16: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de los cabezales de inyección de los pozos de NPF	252
Tabla 4.17: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de bombas de alta presión de NPF	253
Tabla 4.18: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de bombas de media presión de NPF	253
Tabla 4.19: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de bombas de baja presión de NPF	254
Tabla 4.20: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de los cabezales de inyección de los pozos de SPF	254
Tabla 4.21: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de los cabezales de inyección de los pozos de SPF	255
Tabla 4.22: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de bombas de alta presión de SPF.....	255
Tabla 4.23: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de bombas de media presión de SPF.....	256
Tabla 4.24: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de bombas de baja presión de SPF.....	256
Tabla 4.25: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de pozos de producción de crudo de NPF.....	257
Tabla 4.26: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de pozos de producción de crudo de NPF.....	258
Tabla 4.27: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de pozos de producción de crudo de SPF	259
Tabla 4.28: Valores de parámetros que arroja el programa de simulación de pozos de producción de crudo de SPF	260
Tabla 4.29: Valores de presión de salida de Well Pads de SPF que arroja el programa de simulación	261
Tabla 4.30: Error entre datos de campo de los cabezales de inyección de los pozos de NPF, con los valores que arroja la simulación.....	262
Tabla 4.31: Error entre datos de campo de las bombas de alta presión de NPF, con los valores que arroja la simulación.....	263

Tabla 4.32: Error entre datos de campo de las bombas de media presión de NPF, con los valores que arroja la simulación	264
Tabla 4.33: Error entre datos de campo de las bombas de baja presión de NPF, con los valores que arroja la simulación	264
Tabla 4.34: Error entre datos de campo de la altura de almacenamiento de los tanques de NPF, con los valores que arroja la simulación	264
Tabla 4.35: Error entre datos de campo de los cabezales de inyección de los pozos de SPF, con los valores que arroja la simulación	265
Tabla 4.36: Error entre datos de campo de las bombas de alta presión de SPF, con los valores que arroja la simulación	266
Tabla 4.37: Error entre datos de campo de las bombas de media presión de SPF, con los valores que arroja la simulación	266
Tabla 4.38: Error entre datos de campo de las bombas de baja presión de SPF, con los valores que arroja la simulación	267
Tabla 4.39: Error entre datos de campo de la altura de almacenamiento de los tanques de SPF, con los valores que arroja la simulación	267
Tabla 4.40: Error entre datos de campo de presión en los cabezales de los pozos de producción de NPF, con los valores que arroja la simulación	268
Tabla 4.41: Error entre datos de campo de presión en los cabezales de los pozos de producción de SPF, con los valores que arroja la simulación	269
Tabla 4.42: Error entre datos de campo de presión en los cabezales de los pozos de producción de SPF, con los valores que arroja la simulación	270
Tabla 4.43: Error entre datos de campo de presión del crudo en la salida de los Well Pads de SPF, con los valores que arroja la simulación	271
Tabla 4.44: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de los cabezales de inyección de los pozos de NPF	272
Tabla 4.45: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de bombas de alta presión de NPF	273
Tabla 4.46: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de bombas de media presión de NPF	273

Tabla 4.47: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de bombas de baja presión de NPF	273
Tabla 4.48: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de los cabezales de inyección de los pozos de SPF	274
Tabla 4.49: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de bombas de alta presión de SPF	275
Tabla 4.50: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de bombas de media presión de SPF	275
Tabla 4.51: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de bombas de media presión de SPF	276
Tabla 4.52: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de bombas de baja presión de SPF	276
Tabla 4.53: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de pozos de producción de crudo de NPF	277
Tabla 4.54: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de pozos de producción de crudo de SPF	278
Tabla 4.55: Valores de parámetros que arroja el Pipesim de pozos de producción de crudo de SPF	279
Tabla 4.56: Valores de presión de salida de Well Pads de SPF que arroja el Pipesim.....	280
Tabla 4.57: Error entre datos de campo de los cabezales de inyección de los pozos de NPF, con los valores que arroja el Pipesim	281
Tabla 4.58: Error entre datos de campo de las bombas de alta presión de NPF, con los valores que arroja el Pipesim	281
Tabla 4.59: Error entre datos de campo de las bombas de alta presión de NPF, con los valores que arroja el Pipesim	282
Tabla 4.60: Error entre datos de campo de las bombas de media presión de NPF, con los valores que arroja el Pipesim	282
Tabla 4.61: Error entre datos de campo de las bombas de baja presión de NPF, con los valores que arroja el Pipesim	282
Tabla 4.62: Error entre datos de campo de la altura de almacenamiento de los tanques de NPF, con los valores que arroja el Pipesim.....	283

Tabla 4.63: Error entre datos de campo de los cabezales de inyección de los pozos de SPF, con los valores que arroja el Pipesim.....	283
Tabla 4.64: Error entre datos de campo de las bombas de alta presión de SPF, con los valores que arroja el Pipesim.....	284
Tabla 4.65: Error entre datos de campo de las bombas de media presión de SPF, con los valores que arroja el Pipesim.....	284
Tabla 4.66: Error entre datos de campo de las bombas de media presión de SPF, con los valores que arroja el Pipesim.....	285
Tabla 4.67: Error entre datos de campo de las bombas de baja presión de SPF, con los valores que arroja el Pipesim.....	285
Tabla 4.68: Error entre datos de campo de la altura de almacenamiento de los tanques de SPF, con los valores que arroja el Pipesim	285
Tabla 4.69: Error entre datos de campo de presión en los cabezales de los pozos de producción de NPF, con los valores que arroja el Pipesim	286
Tabla 4.70: Error entre datos de campo de presión en los cabezales de los pozos de producción de SPF, con los valores que arroja el Pipesim.....	287
Tabla 4.71: Error entre datos de campo de presión en los cabezales de los pozos de producción de SPF, con los valores que arroja el Pipesim.....	288
Tabla 4.72: Error entre datos de campo de presión del crudo en la salida de los Well Pads de SPF, con los valores que arroja el Pipesim	289
Tabla 4.73: Error absoluto del diámetro, longitud y rugosidad relativa de la tubería.....	290
Tabla 4.74: Fórmulas de acumulación de errores	292
Tabla 4.75: Error en el programa de simulación en la presión y caudal en los cabezales de inyección de los pozos de NPF	308
Tabla 4.76: Error en el programa de simulación de la presión de succión y de descarga de las bombas de alta presión de NPF	309
Tabla 4.77: Error en el programa de simulación de la presión de succión y de descarga de las bombas de media presión de NPF.....	309
Tabla 4.78: Error en el programa de simulación de la presión de descarga de las bombas de baja presión de NPF	309
Tabla 4.79: Error en el programa de simulación de la altura de los tanques de almacenamiento de agua de NPF	310

Tabla 4.80: Error en el programa de simulación en la presión y caudal en los cabezales de inyección de los pozos de SPF	310
Tabla 4.81: Error en el programa de simulación en la presión y caudal en los cabezales de inyección de los pozos de SPF	311
Tabla 4.82: Error en el programa de simulación de la presión de succión y de descarga de las bombas de alta presión de SPF	311
Tabla 4.83: Error en el programa de simulación de la presión de succión y de descarga de las bombas de media presión de SPF	312
Tabla 4.84: Error en el programa de simulación de la presión de descarga de las bombas de baja presión de SPF	312
Tabla 4.85 Error en el programa de simulación de la altura de los tanques de almacenamiento de agua de SPF	312
Tabla 4.86: Error en el programa de simulación de la presión en los cabezales de los pozos de NPF	313
Tabla 4.87: Error en el programa de simulación de la presión en los cabezales de los pozos de SPF.....	314
Tabla 4.88: Error en el programa de simulación de la presión en los cabezales de los pozos de SPF.....	315
Tabla 4.89: Error en el programa de simulación de la presión del crudo a la salida de los Well Pads de SPF.....	316

CAPÍTULO 5

EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROGRAMA DE

SIMULACIÓN 318

Tabla 5.1: Gastos que conllevó realizar el proyecto de grado en las oficinas de REPSOL-YPF	318
Tabla 5.2: Gastos del proyecto de viajes y permanencias en el Bloque 16	319

ÍNDICE DE CUADROS

CAPÍTULO 3

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL PROGRAMA DE

SIMULACIÓN 45

Cuadro 3.1: Tipos de datos en Visual Basic para Excel..... 53

Cuadro 3.2: Coeficiente de pérdidas por accesorios K 62

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN 7

Figura 2.1: Trampas estratigráficas: lentes de arena donde el petróleo se encuentra impregnado entre los granos (poros).....	8
Figura 2.2: Sísmica de Reflexión.....	10
Figura 2.3: Sísmica en 3D.....	11
Figura 2.4: Plataforma de perforación vertical de un pozo.....	12
Figura 2.5: Diferentes tipos de trépano.....	13
Figura 2.6: Inclinaciones direccionales.....	14
Figura 2.7: Bomba electrosumergible.....	15
Figura 2.8: Instalación típica del Bombeo Electrosumergible.....	16
Figura 2.9: Esquema simplificado del Bloque 16.....	19
Figura 2.10: Fotografía de cabezales productores de crudo del Well-Pad Capiron.....	21
Figura 2.11: Cabezal productor del pozo AMO C5.....	21
Figura 2.12: Manifold de un Well Pad.....	23
Figura 2.13: Esquema simplificado de un Well Pad.....	24
Figura 2.14: Sistema de inyección de agua de formación.....	26
Figura 2.15: Facilidades de Producción del Norte (NPF).....	27
Figura 2.16: Facilidades de Producción del Sur (SPF).....	28
Figura 2.17: Dimensiones de líneas de transporte de agua de formación y crudo de la zona norte del Bloque 16.....	32
Figura 2.18: Dimensiones de líneas de transporte de agua de formación de la zona sur del Bloque 16.....	33
Figura 2.19: Dimensiones de líneas de transporte de agua de formación de la zona sur del Bloque 16.....	34
Figura 2.20: Dimensiones de líneas de transporte de crudo de la zona sur del Bloque 16.....	35

Figura 2.21: Dimensiones de líneas de transporte de crudo de la zona sur del Bloque 16	36
Figura 2.22: Bomba SULZER de agua de presión intermedia y 6 etapas..	38
Figura 2.23: Corte de bomba SULZER de agua de presión intermedia y 6 etapas	39
Figura 2.24: Bomba REDA de inyección de agua de alta presión	39

CAPÍTULO 3

DISEÑO E IMPLEMENACIÓN DEL PROGRAMA DE

SIMULACIÓN 45

Figura 3.1: Válvula de Bola	62
Figura 3.2: Válvula Check	63
Figura 3.3: Válvula Mariposa	63
Figura 3.4: Válvula de Choque.....	64
Figura 3.5: Dilatación gradual o expansión	64
Figura 3.6: Contracción gradual o reducción	65
Figura 3.7: Ejemplo de un sistema de línea de tubería paralelo con tres ramas	66
Figura 3.8: Estructura simplificada del sistema de inyección de agua de formación de NPF	95
Figura 3.9: Estructura simplificada del sistema de inyección de agua de formación de SPF	96
Figura 3.10: Estructura simplificada del sistema de inyección de agua de formación de SPF	97
Figura 3.11: Estructura simplificada del sistema de inyección de agua de formación de SPF	98
Figura 3.12: Estructura simplificada del sistema de producción de crudo de Capiron	190
Figura 3.13: Estructura simplificada del sistema de producción de crudo de Amo A, Amo B, Amo C e Iro A	191
Figura 3.14: Estructura simplificada del sistema de producción de crudo de Iro 1 y Daimi B.....	192

Figura 3.15: Estructura simplificada del sistema de producción de crudo de Ginta A.....	193
Figura 3.16: Estructura simplificada del sistema de producción de crudo de Ginta B.....	194

NOMENCLATURA

Símbolo	Descripción
PE	Energía Potencial
w	Peso del elemento
z	Elevación (diferencia de altura)
KE	Energía Cinética
v	Velocidad promedio del fluido
g	Gravedad
FE	Energía de flujo
p	Presión
γ	Peso específico
E	Cantidad total de energía
h_A	Energía añadida o agregada
h_R	Energía removida o retirada
h_L	Pérdida de energía
Q	Caudal
A	Area de una sección
W	Rapidez de flujo de peso
N_R	Número de Reynolds
D	Diámetro
ν	Viscosidad cinemática
μ	Viscosidad dinámica
ρ	Densidad
f	Factor de fricción
L	Longitud de la corriente de flujo
K	Coefficiente de resistencia o pérdidas
sg	Gravedad específica

Símbolo	Descripción
π	Pi (3.14159)
BPD	Barriles por día
ε	Rugosidad de la pared del conducto
e_{relativo}	Error relativo
$X_{\text{Calculado}}$	Valor calculado
$X_{\text{Verdadero}}$	Valor verdadero
dD	Error absoluto del diámetro de la tubería
dL	Error absoluto de la longitud de la tubería
$d\varepsilon D$	Error absoluto de la rugosidad relativa
X	Valor medido
Y	Valor medido
dX	Incertidumbre del valor X
dY	Incertidumbre del valor Y
Q	Función para fórmulas de acumulación de error
dQ	Incertidumbre de Q
k	Constante
α, β	Potencia
$ndiam$	Diámetro en pies
dW	Error absoluto de la rapidez de flujo de peso
$darea$	Error absoluto del área
$dvelocidad$	Error absoluto de la velocidad
dfr	Error absoluto del factor de fricción
dK	Error absoluto de coeficiente de pérdidas

