



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, 31 de marzo de 2017

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

Fabián Esteban Álvarez Espinosa, con C.C. No 1120217571,

autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado titulado Análisis comparativo entre la perforación radial y el cañoneo convencional respecto al área de flujo en pozos verticales

presentado y aprobado en el año 2017 como requisito para optar al título de

Ingeniero de Petróleos;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales "open access" y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, "Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores", los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE:

Firma:

Vigilada Mineducación



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
GESTIÓN SERVICIOS BIBLIOTECARIOS**



**CARTA DE AUTORIZACIÓN**

**CÓDIGO**

**AP-BIB-FO-06**

**VERSIÓN**

**1**

**VIGENCIA**

**2014**

**PÁGINA**

**2 de 2**

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



**TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO:** Análisis comparativo entre la perforación radial y el cañoneo convencional respecto al área de flujo en pozos verticales

**AUTOR O AUTORES:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Álvarez Espinosa	Fabián Esteban

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
Orduz Pérez	Luis Humberto

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
----------------------------	--------------------------

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE:** Ingeniero de Petróleos

**FACULTAD:** Ingeniería

**PROGRAMA O POSGRADO:** Ingeniería de Petróleos

**CIUDAD:** Neiva

**AÑO DE PRESENTACIÓN:** 2017

**NÚMERO DE PÁGINAS:**41

**TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):**

Diagramas  Fotografías  Grabaciones en discos  Ilustraciones en general  Grabados   
Láminas  Litografías  Mapas  Música impresa  Planos  Retratos  Sin ilustraciones   
Tablas o Cuadros

Vigilada mieducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



**SOFTWARE** requerido y/o especializado para la lectura del documento: No

**MATERIAL ANEXO:** No

**PREMIO O DISTINCIÓN** (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria): No

**PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:**

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. Perforación Radial	Radial drilling
2. Técnicas	Techniques
3. Tubería flexible	Coiled tubing
4. Yacimientos	Reservoirs

**RESUMEN DEL CONTENIDO:** (Máximo 250 palabras)

La innovación es uno de los pilares fundamentales en la industria petrolera, es por esta razón que a diario salen a la luz técnicas nuevas de las cuales debemos aprovechar todo su potencial, la perforación radial es una de las técnicas recientes que se está implementando en pozos tanto de yacimientos desarrollados como de nuevos yacimientos, esta técnica aprovecha la tecnología de coiled tubing para su desarrollo y promete un horizonte nuevo en lo que compete a producción de pozos.

En este trabajo se muestra el cálculo de las áreas que están expuestas al flujo de fluidos dentro del pozo mostrando los beneficios de la utilización de cada una de la técnicas, también proporcionando un modelo para el cálculo del posible caudal dentro de un perforado radial teniendo en cuenta parámetros petrofísicos y geométricos lo cual es un aporte para tener un punto de partida a la hora de tomar decisiones en cuanto a terminación de un pozo productor o inyector.

**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)

Innovation is one of the fundamental pillars in the oil industry. For this reason, new techniques are emerging every day, from which we must take full advantage of it. Radial drilling is one of the recent techniques being implemented in wells Both developed and new deposits, this technique uses the technology of coiled tubing for its development and promises a new horizon in what concerns the production of wells.



In this work we show the calculation of the areas that are exposed to the flow of fluids inside the well showing the benefits of the use of each of the techniques, also providing a model for the calculation of the possible flow within a radial perforation taking in It counts on petrophysical and geometric parameters which is a contribution to have a starting point when making decisions as to the completion of a producing well or injector

**APROBACION DE LA TESIS**

Nombre Jurado: Claudia Marcela Hernández cortes

Firma:

Nombre Jurado: Héctor Enrique Sánchez

Firma:

**ANALISIS COMPARATIVO ENTRE LA PERFORACION RADIAL Y EL CAÑONEO  
CONVENCIONAL RESPECTO AL AREA DE FLUJO EN POZOS VERTICALES**

**FABIAN ESTEBAN ALVAREZ ESPINOSA**



**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**INGENIERIA DE PETROLEOS**

**NEIVA**

**2017**

**ANALISIS COMPARATIVO ENTRE LA PERFORACION RADIAL Y EL CAÑONEO  
CONVENCIONAL RESPECTO AL AREA DE FLUJO EN POZOS VERTICALES**

**FABIAN ESTEBAN ALVAREZ ESPINOSA**



Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero de Petróleos.

**DIRECTOR:**

**Ing. Luis Humberto Orduz Pérez**

Ingeniería de petróleos - USCO

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**INGENIERIA DE PETROLEOS**

**NEIVA**

**2017**

Nota de aceptación

---

---

---

---

---

*Arnoldo Hernández*

Firma del Jurado

*Hector Enrique Sánchez*

Firma del Jurado



5. PERFORACIÓN RADIAL .....	23
5.1. GENERALIDADES DE LA TECNOLOGÍA .....	23
5.2. FACTORES QUE AFECTAN LA PRODUCTIVIDAD .....	24
5.3. EQUIPO .....	25
5.3.1. UNIDAD .....	25
5.3.2. ACCESORIOS .....	26
5.3.3. ANCLAJE .....	27
5.4. METODOLOGIA PARA LA APLICACIÓN DE LA PERFORACION RADIAL.....	28
5.5. CÁLCULO DEL AREA DE FLUJO CON PERFORACION RADIAL .....	29
6. ANALISIS COMPARATIVO .....	30
7. CONCLUSIONES .....	39
8. RECOMENDACIONES.....	40
BIBLIOGRAFIA .....	41

## RESUMEN DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Estabilidad de algunos explosivos .....	6
<b>Figura 2.</b> Carcaza de geometría cónica.....	7
<b>Figura 3.</b> Carcaza de geometría parabólica.....	8
<b>Figura 4.</b> Disparos a través de la tubería de producción.....	11
<b>Figura 5.</b> Disparos a través de la tubería de revestimiento.....	12
<b>Figura 6.</b> Disparos transportados por la tubería.....	12
<b>Figura 7.</b> Factores geométricos del disparo.....	13
<b>Figura 8.</b> Relación de productividad vs profundidad de penetración.....	14
<b>Figura 9.</b> Efecto de la fase sobre la relación de productividad.....	15
<b>Figura 10.</b> Daño a la formación causado por el disparo.....	17
<b>Figura 11.</b> Tipo de cañones.....	19
<b>Figura 12.</b> Diagrama de laterales por nivel en perforación radial.....	23
<b>Figura 13.</b> Diagrama arreglo de fondo para el corte del revestimiento.....	26
<b>Figura 14.</b> Diagrama arreglo de fondo para ingresar a la formación.....	27
<b>Figura 15.</b> Diagrama de la metodología para la aplicación de la tecnología de perforación radial.....	28
<b>Figura 16.</b> Esquema de cañoneo convencional.....	30
<b>Figura 17.</b> Esquema del área de flujo proporcionada por la perforación radial.....	33
<b>Figura 18.</b> Esquema de un perforado radial.....	34
<b>Figura 19.</b> Grafica del perfil de presión.....	36
<b>Figura 20.</b> Esquema de un perforado radial con líneas de flujo de fluidos lineal y esquema de presiones.....	37

## DEDICATORIA

A Dios por iluminar mi camino durante esta etapa de mi vida y darme la oportunidad de culminar una de mis metas con salud.

A mi abuelita Rosa quien es la luz de mis ojos, con su amor a llenado cada rincón de mi ser y sin duda alguna es a quien le debo mi vida al igual que a mi ángel guardián Samuel.

A mi madre Fanny por siempre estar conmigo sin importar la distancia, por ser la inspiración de mi día a día, por comprenderme en momentos difíciles y enseñarme el camino correcto.

A mi Padre Marino por siempre apoyarme en todo momento con cada una de las decisiones que he tomado, por hacer de mí una persona con principios y valores, con metas y sueños.

A mi hermano Sebastián y a Milton Nory por hacer cada momento de mi vida algo valioso, son la figura que siempre soñé y nunca me cansaré de admirar.

A Adriana Marcela quien ha sido el ángel guía que nunca me desamparó por difíciles que fueran los momentos, gracias por ser la persona que me impulsó cuando más lo necesité, tu amor hizo que no quisiera cambiarme por nadie durante estos 5 años, me enseñaste que la vida es una sola y que cada momento de ella tenemos que aprovecharlo al máximo.

A todos los miembros de mi familia que aportaron un poco de su vida para que yo sea una persona íntegra, sin miedo a enfrentarme a las adversidades, por enseñarme la fraternidad, el amor y respeto hacia los demás.

A mis compañeros de vida y de universidad, Jerson Sánchez, Fabián Obando, Camilo Cruz, Johan Claros, Miguel Lugo, Pizza (Juan Pablo Ortiz), por llenar de momentos inolvidables el paso por la universidad.

**Fabián Esteban Álvarez E.**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco infinitamente al ingeniero Luis Humberto Orduz por ser el guía de este proyecto de grado, por creer en mis capacidades y disponer de su tiempo para el desarrollo del mismo.

A la gloriosa Universidad Surcolombiana por brindarnos su espacio para el crecimiento personal y profesional.

Le agradezco a todos los profesores de Ingeniería de Petróleos por su dedicación, perseverancia y constancia en el día a día para formarnos como profesionales con visión.

Son tantas las personas que formaron parte de este proceso por la cantidad infinita de experiencias y enseñanzas que sin importar en donde estén les expreso mi gratitud .

## **1. RESUMEN**

**TITULO: ANALISIS COMPARATIVO ENTRE LA PERFORACION RADIAL Y EL CAÑONEO CONVENCIONAL RESPECTO AL AREA DE FLUJO EN POZOS VERTICALES**

**AUTOR: FABIAN ESTEBAN ALVAREZ ESPINOSA**

**PALABRAS CLAVES:**

Perforación radial, técnicas, coiled tubing, yacimientos.

**DESCRIPCION:**

La innovación es uno de los pilares fundamentales en la industria petrolera, es por esta razón que a diario salen a la luz técnicas nuevas de las cuales debemos aprovechar todo su potencial, la perforación radial es una de las técnicas recientes que se está implementando en pozos tanto de yacimientos desarrollados como de nuevos yacimientos, esta técnica aprovecha la tecnología de coiled tubing para su desarrollo y promete un horizonte nuevo en lo que compete a producción de pozos.

Durante el desarrollo de este trabajo se describe la técnica de cañoneo convencional detallando en cada uno de los ítems los parámetros necesarios para el desarrollo efectivo de la técnica para su posterior aplicación, se escribe el modelo matemático que relaciona el radio de invasión que genera la técnica con el fin de compararlo con el modelo matemático del radio de inversión que

genera la perforación radial, se describe la técnica de perforación radial relacionando cada uno de los parámetros para posteriormente analizar el modelo matemático referente al radio de invasión. Finalmente se hace la comparación de los dos modelos matemáticos los cuales describen el radio inversión que genera la perforación radial y el cañonero convencional.

## 1. INTRODUCCION

Una de las operaciones más importantes que se lleva a cabo en un pozo es la de de disparos de producción, esa es la que finalmente logra comunicar el pozo con la formación productora atravesando la zona dañada la cual es la que mayor caída de presión presenta.

Los avances a través del tiempo en materiales perforados proporcionan mejores resultados a hora de su aplicación, los diferentes métodos que hoy en día se aplican para este propósito proporcionar resultados óptimos los cuales van de la mano de operaciones con grados de complejidad altos, todo esto con el propósito de poder incrementar la producción de un campo petrolero.

La técnica de perforación radial desarrollada con el fin de penetrar la formación y establecer comunicación de ésta con con el pozo se lleva a cabo gracias a la tecnología de coiled tubing la cual guía las herramientas dentro del pozo para que éstas perforen uno o más hoyos perpendiculares al mismo frente a la formación productora, “esta técnica ha sido desarrollada para la recuperación mejorada de hidrocarburos en yacimientos nuevos y/o maduros”<sup>1</sup> con esta técnica se busca mejorar el perfil de producción alrededor el pozo, la aplicación de esta técnica da la posibilidad de crear hasta 10 laterales de 100 m de longitud y de 50 mm de diámetro a la profundidad deseada en el pozo.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1. GENERAL**

Hacer un análisis comparativo entre el área proporcionada matemáticamente por la perforación radial y el área proporcionada matemáticamente por el cañoneo convencional respecto al área de flujo en pozos verticales.

#### **3.2. ESPECÍFICOS.**

- 3.2.1.** Determinar matemáticamente el área de flujo que proporciona el cañoneo convencional con cargas en un pozo vertical.
- 3.2.2.** Analizar las variables que intervienen en la perforación radial para determinar matemáticamente el área de flujo que esta técnica proporciona en un pozo vertical.
- 3.2.3.** Hacer un análisis comparativo de las áreas de flujo proporcionadas matemáticamente por cada una de las técnicas.

#### 4. CAÑONEO CONVENCIONAL

La operación de cañoneo, disparo o punzado convencional se refiere a la perforación de agujeros con explosivos, estos tienen la finalidad de penetrar el revestimiento, cemento y la formación productora para establecer comunicación de los fluidos del yacimiento con el pozo; una correcta selección de los disparos es de vital importancia ya que de esto dependerá la productividad del pozo y la disminución de intervenciones adicionales que implican altos costos.

La operación de cañoneo tiene factores que la condicionan como por ejemplo el diámetro de la tubería de revestimiento el cual es el factor que determina el diámetro exterior de los cañones que es el que influye directamente en la longitud de penetración.

El desempeño de las cargas está directamente relacionado con el desempeño del explosivo, estos proporcionan una alta relación Energía-peso por lo que son preferidos por encima de otras fuentes que proporcionen energía. Los explosivos son de un actuar inmediato y proporcionan otros factores que los hacen más confiables como que se pueden almacenar por largos periodos de tiempo y van a tener la misma efectividad, también se pueden manejar con seguridad tomando las precauciones debidas.

Existen diferentes tipos de explosivos con características diferentes, estos pueden clasificarse según su velocidad de reacción en ALTOS y BAJOS.

##### EXPLOSIVOS BAJOS.

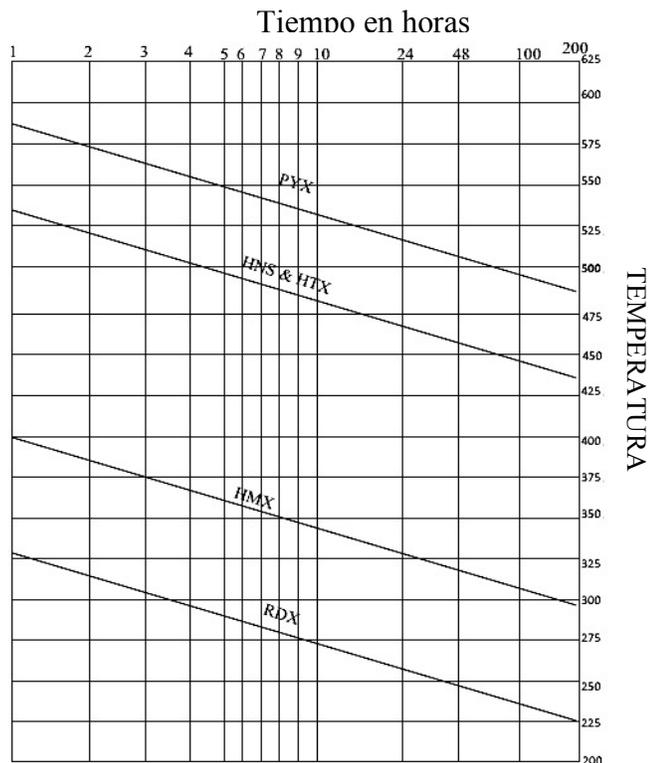
Este tipo de explosivos tienen la característica de poseer una velocidad de reacción entre 330 y 1500 m/s, también son sensibles al calor, estos se inician por flama o chispa.

##### EXPLOSIVOS ALTOS.

Los explosivos de este tipo poseen una velocidad de reacción mayor a 1500 m/s, estos tienen la característica de que pueden ser iniciados por calor o percusión. De este tipo los que más se utilizan en la industria son: Azida de plomo, Tacot, RDX, HMX, HNS, HTX, y PYX. La Azida de plomo y el Tacot se utilizan más comúnmente en los estopines eléctricos, el RDX, HMX, HNS, HTX y PYX se usan en los cordones detonantes, fulminantes y cargas.

Los explosivos utilizados en los disparos para para poder ser almacenados por tiempos razonables y que puedan operar efectivamente después de exponerlos a las temperaturas del pozo deben tener una alta estabilidad.

A continuación se muestra una figura que ilustra la estabilidad de algunos explosivos en función de la temperatura y el tiempo (Fig1).



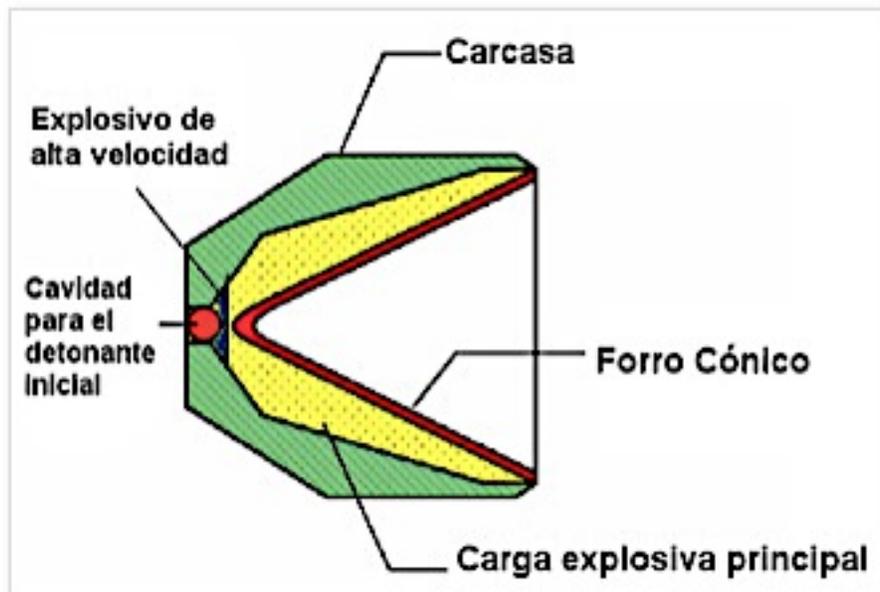
**Figura 1.**

Esta grafica es solo para propósitos de referencia, se recomienda consultar con la compañía de servicios para el uso de un explosivo en particular. (Editada por el autor)

## 4.1 TIPOS DE CARGAS

### CARGAS DE ALTA PENETRACION

Las cargas de este tipo poseen una carcasa de geometría cónica (figura 1) el cual produciría un disparo tipo jet estrecho alargado y fino, esta carcasa generalmente está formado por varias mezclas de metal pulverizado, esto hace que deje una mínima cantidad de residuos después del disparo tomando en cuenta que la mayoría de los residuos generados son del casco, la penetración de este tipo de cargas y relativamente profunda el agujero producido tiene un diámetro pequeño, hay cascos que se desintegran formándose prácticamente polvo es el caso de los cascos de zinc los cuales al final de la operación pueden ser evacuados fácilmente cosa que no ocurre con los cascos de acero los cuales forman residuos más grandes quedando partes tanto en el tubo como en la cápsula.

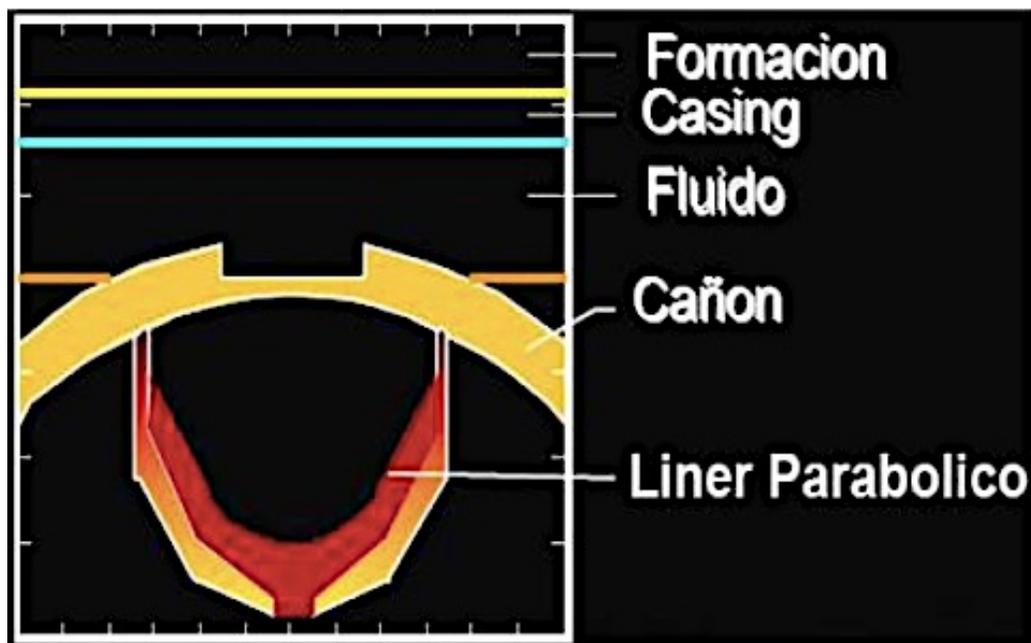


**Figura 2.** Carcaza de geometría cónica.

(Halliburton, perforating solutions,2012)

## CARGAS DE HUECO GRANDE

Este tipo de cargas se usan frecuentemente para optimizar la densidad de disparo o el área de flujo, el disparo acarrea mayor masa lo que da lugar a una perforación poco profunda, pero con un diámetro en el revestidor relativamente más grande, la geometría de estas cargas es parabólica o hemisférica (figura 2), para el diseño de este tipo de cargas se debe encontrar un balance entre el diámetro y la velocidad en el momento del impacto con el revestidor, teniendo en cuenta que para el diseño de una determinada carga de este tipo existe una “longitud focal” la cual determina la creación de un hueco más uniforme y profundo.



**Figura 3.** Carcaza de geometría parabólica.

(Halliburton, perforating solutions, 2012)

## **4.2 TIPOS DE DISPAROS**

### **DISPARO TIPO CHORRO**

Este tipo de disparo se caracteriza por una reacción en cadena la cual detona sucesivamente el cordón explosivo, el explosivo y la carga intensificada de alta velocidad separan el recubrimiento metálico en capas interna y externa, el haz de partículas finas se forma gracias al incremento continuo de presión sobre el recubrimiento, este haz o chorro de partículas finas en forma de aguja adquiere una velocidad aproximada de 2000 pies/seg, con una presión estimada de 5 millones de psi.

El proceso de disparo tipo chorro es muy sensible, debido a la casi perfecta secuencia de eventos los cuales inician en el accionar del detonador hasta la formación del chorro, un funcionamiento deficiente puede ser causa de cualquier falla en el sistema esto ocasiona tamaños irregulares o inadecuados del agujero, una pobre penetración o posiblemente ningún disparo; las posibles causas del mal funcionamiento son: corriente o voltaje insuficiente al detonador, un detonador defectuoso o de baja calidad, un cordón explosivo aplastado o torcido, el explosivo principal de baja calidad o pobremente empacado, el recubrimiento colocado incorrectamente o sin hacer contacto efectivo con el explosivo.

### **DISPAROS TIPO BALA**

Este tipo de disparos se utilizan en formaciones que tienen resistencia a la compresión menor a 6000 psi con pistolas de 3<sup>1</sup>/<sub>2</sub>” o mayor diámetro, en el caso de tener formaciones con resistencia a la compresión menor a 2000psi las pistolas con diámetro de 3<sup>1</sup>/<sub>4</sub>” o mayor diámetro son las óptimas para proporcionar una penetración mayor, este tipo de pistolas se pueden configurar para disparar selectiva o simultáneamente, la velocidad de las balas en

la pistola es de 3000 pies/seg pero ellas pierden velocidad y energía cuando el espacio anular excede de 0,5” y empiezan a perder penetración cuando el espacio anular excede 1”.

### **PISTOLAS HIDRAULICAS**

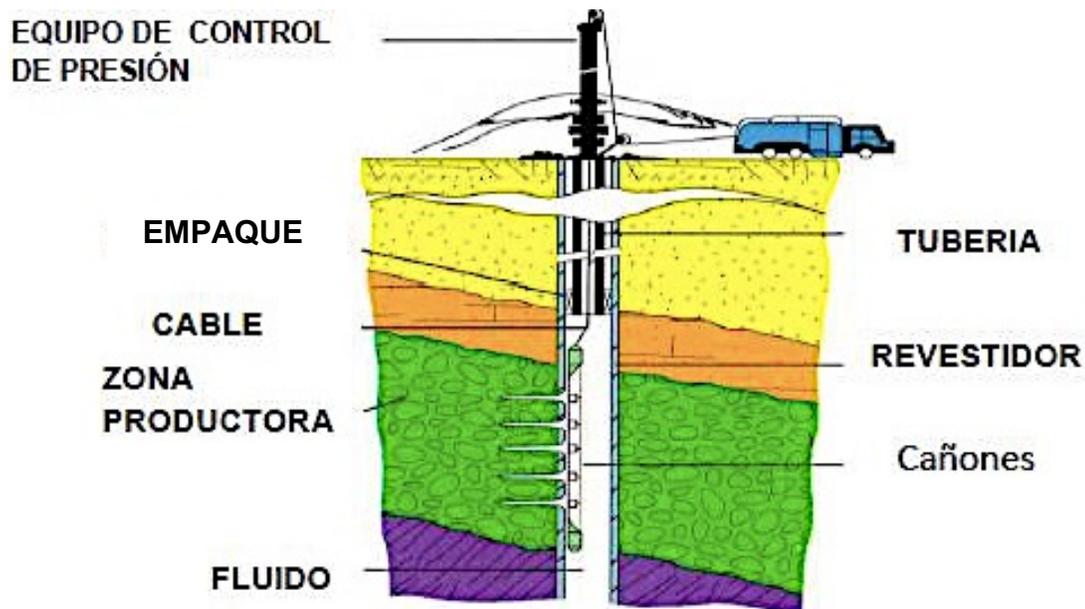
Consiste en generar un chorro de fluido el cual contiene arena y sale por un orificio contra la tubería de revestimiento, debido a la que la presión en el fondo del pozo aumenta de 0 a 300 psi la penetración ve afectada pero también si se adiciona nitrógeno en la corriente de flujo la penetración puede incrementar.

## **4.3 METODOS DE DISPARO**

### **DISPAROS A TRAVES DE LA TUBERIA DE PRODUCCION**

Este método de disparo también llamado cañoneo wireline después del completamiento generalmente se utilizan en pozos productores o inyectoros y no en pozos exploratorios ya que en estos no se puede aplicar un diferencial de presión estática a favor de la formación en el momento de la operación, la herramienta se baja con un cable a través de la tubería de producción, también para esta operación se debe contar con un empacador y una tubería de trabajo o de prueba.

Este proceso permite obtener en las perforaciones una limpieza óptima pero no puede haber selectividad en el disparo, también se debe tener cuidado al probar otro intervalo ya que se debe controlar el pozo y esto genera que las zonas ya intervenidas queden expuestas a los fluidos de control.

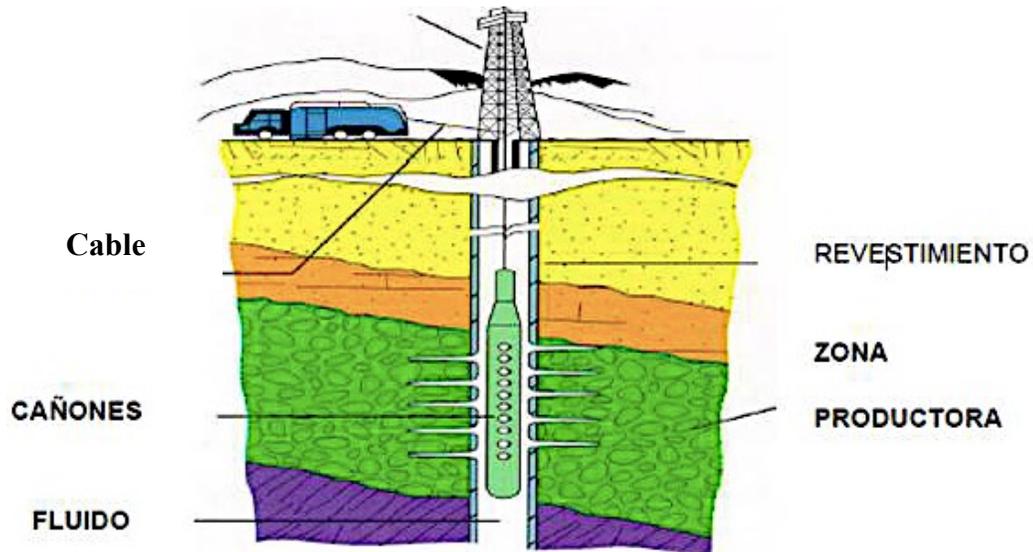


**Figura 4.** Disparos a través de la tubería de producción

(Ing. L Mendoza, manual de workover)

#### **DISPAROS A TRAVES DE LA TUBERIA DE REVESTIMIENTO**

También llamada cañoneo wireline sin completamiento, consiste en disparar a través de la tubería de revestimiento generalmente con pistolas bajadas con cable eléctrico, generalmente se utilizan cargas tipo chorro en estas operaciones ya que estas asociadas al método no dañan la formación, el método se emplea en zonas donde hay alta depositación de sedimentos, este método no es favorable utilizarlo cuando se requiere llevar a cabo operaciones de acidificación o fracturamiento ya que las bolas selladoras no funcionan debido a la forma irregular de los disparos.

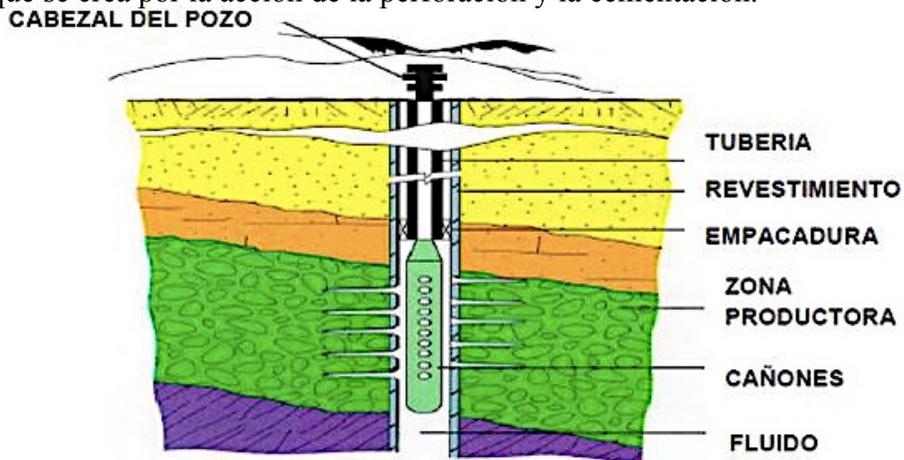


**Figura 5.** Disparos a través de la tubería de revestimiento

(Ing. L Mendoza, manual de workover)

### DISPAROS TRANSPORTADOS POR LA TUBERIA (TCP)

La pistola es transportada en el extremo inferior de la tubería conductora, se utilizan disparos de mayor diámetro, cargas de alta penetración, no se tiene límite en la longitud de los intervalos a disparar en una misma corrida, poseen alta densidad de disparo aunado a un diferencial de presión óptimo a favor de la formación en condiciones dinámicas al momento mismo del disparo generan orificios limpios, profundos y simétricos, eliminan el daño que se crea por la acción de la perforación y la cementación.



**Figura 6.** Disparos transportados por la tubería (Ing. L Mendoza, manual de workover)

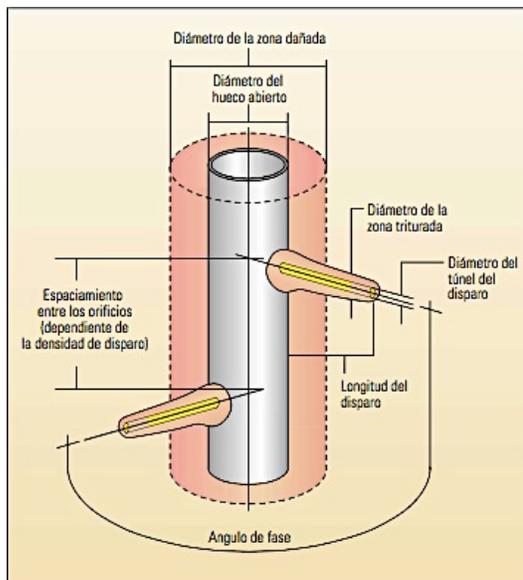
## 4.4 FACTORES QUE AFECTAN LA PRODUCTIVIDAD DE UN POZO

### 4.4.1 DAÑO GENERADO POR EL FLUIDO DE PERFORACION

El fluido que se utiliza para llevar a cabo la perforación causa taponamiento en los poros de la formación lo que se conoce como daño a la formación, esto causa que el flujo de la formación al pozo se vea afectado este problema se trata de mitigar haciendo canales conductores de flujo con el cañoneo pero en ocasiones esto no se puede lograr ya que las partículas son empujadas al agujero creado por el disparo.

### 4.4.2 FACTORES GEOMETRICOS DEL DISPARO

La relación de productividad del pozo se ve influenciada por la geometría de los agujeros hechos por las cargas explosivas los cuales están definidos por los factores geométricos que determinan la eficiencia del flujo en un pozo disparado y son:



- La penetración
- La densidad de cargas
- La fase angular entre las perforaciones
- El diámetro del agujero del disparo

También la penetración parcial, la desviación del pozo, el tipo de formación y el radio de drenaje son otros factores geométricos que toman importancia en casos especiales.

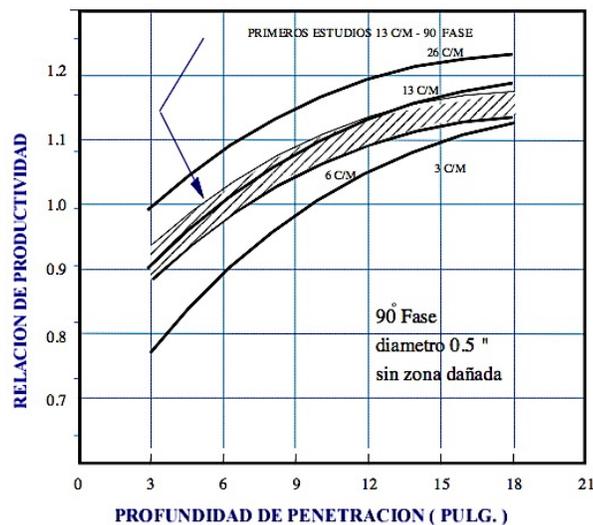
**Figura 7.** Factores geométricos del disparo

(Schlumberger, técnicas de diseño de los disparos para optimizar la producción, 2000)

#### 4.4.2.1 EFECTO DE LA PENETRACION Y LA DENSIDAD DE LA CARGA

En la gráfica de la figura 7 se puede observar que el efecto de la penetración y la densidad de cargas son muy importantes ya que dichos factores intervienen en la relación de productividad como por ejemplo arriba de 6 pulgadas la tendencia es menor pero es evidente la importancia de la penetración para poder mejorar el índice de productividad, también la densidad de carga influye en la relación de productividad como se puede observar en la gráfica para una densidad de carga de 3cargas/metro es necesaria una penetración de 16 pulgadas con la cual se obtiene una relación de productividad de 1.0 mientras que para una densidad de 13cargas/metro se necesita solo 6 pulgadas.

En la gráfica de la figura 7 se hace referencia a un pozo sin daño, en un pozo que tenga daño por acción del fluido de perforación, la penetración más allá de la zona dañada es relevante para determinar la relación de productividad.



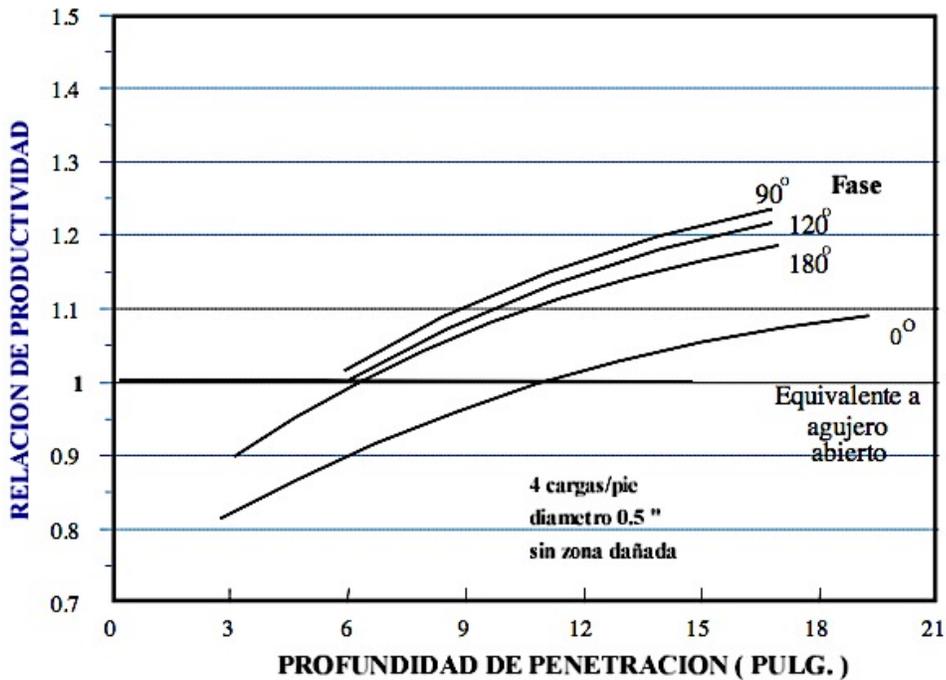
**Figura 8.** Relación de productividad vs de la profundidad de penetración

(Pemex, terminación y mantenimiento de pozos,2014)

#### 4.4.2.2 EFECTO DE LA FASE

En las perforaciones sucesivas la fase angular es un factor importante como se puede observar en la gráfica de la figura 8, la cual muestra una reducción de 10-12% de la relación de productividad para sistemas de 0° y 90° con una misma penetración.

Según la gráfica para un sistema de 0° de fase con una penetración de 6 pulgadas, la relación de productividad que se obtiene es de 0.9 mientras que para un sistema de 90° de fase la relación de productividad obtenida es de 1.02 lo que representa una diferencia del 11% en la relación de productividad, la figura 8 muestra la profundidad de penetración con relación a las fases en las cargas de 90°, 120° y 180°.



**Figura 9.** Efecto de la fase sobre la relación de productividad

(Pemex, terminación y mantenimiento de pozos,2014)

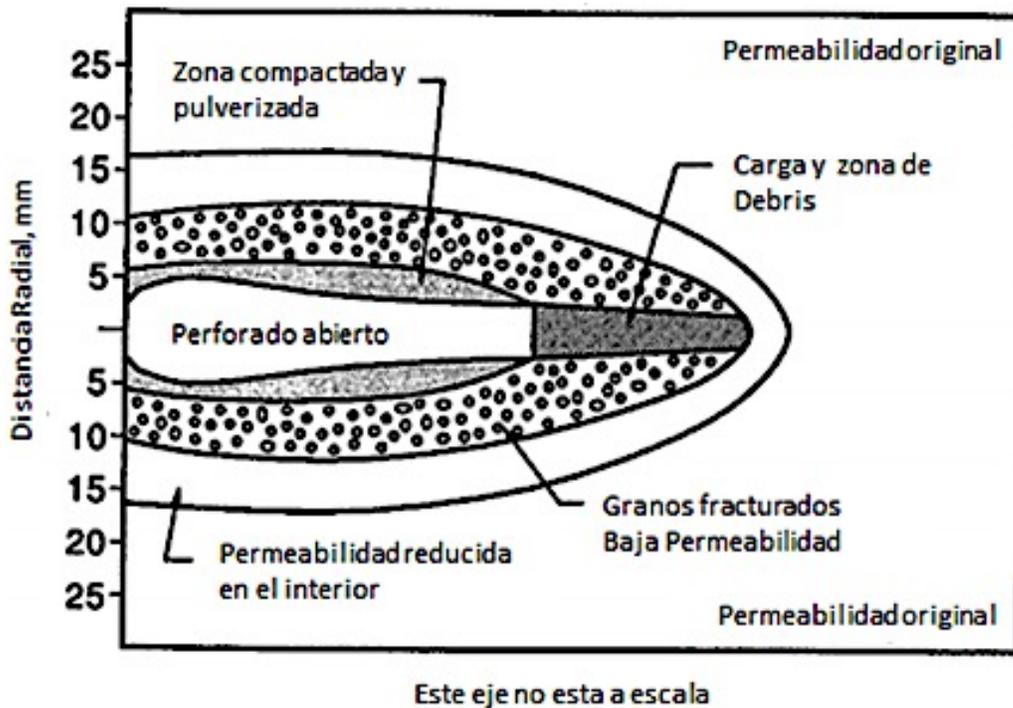
#### **4.4.3 DAÑO CAUSADO POR EL FLUIDO DE TERMINACION**

El fluido de terminación es un parámetro muy importante a la hora de realizar el cañoneo ya que este tiene una alta influencia en el desempeño de las cargas y la productividad del pozo, por consiguiente debe tratarse de un fluido limpio ya que la presencia de algún material extraño podría causar que el disparo empuje al mismo dentro de la formación lo que daría lugar a un taponamiento del flujo de fluidos.

#### **4.4.4 DAÑO CAUSADO POR EL DISPARO**

En la matriz de la roca alrededor del túnel creado por el disparo se genera un daño como se muestra en la figura 9, a la zona que es alterada se le llama zona dañada la cual es generada por el impacto producido por la alta presión durante los disparos, esta zona está constituida por los granos triturados y compactados los cuales forman una capa de aproximadamente 0.25 a 0.5 pulgadas alrededor del túnel creado, el grosor de esta capa no es uniforme y decrece a lo largo del túnel.

Algunas evidencias muestran que las cargas de hueco grande pueden causar un daño de una pulgada alrededor del túnel, también muestran que la permeabilidad de la zona dañada por el disparo puede ser del 10% al 20% de la permeabilidad de la zona virgen, debido a esto se debe realizar un muy buen diseño de los disparos para causar un mínimo de daño sobre el pozo.



**Figura 10.** Daño a la formación causado por el disparo

(Halliburton, perforating solutions, 2012)

#### 4.4.5 TIPOS DE CAÑONES Y CARGAS

En la industria son utilizados tres tipos de sistemas de cañones, de tapas (ported), de tubos (scaloped) y de tipo cápsula (capsule). Las pistolas de tapa y las de tubo pertenecen a la familia llamada los cañones o pistolas de revestimiento las cuales poseen paredes reforzadas y selladas de forma tubular con conductos que permiten transportar el tren de explosivos dentro de ellos, también ayudan a proteger los explosivos del ambiente que rodea el pozo.

**Cañones de tapas.** Este tipo de pistolas o cañones poseen ventajas económicas ya que pueden ser reutilizados hasta 100 veces, pero debido al sistema de carga y

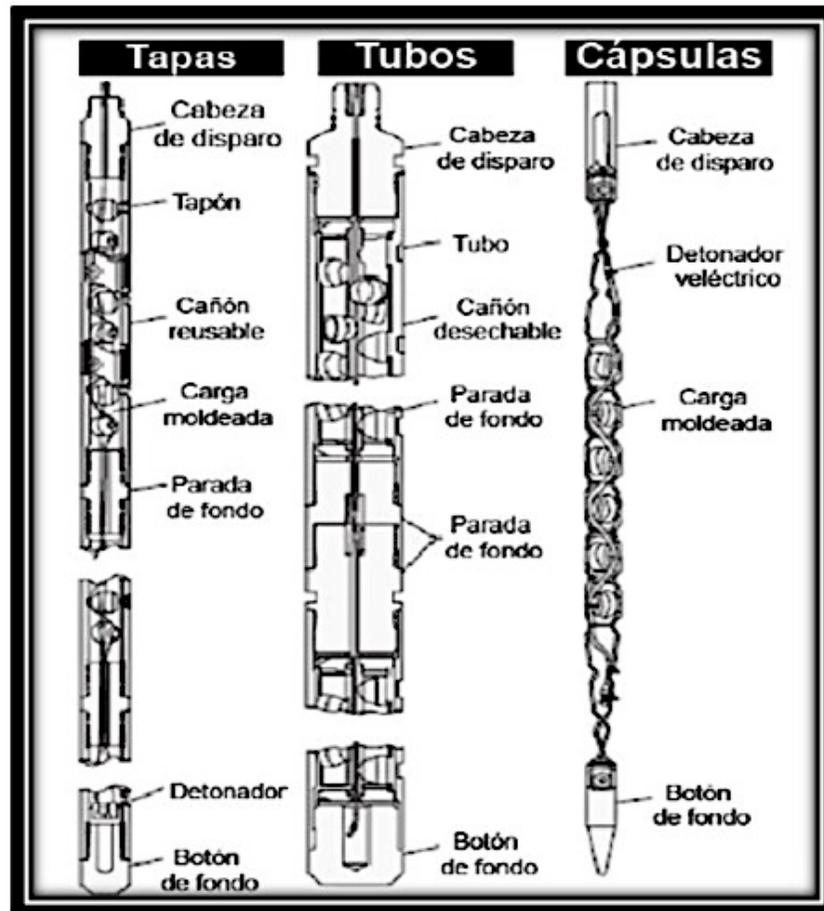
reposición de tapas existe la posibilidad de que los fluidos del pozo cuando estos son enviados al fondo y debido a esto no detonen o también por la entrada de fluidos del pozo se disparen pudiendo romperse y quedar atascados dentro del revestimiento.

**Cañones de tubo.** Los cañones de tubo soportan la mayoría de las condiciones de pozo, estos son corridos principalmente a través de la tubería de producción y se encuentran disponibles en una gran variedad de tamaños.

Este tipo de cañones soportan condiciones de hasta 30000 psi y 500 °F y tienen la posibilidad de ser corridos por cable o tubería, en comparación a los cañones de tapas son menos susceptibles a que los fluidos del pozo, son recomendados para disparar en zonas con intervalos mayores a 822 metros (2700 ft) en los cuales se pueden acoplar a mecanismos de detonación mecánica, hidráulica o eléctrica, los cañones de este tipo permiten adsorber el impacto causado al momento de la detonación lo que se traduce en una protección de un daño potencial del revestimiento.

**Cañones de capsula.** Los cañones de capsula consisten en cargas que son encapsuladas dentro de una capa protectora, estas cargas son fijadas a un fleje para poder ser bajadas con cable eléctrico dado que no consiste en cargas encapsuladas dentro de un tubo, el tamaño de las cargas pueden ser tan grandes como las usadas en pistolas de tubo, la principal desventaja de este tipo de cañones consiste en que el detonador y el cordón detonantes están expuestos a fluidos del pozo, estos fluidos

pueden incurrir en la interface del detonador y el cordón detonante por lo que se requiere de técnicas especiales de aislamiento, este sistema tiene un grado muy alto de rendimiento pero la complejidad mecánica del equipo y los escombros generados pueden ser indeseables.



**Figura 11.** Tipos de cañones

(Schlumberger, técnicas de diseño de los disparos para optimizar la producción, 2000)

#### 4.4.6 PRESION DIFERENCIAL AL MOMENTO DEL DISPARO

Durante la ejecución de los disparos existen dos técnicas que pueden aplicarse.

- Sobre balance

Presión hidrostática > Presión de la formación

- Bajo balance

Presión hidrostática < Presión de la formación

En una terminación sobre balance se tiene como objetivo fracturar la formación al momento del disparo, si la presión para que la formación se fracture no es alcanzada después del disparo y antes de que fluya el pozo se forman tapones con los residuos de las cargas, después de dejar fluir el pozo puede que aún se tenga una perforación parcialmente taponada y una zona compactada de baja permeabilidad.

Cuando se tiene una terminación bajo balance los residuos de las cargas y la zona comprimida pueden ser expulsados por la acción del flujo de fluidos desde la formación hasta el pozo, este tipo de terminación es recomendada para obtener una limpieza del perforado sin embargo esta acción debe ser monitoreada para tener control del pozo.

Para establecer la presión con la cual se va a intervenir en el proceso de cañoneo es necesario tener en cuenta los siguientes parámetros.

- Grado de consolidación de la formación
- Permeabilidad de la formación
- Fluido en los poros
- Presión de colapso de las tuberías y equipo
- Grado de invasión del fluido de perforación
- Tipo de cemento

#### **4.5 EFECTIVIDAD DE LOS DISPAROS**

Para determinar la efectividad de los disparos es necesario analizar diferentes parámetros los cuales demostraran tanto cualitativamente como cuantitativamente el rendimiento de estos, como por

ejemplo se debe determinar si la penetración del disparo superó la zona dañada por el fluido de perforación, se debe tener en cuenta un método que determine la productividad del pozo y posteriormente compararla con la óptima para de esta manera estimar la efectividad del disparo, también se debe tener en cuenta en los análisis el daño total generado por acción de los disparos; con el propósito de obtener el los resultados para el análisis de los anteriores parámetros se debe realizar el cálculo del radio de invasión de la formación productora como también el cálculo de la profundidad de penetración de los disparos.

#### **4.1.1. CALCULO DE LA PROFUNDIDAD DE PENETRACION DE LOS DISPAROS**

A medida que la resistencia a la compresión de la formación aumenta al igual que aumenta el esfuerzo de sobre carga la penetración de los disparos disminuye, Thompson propone la ecuación 1 para el cálculo de la penetración de los disparos en la cual relaciona la resistencia a la compresión de la roca con parámetros obtenidos en superficie.

$$Pen = Pen_{sup} * e^{(0.086(c_r - c_f))}$$

**Ecuación 1.** Modelo de Thompson para determinar la penetración

**Donde:**

Pen = Penetración

Pensup = Penetración en superficie, carta API-RP43

Cr = Compresibilidad en superficie a las condiciones de prueba, (Kpsi)

Cf = Compresibilidad de la formación de interés, (Kpsi)

Para definir si la operación se va a realizar sobre balance o bajo balance se analiza las condiciones esperadas del pozo después de realizar el disparo, estas condiciones están influenciadas por los fluidos en los poros, presión de poro y la presión hidrostática ejercida por los fluidos de terminación.

#### **4.6 CALCULO DEL AREA DE FLUJO CON CAÑONEO CONVENCIONAL**

En el cálculo del área de flujo con cañoneo convencional intervienen los parámetros geométricos del perforado como el radio y la longitud del mismo, a continuación se relaciona la ecuación la cual incluye estos parámetros para el cálculo del área de flujo.

$$Af = \pi * \frac{r^2}{144} * n$$

**Ecuación 2.** Área de flujo de los perforados en un pie

(Ecuación deducida geoméricamente por el autor)

**Af**= Área de flujo de un pie cañoneado (pies<sup>2</sup>)

**r**= radio teórico del perforado (pulgadas)

**n**= Número de perforados por pie

La ecuación 2 calcula el área de flujo en un pie cañoneado, para efecto del cálculo del área de flujo total proporcionado por el conjunto de perforados en el total del intervalo perforado se aplica la ecuación 3.

$$\text{Area de flujo total} = Af * \text{Longitud del intervalo cañoneado}(\text{pies})$$

**Ecuación 3.** Área de flujo total proporcionada por el conjunto de perforados en un intervalo intervenido.

(Ecuación deducida por el autor)

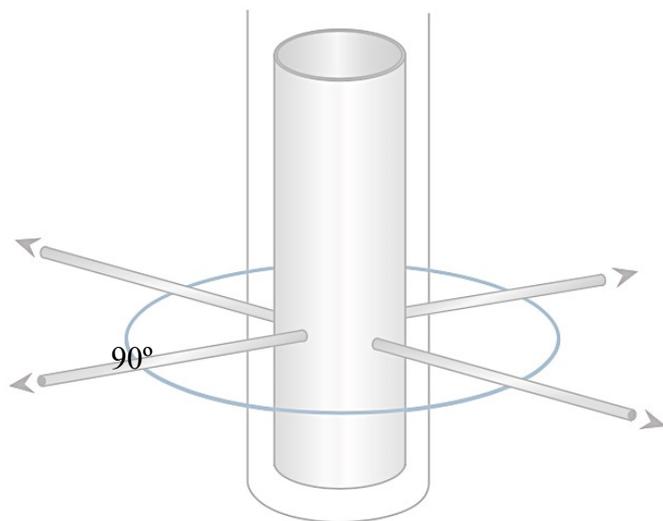
**Af**= Área de flujo de un perforado (pies<sup>2</sup>)

El número de perforados arreglados en la pistola se debe relacionar por pie, el total del área de flujo en el intervalo cañoneado se obtiene multiplicando el área de flujo en un pie por la distancia en pies del intervalo que se intervino.

## 5. PERFORACION RADIAL

### 5.1 GENERALIDADES DE LA TECNOLOGIA

La tecnología consiste en generar aperturas en el revestimiento de aproximadamente  $\frac{3}{4}$  de pulgada frente a la formación para poder seguir con la perforación en la zona de interés por parte de jets que accionados desde superficie a través de tubería flexible, estos jets abren paso en la arena productora gracias a la presión generada por el bombeo de agua, estas perforaciones pueden alcanzar una longitud de aproximadamente 300 pies perpendicularmente al pozo y tienen un diámetro estimado entre  $1\frac{1}{4}$  y  $2\frac{1}{2}$  pulgadas, esto permite que la comunicación entre la zona productora y el pozo sea mayor. Esta técnica se puede aplicar para varios niveles, por nivel el máximo de perforados es de 4 teniendo en cuenta que cada uno está separado por un ángulo de  $90^\circ$ .



**Figura 12.** Diagrama de laterales por nivel en perforación radial.

(Radial drilling services, significantly increases production at Petrobras)

Para ingresar a la formación mediante esta técnica se hace utilizando manguera de kevlar ya que la tubería flexible no tiene la capacidad de cambiar de vertical a horizontal en un radio tan pequeño; el objetivo de esta técnica es mejorar la producción del pozo aumentando el área de drenaje y accediendo a zonas de bolsillos que quedaron en el yacimiento.

## 5.2 FACTORES QUE AFECTAN LA PRODUCTIVIDAD

Los factores que pueden llegar a tener repercusiones en la productividad una vez utilizada la tecnología de perforación radial pueden ser tanto mecánicos como geológicos, por este motivo se debe realizar un estudio previo de factibilidad para la aplicación, a continuación se relacionan algunos de los factores.

- La operación óptima del sistema se logra hasta los 8000 pies, una vez superados los 8000 pies el sistema puede no funcionar normalmente, esto se puede llegar a corregir con arreglos de superficie pero no amplían mucho el rango de aplicación.
- El ángulo de buzamiento es un factor limitante para la técnica ya que las ventanas se abren perpendicularmente a la línea de la tubería.
- La composición heterogénea de la formación limita la productividad debido a la variación tanto de espesores, cambios de facies o intercalaciones de formaciones de diferentes características.
- A una profundidad deseada los registros tomados a la cementación deben mostrar que el cemento garantiza una buena contención lateral caso contrario se requerirá de una cementación forzada debido a la presión proporcionada por el equipo se podría ver afectada la integridad del pozo.
- Los depósitos que sean conformados por rocas cristalinas, anhidritas, yeso y algunas otras evaporitas podrían carecer de porosidad por lo que la tecnología no arrojaría resultados óptimos.
- Los depósitos en arenas no consolidadas también tienen problemas con la aplicación de la tecnología ya que los chorros que se generan de reversa al sacar la herramienta pueden derrumbar las paredes y posteriormente taponar los perforados.

- Los jets de la herramienta no pueden causar acción de erosión en minerales duros por este motivo los perforados pueden no presentar óptimos resultados en rocas con contenido alto de minerales duros.
- La horizontalidad de la herramienta no se puede lograr al 100% por lo que se tienen ángulos de desvío afectando el recorrido de los fluidos.

## **5.3 EQUIPO**

### **5.3.1 UNIDAD**

Los principales componentes de una unidad de cañoneo por perforación radial se clasifican en:

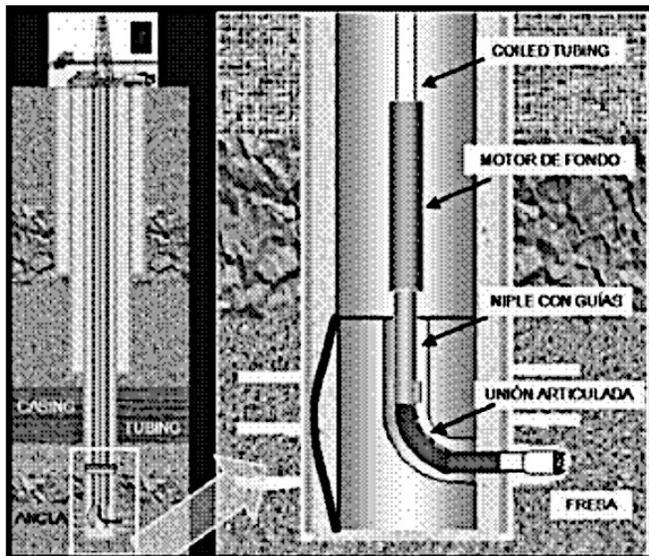
- Equipo de superficie, el cual está conformado por todos los dispositivos que forman parte de la unidad autopropulsada como:
  - Cabina de comando y monitoreo
  - Fuente de poder hidráulico
  - Tubería de media pulgada, hasta 13500 pies de longitud y 10000 psi de presión de trabajo
  - Bomba triplex (2-5 gpm) de baja rata de flujo y alta presión (10000 psi)
- Cabezal de inyección con acondicionamiento hidráulico (pull=10000 lbs) opcional para unidades operativas de más de 6500 pies
- Equipo de fondo, conformado por componentes que trabajan posicionados directamente frente a la formación a intervenir.

## 5.3.2 ACCESORIOS

### ARREGLO DE LA SARTA DE FONDO DE POZO

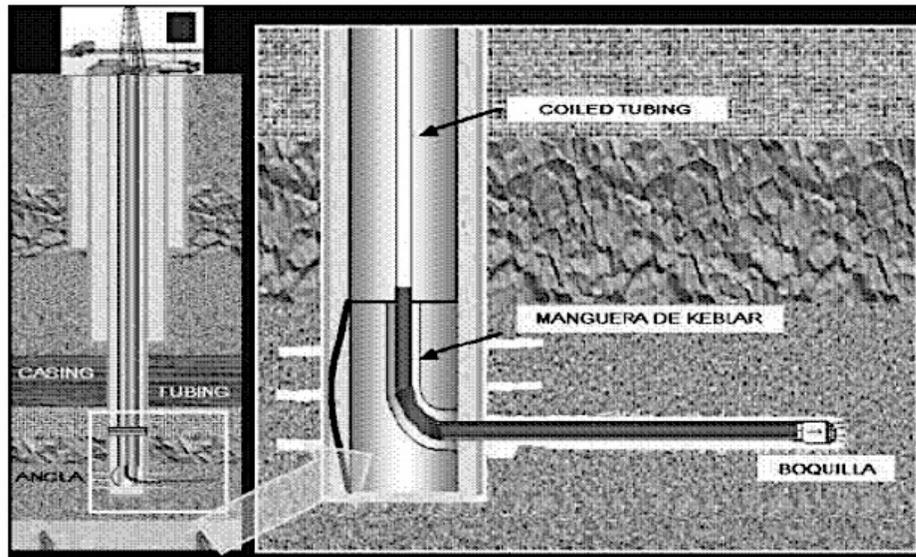
Este arreglo se utiliza tanto para el corte del revestimiento como para ingresar en a la formación

- **Arreglo para corte del revestimiento.**
  - Fresa de  $\frac{3}{4}$  de pulgada (1,905 cm).
  - Codo o unión articulada.
  - Boquilla con bloqueo.
  - Motor de fondo 1  $\frac{11}{6}$  pulgadas (4,29 cm).



**Figura 13.** Diagrama arreglo de fondo para el corte del revestimiento (radial drilling in Argentina, YPF, SPE 107382)

- **Arreglo para ingresar a la formación.**
  - Jet con tres orificios orientados hacia delante y tres hacia atrás.
  - Aproximadamente 328 pies de manguera de kevlar flexible de 1/1 pulgadas (1,27 cm).
  - Zapata deflectora frente a la formación productora.



**Figura 14.** Diagrama arreglo de fondo para ingresar a la formación  
(radial drilling in Argentina, YPF, SPE 107382)

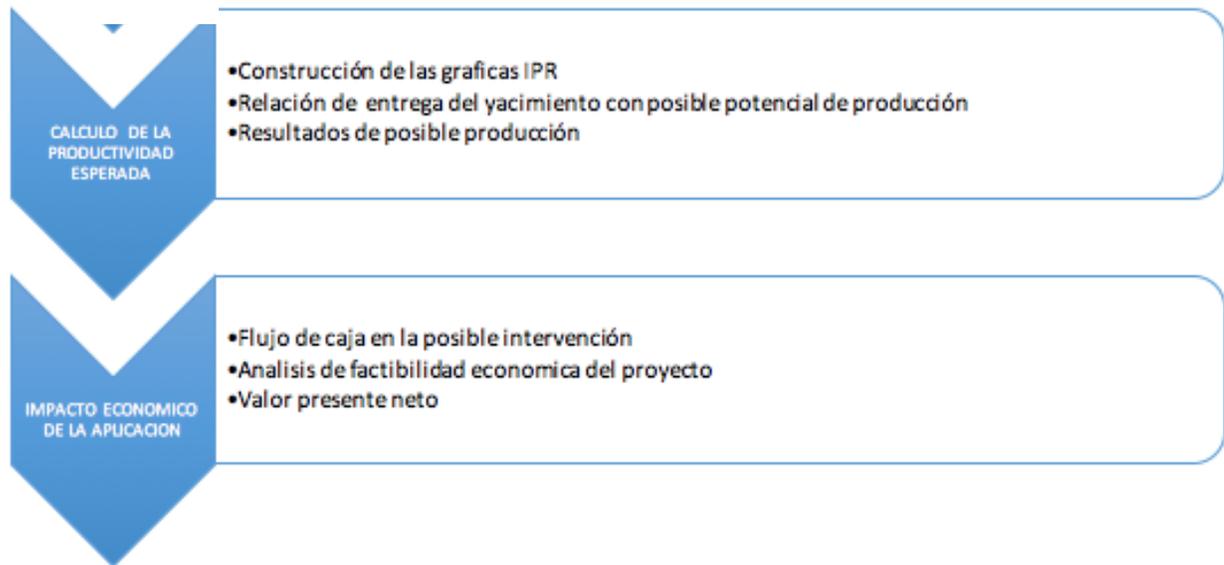
### 5.3.3 ANCLAJE

El anclaje es un dispositivo que se localiza frente a la formación en la posición donde se realizara la intervención, este dispositivo se baja con la línea o cable de trabajo de la unidad de workover y normalmente tiene tres funciones.

- Mantiene el orificio de salida de la herramienta en el lado del revestimiento, este se posiciona gracias a una presión simple que ejerce una banda localizada en el lado opuesto.
- Este dispositivo ayuda a guiar la herramienta para ir de vertical a horizontal en un pie a través de un conducto formado en el interior.
- Previene el torque reactivo del motor de fondo mientras es perforado el revestimiento.

## 5.4 METODOLOGIA PARA LA APLICACIÓN DE LA PERFORACION RADIAL





**Figura 15.** Diagrama de la metodología para la aplicación de la tecnología de perforación radial (modificado de análisis de factibilidad para la perforación radial con fluido tipo jet mediante la técnica de coiled tubing aplicado a campo colorado, UIS 2012)

### 5.5 CALCULO DEL AREA DE FLUJO CON PERFORACION RADIAL

Al igual que el cálculo del área de flujo con cañoneo convencional intervienen parámetros geométricos como el radio del perforado y la longitud del mismo, a continuación se relaciona la ecuación para el cálculo del área de flujo de un solo perforado.

$$A_{f_{pr}} = 2\pi \frac{r}{12} * L$$

**Ecuación 4.** Área de flujo de un perforado

$A_{f_{pr}}$  = Área de flujo de un perforado (pies<sup>2</sup>)

$r$  = radio teórico del perforado (pulgadas)

$L$  = longitud teórica del perforado (pies)

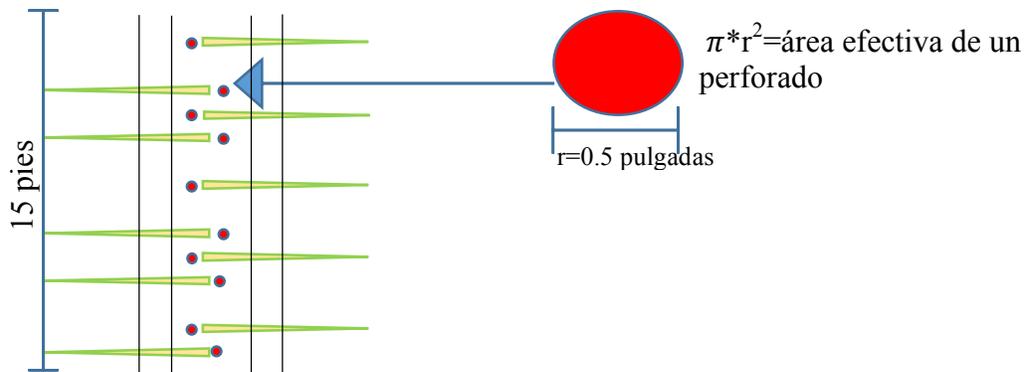
A diferencia del cañoneo convencional para el cálculo total del área de flujo con perforación radial se multiplica directamente la ecuación 2 con el número total del perforados por nivel (Max 4).

## 6. ANALISIS COMPARATIVO

A continuación se analizan matemáticamente los modelos tanto de cañoneo convencional como de perforación radial en intervalos de 15 pies.

Para cañoneo convencional se toman configuraciones en las pistolas de 4,6,9 y 12 tiros por pie (TPP), para la perforación radial se realiza el análisis para 1,2,3 y 4 perforados por estrato, teniendo en cuenta que los 15 pies intervenidos pertenecen a un estrato productor.

- Sistema de cañoneo convencional con 4 (TPP) en un intervalo de 15 pies “ para efecto del ejercicio se toma un radio  $r = 0.5$  pulgadas el cual corresponde a un promedio de los perforados con la técnica de cañoneo convencional”



**Figura 16.** Esquema de cañoneo convencional

$$Af = \pi * \frac{r^2}{144} * n * longitud\ del\ intervalo\ cañoneado$$

$$Af = \pi * \frac{0.5^2}{144} * 4 * 15$$

$$Af = 0.327249\ ft^2$$

- Sistema de cañoneo convencional con 6 (TPP) en un intervalo de 15 pies.

$$Af = \pi * \frac{r^2}{144} * n * longitud\ del\ intervalo\ cañoneado$$

$$Af = \pi * \frac{0.5^2}{144} * 6 * 15$$

$$Af = 0.490874 \text{ ft}^2$$

- Sistema de cañoneo convencional con 9 (TPP) en un intervalo de 15 pies.

$$Af = \pi * \frac{r^2}{144} * n * \text{longitud del intervalo cañoneado}$$

$$Af = \pi * \frac{0.5^2}{144} * 9 * 15$$

$$Af = 0.736311 \text{ ft}^2$$

- Sistema de cañoneo convencional con 12 (TPP) en un intervalo de 15 pies.

$$Af = \pi * \frac{r^2}{144} * n * \text{longitud del intervalo cañoneado}$$

$$Af = \pi * \frac{0.5^2}{144} * 12 * 15$$

$$Af = 0.981748 \text{ ft}^2$$

- Sistema de perforación radial con un perforado en la mitad del estrato el cual tiene una longitud de 15 pies, tomando como referencia el radio r del perforado 1.875 el cual corresponde al promedio de tamaños que se podrían tener dentro de la formación, y la longitud teórica del perforada se toma como 220 pies que corresponde a un promedio de penetraciones en perforación radial.

$$Af_{pr} = 2\pi \frac{r}{12} * L$$

$$Af_{pr} = 2\pi \frac{1.875}{12} * 220$$

$$Af_{pr} = 215.984 \text{ ft}^2$$

El área efectiva al flujo para la perforación radial con un solo perforado supera mucho el área efectiva al flujo del cañoneo convencional con más de un perforado por pie.

- Sistema de perforación radial con 2 perforados separados por un ángulo de 180° en la mitad del estrato el cual tiene una longitud de 15 pies.

$$A_{f_{pr}} = \pi \frac{r}{12} * L * 2 \text{ perforados por estrato}$$

$$A_{f_{pr}} = 2\pi \frac{1.875}{12} * 220 * 2$$

$$A_{f_{pr}} = 431.969 \text{ ft}^2$$

- Sistema de perforación radial con 3 perforados separados por un ángulo de 120° en la mitad del estrato el cual tiene una longitud de 15 pies.

$$A_{f_{pr}} = 2\pi \frac{r}{12} * L * 3 \text{ perforados por estrato}$$

$$A_{f_{pr}} = \pi \frac{1.875}{12} * 220 * 3$$

$$A_{f_{pr}} = 647.953 \text{ ft}^2$$

- Sistema de perforación radial con 4 perforados separados por un ángulo de 90° en la mitad del estrato el cual tiene una longitud de 15 pies.

$$A_{f_{pr}} = 2\pi \frac{r}{12} * L * 4 \text{ perforados por estrato}$$

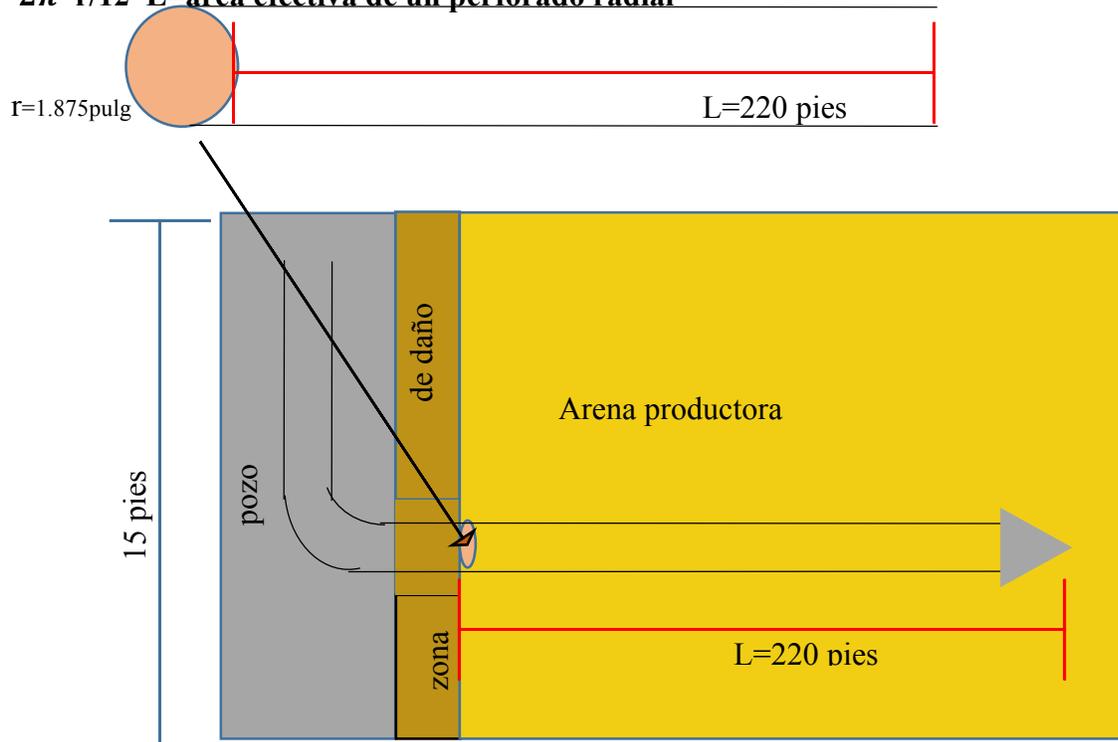
$$A_{f_{pr}} = 2\pi \frac{1.875}{12} * 220 * 4$$

$$A_{f_{pr}} = 863.938 \text{ ft}^2$$

El área de proporcionada para el flujo por el cañoneo convencional es más pequeña que el área proporcionada por la perforación radial, el cañoneo convencional proporciona una cobertura mayor en la cara del pozo a lo largo del estrato productor, mientras que la perforación radial

permite mucha más área de para el flujo pero su cobertura en la cara del pozo es limitada, el área que proporciona la perforación radial es dentro de la arena productora figura 17, a continuación se muestra como interviene cada una de las técnicas en la producción.

**$2\pi*r/12*L$ =área efectiva de un perforado radial**



**Figura 17.** Esquema del área de flujo proporcionada por la perforación radial

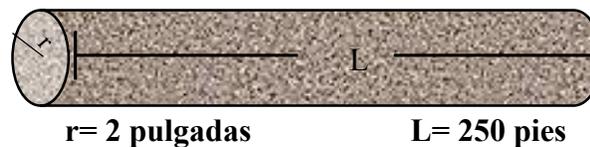
Los resultados demuestran que el área efectiva al flujo por parte de la perforación radial es mucho mayor, esto se traduce en una mayor cobertura del pozo en el yacimiento, a continuación se relacionan unos datos de yacimiento con los cuales se procederá a los cálculos respectivos para determinar el caudal de producción que se puede obtener con cada una de las técnicas de completamiento.

h	Pe	Pwf	Pb	K	$\mu_o$ (cP)	$\beta_o$	$r_e$	$r_w$	S
(pies)	(Psi)	(Psi)	(Psi)	(mD)		(BY/BN)	(pies)	(pies)	
15	1600	850	800	100	1.0	1.2	1000	0.25	4

**Tabla 1.** Datos de yacimiento, (Fundamentos de Ing. de yacimientos, Magdalena París de Ferrer)

### Perforado Radial

$$A_{PR} = 2\pi * r * L$$



**Figura 18.** Esquema de un perforado radial

El caudal que puede ser producido en el pozo en condiciones óptimas de cañoneo convencional se calcula mediante la siguiente ecuación para condiciones de flujo radial estable.

$$Q = 0.00708 \frac{K * h * (P_e - P_{wf})}{\mu_o * \beta_o * [\ln(r_e/r_w) + s]}$$

**Ecuación 5.** Caudal de producción para flujo radial (flujo radial estable, ley de Darcy)

El daño producido por las operaciones de perforación, control y terminación del pozo se hace 0 (cero) en condiciones óptimas de cañoneo.

$$Q = 0.00708 \frac{100 * 15 * (1600 - 850)}{1.0 * 1.2 * [\ln(1000/0.25) + 0]}$$

$$Q = 800.273 \text{ STB/dia}$$

A continuación se realiza un perfil de presión para conocer el valor de la presión en la longitud final de perforado radial para poder realizar los cálculos de flujo para la técnica de perforación

radial teniendo en cuenta que la presión de flujo en la cara del pozo es estática al igual que el caudal de producción.

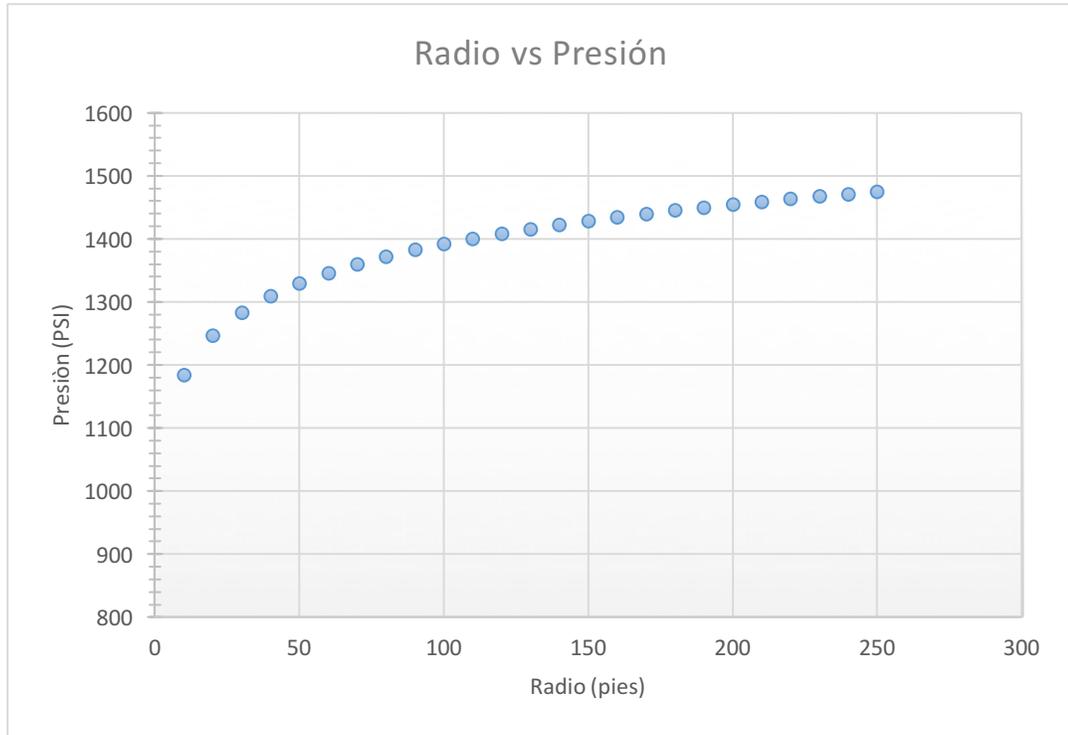
$$P_{10pies} = P_{wf} + \left[ \frac{Q * \mu_o * \beta_o}{0.00708 * K * h} \right] \text{Ln}(r/r_w)$$

$$P_{10pies} = 850 + \left[ \frac{800.273 * 1.0 * 1.2}{0.00708 * 100 * 15} \right] \text{Ln}(10/0.25)$$

$$P_{10pies} = 1183.57 \text{ Psi}$$

RADIO (PIES)	PRESIÓN (PSI)		
<b>10</b>	1183,571822	<b>130</b>	<b>1415,510773</b>
<b>20</b>	1246,250576	<b>140</b>	1422,212085
<b>30</b>	1282,915297	<b>150</b>	1428,450857
<b>40</b>	1308,92933	<b>160</b>	1434,286839
<b>50</b>	1329,107382	<b>170</b>	1439,768901
<b>60</b>	1345,594051	<b>180</b>	1444,937526
<b>70</b>	1359,533331	<b>190</b>	1449,826626
<b>80</b>	1371,608085	<b>200</b>	1454,464891
<b>90</b>	1382,258772	<b>210</b>	1458,876806
<b>100</b>	1391,786136	<b>220</b>	1463,08344
<b>110</b>	1400,404686	<b>230</b>	1467,10305
<b>120</b>	1408,272805	<b>240</b>	1470,951559
		<b>250</b>	1474,642942

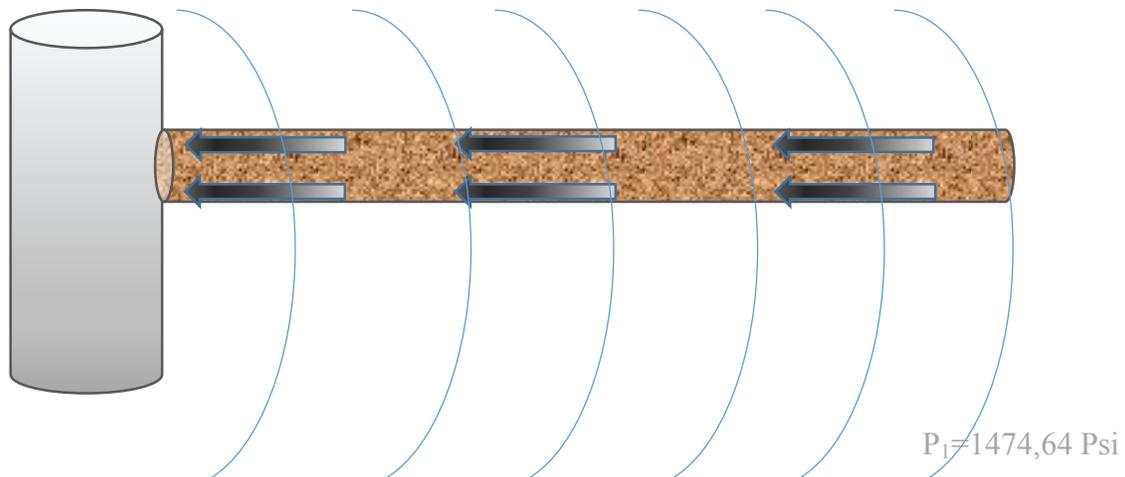
**Tabla 1.** Perfil de presiones



**Figura 19.** Grafica del perfil de presión.

Los cálculos anteriores nos indican que para un radio de 250 pies la presión es de 1474,64, ésta es la longitud promedio de un perforado radial, por este motivo se toma este valor como referencia para hacer el cálculo del posible caudal suministrado por un perforado radial, a continuación se calculan los posibles caudales con diferentes permeabilidades efectivas de los perforados, se debe tener en cuenta que estos valores cambian según el tipo de roca, y las características petrofísicas de la misma, también varían según la calidad de los perforados.

Para estos cálculos se tendrá en cuenta que dentro del perforado el flujo de fluidos es lineal, y la presión tanto de referencia a los 250 pies y en el pozo son estáticas de  $P_r = 1474,64$  Psi y  $P_{wf} = 850$  Psi respectivamente.



**Figura 20.** Esquema de un perforado radial con líneas de flujo de fluidos lineal y esquema de presiones.

Los siguientes cálculos se realizan teniendo en cuenta una variación de permeabilidades desde 1000 mD hasta 8000 mD, en intervalos de 1000 mD, esto debido a que los perforados pueden llegar a variar sus permeabilidades efectivas, para determinar la permeabilidad que proporciona cada perforado es necesario que se realicen estudios y pruebas respectivas.

$$q = \frac{0,001127 * K * A * (P_1 - P_2)}{\mu * L}$$

El área que se tiene en cuenta para este cálculo es el área efectiva al flujo de los perforados radiales calculada en la página 32.

$$q = \frac{0,001127 * 1000 * 215.984 * (1474,64 - 850)}{1.0 * 250}$$

$$q = 608.184 \text{ Bbls}/\text{dia}$$

K (mD)	q (Bbls/dia)
1000	608.184
<u>1315.84</u>	<u>800.273</u>
2000	1216.37
3000	1824.55
4000	2432.74
5000	3040.92
6000	3649.11
7000	4257.29
8000	4865.48

**Tabla 2.** Caudales de producción con diferentes permeabilidades en un perforado radial

Los anteriores cálculos se realizaron teniendo en cuenta un perforado de L=250 pies, los valores pueden cambiar según la longitud de cada perforado y las condiciones petrofísicas de la formación que se vaya a intervenir.

Para el caudal de 800.273 Bbls/dia el cual es el que proporciona el cañoneo convencional es necesario tener un perforado radial de 1315.84 mD.

## 7. CONCLUSIONES

La tecnología de perforación fue evaluada analíticamente en este proyecto para determinar los beneficios de su aplicación llegando a concluir lo siguiente.

- En este proyecto se logra determinar analíticamente los beneficios que podría tener la implementación de la perforación radial.
- Los cálculos muestran que al implementar la perforación radial se pueden tener resultados óptimos.
- La perforación radial aumenta significativamente el área de flujo de un pozo lo que conlleva a un posible incremento en el factor de recobro, sin embargo ésta técnica se ve restringida en la cara del pozo por el área de la sección transversal del perforado radial.
- La tecnología de perforación radial se puede emplear sola o en conjunto con otras técnicas de estimulación a pozos como acidificación y fracturamiento hidráulico según Radial Drilling Services®; esto debido a que la técnica garantiza una intervención directa y profunda en el yacimiento,
- Una vez aplicada correctamente la técnica en un yacimiento apto para su funcionamiento podemos tener aumentos significativos de caudal debido al área efectiva del perforado radial la cual está directamente expuesta al flujo.

## 8. RECOMENDACIONES

- Se recomienda continuar con más análisis matemáticos respecto a la restricción en la cara del pozo, para dar mayor certeza de la aplicación de la técnica.
- Se deben realizar los respectivos análisis para determinar la longitud de los perforados con relación a la permeabilidad efectiva de cada uno.
- Se debe tener en cuenta el cálculo del estrangulamiento de fluido en la cara del pozo debido a el diámetro reducido del perforado.
- Se debe implementar un análisis para determinar el número de radiales óptimos por estrato para tener un equilibrio entre la tasa de producción y la de declinamiento de presión del yacimiento de petróleo, gas y/o agua.
- Se debe implementar un estudio analítico que determine los mejores escenarios para la implementación de la técnica de perforación radial.

## BIBLIOGRAFIA

- ❖ Buset P, and Riiber M, SPE. Jet Drilling Tool: Cost – Effective Lateral Drilling Technology for Enhanced Oil Recovery. SPE 68504.
- ❖ C. Cabral ad W.Crow. *Coiled Tubing Conveyed Perforating*. Prepared for presentation at Fourth Latin American and Caribbean Petroleum Conference held in Port-of Spain Trinidad & Tobago, 23-26 april 1996.SPE 36137.
- ❖ Cirigliano R, Talavera J, Drilling and Workover Repsol YPF UN Bolivia, Dept. First Experience in the Application of Radial Perforation Technology in Deep Wells. SPE 107182.
- ❖ D. Johan, S. Christian, Análisis técnico-económico del uso de las diferentes técnicas de cañoneo en los campos operados por Petroproducción,2007.
- ❖ F. Bonilla Camacho, Productividad de pozos de hidrocarburos, chapter 3.
- ❖ G. Wilder, U. Jader, Analisis de factibilidad para la perforación radial con fluido tipo jet mediante la técnica de coiled tubing aplicado a campo colorado, UIS,2012
- ❖ HALLIBURTON ENERGY SERVICES, perforating solutions, U.S.A., 2005
- ❖ J.R.A. Pearson, and A. F. Zazovsky, *A Model for Transport of Sand Grains Form a Perforation During Underbalance Surge*. SPE, Schlumberger, Cambridge Research. Oct, U.S.A., 1997, SPE 38634.
- ❖ L. Yonghe, W. Chunjie, S. Lionhai, G. Weiji, Engeneering Technology Research Institute of Liaohe Oilfield, China. SPE International Oil and Gas Exhibition, Beijing, China, Nov. 2000.
- ❖ P. Magdalena, Fundamentos de ingeniería de yacimientos, 2009.
- ❖ P. Reyna, Tecnicas de disparos para optimizar la producción en la condición de operación bajo balance, UNAM, 2013.
- ❖ Radial Drilling Services, Inc. Presentación de Radial Drilling Technology.
- ❖ Victor G. Vallejo Arrieta. Técnicas de Disparos Bajo- Balanceadas y sobre. Balanceados. Tesis de Maestría, UNAM. México, 1997.
- ❖ W. Dickinson, SPE, Petrolphysics Inc., H. Dystra, SPE, Consultant, and R. Nordlund, SPE, and Wayne Dickinson, Petrolphysics Inc., Coiled tubing radials placed by jet drilling, field results, theory and practices, 6th Annual Thecnical Conference and exhibition of SPE, (p.343-355), Houston, Texas, October 1993.