

10



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

MODELO PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA HIDRÁULICA DE  
PERFORACIÓN.

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO PETROLERO**

P R E S E N T A :

**JESÚS RODOLFO GONZÁLEZ GARCÍA**

**TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN**



DIRECTOR: M.I. JOSÉ MARTÍNEZ PÉREZ

MÉXICO, D. F., CIUDAD UNIVERSITARIA, 2002



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PAGINACIÓN

DISCONTINUA

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DIVISIÓN DE INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

Alumno:

Jesús Rodolfo González García

Número de Cuenta:

9040651-5

Tesis:

**"MODELO PARA LA OPTIMACIÓN DE LA HIDRÁULICA DE  
PERFORACIÓN"**

Director de tesis: M.I. José Martínez Pérez

**JURADO DEL EXAMEN PROFESIONAL**

PRESIDENTE:

Ing. Salvador Macías Herrera



VOCAL:

M.I. José Martínez Pérez



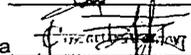
SECRETARIO:

Ing. Oswaldo Hernández Mena



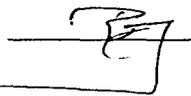
PRIMER SUPLENTE:

Ing. Ma. Cristina Aviles Alcántara



SEGUNDO SUPLENTE:

Dr. Rafael Rodríguez Nieto



Ciudad Universitaria, Abril de 2002



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
60-1-373

**SR. JESUS RODOLFO GONZALEZ GARCIA**  
Presente

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M. en I. José Martínez Pérez y que aprobó esta Dirección para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de Ingeniero Petrolero:

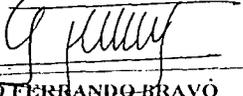
**MODELO PARA LA OPTIMACION DE LA HIDRAULICA DE PERFORACION**

	<b>RESUMEN</b>
	<b>INTRODUCCION</b>
<b>I</b>	<b>CONSIDERACIONES TEORICAS</b>
<b>II</b>	<b>DESCRIPCION DEL MODELO IMPACTO</b>
<b>III</b>	<b>APLICACION EN CAMPO</b>
<b>IV</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>
	<b>NOMENCLATURA</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>
	<b>ANEXO</b>

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo, le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que se deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar examen profesional

Atentamente  
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"  
Cd. Universitaria, D. F., a 19 de marzo de 2002  
EL DIRECTOR

  
\_\_\_\_\_  
ING. GERARDO FERRANDO-BRAVO

GFB\*RLLR\*gtg



## AGRADECIMIENTOS

Primeramente quiero agradecer el apoyo de mis padres María de la Luz y Rodolfo, quienes con su esfuerzo han logrado que pueda alcanzar esta meta, que además de darme una educación profesional, me han otorgado una herencia que dura toda la vida. *GRACIAS*.

También quiero agradecer el apoyo brindado por mi abuelito Guillermo, quien con sus pláticas, consejos y actitud me demostró que las metas se consiguen con disciplina y perseverancia, *GRACIAS*, dondequiera que estés(†).

Agradezco también el apoyo otorgado por mis hermanos Carlos y Jonathan, que a pesar de las inclemencias que se nos han presentado, hemos podido superarlas y demostrado que la unión hace la fuerza.

Gracias a Virginia por su apoyo incondicional en la parte más importante de mi carrera y de mi vida, y espero que sea por siempre. Gracias además por la paciencia que me has tenido y espero que me tengas aún más.

A mis amigos por sus consejos y ayudas ya que compartí con ellos parte de una gran vida donde adquirí experiencia y madurez, la cual me servirá para afrontar las situaciones que se presenten en la vida, además de aprender a valorar a los amigos, quienes están contigo no solo en las buenas y me aceptan tal y como soy, diciendo las cosas con el único fin de desearme lo mejor.

---

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por haberme brindado el conocimiento y visión necesaria para alcanzar esta meta tan importante para el futuro.

Al Instituto Mexicano de Petróleo por el apoyo otorgado para la realización de este trabajo, en especial al Dr. Héctor Rodríguez Hernández, quién además de proporcionarme un gran apoyo y guía para el desarrollo de este trabajo, me supo dar consejos y confianza para llegar más allá de mis metas establecidas.

---

# CONTENIDO

## Modelo para la optimación de la hidráulica de perforación.

<b>Resumen</b>	1
<b>Introducción</b>	2
<b>1. Consideraciones Teóricas</b>	5
1.1. Hidráulica en el fondo del pozo	5
1.1.1 Hidráulica en la barrena	6
1.2 Optimación de la hidráulica en el fondo del pozo	13
1.2.1 Máxima potencia hidráulica	14
1.2.2 Máxima fuerza de impacto hidráulica	16
1.2.3 Máxima velocidad en las toberas	17
1.2.4 Potencia hidráulica óptima por pulgada cuadrada de agujero	18
1.3 Modelos de hidráulica en el fondo del pozo	20
1.3.1 Velocidad y fuerza de impacto (Modelo Maurer)	24
1.3.2 Potencia hidráulica y fuerza de impacto (Modelo Warren)	29
<b>2. Descripción del Modelo IMPACTO</b>	37
2.1 Desarrollo del modelo IMPACTO	37
2.2 Influencia de los diferentes parámetros de la perforación en la hidráulica en el fondo del pozo	41
2.2.1 Gasto de la bomba	43
2.2.2 Diámetro de las toberas	49
2.2.3 Litología	57
2.2.4 Fluido de perforación	62
2.2.5 Establecimiento de ventana operativa	70
<b>3. Aplicación en Campo del Modelo Impacto</b>	78
3.1 Estadísticas de barrenas por etapa	78
3.2 Estadística de tipo de barrena por longitud perforada	82
3.3 Aplicación del modelo para medir el desempeño de los diferentes tipos de Barrenas	86
<b>4. Conclusiones y recomendaciones</b>	104
<b>Nomenclatura</b>	106
<b>Bibliografía</b>	109
<b>Anexos</b>	113

# LISTA DE TABLAS Y FIGURAS

## ***TABLAS***

### **CAPÍTULO 1**

Tabla 1.1. Componentes de las conexiones superficiales en combinaciones típicas.

Tabla 1.2. Longitud equivalente de conexiones superficiales.

Tabla 1.3. Variables consideradas en la optimización.

### **CAPÍTULO 2**

Tabla 2.1. Datos utilizados en el programa IMPACTO, teniendo como variable al gasto

Tabla 2.2. Datos utilizados en el programa IMPACTO, teniendo como variable al diámetro de toberas

Tabla 2.3. Clasificación de la IADC contra el valor de Co.

Tabla 2.4. Datos utilizados en el programa IMPACTO, teniendo como variable la densidad de la formación

Tabla 2.5. Datos utilizados en el programa IMPACTO, teniendo como variable la densidad del lodo de perforación

### **CAPÍTULO 3**

Tabla 3.1. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 14 ¾ pg en el pozo F.I.1.

Tabla 3.2. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 10 5/8 pg en el pozo F.I.1.

Tabla 3.3. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 14 ¾ pg. en el pozo F.I.2.

Tabla 3.4. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 10 5/8 pg en el pozo F.I.2.

Tabla 3.5. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 18 1/2 pg en el pozo F.I.3.

Tabla 3.6. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 14 3/4 pg en el pozo F.I.3.

Tabla 3.7. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 10 5/8 pg en el pozo F.I.3.

Tabla 3.8. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 14 3/4 pg en el pozo F.I.4.

Tabla 3.9. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 10 5/8 pg en el pozo F.I.4.

Tabla 3.10. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 8 3/8 pg en el pozo F.I.4.

Tabla 3.11. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 14 3/4 pg en el pozo F.I.5.

Tabla 3.12. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 10 5/8 pg en el pozo F.I.5.

## ***FIGURAS***

### **CAPÍTULO 1**

Fig. 1.1. Balance de los elementos que se contemplan en la optimación de la hidráulica (Lummus 1974)

Fig. 1.2. Curvas hidráulicas de perforabilidad (Lummus 1974)

Figura 1.3a. Diagrama de flujo para la optimación de la hidráulica.

Figura 1.3b. Diagrama de flujo para la optimación de la hidráulica.

Figura 1.3c. Diagrama de flujo para la optimación de la hidráulica.

Fig. 1.4. Flujo generalizado en un sistema

Fig. 1.5. Ángulo de las toberas con respecto a la pared del pozo.

Fig. 1.6. Choque del chorro con respecto a la superficie del pozo.

### **CAPÍTULO 2**

Fig. 2.1. Áreas del jet consideradas en el desarrollo del modelo IMPACTO

Fig. 2.2. Distancia axial del jet considerada en el modelo IMPACTO

Fig. 2.3. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra caída de presión del jet (ver Tabla 2.1)

Fig. 2.4. Distancia axial desde la tobera al fondo del pozo del jet contra la fuerza de impacto del jet sobre la superficie del pozo (ver Tabla 2.1)

Fig. 2.5. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra el área de impacto del jet (ver Tabla 2.1)

Fig. 2.6. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra velocidad del jet (ver Tabla 2.1)

Fig. 2.7. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra caída de presión del jet (ver Tabla 2.2)

Fig. 2.8. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra fuerza de impacto del jet (ver Tabla 2.2)

Fig. 2.9. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra área de impacto del jet (ver Tabla 2.2)

Fig. 2.10. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra velocidad del jet (ver Tabla 2.2)

Fig. 2.11. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra caída de presión del jet (ver Tabla 2.4)

Fig. 2.12. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra fuerza de impacto del jet (ver Tabla 2.4)

Fig. 2.13. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra área de impacto del jet (ver Tabla 2.4)

Fig. 2.14. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra velocidad del jet (ver Tabla 2.4)

Fig. 2.15. Efecto de la densidad sobre la velocidad de perforación

Fig. 2.16. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra caída de presión del jet (ver Tabla 2.5)

Fig. 2.17. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra fuerza de impacto del jet (ver Tabla 2.5)

Fig. 2.18. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra área de impacto del jet (ver Tabla 2.5)

- Fig. 2.19. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra velocidad del jet (ver Tabla 2.5)
- Fig. 2.20. Gastos y diámetros óptimos aplicables a una barrena de 36 pg.
- Fig. 2.21. Gastos y diámetros óptimos aplicables a una barrena de 22 pg.
- Fig. 2.22. Gastos y diámetros óptimos aplicables a una barrena de 18 1/2 pg.
- Fig. 2.23. Gastos y diámetros óptimos aplicables a una barrena de 14 3/4 pg.
- Fig. 2.24. Gastos y diámetros óptimos aplicables a una barrena de 10 5/8 pg.
- Fig. 2.25. Gastos y diámetros óptimos aplicables a una barrena de 8 3/8 pg.
- Fig. 2.26. Nomograma para gastos y diámetros óptimos aplicables a barrenas.

### CAPÍTULO 3

- Fig. 3.1. Marca de barrenas utilizadas dentro de cada etapa (Pozo F.I. 1)
- Fig. 3.2. Marca de barrenas utilizadas dentro de cada etapa (Pozo F.I. 2)
- Fig. 3.3. Marca de barrenas utilizadas dentro de cada etapa (Pozo F.I. 3)
- Fig. 3.4. Marca de barrenas utilizadas dentro de cada etapa (Pozo F.I. 4)
- Fig. 3.5. Marca de barrenas utilizadas dentro de cada etapa (Pozo F.I. 5)
- Fig. 3.6. Metros perforados por cada etapa (F.I. 1)
- Fig. 3.7. Metros perforados por cada etapa (Pozo F.I. 2)
- Fig. 3.8. Metros perforados por cada etapa (Pozo F.I. 3)
- Fig. 3.9. Metros perforados por cada etapa (Pozo F.I. 4)
- Fig. 3.10. Metros perforados por cada etapa (Pozo F.I. 5)
- Fig. 3.11. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.1.
- Fig. 3.12. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.1.
- Fig. 3.13. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.2.
- Fig. 3.14. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.2.
- Fig. 3.15. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.3.

- Fig. 3.16. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.3.
- Fig. 3.17. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.3.
- Fig. 3.18. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.4.
- Fig. 3.19. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.4.
- Fig. 3.20. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.4.
- Fig. 3.21. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.5.
- Fig. 3.22. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.5.

# RESUMEN

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos del análisis de información bibliográfica, enfocados a la optimación de la hidráulica en la barrena y el desarrollo de un modelo. El cual para su etapa inicial, se llevó a cabo una búsqueda bibliográfica que abarcó los métodos y modelos que existen actualmente y que incluye los conceptos, tales como fuerza de impacto, potencia hidráulica, velocidad en toberas y potencia hidráulica óptima por pulgada cuadrada de agujero.

Como segunda etapa, se propone un modelo, el cual se desarrolla a partir de los conceptos que se tienen que cubrir, mencionados y analizados en la primera parte, además de considerar también en el modelo a las variables que ajustan estos objetivos como gasto, diámetro de toberas, densidad del lodo y litología.

Para una tercera etapa, se aplica el modelo aquí propuesto, a una serie de datos de pozos reales que refuerzan la aplicabilidad del modelo pero que bien se puede ajustar si se pudiese aplicar en campo para comprobar su efectividad en condiciones reales y validarlo. Además de establece una ventana operativa que indica el rango de valores de los parámetros que se pueden variar y que se tengan en la presente etapa, además de proponer valores para una siguiente etapa.

Finalmente se llega a una serie de conclusiones que determinan que parámetros son los que mejor se pueden variar de acuerdo a las condiciones establecidas por el mismo pozo y el equipo de perforación.

# INTRODUCCIÓN

La industria petrolera ha tenido que desarrollar técnicas y métodos más efectivos y mejorados para reducir tanto el tiempo, como los costos de operación, además de obtener la mayor producción posible. Es por ello que la etapa de perforación debe estar lo mejor diseñada para evitar contratiempos y cumplir de manera efectiva con los tiempos que se tienen planeados para llegar a la profundidad objetivo y así evitar un aumento de costos.

La etapa de perforación se encuentra conformada entre otros aspectos por el diseño de la tubería de perforación, diseño de los fluidos de perforación, registros geofísicos, estudios litológicos, etc. Por consiguiente este proceso debe de contener un programa de perforación que debe incluir un diseño hidráulico. Esta parte es mejor conocida como hidráulica de la perforación, que es la que se encargará de mejorar la condición de velocidad de penetración y de cómo se pueden desarrollar los modelos de hidráulica.

El propósito principal de un programa hidráulico es limpiar el fondo del pozo, para evitar remoler recortes; a su vez ayuda en la perforación del pozo de la manera más eficiente y que se encuentra complementado con la circulación del lodo a una presión y volumen adecuados, para enfriar tanto el sistema de rodamiento como las caras de la barrena, proveer una acción de chorro para ayudar a perforar el agujero por erosión hidráulica y acarrear recortes del material perforado hacia la superficie. Por esta razón se tienen y se han desarrollado numerosos modelos de optimización de la hidráulica que se aplican según las condiciones geológicas, litológicas y del equipo y material con que se cuenta.

Dentro de los modelos existentes para la optimización de la hidráulica en el fondo del pozo se pasa por alto en la mayoría de ellos, el efecto que se puede presentar al variar el ángulo de las toberas y esto altere las condiciones de la fuerza de impacto en la superficie del fondo del pozo; y otro factor que también no se toma

---

---

en cuenta y que se relaciona directamente con el punto anterior, es el del área de impacto del fluido con la formación, ya que entre más área se abarque, mejor será la efectividad que tenga la limpieza y mejor será la velocidad de penetración.

En el presente trabajo se desarrolla un modelo óptimo que toma en cuenta la fuerza de impacto y además el área de impacto del fluido sobre la superficie del fondo del pozo y que en conjunto serán un factor determinante para evaluar y mejorar la velocidad de penetración, a través de diferentes diámetros de toberas, gastos, propiedades del lodo y considerando las litologías más representativas en un yacimiento de la zona marina.

El desarrollo del modelo aquí propuesto es una aplicación de los modelos mecánicos, que para una mejor comprensión se describen en los párrafos siguientes, apoyados de la descripción de los modelos utilizados actualmente.

Los modelos empíricos resultan adecuados para conocer el comportamiento de los fenómenos, utilizándose diseños de experimentos que incluyen diferentes factores y métodos de superficie de respuesta, cuando se requiere mejorar el proceso. Un modelo teórico anticipa un comportamiento detallado del sistema mediante la validación apropiada de mecanismos de proceso que son evaluados independientemente y expresados mediante un sistema de ecuaciones diferenciales acopladas en espacio y tiempo. Y finalmente un modelo mecánico puede contribuir a la comprensión científica, proporcionar una base para la extrapolación y proporciona una representación de la función respuesta más lacónica o concisa que la que se obtendría empíricamente.

Los problemas técnicos al ajustar los modelos mecanicistas:

- Se formulan en términos de ecuaciones diferenciales que normalmente son difíciles de encontrarles una solución explícita, debido a que solo se requiere conocer los valores numéricos a las respuestas de las variables y parámetros y éstos se pueden calcular mediante métodos numéricos.

- Los modelos mecanicistas normalmente no son lineales con relación a los parámetros, lo que implica la utilización de cálculo de mínimos cuadrados no lineales.

El modelo mecánico aquí propuesto, ha sido aplicado para barrenas utilizadas principalmente en pozos de la zona de Cantarell las cuales presentan características diferentes para cada pozo perforado.

# CAPÍTULO 1

## *CONSIDERACIONES TEÓRICAS*

En la elaboración del programa hidráulico de perforación se debe contemplar la selección del equipo de perforación, capacidad de bombas de lodo, tuberías de revestimiento y perforación, con la finalidad de considerar todos los elementos que se necesitan para la adecuada optimización.

Los sistemas hidráulicos tienen un papel muy importante en cada etapa de perforación, ya que el óptimo diseño de estos, dará como resultado una mejoría en la limpieza del pozo además de una reducción en el tiempo de perforación y todo ello en su conjunto además de otros factores, se verá reflejado en una disminución de los costos de la perforación. Parámetros hidráulicos como la fuerza de impacto del chorro y la potencia hidráulica son optimadas con la finalidad de tener una limpieza adecuada del fondo del pozo y aumentar la velocidad de penetración. En este estudio además, se analizará la velocidad en toberas, con el objetivo de obtener una limpieza adecuada del fondo del pozo con el mínimo de potencia hidráulica aplicada en superficie.

### **1.1 HIDRÁULICA EN EL FONDO DEL POZO**

Durante la perforación uno de los factores importantes a considerar para tener una buena velocidad de penetración es la limpieza del pozo, ya que ésta determinará la duración de la barrena. La velocidad de penetración se verá afectada por la velocidad de flujo y geometría de las toberas (área y ángulo), fluido de perforación, el tipo régimen de flujo presente y litología predominante. La importancia de tener un adecuado sistema hidráulico radica en que proporcionará los siguientes beneficios:

- Se obtiene un buen control sobre las presiones subsuperficiales donde es necesario que el fluido imparta una presión hidrostática ligeramente superior a la de la formación. Se pueden presentar zonas de presión normal que no tienen mayor problema y las zonas de presión anormal que se clasifican en altas y bajas. Las zonas anormales de alta presión son las que representan mayor peligro en las operaciones.
- Aporta efectos de flotación a la sarta de perforación y tubería de revestimiento.
- Maximiza la erosión del agujero debido a la acción del lodo durante su movimiento.
- Ayuda a remover los recortes que se generan.
- Incrementa el ritmo de penetración.
- Prevé el control del pozo durante brotes o pérdidas de circulación, por medio del mantenimiento de una contrapresión en el espacio anular.
- Controla las presiones al realizar una operación de sacar o meter tubería.

### **1.1.1 HIDRÁULICA DE LA BARRENA**

El uso de las barrenas de chorro ha sido el desarrollo más importante para el mejoramiento en la eficiencia de la perforación (Chilingarian 1981), debido a que la limpieza en el fondo del pozo se ha mejorado y esto ha permitido incrementar la velocidad de penetración. Para poder cuantificar el efecto de la hidráulica de la barrena sobre la velocidad de penetración, se toman en cuenta los parámetros de fuerza de impacto del chorro, potencia hidráulica, velocidad del chorro y número de Reynolds del chorro, todos ellos referidos a las propiedades de los fluidos en la tobera.

Varios autores, (Kendall y Goins 1960), han hecho importantes contribuciones en el conocimiento de la hidráulica de la perforación rotaria considerando la

distribución de la presión del fluido sobre la superficie del fondo del pozo a través del balance de la velocidad de flujo; además de determinar el área de toberas necesaria para desarrollar la máxima velocidad de chorro, potencia hidráulica de la barrena e impacto del chorro.

En éste último punto los estudios han conducido que entre más pequeño es el diámetro de la tobera, se tendrá una mayor velocidad, lo que mejora el impacto del chorro, aunque la caída de presión será mayor, además de que también depende de las condiciones de la formación, así como del equipo con el que se cuente en superficie.

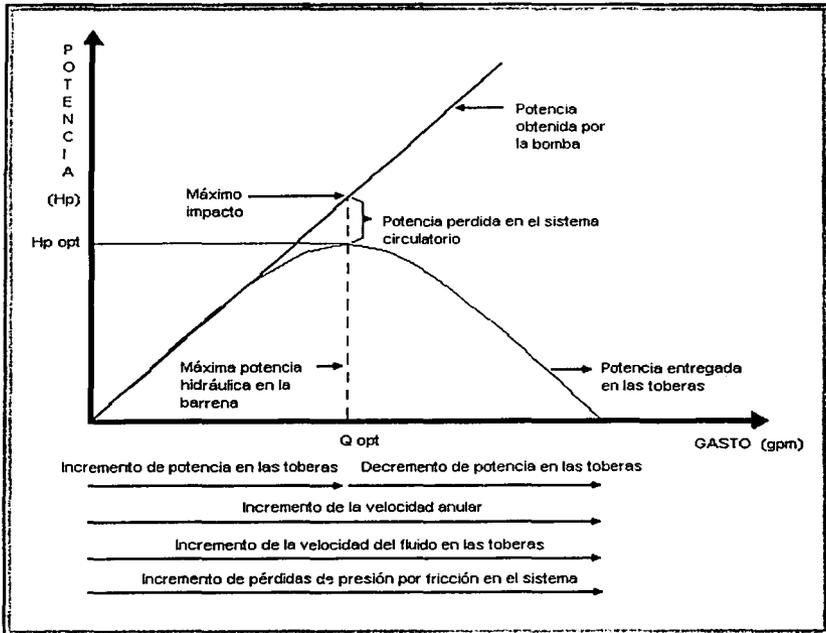
Los tres pasos básicos para la optimación de la hidráulica son:

1. Determinación de la limpieza requerida en el fondo del pozo, que significa remover la mayor cantidad posible de recortes a fin de que no se tengan que volver a remoler estos y causar un mayor desgaste a la barrena, incrementándose el tiempo de perforación.
2. Determinación de la potencia hidráulica de la barrena para balancear el nivel de energía del peso sobre barrena y velocidad de rotación, ya que por sí sólo el peso sobre barrena no incrementa la velocidad de penetración y lo mismo sucede con la velocidad de rotación.
3. Y finalmente determinar la máxima potencia hidráulica de la barrena en relación con la potencia disponible en superficie que se encuentra referida a la capacidad de bombeo con que se cuente en las bombas.

La mayoría de los cálculos en la caída de presión hidráulica son realizados con cálculos hidráulicos como los que se presentan más adelante, ó reglas de cálculo (Chilingarian, 1981) que se apoyan en gráficos de balance de los elementos de la hidráulica como se muestra en la figura 1.1, la cual nos ayuda a determinar la apropiada optimación de los gastos de flujo y la potencia aplicada a las toberas para un pozo determinado que permita que alguno de los criterios de optimación sea utilizado y se evite el gasto de energía que no se traduce en un aumento de

---

velocidad de penetración. La decisión que se toma en el balance apropiado de los elementos de la optimización de la hidráulica es una de las más difíciles ya que normalmente solo se puede maximizar un parámetro (Lummus, 1974) como se muestra en la misma figura 1.1.



**Fig. 1.1. Balance de los elementos que se contemplan en la optimización de la hidráulica (Lummus 1974)**

En la figura 1.1 además de poder determinar la máxima potencia, máxima fuerza de impacto y máximo gasto; se puede decir que un aumento en la potencia sería innecesario, ya que además de tener una gran pérdida de potencia en el sistema, el gasto óptimo que se tendría sería solo uno de acuerdo a las características del pozo en estudio, teniendo por consiguiente que un aumento desmesurado en potencia, gasto o velocidad esté por demás.

Las consideraciones para maximizar uno de los parámetros ocasionan que los demás parámetros se vean afectados directamente y lo mejor que se puede hacer es determinar los valores óptimos de cada uno de los parámetros para evitar así un exceso en la energía suministrada al sistema, que generará finalmente un exceso en los costos de perforación.

Para determinar los valores de caídas de presión en el sistema y más aún determinar la presión que se tiene en la barrena así como en el fondo del pozo, se han generado una serie ecuaciones empíricas y han sido desarrolladas para calcular los programas hidráulicos:

1. Conexiones superficiales y sarta de perforación.

$$\Delta p = \frac{0.0000765 Q^{1.82} \rho^{0.82} \overline{PV}^{0.18} L_T}{D_i^{4.82}} \quad (\text{flujo turbulento}) \quad 1.1$$

2. Pérdidas en el espacio anular.

$$\Delta p = \frac{0.0000765 Q^{1.82} \rho^{0.82} \overline{PV}^{0.18} L_T}{(D_h - D_T)^3 (D_h + D_T)^{1.82}} \quad (\text{flujo turbulento}) \quad 1.2$$

3. Determinación del tamaño de la tobera.

$$\Delta p_h = \frac{\rho Q^2}{1203 A_n^2 C_n^2} \quad 1.3$$

donde:

$$A_n = \frac{Q}{104.2} \frac{\rho}{\Delta p_h} \quad 1.4$$

La estimación analítica de las caídas de presión en las conexiones superficiales con las ecuaciones mencionadas no es suficiente ya que es más compleja por los cambios de dirección del flujo y geometría de sus componentes. Una solución para la determinación de las caídas de presión sería medirlas, circulando el lodo

de perforación, solamente a través de las conexiones superficiales, a diferentes gastos; sin embargo, ésta no es una práctica recomendable.

Generalmente, para las aplicaciones prácticas de campo, las caídas de presión por fricción en las conexiones superficiales se determinan considerando una longitud equivalente de tubería de perforación, de acuerdo con cualquiera de las cuatro combinaciones de equipo superficial mostradas en las tablas 1.1 y 1.2.

**Tabla 1.1. Componentes de las conexiones superficiales en combinaciones típicas.**

Componentes de las conexiones superficiales	Combinaciones típicas					
	Caso 2		Caso 3		Caso 4	
	Diámetro Interior (pg)	Longitud (m)	Diámetro interior (pg)	Longitud (m)	Diámetro Interior (pg)	Longitud (m)
Tubería vertical	3.50	12.2	4.00	13.7	4.00	13.7
Manguera	2.50	16.8	3.00	16.8	3.00	16.8
Tubo lavador de la unión giratoria y cuello de ganso	2.50	1.5	2.50	1.5	3.00	1.8
Flecha	3.25	12.2	3.25	12.2	4.00	12.2

**Tabla 1.2. Longitud equivalente de conexiones superficiales.**

Tubería de perforación			Longitud equivalente de las conexiones superficiales, en metros de tubería de perforación.
Diámetro Exterior (pg)	Peso (lb/pie)	Diámetro Interior (pg)	
3.5	13.3	2.764	49.1
4.5	16.6	3.826	232.0
5.5	19.5	4.276	248.8

Por lo tanto, para determinar las caídas de presión a través de las conexiones superficiales de un equipo, se selecciona el caso de conexiones, de acuerdo con

las dimensiones de las conexiones superficiales, y de la tabla anterior se determina la longitud equivalente de tubería de perforación y su diámetro interior.

Muchos métodos de predicción óptimos asumen que existirá siempre la suficiente potencia disponible en superficie para las conexiones superficiales, el peso sobre barrena y la velocidad de rotación. Para éstas dos últimas condiciones, Fullerton y Mechem (1965) y Fullerton y Fullerton (1973) desarrollaron una correlación entre la máxima potencia hidráulica de la barrena, el peso sobre la barrena y la velocidad de rotación para prevenir errores hidráulicos. Esta correlación muestra el significado de predecir o calcular la velocidad de penetración basados sobre las condiciones hidráulicas de la barrena disponibles (Chilingarian, 1981).

Las curvas hidráulicas de perforabilidad mostradas en la figura 1.2 fueron desarrolladas por Investigaciones de Producción Amoco y discutidas por Lummus (1974), donde  $Q_1 > Q_2 > Q_3 > Q_4 > Q_5 > Q_6$ . Existe una correlación directa entre la respuesta de perforación y la potencia específica de la hidráulica de la barrena.

Allen (Sii Smith Tool, 1975) discutió en detalle la relación entre peso sobre barrena y velocidad de rotación, además de la potencia hidráulica de la barrena. En este estudio se utilizaron barrenas con insertos de carburo de tungsteno y condiciones de bajo peso sobre barrena y velocidades de rotación para que los dientes de la barrena muelan. Las barrenas con insertos y requerimientos de bajo nivel de energía no requieren condiciones de hidráulica máxima con bombas de lodo más nuevas y grandes.

La forma más conveniente de utilizar las curvas hidráulicas de perforabilidad es ocupar los valores que se encuentran dentro de los límites de hidráulica mínima y máxima. Cuando se trabaja fuera de ellos para el caso de hidráulica mínima ocasionaría que la limpieza del fondo del pozo no sea efectiva ya que los recortes generados no serían removidos y éstos retardarían la operación, además de aumentar el desgaste de la barrena ya que serían remolidos nuevamente. En caso contrario si se sobrepasa el límite de hidráulica máxima, la energía

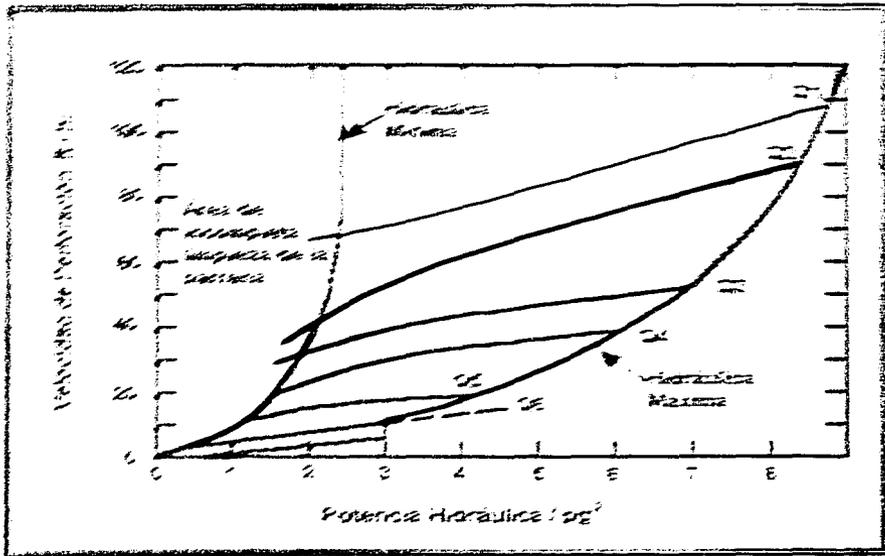


Fig. 12. Curvas hidráulicas de perforabilidad (Lummus 1974)

En la figura 12 se muestra la gráfica de potencias hidráulicas óptima por pulgada cuadrada de agujero, contra el nivel de penetración de la barrera, mostrando diferentes gastos y se vea que los mayores gastos son los que proporcionarán una alta velocidad de penetración y una potencia hidráulica sobre el fondo del pozo y garantizarán la mayor limpieza de los resacas, aunque como se mencionó en la figura 11, cuando se llega a un nivel de limpieza adecuado, aún cuando se aumente el gasto que se le aplique a las toberas, la limpieza del pozo ya no se verá beneficiada, teniendo por consiguiente que el aumento en el gasto sea innecesario y no causará un mayor efecto sobre la limpieza mayor al que ya ha causado.

## 1.2 OPTIMACIÓN DE LA HIDRÁULICA EN EL FONDO DEL POZO

La condición de hidráulica óptima es normalmente considerada como la obtención del máximo impacto ó potencia en la barrena mientras se mantiene la velocidad de flujo dentro de los límites establecidos por el desgaste del pozo y las consideraciones en el acarreo de los recortes. Para obtener la condición de hidráulica óptima es necesario considerar las variables que se pueden resumir en alterables e inalterables como son las siguientes:

**Tabla 1.3. Variables consideradas en la optimación.**

<b>ALTERABLES</b>	<b>INALTERABLES</b>
<b>Lodo de perforación</b>	Tiempo climático
Tipo de lodo	Localización
Contenido de sólidos	Condiciones del equipo de perforación
Viscosidad	Flexibilidad del equipo de perforación
Pérdida de fluido	Contenido de gases corrosivos en el fondo del pozo
Densidad	Temperatura en el fondo del pozo
<b>Hidráulica</b>	Tiempo de viaje del equipo de perforación
Presión de bombeo	Propiedades de la roca
Velocidad del chorro	Problemas característicos en el fondo del pozo
Velocidad de circulación	Disponibilidad del agua
Velocidad anular	Tipo de formación
<b>Tipo de barrena</b>	Profundidad
<b>Peso sobre barrena</b>	Eficiencia del personal
<b>Velocidad de rotación</b>	

Las variables alterables como su nombre lo indica se pueden modificar de tal forma que ayuden a mejorar o reducir las variables inalterables. Las variables alterables no pueden ser modificadas todas a la vez ya que si modificamos alguna de ellas, se tendrá una respuesta de cambio sobre una o varias, por lo que las modificaciones que lleven a cabo sobre las variables deben de tener un equilibrio para lograr el objetivo buscado.

### 1.2.1 MÁXIMA POTENCIA HIDRÁULICA

La potencia hidráulica que proporciona la bomba en superficie se utiliza en parte para vencer la resistencia que opone el sistema circulatorio al flujo del lodo, quedando el resto para ser consumida por la barrena. La efectividad de la barrena mejora cuando se incrementa la potencia hidráulica, ya que si se aumenta ésta, tendremos un incremento en la velocidad de penetración, debido a que los recortes son removidos tan rápido como se van generando. Pero, si se aumenta la potencia superficial sin que se tenga un control, ocasionará que aumente el gasto en la descarga de la bomba, además de un aumento en las caídas de presión por fricción en el sistema. Esto originará que se aumente la potencia destinada a vencer la resistencia por circulación teniendo como consecuencia una disminución en la potencia destinada a la barrena en la misma barrena.

En otras palabras, una vez que se llega al nivel de limpieza "perfecto", el aumento en la potencia hidráulica ya no se traduce en un aumento en el avance de la penetración. Para representar a la potencia hidráulica en la barrena, nos auxiliamos de la siguiente ecuación:

$$BHHP = \frac{\Delta p_{h_{opt}} Q_{opt}}{1717} \quad 1.5$$

Donde la caída de presión en la barrena óptima es:

$$\Delta p_{h_{opt}} = \left[ \frac{m}{m+1} \right] P_{s_{min}} \quad 1.6$$

$$\Delta p_{h, opt} = P_{S_{máx}} - \Delta p_{par, opt} \quad 1.7$$

La caída de presión parásita óptima es:

$$\Delta p_{par, opt} = \left[ \frac{1}{m+1} \right] P_{S_{máx}} \quad 1.8$$

Y finalmente el gasto de flujo óptimo será:

$$Q_{opt} = \left[ \frac{P_{S_{máx}}}{(m+1)K} \right]^{\frac{1}{m}} \quad 1.9$$

$$Q_{opt} = Q \left[ \frac{\Delta p_{par, opt}}{\Delta p_{par}} \right]^{\frac{1}{m}} \quad 1.10$$

El criterio de máxima potencia hidráulica emplea el 65% de la presión superficial en la barrena y el 35% restante para vencer las caídas de presión por fricción en el sistema. El valor de la constante  $m$  varía entre 1.12 y 1.96, sin embargo, como una aproximación, el valor  $m$  puede ser considerado igual a 1.86. En caso de contar con más de dos valores de presión de bombeo medidos en el equipo a diferentes gastos de flujo, el valor de las constantes puede ser determinado mediante algún método de ajuste. Si se cuenta con 2 datos de presión de bombeo y sus respectivos gastos resulta un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas, cuya solución es:

$$m = \frac{\log \left[ \frac{\Delta P_{p1}}{\Delta P_{p2}} \right]}{\log \left[ \frac{Q_1}{Q_2} \right]} \quad 1.11$$

$$m = 2 + (2 - n) \cdot \frac{(\log n - 1.75)}{7} \quad 1.12$$

$$K = \frac{\Delta P_{p1}}{Q_1^m} = \frac{\Delta P_{p2}}{Q_2^m} \quad 1.13$$

## 1.2.2 MÁXIMA FUERZA DE IMPACTO HIDRÁULICA

La mayoría de los operadores de equipo prefieren seleccionar el tamaño de toberas tales que la fuerza de impacto sea mucho mayor que la potencia hidráulica en la barrena, debido a que si se tiene mayor fuerza de impacto, se obtiene mayor velocidad de flujo y por consiguiente se tiene una mejor limpieza en el fondo del pozo. Se define a la fuerza de impacto, como la rapidez con que cambia el momento del fluido con respecto al tiempo, es decir, la fuerza impartida a la formación (León Loya, 2001).

Dentro de este parámetro existe la selección de los diámetros de la tobera, tales que se obtenga de ellos la máxima fuerza de impacto. Se puede calcular la fuerza de impacto mediante la siguiente ecuación:

$$I_f = \sqrt{\frac{\rho Q_{opt}^2 \Delta p_{h\ opt}}{1511}} \quad 1.14$$

Donde la caída de presión en la barrena óptima será:

$$\Delta p_{h\ opt} = \left[ \frac{m}{m+2} \right] P S_{máx} \quad 1.15$$

$$\Delta p_{h\ opt} = P S_{máx} - \Delta p_{par\ opt} \quad 1.16$$

La caída de presión parásita óptima es:

$$\Delta p_{par\ opt} = \left[ \frac{2}{m+2} \right] P S_{máx} \quad 1.17$$

Y finalmente el gasto de flujo óptimo será:

$$Q_{opt} = \left[ \frac{2 P S_{máx}}{(m+2)K} \right]^{\frac{1}{m}} \quad 1.18$$

Para las condiciones de máximo impacto, se consume aproximadamente 52% de la presión de superficie en el sistema de circulación y el 48% en las toberas de la barrena. A partir de trabajos experimentales se ha podido determinar que la velocidad de perforación se incrementa con el aumento en la fuerza de impacto y más aún, ya que incrementando la fuerza de impacto se maximiza la velocidad de flujo a través del fondo del pozo conocido como cross-flow, obteniéndose por lo tanto una mayor velocidad de penetración.

### 1.2.3 MÁXIMA VELOCIDAD EN LAS TOBERAS

La máxima velocidad del fluido que se pueda alcanzar en las toberas se logra cuando se calcula el tamaño de estas de modo de que la presión de superficie a esa velocidad de flujo sea equivalente a la máxima presión de superficie disponible. Se puede calcular esta velocidad utilizando la siguiente ecuación:

$$v_n = \sqrt{\frac{133\Delta p_{h,opt}}{\rho}} \quad 1.19$$

Y como se puede notar en esta ecuación la velocidad en las toberas es directamente proporcional a la raíz cuadrada de la caída de presión a través de la barrena:

$$v_n \propto \sqrt{\Delta P_h} \quad 1.20$$

Esto implica que al obtener la máxima velocidad en las toberas, se obtendrá igualmente la máxima caída de presión disponible en la barrena.

La caída de presión en la barrena óptima será:

$$\Delta p_{h,opt} = P_{s,max} - \Delta p_{par,opt} \quad 1.21$$

La caída de presión parásita óptima es:

$$\Delta p_{par,opt} = \Delta p_{par} @ Q_{min} \quad 1.22$$

Y el gasto de flujo óptimo es:

$$Q_{opt} = Q_{min} \quad 1.23$$

En el desarrollo de este punto se calcula también el área de toberas óptima, utilizando la ecuación de la caída de presión en la barrena utilizando los parámetros óptimos.

$$A_{n\ opt} = \sqrt{\frac{\rho Q_{opt}^2}{1302 \Delta \rho_{t\ opt}}} \quad 1.24$$

La caída de presión a través de las toberas de la barrena es proporcional al gasto de circulación y al área de la tobera. Además de que la caída de presión en la barrena será mínima cuando la presión en superficie sea mínima y la caída de presión por fricción en la sarta de perforación y espacio anular sean máximas.

### **1.2.4 POTENCIA HIDRÁULICA ÓPTIMA POR PULGADA CUADRADA DE AGUJERO**

Este último método ha comenzado a utilizarse en la industria últimamente debido a que tiene varias ventajas con respecto a los tres métodos anteriores:

1. No involucra directamente las pérdidas por fricción o parásitas en el cálculo de optimación hidráulica.
2. Marca un límite máximo después del cual cualquier velocidad de penetración en la barrena "no podrá mejorarse" y cualquier incremento sobre ese límite solo causará un gasto innecesario de energía. Esto tal y como se ha mencionado en el punto 1.2.1.
3. Marca un límite mínimo que de no obtenerse ocasionará una limpieza inadecuada al fondo del agujero, ya que los recortes generados no podrán

ser acarreados a superficie y por lo tanto el ritmo de penetración se verá disminuido.

4. Define completamente el grado de limpieza del agujero.

Y además cumple con los tres pasos básicos para la optimación de la hidráulica que se han mencionado en el punto 1.1.1. Para entender mejor esto se observa la gráfica de la figura 1.2 que muestra las curvas hidráulicas de perforabilidad donde Lummus determinó que para velocidades de penetración de 10 (ft/hr) (20 min/m) o menores, se requería un máximo de 2.5 a 3 caballos de fuerza por pulgada cuadrada de agujero para obtener una limpieza óptima en la barrena y en el fondo del agujero.

Por otro lado, determinó que para velocidades de penetración mayores a 10 (ft/hr), el máximo caballaje hidráulico utilizable por pulgada cuadrada de agujero era muy próximo pero no igual a la raíz cuadrada de la velocidad de penetración medida en ft/hr. Asimismo, en este estudio se determinó que para obtener una limpieza adecuada del agujero se utiliza el valor de 3 (H.P./in<sup>2</sup>) como límite general inferior ya que si se utiliza un valor menor, éste se ubicaría en el área de limpieza incompleta de la barrena en todo el rango de velocidades de penetración; de forma contraria se utiliza un valor de 5 (H.P./in<sup>2</sup>) como límite superior ya que valores mayores pueden causar desgastes o fallas prematuras en las barrenas de conos por lo únicamente deberán utilizarse valores mayores a los 5 (H.P./in<sup>2</sup>) cuando las velocidades de penetración obtenidas justifiquen el costo ocasionado por el desgaste prematuro de la barrena y los viajes adicionales que esto ocasione.

La potencia hidráulica por pulgada cuadrada de agujero o caballaje específico se calcula:

$$H.P._c = \frac{BHHP}{A_a} \quad 1.25$$

Donde:

$$A_u = 0.785 D_b^2 \quad 1.26$$

Este último método que se muestra para optimizar hidráulicamente el fondo del pozo, es el más completo y el más fácil de aplicar ya que define el grado de limpieza que se obtiene al aplicar gastos a diámetros de barrena específicos.

Si el rango de operación del equipo superficial de bombeo no es capaz de reunir estos requisitos mínimos de presión y gasto, deberá seleccionarse uno con mayor capacidad. De no ser posible esto último deberá sacrificarse el ritmo de penetración a un rango donde sea posible tener un caballaje hidráulico específico que asegure una limpieza adecuada de la barrena y el fondo del pozo.

Tanto al aplicar éste método como cualquiera de los otros tres nunca se debe de perder de vista puesto que dependiendo de las características del pozo, será éste quién tendrá la última palabra, por lo que optimización de la hidráulica se refiere, por lo que el programa hidráulico deberá adecuarse al equipo e indicaciones y parámetros que sean proporcionados por el pozo.

### **1.3 MODELOS DE HIDRÁULICA EN EL FONDO DEL POZO**

En la actualidad existen numerosos modelos de hidráulica que ayudan tanto a la perforación como a la limpieza del pozo. Debido a la complejidad y tiempo que se tardaría en analizar todos y cada uno de ellos, se toman dos de los modelos más representativos que existen, y que se describen a continuación, los cuales posteriormente serán analizados con un ejemplo que contenga los mismos valores iniciales y compararlos finalmente con el modelo propuesto en este trabajo. Las figuras 1.3a, 1.3b y 1.3c presentan un diagrama de flujo que generaliza los modelos aquí presentados y se sirve de base para la aplicación de la optimización de la hidráulica.

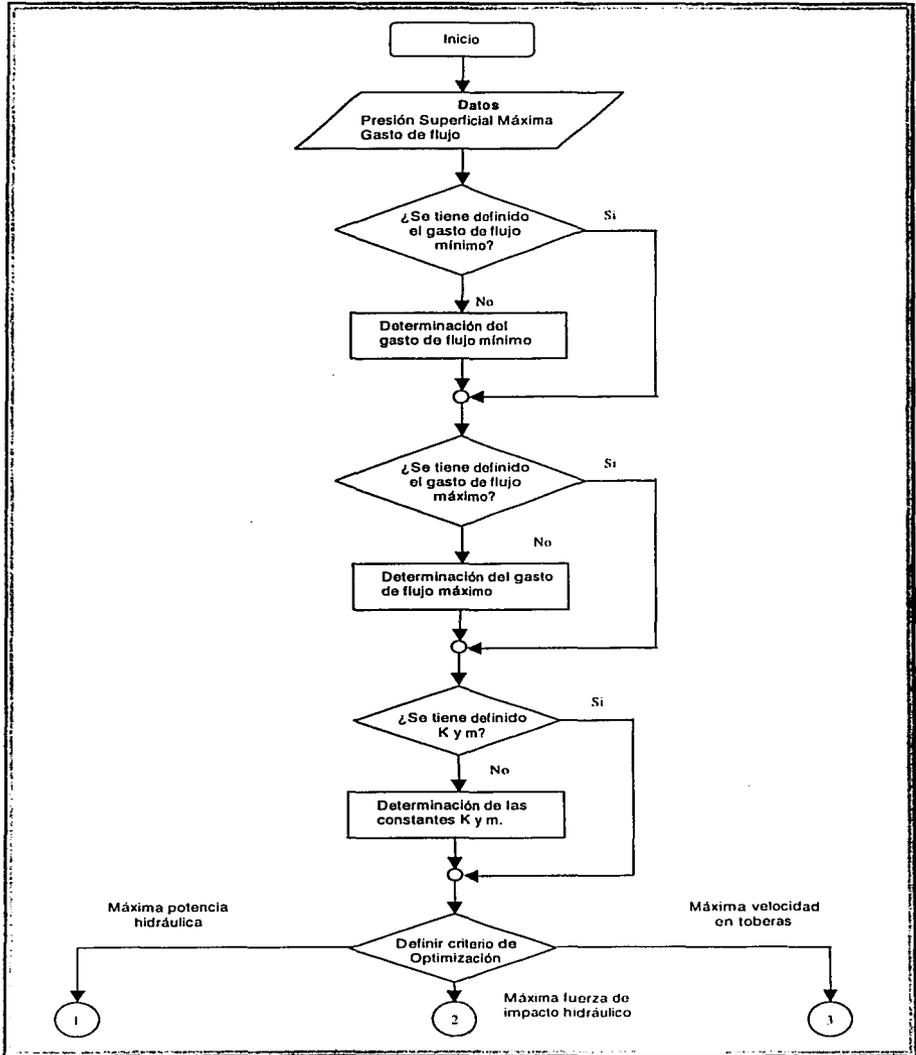


Figura 1.3a. Diagrama de flujo para la optimización de la hidráulica.

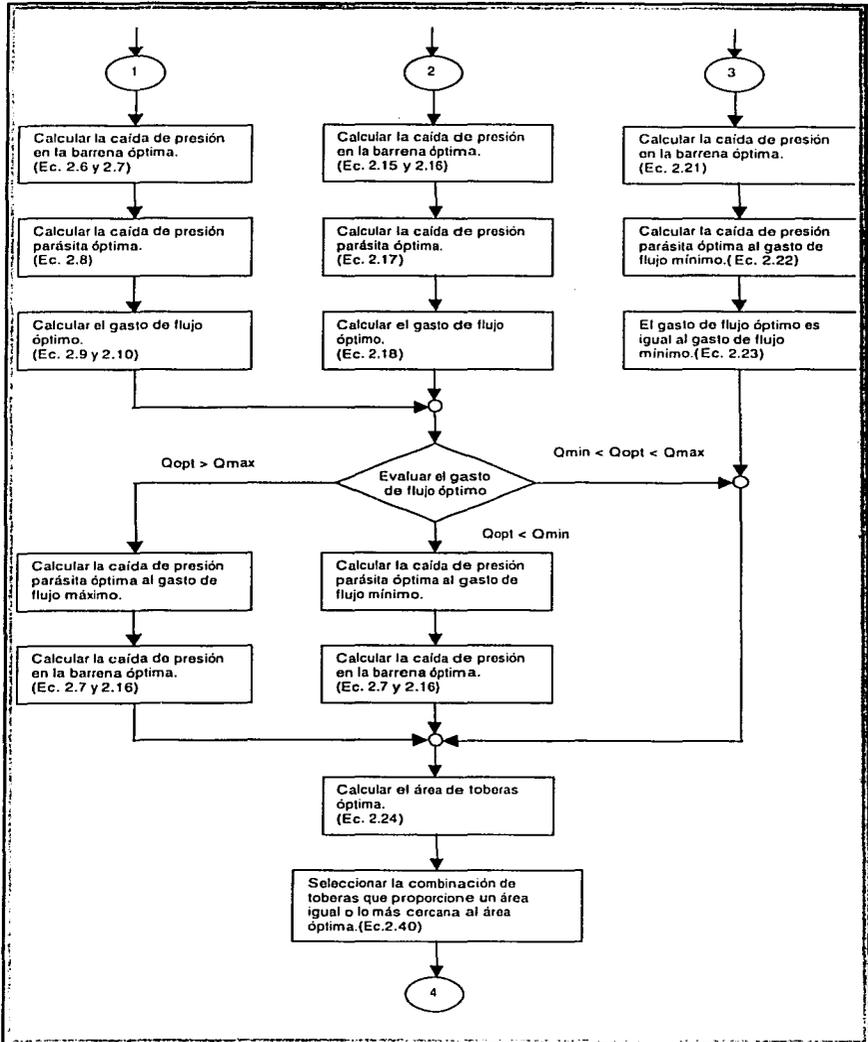


Figura 1.3b. Diagrama de flujo para la optimización de la hidráulica.

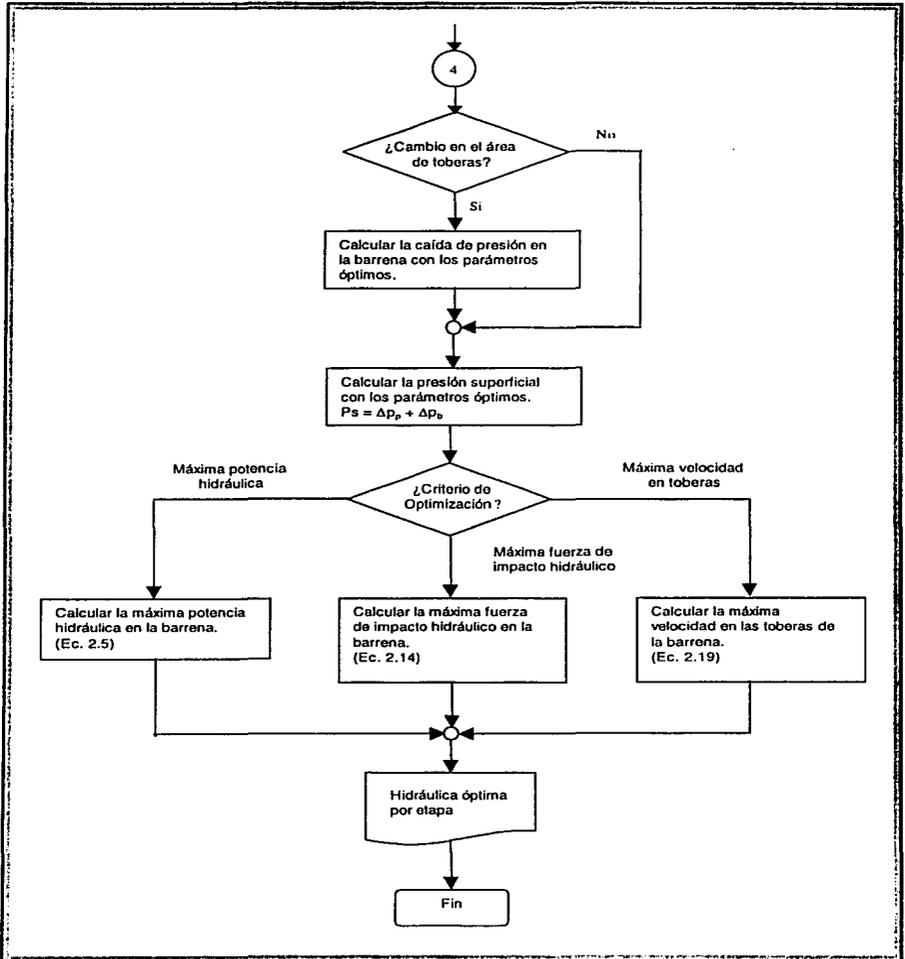


Figura 1.3c. Diagrama de flujo para la optimización de la hidráulica.

### 1.3.1 VELOCIDAD Y FUERZA DE IMPACTO (MODELO MAURER)

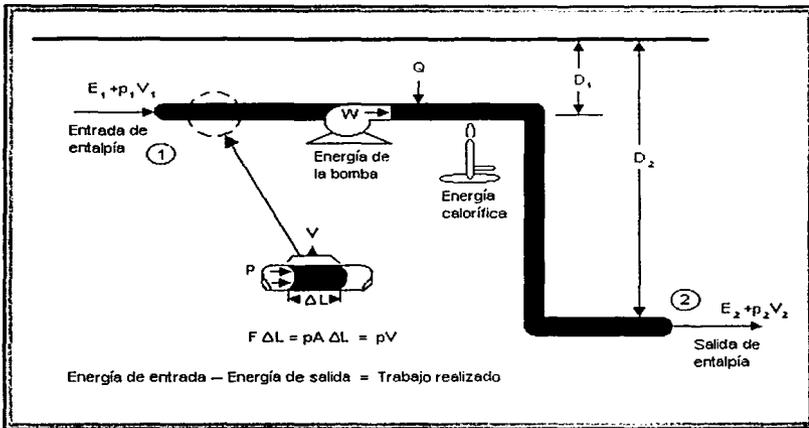
Dentro de este modelo Maurer (1992) realiza la aplicación de la optimización de la hidráulica a través de un software que determina la de fuerza de impacto, potencia hidráulica y velocidad en toberas, pero como se mencionó anteriormente solo se puede maximizar uno de ellos. El software solo realiza la aplicación de la metodología de cálculo de la optimización de la hidráulica de Bourgoyne (1991), mostrándonos los parámetros que se toman en cuenta en forma interactiva.

De acuerdo al modelo, éste comienza con un estudio en el cual se aplica la ley de la conservación de la energía, donde la energía que entra al sistema es equivalente al trabajo realizado al sistema. Se considera un sistema de flujo generalizado como el mostrado en la figura 1.4 donde la energía entrante se puede resumir en:

- ◆  $E_1 + p_1 v_1$ : es la entalpía por unidad de masa del fluido entrante al sistema en el punto 1
- ◆  $-gD_1$ : es la energía potencial por unidad de masa del fluido entrante al sistema en el punto 1.
- ◆  $V_1^2/2$ : es la energía cinética por unidad de masa del fluido entrante al sistema en el punto 1.
- ◆  $Q$ : calor por unidad de masa del fluido entrante al sistema.

La energía que sale del sistema se resume en.

- ◆  $E_2 + p_2 V_2$ : es la entalpía por unidad de masa del fluido que sale del sistema en el punto 2.
- ◆  $-gD_2$ : es la energía potencial por unidad de masa del fluido que sale del sistema en el punto 2.
- ◆  $V_2^2/2$ : es la energía cinética por unidad de masa del fluido que sale del sistema en el punto 2.



**Fig. 1.4. Flujo generalizado en un sistema**

El trabajo realizado por el fluido es igual a la energía por unidad de masa del fluido que se genera en las bombas, aplicando así la ley de la conservación de la energía, obtenemos la ecuación:

$$(E_2 - E_1) + (p_2 \bar{V}_2 - p_1 \bar{V}_1) - g(D_2 - D_1) + \frac{1}{2}(\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2) = W + Q \quad 1.27$$

Simplificando esta ecuación al utilizar notaciones diferenciales, obtenemos la primer ley de la termodinámica aplicada a un proceso de flujo estacionario, quedando como:

$$\Delta E + \Delta(p\bar{V}) - g\Delta D + \frac{\Delta v^2}{2} = W + Q \quad 1.28$$

Esta ecuación es más utilizada para sistemas de flujo que involucran ya sea transferencia de calor o un proceso adiabático, aunque esta forma de la ecuación no es muy aplicada por ingenieros en perforación, sino más bien en una forma que se desarrollará más adelante. El cambio en la energía interna del fluido y el calor

obtenido por el fluido es considerado normalmente como un término de pérdida por fricción, el cual se puede definir en los términos de la ecuación anterior, como:

$$F = \Delta E + \int_1^2 \rho d\bar{V} - Q \quad 1.29$$

El término de pérdida por fricción puede ser utilizado convenientemente para obtener la pérdida del trabajo o energía desechada por las fuerzas que actúan en el fluido. Por ello sustituyendo la ecuación 1.29 en la 1.28, obtenemos:

$$\int_1^2 \bar{V} dp - g\Delta D + \frac{\Delta \bar{v}^2}{2} = W - F \quad 1.30$$

Esta ecuación es llamada ecuación de balance de energía mecánica y que puede ser expresada también como:

$$\Delta p - \rho g \Delta D + \rho \frac{\Delta \bar{v}^2}{2} = \rho W - \rho F \quad 1.31$$

Expresando esta ecuación en unidades prácticas de campo:

$$p_1 + 0.052\rho(D_2 - D_1) - 8.074 * 10^{-4} \rho(\bar{v}_2^2 - \bar{v}_1^2) + \Delta p_p - \Delta p_f = p_2 \quad 1.32$$

*Flujo a través de las toberas de la barrena.*

Aplicando estos principios en la práctica con un flujo en una estructura corta tal como la tobera de una barrena, se considera entonces que:

- El cambio en la presión debido al cambio en la elevación es despreciable
- La velocidad  $v_o$  arriba de la barrena es despreciable y
- La pérdida de presión por fricción a través de la barrena es despreciable.

Por lo que la ecuación 1.32 se reduce a:

$$p_1 - 8.074 * 10^{-4} \rho v_o^2 = p_2 \quad 1.33$$

Para la ecuación anterior se sustituye el símbolo  $\Delta p_b$  para la caída de presión ( $p_1 - p_2$ ) y resolviéndola para velocidad en toberas, se obtiene:

$$v_n = C_d \sqrt{\frac{\Delta P_b}{8.074 * 10^{-4} \rho}} \quad 1.34$$

En la ecuación anterior se agrega un coeficiente de descarga, debido a que el valor obtenido sin utilizar éste término resulta menor a la velocidad real, por lo que para compensar esa diferencia se utiliza un factor de corrección que es el coeficiente de descarga.

Como es conocido en una barrena se cuenta con más de una tobera, teniendo usualmente el mismo numero de toberas y de conos. Cuando se tiene más de una tobera la caída de presión a través de todas las toberas debe de ser la misma debido a lo cual la velocidad a través de todas las toberas es la misma. Pero si las toberas son de diferentes áreas, entonces la velocidad de flujo Q a través de cada tobera se debe ajustar a la relación  $Q / A_n$  la cual debe de ser la misma para cada tobera.

$$\bar{v} = \frac{Q_1}{A_1} = \frac{Q_2}{A_2} = \frac{Q_3}{A_3} \quad 1.35$$

Donde la velocidad de flujo total esta dada por:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \bar{v}_n A_1 + \bar{v}_n A_2 + \bar{v}_n A_3 \quad 1.36$$

Simplificando la ecuación anterior tenemos:

$$Q = \bar{v}_n (A_1 + A_2 + A_3) = \bar{v}_n A_n \quad 1.37$$

Se obtiene que la velocidad de flujo a través de cada tobera es también igual a la velocidad de flujo total dividida por el área total de toberas, quedando como:

$$\frac{Q_1}{A_n} = \frac{Q_1}{A_1} = \frac{Q_2}{A_2} = \dots = \frac{Q_i}{A_i} \quad 1.38$$

Por lo que la velocidad en las toberas,  $v_n$  está dada por:

$$v_n = \frac{Q}{3.117 A_n} \quad 1.39$$

Donde el área total de toberas es:

$$A_n = \frac{\pi}{4(32)^2} (D_{n1}^2 + D_{n2}^2 + \dots + D_{nn}^2) \quad 1.40$$

ahora relacionando las ecuaciones 1.34 y 1.40 y resolviendo para la caída de presión a través de la barrena,  $\Delta p_b$ , tenemos:

$$\Delta p_b = \frac{8.311 \cdot 10^{-5} \rho Q^2}{Cd^2 A_n^2} \quad 1.41$$

*Potencia hidráulica en la barrena.*

Por definición la potencia será la velocidad o rapidez con que se realiza un trabajo, por lo que la energía de bombeo  $W$  puede ser convertida a potencia hidráulica, BHHP por la multiplicación de  $W$  con la velocidad de flujo de masa,  $\rho Q$ , quedando entonces:

$$BHHP = \rho W Q = \Delta p_p Q \quad 1.42$$

Asimismo en términos de unidades de campo tenemos:

$$BHHP = \frac{\Delta p_p Q}{1714} \quad 1.43$$

*Fuerza de impacto.*

El propósito de las toberas es mejorar la acción de limpieza del fluido de perforación en el fondo del pozo y es por ello que varios investigadores han concluido que la acción de limpieza es maximizada cuando se maximiza la fuerza de impacto total del fluido que choca en el fondo del pozo. El fluido que pasa a

través de las toberas, tiene una velocidad vertical  $v_n$  antes de chocar en el fondo del pozo y está viajando a una velocidad cero después de chocar en el fondo del pozo, por lo que el cambio en la velocidad del momentum con respecto al tiempo está dado por:

$$I_f = \frac{\Delta(m_a \vec{v})}{\Delta t} \equiv \left( \frac{m_a}{\Delta t} \right) \Delta \vec{v} = \frac{(\rho Q) \vec{v}_n}{32.17(60)} \quad 1.44$$

Combinando las ecuaciones 1.34 y 1.44, obtenemos finalmente:

$$I_f = 0.01823Cd Q \sqrt{\rho \Delta P_h} \quad 1.45$$

### 1.3.2 POTENCIA HIDRÁULICA Y FUERZA DE IMPACTO (MODELO WARREN)

Este modelo basa sus estudios en maximizar la optimización de la potencia hidráulica en la barrena y la fuerza de impacto del chorro, dando como resultado un incremento en la energía disponible en el fondo del pozo tanto para levantar los recortes y mantener limpio el fondo, como para ayudar a la barrena en su función de perforar.

De acuerdo a la geometría de la barrena, las toberas apuntan hacia las esquinas del fondo del pozo, creando un flujo cruzado, debido al retorno del fluido que proviene del fondo ya que la distancia es relativamente pequeña entre la tobera y el fondo del pozo, originándose que la velocidad no se vea afectada en este retorno. Considerando lo anterior se obtiene que la velocidad del flujo cruzado es directamente proporcional a la velocidad de flujo.

Warren basó sus estudios utilizando una barrena de 8 ½ con un código IADC de 6-1-7 el cual nos indica que la barrena tiene insertos de carburo de tungsteno para formaciones duras y con cojinetes sellados, sirviendo para determinar las velocidades de flujo reales y las velocidades de chorro. Las velocidades de flujo

utilizadas fueron de 565 gal/min y las velocidades de chorro fueron arriba de 400 ft/seg.

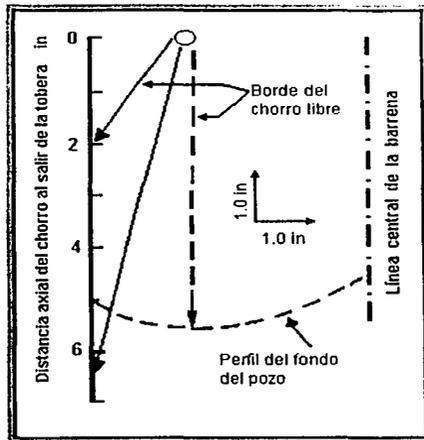
El área de impacto fue determinada observando la localización del área desgastada y por la medición de la presión dinámica bajo la barrena en una prueba de celda.

Los datos obtenidos de pruebas realizadas en laboratorios por años con los esfuerzos en la perforación han indicado que la velocidad de penetración es función del diámetro de la tobera para una barrena con una condición de potencia hidráulica constante (Warren, 1984).

Los resultados de estas pruebas claramente muestran un gran efecto de la hidráulica sobre la velocidad de penetración. Además, otro factor que incide en la velocidad de penetración es el diámetro de la tobera independientemente de la fuerza de impacto. Por ejemplo, una fuerza de impacto de 500 lb. con tres toberas de 9/32 de pulgada da la misma velocidad de penetración en comparación con una fuerza de impacto de 800 lb. con tres toberas de 15/32 de pulgada.

Dentro de este modelo se diseñó un programa experimental de dos fases para examinar el mecanismo por el cual, la hidráulica afecta la velocidad de penetración. La primera fase consiste en estudios básicos para evaluar la energía disponible bajo la barrena para remover los recortes y la segunda parte del proyecto consiste en pruebas para medir la velocidad del movimiento de los recortes del fondo y de los recortes sostenidos en el lugar por una presión diferencial.

También se describe dentro del modelo, cómo los jets en la barrena apuntan hacia la esquina del fondo del pozo con una ligera inclinación de aproximadamente 10 a 15° como se muestra en la figura 1.5. Se puede observar en ésta figura el campo de flujo del jet puede ser influenciado por la pared del pozo, el fondo del pozo, los conos sobre la barrena y el regreso del fluido que viene debajo de la barrena, así como las zonas estancadas bajo la barrena debido al efecto adyacente de los jets.



**Fig. 1.5. Ángulo de las toberas con respecto a la pared del pozo.**

El acercamiento que ha sido retomado en este estudio de literatura es para revisar la información disponible en la literatura sobre lo pertinente a la turbulencia en los jets para cada uno de estos parámetros y que sirve para evaluar los principales efectos que se producen durante una operación de perforación y que enseguida se describen.

El primer efecto a ser considerado es el choque del chorro sobre el fondo del pozo. La figura 1.6 muestra un esquema de la turbulencia del chorro en el choque vertical sobre una superficie y éste se encuentra fluyendo dentro de un fluido inmóvil que tiene la misma composición que el chorro.

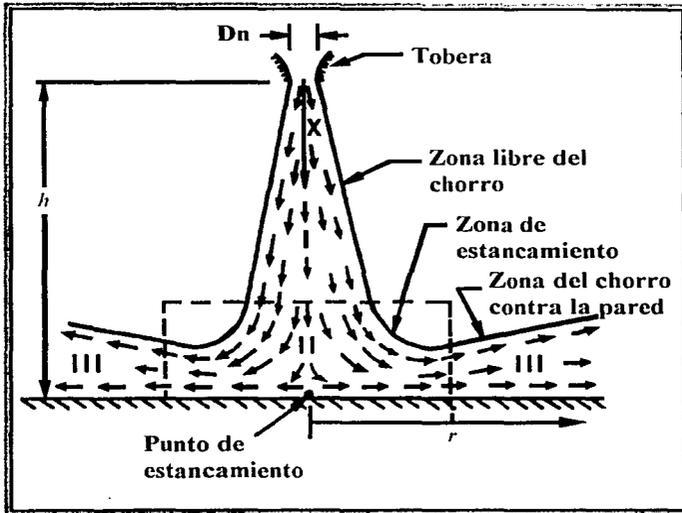


Fig. 1.6. Choque del chorro con respecto a la superficie del pozo.

La placa del piso es suficientemente grande para que no existan efectos de borde sobre el flujo bajo el chorro el cual puede ser dividido en tres distintas zonas (Beltaos, 1978). La zona I es conocida como la zona de libre chorro y se encuentra caracterizada por un cono con movimiento de fluido el cual se expande y pierde velocidad mientras que el chorro entra al fluido encubierto. La máxima velocidad,  $u_x$ , ocurre a lo largo del eje del chorro y está dado por la siguiente ecuación para "x" mayor que cerca de 6 diámetros de toberas.

$$u_x = \frac{u_n C_1}{x/D_n} \quad 1.46$$

El valor de  $C_1$  en la ecuación anterior se encuentra en los rangos de 5.75 a 7.32, pero generalmente es tomado como 6.3 (Rajaratnam, 1976). La velocidad disminuye radialmente desde los ejes del chorro y es reducido a  $\frac{1}{2} u_x$  a  $r = 0.096x$  para cualquier distancia x. El origen del cono que identifica el límite del chorro es

usualmente encontrado ligeramente detrás de la tobera. En este caso se considera  $x=h$  debido a que la tobera se encuentra en posición vertical, pero con la inclinación que tiene la tobera estos valores son distintos uno del otro. El ángulo incluido del cono para tres chorros es generalmente de 20 a 25°(Linzer, 1971) y lo que finalmente este estudio muestra que la máxima presión en el punto de estancación está dada por:

$$P_m = \frac{\rho u_n^2}{12386} \frac{C_2}{\left(\frac{h}{D_n}\right)^2} \quad 1.47$$

Las unidades para esta ecuación y las ecuaciones citadas subsecuentemente fueron cambiadas a unidades de campo a partir de la publicación. La presión sobre la pared disminuye radialmente a partir del punto de estancación y resume la presión ambiental a una distancia de  $r = 0.22h$  del punto de estancación. El comienzo de la región de choque se define como  $x = 0.86h$ , porque a este punto la velocidad axial comienza a desviarse de la velocidad esperada de un chorro libre.

La fuerza de impacto del chorro que es utilizado como un parámetro para caracterizar el nivel de la hidráulica de la barrena esta dado por:

$$I_r = 0.000516\rho Q u_n \quad 1.48$$

$$I_r = 0.00126\rho D_n^2 u_n^2 \quad 1.49$$

Al momento de realizar una comparación de las ecuaciones 1.47 y 1.49 revela que la máxima presión bajo la tobera debería de ser una función de la fuerza de impacto calculada y debería de ser independiente del diámetro de tobera utilizado para obtener la fuerza de impacto.

El máximo esfuerzo cortante para un chorro estancado está localizado a una posición de  $r = 0.14h$  del punto de estancamiento (Beltaos, 1978). El esfuerzo cortante sobre la pared decrece radialmente de este punto y se obtiene un valor

de  $\frac{1}{2}$  del máximo valor a  $r = 0.3h$ . El máximo valor del esfuerzo cortante está dado por:

$$\Psi_m = 2.583 * 10^{-4} \frac{\rho(u_m)^2}{\left(\frac{h}{D_n}\right)^2} \quad 1.50$$

Ha habido varias investigaciones de la zona del chorro radial a la pared. Poreh et al.(1967) encontró la siguiente ecuación que predice la máxima velocidad radial en esta región utilizando datos de Bradshaw y Love (1959).

$$u_m = 1.32 \frac{1}{h} \left(\frac{r}{h}\right)^{-1.1} \sqrt{Kf} \quad 1.51$$

donde:

$$Kf = 0.153\pi D_n^2 u_o^2 \quad 1.52$$

Combinando estas dos ecuaciones y convirtiendo a unidades de campo obtenemos la siguiente expresión:

$$u_m = 0.915 \frac{1}{h} \left(\frac{r}{h}\right)^{-1.1} D_n u_o \quad 1.53$$

La altura anterior de la placa a la máxima velocidad fue encontrada para ser:

$$x_m = 0.0196 \left(\frac{r}{h}\right)^{0.9} h \quad 1.54$$

La fricción sobre la pared queda expresada por:

$$\Psi_m = 3.345 * 10^{-5} \left(\frac{\mu}{\rho D_n u_o}\right)^{0.3} \left(\frac{h}{r}\right)^{0.3} \left(\frac{D_n}{r}\right)^2 \rho u_o \quad 1.55$$

Esta ecuación es igualmente consistente con los datos de Bradshaw y Love.

Los chorros bajo la barrena son afectados por el límite de flujo que resulta de la geometría de la barrena y del agujero los cuales en un caso simple como el mostrado en la figura 1.6 no se aplican necesariamente.

Parte del impacto del chorro sobre la pared del pozo antes alcanzaba el fondo como ha sido mostrado en la figura 1.5. Foss y Kleis (1972), midieron el efecto de una pared sobre un chorro inclinado a  $15^\circ$  de la pared. Sus datos muestran que aunque la línea central del chorro es ligeramente inclinada desde la pared debido a la presión de estancamiento sobre la pared, el principal efecto es una extensión del chorro a lo largo de la pared. Los datos de Davis y Winarto (1980), muestran que la línea de velocidad central de un chorro, fluyendo paralela hacia la pared es poco afectada por la presión de estancamiento a lo largo de la pared. Sus datos también muestran la extensión del chorro a lo largo de la pared en vez de la deflexión desde la pared.

En suma para el efecto de la pared del pozo, los chorros están sujetos a la influencia del regreso del fluido que viene por debajo de la barrena. Para el análisis de una barrena, se revela que el área disponible para un fluido que regresa por debajo de la barrena se efectúa por uno de los lados de la tobera a causa del volumen ocupado por los conos y por los soportes de la barrena. El área abierta al fluido que retorna es aproximadamente el 15% del total del área seccional del agujero. Esto no significa que el chorro no esté emitiendo dentro de una masa estancada de fluido, pero está fluyendo casi dentro de un fluido en contracorriente. Esto causa una tendencia para el chorro a ser desviado hacia la pared del pozo, así como un incremento significativo de entrada de fluido dentro del chorro (Rajaratnam, 1976). Platten y Keffer (1968) encontraron que el arrastre debía ser incrementado de 2 a 5 veces que un simple chorro a estar fluyendo dentro de un fluido estancado. La máxima velocidad del chorro a cualquier distancia desde la tobera es reducida de una velocidad de chorro libre a la misma distancia por una función de la relación de velocidad de tobera a la velocidad libre de flujo (Rajaratnam, 1976).

En 1964 y 1965 McLean publicó dos artículos que examinaron el flujo cruzado y el impacto bajo las barrenas de chorro. Su trabajo incluye las mediciones de presión y velocidad a través del fondo del pozo, bajo una barrena de 4 ¾ de pulgada.

Encontró que la máxima velocidad paralela en el fondo del pozo en cierta posición de alrededor de 0.6 pulgadas de la pared está dada por:

$$u_c = \frac{5.9(Qu_o)^{1/2}}{D_b} \quad 1.56$$

La máxima velocidad ocurre a una distancia de 0.016 pulgadas en el fondo y disminuye a un 41% de la máxima a una distancia de 0.1 pulgadas del fondo.

Este trabajo muestra que la presión de choque del chorro y la velocidad de flujo cruzado son maximizadas cuando el producto  $Qu_o$  es maximizado. Estos dos parámetros fueron pensados para ser aquellos que dieran el mejor control de limpieza bajo la barrena.

Utilizando la ecuación 1.53 y la geometría del experimento de McLean, fue calculada una constante de 4.9 para la ecuación 1.56 en vez de la medida experimental de 5.9. La altura de la máxima velocidad del fluido fue calculada para ser de 0.0145 pulgadas de la ecuación 1.54 como comparación con el valor medido de 0.016 pulgadas. Estos valores están de acuerdo con los valores experimentales.

## CAPÍTULO 2

### *DESCRIPCIÓN DEL MODELO IMPACTO*

En este capítulo se presenta el desarrollo de un modelo mecanístico para calcular la velocidad, fuerza, ángulo, área y potencia de los jets que forma el fluido de perforación al salir de las toberas y durante su recorrido hasta impactarse en la formación. El modelo se ha desarrollado en función de parámetros como son el gasto, presión de bombeo, densidad de la formación y del lodo; los cuales son variables muy importantes en su desarrollo, ya que dependiendo de la litología presente y del lodo empleado, las condiciones de impacto aumentarán o disminuirán (fuerza y área); como es explicado en las secciones siguientes. En el presente capítulo se realiza un análisis de sensibilidad del modelo con respecto al gasto, densidad del lodo, litología y diámetro de toberas con la finalidad de examinar su variación con respecto a la distancia axial del jet. Para comprender mejor cada uno de los puntos mencionados se muestra a continuación el desarrollo del modelo IMPACTO.

#### **2.1 DESARROLLO DEL MODELO IMPACTO.**

El modelo está estructurado a partir de algunas definiciones fundamentales tales como la de gasto, el cual es la relación de volumen de fluido y el área de sección transversal de flujo, y su forma básica de representación se muestra en la ecuación 2.1.

$$Q = \bar{v}A = \frac{\text{volumen}}{\text{tiempo}} \quad 2.1$$

Para fines de estudio a partir de la ecuación anterior se obtiene que el flujo másico de un fluido se representa por la ecuación 2.2.

$$\dot{Q} = \bar{v} A \rho \quad 2.2$$

Por otro lado, momentum, es el cambio del producto de la masa por la velocidad de un cuerpo (ver ecuación 2.3).

$$M = m_a \bar{v} \quad 2.3$$

A partir de las ecuaciones 2.2 y 2.3 el momentum del jet se puede expresar de la siguiente forma:

$$M_j = \bar{v}^2 A \rho \quad 2.4$$

Partiendo de la ecuación 2.4 un cambio de volumen se puede representar a partir de la ecuación 2.5:

$$\Delta V = A \Delta L \quad 2.5$$

Si  $z$  representa la distancia axial del jet, entonces un cambio infinitesimal de volumen se puede escribir como:

$$dV = A dz \quad 2.6$$

El empuje que experimenta un cuerpo sumergido dentro de un fluido es igual al producto del peso específico del fluido por el volumen del líquido desalojado por el cuerpo.

$$F_e = V P_e \quad 2.7$$

Donde  $P_e$  es igual a  $p$  en sistemas técnicos de ingeniería:

$$P_e = \rho g \quad 2.8$$

Por la definición citada de la ecuación 2.2 sabemos entonces que:

$$\dot{Q} = A \bar{v} \rho \quad 2.9$$

Un cambio en el momentum del jet debe de ser igual a un cambio en el empuje del fluido, por lo tanto igualando la Ec.2.8 y la Ec. 2.4 y sustituyendo 2.5, considerando la densidad del medio circundante al jet, un promedio de densidades del lodo y recortes, se tiene:

$$\Delta v^2 A \rho = \left( \frac{\rho_f + \rho_l}{2} \right) A \Delta z \quad 2.10$$

Dividiendo entre  $\Delta z$  y tomando el límite cuando  $\Delta z \rightarrow 0$ :

$$\frac{dv^2 A \rho}{dz} = \left( \frac{\rho_f + \rho_l}{2} \right) \Delta z A \quad 2.11$$

Auxiliándonos de la figura 2.1, se obtiene la ecuación 2.11 la cual considera las variaciones de la densidad, longitud del jet ( $z$ ) y velocidad ya que estas varían a medida que el jet avanza en su trayectoria.

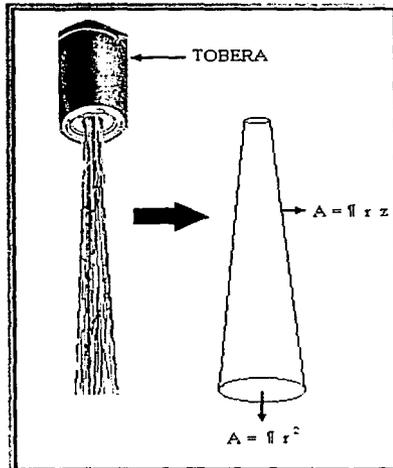


Fig. 2.1. Áreas del jet consideradas en el desarrollo del modelo IMPACTO

$$\Delta \rho A \bar{v} = (\rho_E - \rho_S) \pi r (z_1 - z_2) (\bar{v}_S - \bar{v}_E) \quad 2.12$$

Debido a que el fluido circundante penetra dentro del jet mientras éste se disipa y es lógico afirmar que un cambio en el flujo másico del jet en la dirección axial sería proporcional a un cambio en el flujo másico en la dirección radial, por lo tanto:

$$\Delta \rho A \bar{v} = k d \rho_m \Delta z \bar{v}_m \quad 2.13$$

Dividiendo la Ec. 2.13 entre  $\Delta z$  y tomando el límite cuando tiende a cero:

$$\frac{d \rho A \bar{v}}{dz} = k d \rho_m \quad 2.14$$

El valor de la constante  $k$  ha sido determinado experimentalmente con un valor de 0.06, teniendo como consideración a través del modelo de Irons y Farias (1985), el uso de la hipótesis de arrastre utilizada para correlacionar el arrastre del fluido desde la tobera hasta fuera de ella, trasportando el momentum y masa por medio de la turbulencia que se genera dentro de la tobera. El factor  $k$  supone una relación lineal entre el producto de la velocidad del jet, la densidad y el medio del fluido al que se penetra.

Con la finalidad de evitar efectos dimensionales y definiendo las variables adimensionales (ver anexo A), las ecuaciones 2.15 y 2.16 se pueden expresar de la siguiente forma:

$$\frac{dv_j^*}{dz^*} = -\frac{4kv_j^*}{\pi d_j^*} + \left( \frac{1 - \frac{\Gamma}{\rho_j^*}}{N_{Fr} v_j^*} \right) \quad 2.15$$

$$\frac{dd_j^*}{dz^*} = \frac{2k}{\pi} \left( 1 + \frac{\rho_j^*}{\Gamma} \right) - \left( \frac{1 - \frac{\Gamma}{\rho_j^*}}{2N_{Fr} v_j^{*2}} \right) d_j^* \quad 2.16$$

Para facilitar el desarrollo de este modelo se ha creado un programa, llamado IMPACTO (ver anexo) que nos ayudará a evaluar diferentes valores de gasto,

diámetro de toberas, densidad del fluido de perforación y densidad de las rocas más representativas que se encuentran en las operaciones de perforación. El modelo se aplica a continuación para cada uno de los puntos considerados, en los cuales se explicará cual es la ventaja o desventaja de maximizar cada uno de los parámetros considerados. Al momento de realizar la evaluación de los parámetros citados dentro de cada punto descrito a continuación, el resto de los datos se mantuvo fijo de tal manera que existiera una consistencia en el arreglo de los datos para poder manejar los parámetros a conveniencia.

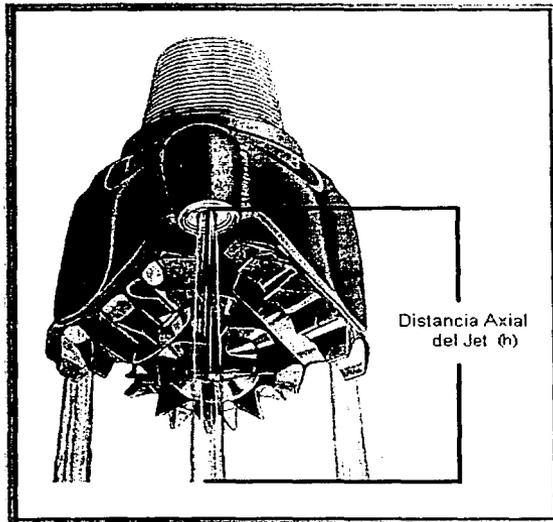
## **2.2 INFLUENCIA DE LOS DIFERENTES PARÁMETROS DE LA PERFORACIÓN EN LA HIDRÁULICA EN EL FONDO DEL POZO.**

En este punto se cubren los parámetros más comunes e importantes que se contemplan en un análisis de hidráulica, con el fin de optimizar la perforación; como por ejemplo la capacidad de gasto y presión con se puede contar en superficie, ya que de esta capacidad dependerá la efectividad que se obtendrá en la velocidad en toberas y que además se calcula el diámetro óptimo para mejorar la limpieza en el pozo.

Además de estos factores se incluye un análisis de cómo el fluido de perforación, que es uno de los más importantes, afecta la velocidad de penetración; por lo que un adecuado diseño, selección y mantenimiento de las propiedades del fluido, permitirán la aplicación de una hidráulica óptima, en conjunto con la determinación de la litología y la propiedad reologica que se tenga de acuerdo a las características del pozo.

Los cálculos realizados por el programa IMPACTO se hicieron a partir de la salida de la tobera hasta la superficie del fondo del pozo (figura 2.2), que es la distancia axial del jet y tiene ventaja sobre los modelos citados en el capítulo anterior, ya que los resultados que se obtienen a partir de estos modelos están considerados a

partir de la salida de la tobera y no consideran la variación del jet conforme éste avanza en la operación de perforación, es decir, conforme avanza el jet, los valores de caídas de presión, velocidades y fuerza aplicada el fondo del pozo estarán variando. El cálculo para el avance del jet se programó en el modelo IMPACTO para determinar los valores de velocidad de jet, diámetro del jet, área del jet, caída de presión del jet, fuerza del jet, a cada 0.005 ft aproximadamente.



**Fig. 2.2. Distancia axial del jet considerada en el modelo IMPACTO**

Aparentemente por la distancia que recorre el jet, éste no se ve afectado sin embargo, más adelante se podrá observar que las variaciones en algunos casos son considerables, por ejemplo, uno de los parámetros que influye en la variación de velocidad, fuerza, área, caída de presión, etc., es el medio circundante alrededor del jet y la fuerza de empuje del fluido de perforación en el fondo del pozo. Los puntos que se citan a continuación son los más recurrentes en un análisis comparativo de hidráulica en la barrena para determinar en dado caso, el

---

ritmo o velocidad de penetración e influyendo directamente en una disminución o aumento del tiempo de perforación.

### **2.2.1 Gasto de la bomba.**

El gasto define la velocidad anular, en el interior de las tuberías y las pérdidas de presión por fricción en el sistema circulatorio y se relaciona directamente con la potencia disponible en superficie. Aparentemente la potencia no es problema para un diseño de hidráulica óptima ya que ésta siempre se encontrará disponible en superficie. Los problemas a considerar en la bomba son, la eficiencia con la que se cuente en la bomba, ya que en varias ocasiones el equipo utilizado no opera al 100%. La máxima potencia hidráulica en la barrena, dependerá de la efectividad de la bomba, debido a que la velocidad de penetración aumenta conforme aumenta la potencia en las bombas, sin embargo una vez que se consigue el nivel de máxima limpieza, que es cuando los recortes se remueven a medida que se generan, cualquier incremento en la potencia no aumentará los avances de penetración. La potencia hidráulica desarrollada por la bomba se utiliza en parte, para vencer la resistencia ofrecida al fluido de perforación por el sistema circulatorio y también para la misma barrena.

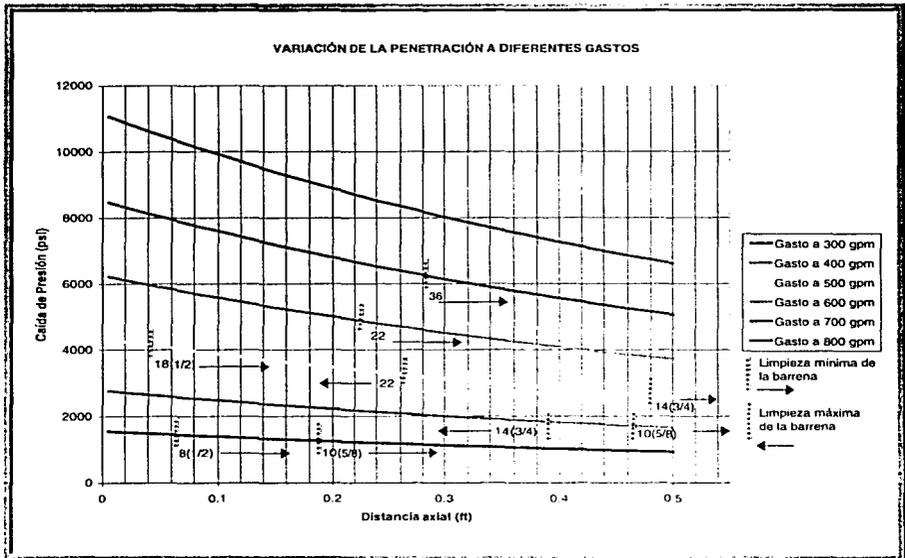
La potencia con que cuenta la bomba será la capacidad de gasto con que se pueda trabajar y ese gasto de circulación junto con la presión de salida en toberas, provocarán la remoción de los recortes por el fluido de perforación. Es decir, la velocidad del fluido de perforación es proporcional al gasto en la salida de las toberas.

Para analizar el efecto del gasto en la hidráulica en el fondo del pozo, se realizaron diferentes corridas variando su valor y manteniendo fijas las demás variables (ver tabla 2.1), esto apoyándose a través del modelo y programa IMPACTO. Posteriormente se realizan una serie de gráficos comparativos con el propósito de analizar cual de los parámetros operativos es el más adecuado para optimizar la hidráulica en la barrena.

**Tabla 2.1. Datos utilizados en el programa IMPACTO, teniendo como variable al gasto**

Datos	Valores
Presión de Bombeo (kg/cm <sup>2</sup> )	2285
Densidad de la formación (lb/gal)	21.7
Diámetro de toberas (1/32 in)	10-10-10
Densidad del lodo (lb/gal)	10
Gasto (gpm)	300, 400, 500, 600, 700, 800

Como resultados se obtienen una serie de gráficos donde el principal factor que influye en los parámetros que se consideran en cada uno de éstos es el gasto.

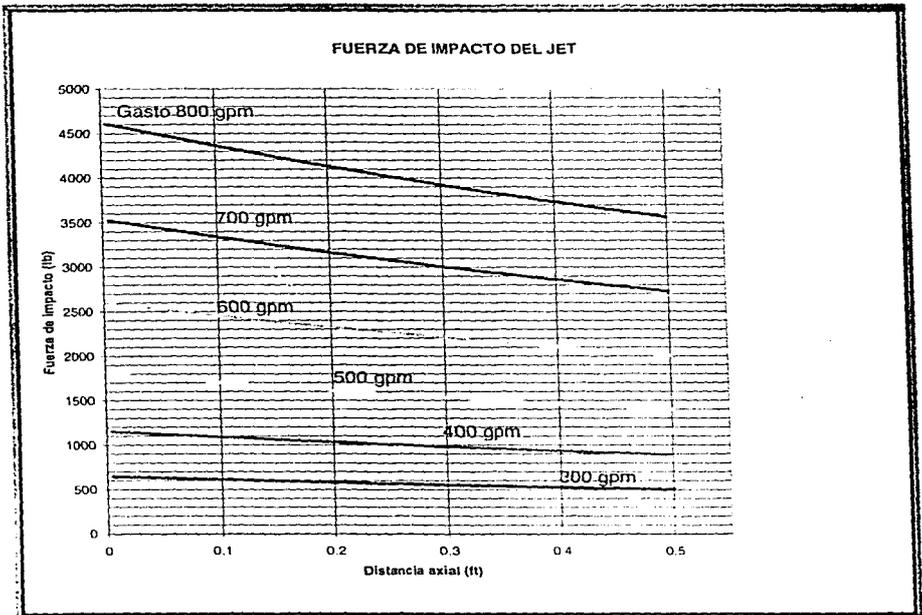


**Fig. 2.3. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra caída de presión del jet (ver Tabla 2.1)**

En la figura 2.3, se observa la variación de la caída de presión con respecto a la distancia axial la cual nos indica que el gasto con los valores mostrados en la tabla 2.1, y más aún cuando aumenta éste, la caída de presión aumenta tanto en la barrena como en el sistema. Es decir en este ejemplo cuando se considera un gasto de 800 gpm la caída de presión es mucho más pronunciada en los primeros 0.3 ft de avance, después de salir de la tobera, teniendo una caída de alrededor de 3000 psi, que representa un 25% de la caída de presión al salir de la tobera, más sin embargo para un gasto de 300 gpm, la caída de presión para ese mismo avance, es de 430 psi, que representa alrededor del 20%; notándose una diferencia aproximada del 80% de caída de presión, entre estos dos gastos aplicados. Se puede observar además como ya se mencionó que las caídas de presión son graduales a medida que se aumenta el gasto; es decir que para los primeros tres gastos que son de 300, 400 y 500 gpm, las pendientes respectivas para una distancia axial de 0.1 ft, no varían.

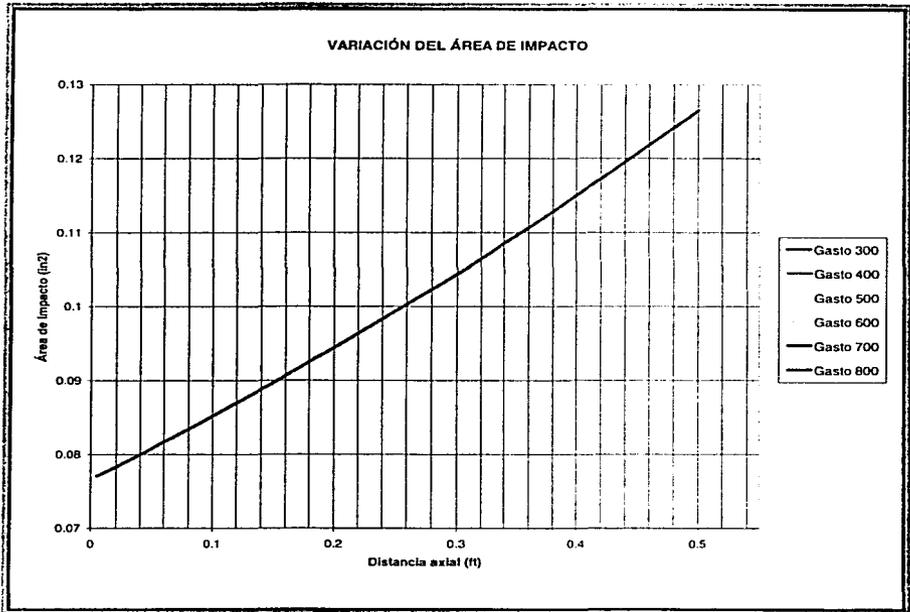
Esto nos indica que solo para este caso en específico se puede utilizar el menor gasto para evitar la mayor caída de presión en los primeros tres gastos, a reserva de que las condiciones del pozo o de la operación necesiten un gasto mayor. Además se incluye en el gráfico un análisis del grado de limpieza que se puede obtener con los mismos datos y la barrena ó barrenas (diámetro) que cumplen con la mejor limpieza. El grado utilizado (Potencia hidráulica óptima por pulgada cuadrada de agujero) varía según los autores donde se considera que un valor de limpieza menor a dos (2) no cumple con la limpieza requerida, ocasionando que cuando los recortes se generan, éstos no sean removidos al momento; por otro lado un valor mayor a cinco (5) es demasiado ocasionando que, debido a la alta presión que pasa por las toberas, los conos y dientes de la barrena presenten un desgaste más rápido; por lo que tomando en cuenta estas condiciones, el rango que se utiliza en este análisis es de 2.5 a 4.5 que cumple con la limpieza adecuada. Considerando solo este grafico para análisis, no se puede llegar a una respuesta de optimización pero será de gran ayuda en conjunto con otros gráficos que se presentan más adelante. Se puede notar que en comparación con el análisis de otros parámetros, para el gasto se obtienen las mayores caídas de

presión por lo que se comprueba que a mayores gastos, se tendrán mayores caídas de presión. Ahora en la figura 2.4 podemos apreciar que la fuerza de impacto es proporcional al gasto aplicado por lo que dependiendo de la fuerza con la que queramos impactar a la formación será el gasto que se debe utilizar. Haciendo una comparación con la figura 2.3, notamos que las pendientes de las rectas son casi iguales para los primeros tres gastos, pero el comportamiento cuando se aplica el mayor gasto es totalmente diferente ya que la fuerza de impacto no decae con la distancia tan rápidamente como la caída de presión. Esto se debe a que el cambio de momentum del jet es muy grande en comparación con la fuerza de empuje.



**Fig. 2.4. Distancia axial desde la tobera al fondo del pozo del jet contra la fuerza de impacto del jet sobre la superficie del pozo (ver Tabla 2.1)**

Como ya se ha mencionado a mayores gastos, mayores caídas de presión, pero se tendrá también debido a ese gasto alto, un alta fuerza de impacto. Un resultado importante para el estudio de este parámetro en específico que es el gasto, tenemos que el área de impacto cubierta es la misma para cualquier gasto aplicado en este ejemplo y que se puede apreciar en la figura 2.5. Esto nos indica que el área de impacto es independiente del gasto, por lo que se puede notar que el área de limpieza será cubierta a su máxima capacidad.

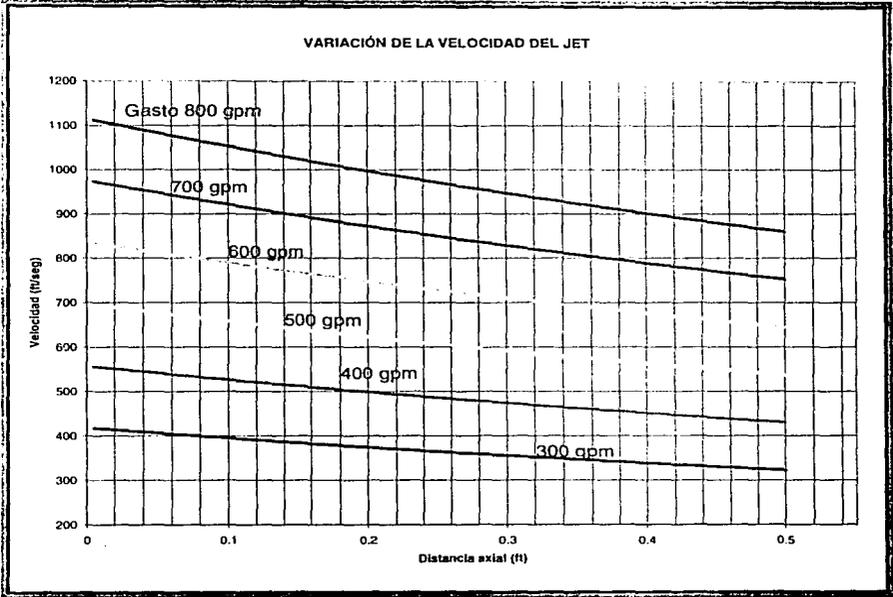


**Fig. 2.5. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra el área de impacto del jet (ver Tabla 2.1)**

Esto no quiere decir que se tenga una eficiente limpieza con el menor gasto, ya que esta efectividad dependerá de otros factores, tales como el tamaño de los recortes, densidad de los mismos, etc.

La dispersión del jet en este caso tiene un crecimiento del 50% total para los tres jets, con respecto al tamaño inicial que es el de diámetro total de toberas. Cabe aclarar que por cuestiones de estudio el área considerada en el desarrollo del modelo, así como para el programa, se realizó el cálculo del área de impacto para un solo jet. Este resultado que se obtiene debido a que se hizo el estudio enfocado a un solo jet, ya que por diseño de la misma tobera el comportamiento es el mismo para todos los jets, siempre y cuando los tres tengan el mismo diámetro. En la comparación de este punto (Fig. 2.5) con el resto de los análisis (2.2.2 — 2.2.5) se obtiene que el área de impacto obtenida es la menor en comparación de los demás parámetros (diámetro de toberas, densidad del lodo y de la formación), pero con un aumento de valores en sus respectivos parámetros.

Por último se realizó una comparación entre las velocidades que se pueden obtener de los gastos descritos y se obtuvo que al igual que en la caída de presión, se tienen decrementos a medida que avanza el jet, aunque en una proporción menor que con la caída de presión, por lo que no se tiene mayor problema para este caso (figura 2.6). También se puede apreciar que con el incremento del gasto se puede obtener una mayor velocidad y además será el mayor valor que se pueda obtener en comparación con el resto de los parámetros en estudio, tales como diámetro de tobera, densidad de la formación y del fluido de perforación.



**Fig. 2.6. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra velocidad del jet (ver Tabla 2.1)**

## **2:2.2 Diámetro de las toberas.**

Para poder contemplar y cubrir el punto anterior se tiene que realizar el cálculo hidráulico del circuito del fluido de perforación, y así definir el diámetro óptimo de las toberas y la presión en éstas, la cual proporcionará la energía necesaria para impulsar la masa del fluido contra el fondo del pozo. Es pertinente aclarar que el fluido de perforación, independientemente de la velocidad de éste a través de las toberas de la barrena, no destruye la roca consolidada significativamente en ningún grado, sino más bien mejorará limpieza del fondo del pozo.

La capacidad de remoción de los recortes por el fluido, estará en función de la presión a la salida de las toberas y del gasto de circulación y éste es proporcional a la velocidad del fluido de perforación a la salida de las toberas. Por lo tanto debe de hacerse un cálculo hidráulico del circuito del fluido de perforación, para así poder definir el diámetro óptimo de las toberas, es decir, aquel que dé lugar a la máxima potencia hidráulica del flujo del fluido de perforación a la salida de las toberas.

En general si se aumenta indiscriminadamente la potencia superficial, crecerá el gasto y por lo tanto las caídas de presión en el sistema. Esto trae como consecuencia considerando una misma combinación de toberas que aumente la potencia destinada a vencer la resistencia por circulación en todo el circuito, pero sin mejorar en forma significativa la potencia hidráulica en la barrena, que trae como consecuencia que la optimización de la potencia hidráulica en la barrena no se logra a través del diámetro de las toberas.

Sin embargo el modelo aquí propuesto arroja como dato un diámetro óptimo a fin de auxiliar a la potencia hidráulica ó a la fuerza de impacto en su acción de perforación, el cual se mostrará más adelante de acuerdo a las condiciones mostradas en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2. Datos utilizados en el programa IMPACTO, teniendo como variable al diámetro de toberas**

Datos	Valores
Presión de Bombeo (kg/cm <sup>2</sup> )	2285
Densidad de la formación (lb/gal)	21.7
Diámetro de toberas 3(1/32 in)	10, 12, 14, 16, 18, 20
Densidad del lodo (lb/gal)	10
Gasto (gpm)	300

Iniciando de igual forma que en estudio del parámetro anterior, la caída de presión con la variación del diámetro de toberas es pronunciada y que se puede observar en la figura 2.7 que a menor diámetro de tobera, tendremos una mayor caída de presión o que es lo mismo, a mayor diámetro, menor caída de presión, esto desde que el fluido sale de la tobera, ya que la restricción de flujo para un diámetro grande será menor que utilizando un diámetro pequeño. Se puede notar también, auxiliándose y comparando con la figura 2.3, que la caída de presión disminuye con el aumento del diámetro, por lo que si es necesario que la caída de presión sea pequeña, la opción de incremento de diámetro es la más recomendable para este caso.

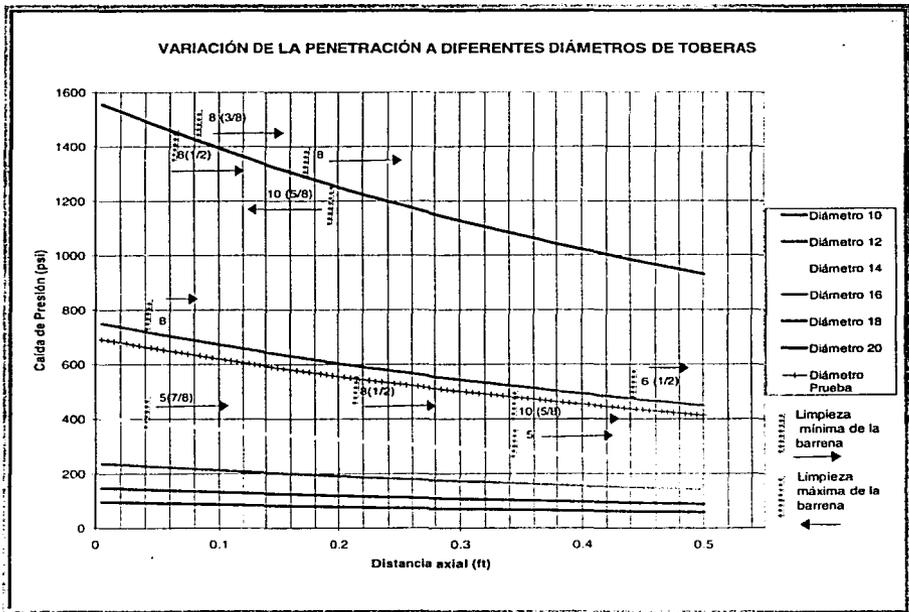
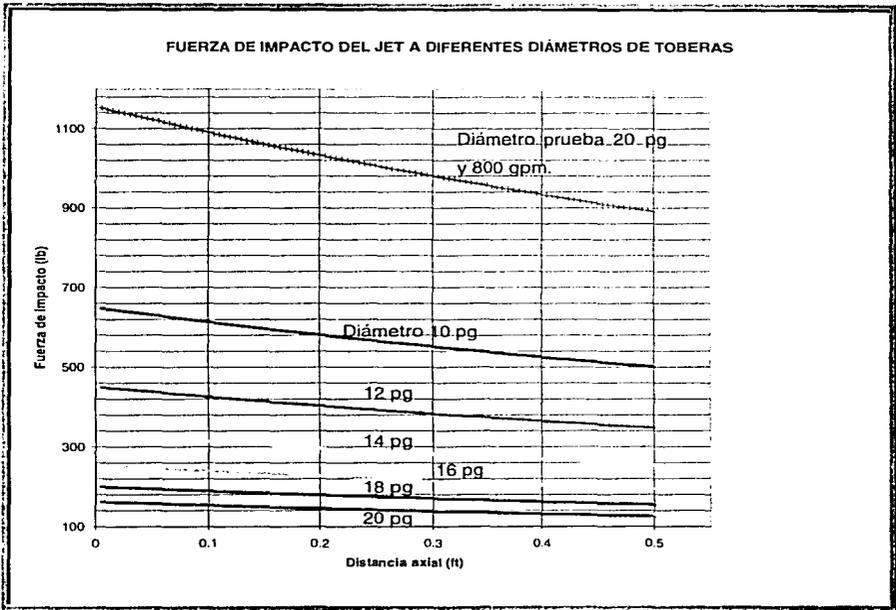


Fig. 2.7. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra caída de presión del jet (ver Tabla 2.2)

Haciendo un análisis respecto al mayor de los diámetros aquí propuestos (20/32 pg), si le aumentamos el gasto hasta 800 gpm, tenemos entonces una recuperación considerable, al grado de que con estas condiciones podemos obtener la misma caída que con un diámetro de 12/32 pg y con 300 gpm, pero como uno de los objetivos principales en la perforación es el ahorro de energía disponible y por sentido común, entonces esta forma de evitar la caída de presión no es convencional.

Podemos apreciar de igual forma que la diferencia de valores de caída de presión entre un diámetro y otro es pequeña, en comparación con la variación existente cuando se varía el gasto (ver figura 2.3), lo que nos indica que existe una caída de presión mayor cuando se aplica un incremento en el gasto que cuando se aplica un incremento en el diámetro de la tobera.

Analizando la figura 2.8 y comparándola con la figura 2.4 notamos que debido a una alta caída de presión tendremos como consecuencia una menor fuerza de impacto cuando se incrementa el diámetro de toberas por lo que tampoco se recomienda incrementar el diámetro para aumentar la fuerza de impacto. Haciendo el mismo análisis que en el punto anterior si aumentamos el gasto hasta 800 gpm, se tiene entonces un incremento en la fuerza de impacto pero el gasto aplicado lo hace poco conveniente por el incremento en el gasto de energía, más sin en cambio se tiene una fuerza de impacto aproximadamente igual si se utiliza un gasto de 400 gpm con un diámetro de 10/32 pg.

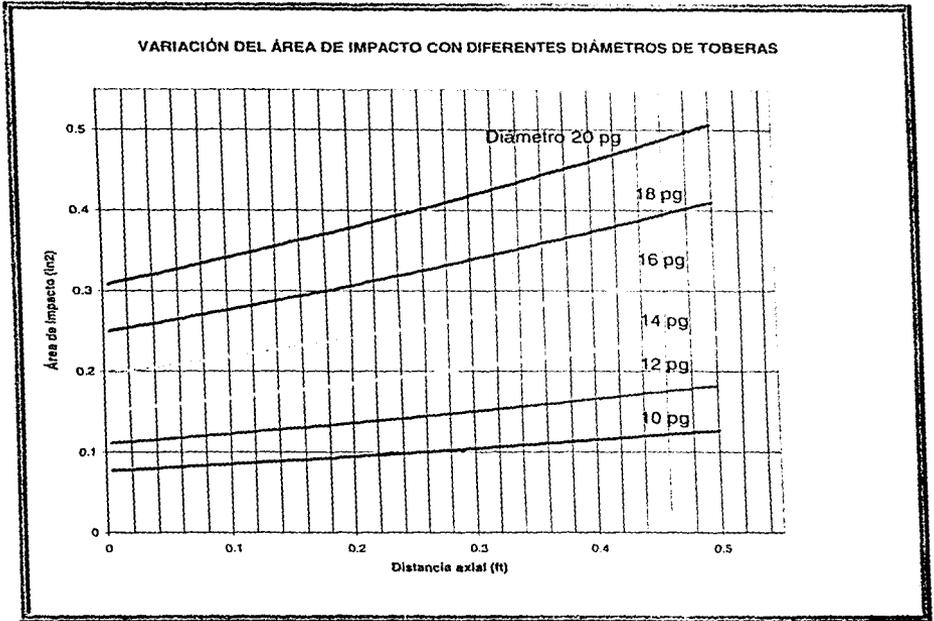


**Fig. 2.8. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra fuerza de impacto del jet (ver Tabla 2.2)**

El hacer comparaciones entre uno y otro parámetro de optimización nos ayuda a saber cual de ellos podemos tomar primero y en que proporción. La ventaja que se puede obtener del incremento de este parámetro es la de evitar un embolamiento y para comprender mejor este término, se define embolamiento cuando los recortes de perforación no son removidos bajo la barrena tan rápido como se generan, ocasionando que se genere una capa de roca entre la barrena y la superficie del fondo del agujero, disminuyendo así el ritmo de penetración de la barrena.

Es por ello que aparentemente el aumento del diámetro resulta poco conveniente a excepción de la anterior condición donde además de esta, se pueden tener

mejores resultados en comparación con el incremento del gasto, no obstante el área de impacto muestra resultados favorables en este punto, tal y como se puede apreciar en la figura 2.9.

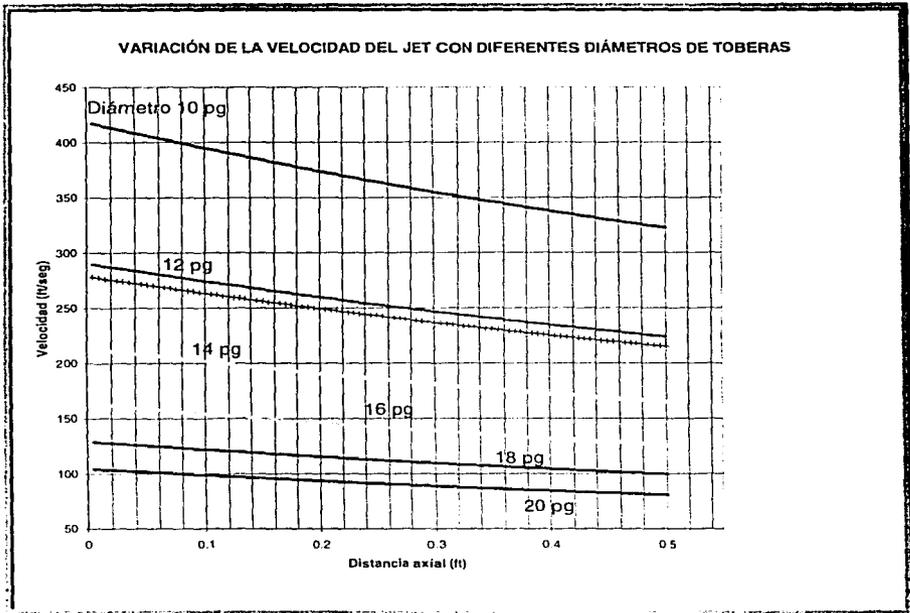


**Fig. 2.9. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra área de impacto del jet (ver Tabla 2.2)**

Los resultados muestran una mejora en el área cubierta ya que con el incremento del diámetro, como es de suponerse, se obtiene un área impacto mayor, esto nos puede servir, por ejemplo, cuando se nos presente un embolamiento y necesitemos desalojar aquellos recortes, de manera efectiva como también en el caso de la fuerza de impacto, que nos estén afectando en el avance de la perforación. Con el incremento en el diámetro de la tobera se puede obtener una cobertura del 50% más de área de acuerdo al gráfico, lo que puede ser

significativo para mejorar según sea el caso la limpieza, aunque todos los demás factores que intervienen en esta compleja operación deberán ser tomados en cuenta.

Por último se tiene el análisis de la distancia axial del jet contra la velocidad del jet (figura 2.10) y se obtiene que la velocidad también disminuye, esto por el hecho de que el gasto al mantenerlo constante y el diámetro se incrementa, ocasiona que el flujo del fluido esté menos restringido, ocasionando que exista una mayor caída de presión, seguido de una disminución en la fuerza de impacto y como acto seguido una disminución en la velocidad del jet.



**Fig. 2.10. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra velocidad del jet (ver Tabla 2.2)**

El único beneficio que se obtiene del incremento del diámetro de acuerdo a los resultados obtenidos es el de obtener un área de limpieza más completa tomando las reservas correspondientes a un aumento del gasto para mantener la presión, velocidad y fuerza de impacto del jet para cumplir con las mismas condiciones iniciales de estos tres factores.

Aunque por variación en los puntos de caída de presión y fuerza de impacto no ha sido favorable el aumento del diámetro de la tobera, se puede recomendar que si se tiene que aumentar el diámetro de toberas, se haga solo para la siguiente medida ya que un aumento mayor de diámetro de toberas, provocará un consumo de energía innecesario.

### 2.2.3 Litología

La información litológica por lo general es la primera que se necesita para determinar la mejor selección de barrena y tipo de fluido que se va a emplear.

Tabla 2.3. Clasificación de la IADC contra el valor de Co.

TIPO DE LITOLOGÍA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (PSI)	CÓDIGO AIDC / API
Formaciones muy débiles – Alta plasticidad con baja resistencia. (margas y arcillas)	< 1500	111 – 117 / 415 – 427
Formaciones débiles – Baja resistencia (margas, evaporitas y lutitas)	1500 – 3000	121 – 127 / 435 – 527
Formaciones débiles a medianamente débiles – baja resistencia, interlineadas con secuencias de alta resistencia. (lutitas, pizarras, lignitos)	3500 – 7500	131 – 137 / 537 – 547
Formaciones medianamente duras – alta densidad, alta resistencia, pero sin lentes abrasivos (lutitas, areniscas y carbonatos)	7500 – 15000	211 – 221 / 617 – 637
Formaciones duras – alta resistencia, con lentes abrasivos (areniscas, limolitas y dolomitas)	15000 – 30000	316 – 347 / 732 – 737
Formaciones extremadamente duras – resistencia muy alta, muy abrasivas (rocas ígneas y metamórficas)	> 30000	832 – 837

En la naturaleza se presentan diferentes tipos de litología y es precisamente por sus propiedades físicas que se tienen que utilizar diferentes tipos de barrenas, de acuerdo a la litología presente en cada yacimiento.

En la tabla 2.3 se muestra la clasificación de la IADC contra el valor de compresión uniaxial, ó que es lo mismo, la resistencia máxima a la ruptura y se encuentra basada en modelos empíricos desarrollados a partir de trabajos experimentales. De acuerdo, al tipo de litología presente en la operación de perforación se decidirá que tipo de barrena que por sus características de diseño y operación será la más adecuada para utilizarla en esa etapa de perforación.

Para el desarrollo de este punto se consideraron los datos contenidos en la tabla 2.4, que como se podrá notar, se han tratado de mantener algunos de ellos, para poder apreciar mejor la diferencia entre un parámetro y otro de optimización.

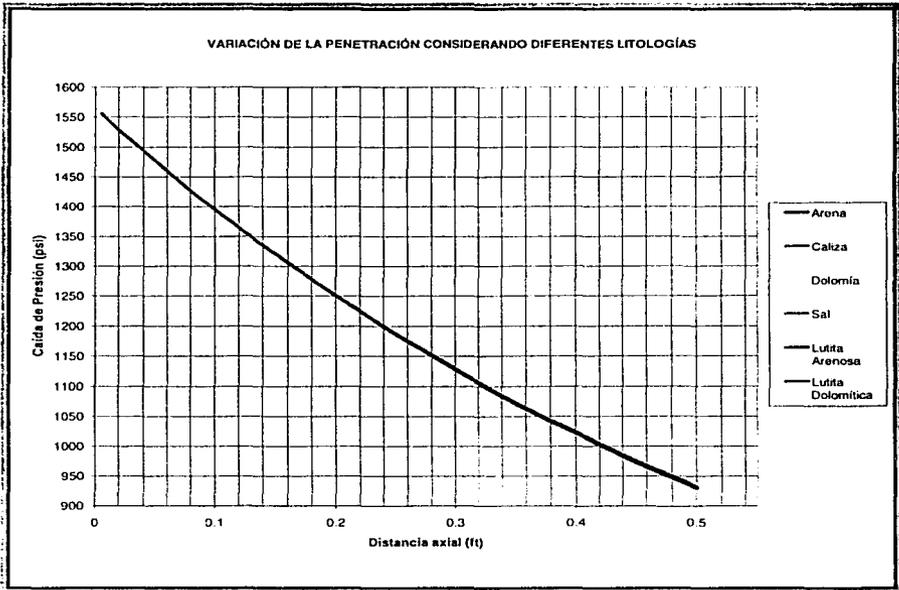
**Tabla 2.4. Datos utilizados en el programa IMPACTO, teniendo como variable la densidad de la formación**

Datos	Valores
Presión de Bombeo (kg/cm <sup>2</sup> )	2285
Densidad de la formación (lb/gal)	
Arena	22.08
Caliza	22.6
Dolomía	23.99
Sal	16.95
Lutita	20.016 -- 23.352
Diámetro de toberas 3(1/32 in)	10
Densidad del lodo (lb/gal)	10
Gasto (gpm)	300

Los datos de la densidad de la formación corresponden a diferentes litologías consideradas en este estudio y siendo éstas las más representativas en un campo petrolero. Cabe aclarar que las densidades manejadas son promedio y éstas

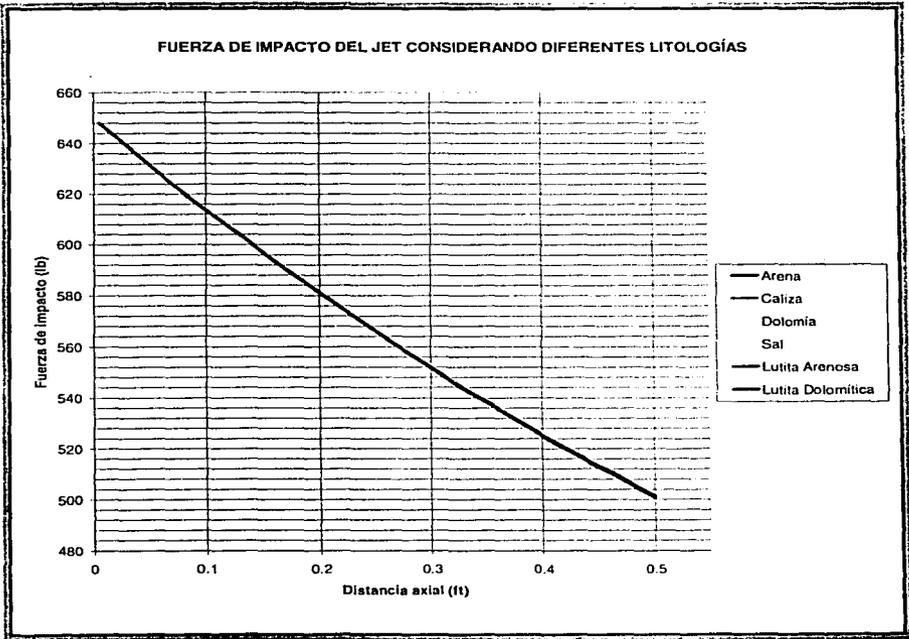
pueden variar de acuerdo a sus propiedades físicas y reacciones químicas que puedan tener con el fluido de perforación empleado; y debido a que no es posible alterar las características de la roca, se tiene que adaptar la optimización a este parámetro. En este análisis se observa en que forma afectan los diferentes tipos de litología presentes cuando se mantienen el resto de los parámetros constantes.

Primeramente se puede decir que de acuerdo a la figura 2.11 que no existe diferencia alguna en la caída de presión al perforar cualquier tipo de roca, ya que se mantiene en el mismo rango para las condiciones propuestas y por ello la densidad de la formación no causa efectos sobre la caída de presión.



**Fig. 2.11. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra caída de presión del jet (ver Tabla 2.4)**

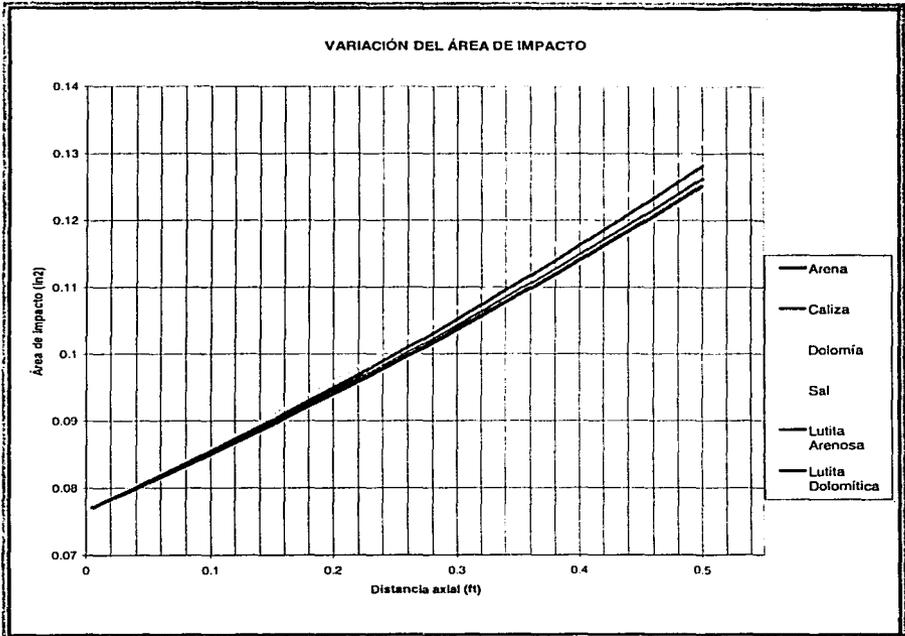
Para el análisis de la figura 2.12 que involucra la fuerza de impacto del jet se puede ver que tampoco existe variación alguna al perforar cualquier tipo de roca.



**Fig. 2.12. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra fuerza de impacto del jet (ver Tabla 2.4)**

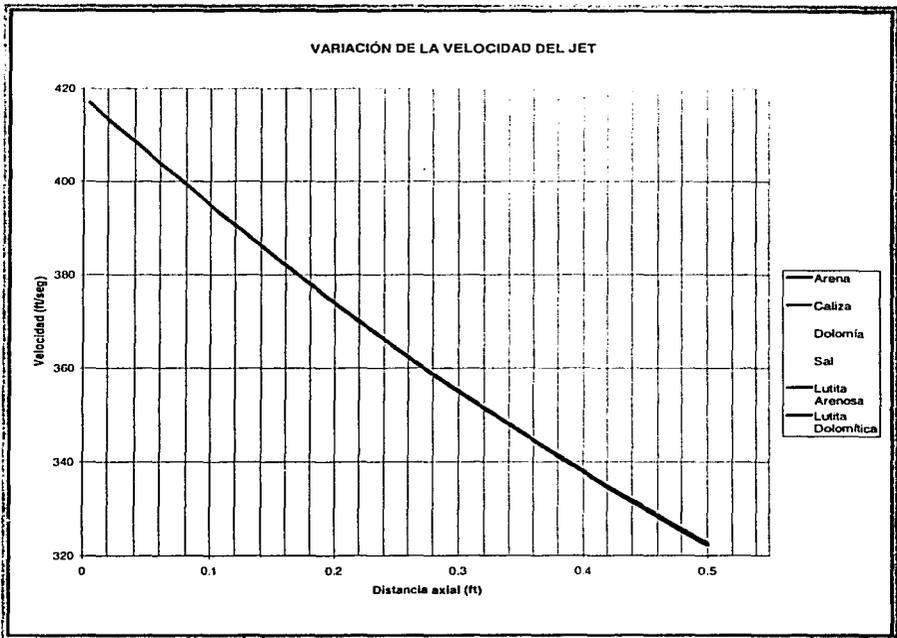
El área de impacto al igual que en el punto de variación del diámetro del jet y del gasto aplicado a la tobera, muestra un cambio en la tendencia que se viene dando con la caída de presión y de la fuerza de impacto ya que en la figura 2.13 podemos ver que la tendencia para 0.1 ft de distancia axial, es la misma para todas las litologías, pero de ahí en adelante comienza a tener un comportamiento diferente. Después de 0.1 ft las tendencias comienzan a dividirse ocasionando que las densidades de formación más bajas comiencen a tener más área de

impacto que las más altas. En el ejemplo utilizado la litología más presente es la lutita y por ello se utilizaron dos valores de densidad, observándose en el gráfico 2.13 que es una de las litologías con mayor área de impacto.



**Fig. 2.13. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra área de impacto del jet (ver Tabla 2.4)**

Finalmente para el caso de la velocidad se puede observar en la figura 2.14 que de igual forma que en los casos de caída de presión y fuerza de impacto, no existe variación alguna entre una litología y otra, por lo que si se requiere hacer una optimización de la hidráulica, la litología presente no causará mayor problema.



**Fig. 2.14. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra velocidad del jet (ver Tabla 2.4)**

### **2.2.4 Fluido de perforación.**

Los fluidos ó lodos de perforación son definidos como una mezcla de cualquier arcilla, la cual queda suspendida en el agua por un determinado tiempo y a medida que ha avanzado la eficiencia en la perforación, se han mejorado éstos, introduciéndoles aditivos capaces de impartirles propiedades específicas y pasaron de ser un fluido simple a una mezcla complicada de líquidos, sólidos y sustancias químicas.

Según la definición API un lodo de perforación se define como un fluido circulante, utilizado en la perforación rotatoria, para ejecutar alguna o todas las funciones requeridas.

Dentro de las funciones que tiene el fluido de perforación se encuentran las siguientes:

- ◆ Enfría y lubrica la barrena y sarta de perforación
- ◆ Remueve los recortes del fondo del pozo
- ◆ Transporta a la superficie los recortes del fondo del pozo
- ◆ Minimiza el daño a la formación
- ◆ Controla las presiones de formación
- ◆ Mantiene la estabilidad del pozo
- ◆ Permite las operaciones de toma de registros
- ◆ Minimiza la corrosión de las sargas de tuberías
- ◆ Minimiza los problemas de contaminación e impacto ambiental
- ◆ Reduce la torsión, fricción y tendencias de pegaduras de las tuberías
- ◆ Incrementa la velocidad de perforación

El empleo adecuado del lodo de perforación lleva consigo a comprender las principales características físicas de los fluidos, las cuales se utilizan en cualquier análisis de un lodo de perforación.

**DENSIDAD:** el efecto que presenta la densidad del fluido de perforación sobre la velocidad de penetración se demuestra en función de la presión hidrostática Fig.2.15.

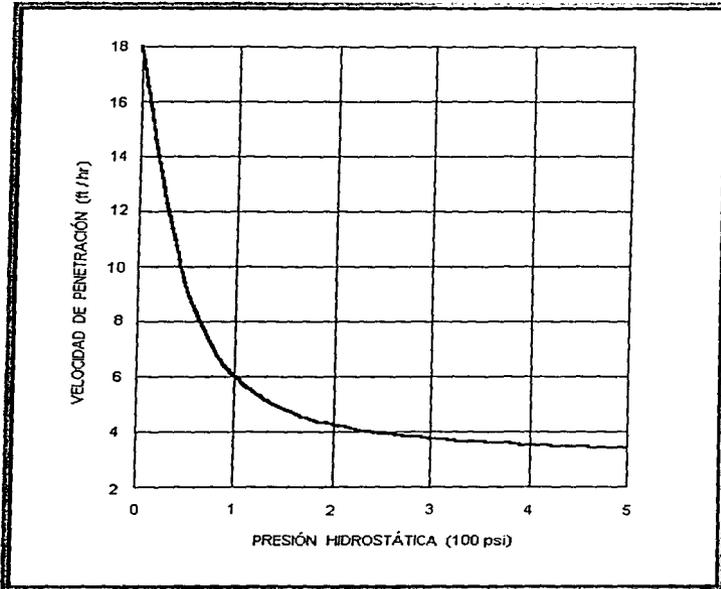
La presión hidrostática junto con la presión de poro de la formación, originarán la presencia de una presión diferencial que actúa sobre el fondo del pozo, y ésta se convertirá en una presión diferencial positiva en sentido de la gravedad y su valor dependerá del peso específico de la columna del fluido. Se puede apreciar esta definición con el siguiente rango de valores:

$$\text{Presión diferencial} = \text{presión hidrostática} - \text{presión de formación}$$

Presión diferencial > 0 si  $P_h > P_f$

Presión diferencial < 0 si  $P_h < P_f$

Presión diferencial = 0 si  $P_h = P_f$



**Fig. 2.15. Efecto de la densidad sobre la velocidad de perforación**

La presencia de la presión diferencial es una fuerza neta que se ejerce sobre los recortes generados por la barrena, tratando de mantenerlos en el fondo del pozo, ocasionando el retardo de la remoción de los recortes y por lo tanto los dientes de la barrena remuelen los recortes ya generados sin penetrar la roca, lo que produce una reducción en la velocidad de penetración; a este fenómeno se le conoce como "hold down" (Contra-presión). Por definición la densidad se escribe como:

$$\rho = \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{m}{V}$$

Unidades:

$$\left[ \frac{g_m}{cm^3} \right] \quad \left[ \frac{kg_m}{m^3} \right] \quad \left[ \frac{lb_m}{ft^3} \right] \quad \left[ \frac{slug}{ft^3} \right] \quad \left[ \frac{lb}{gal} \right]$$

En la tabla 2.5 se muestran los valores empleados para realizar los gráficos siguientes a través del modelo IMPACTO.

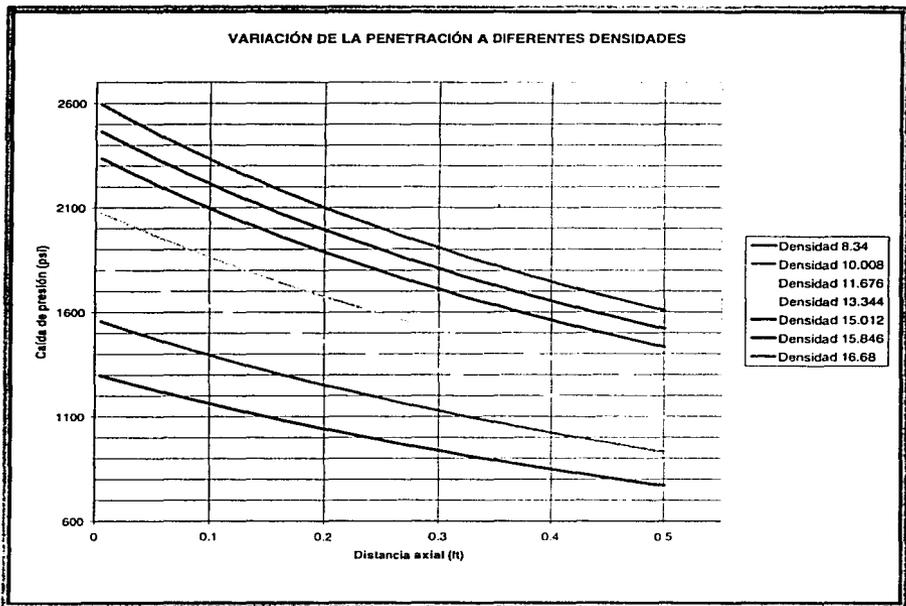
**Tabla 2.5. Datos utilizados en el programa IMPACTO, teniendo como variable la densidad del lodo de perforación**

Datos	Valores
Presión de Bombeo (kg/cm <sup>2</sup> )	2285
Densidad de la formación (lb/gal)	21.7
Diámetro de toberas 3(1/32 in)	10
Densidad del lodo (lb/gal)	8.34, 10.008, 11.676, 13.344, 15.012, 15.846, 16.68
Gasto (gpm)	300

Las densidades corresponden a 1, 1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 1.9, y 2 gr/cm<sup>3</sup> respectivamente. Para el primer gráfico de éste punto de estudio, se observa que existe una separación equitativa entre una y otra densidad para la caída de presión, por lo que se puede decir que existe un mejor control sobre las caídas de presión en comparación con la variación del diámetro de toberas. Curiosamente se puede notar que para la densidad de 10.008 lb/gal, obtenemos el mismo resultado cuando se perfora cualquier tipo de litología (ver figura 2.11), por lo que el valor de 8.34 lb/gal (1gr/cm<sup>3</sup>) de densidad de lodo es inadecuado para la optimización de la hidráulica ya en esta densidad, por ser ligera, la pérdida de presión se incrementa, teniendo como consecuencia una pérdida de fuerza de impacto que se puede observar en el gráfico de la figura 2.17.

También se puede observar al comparar las figuras 2.7, 2.11 y 2.16, que existe una menor pérdida de presión en comparación con el diámetro de toberas y densidad de la roca, por lo que tener un buen control sobre el lodo de perforación

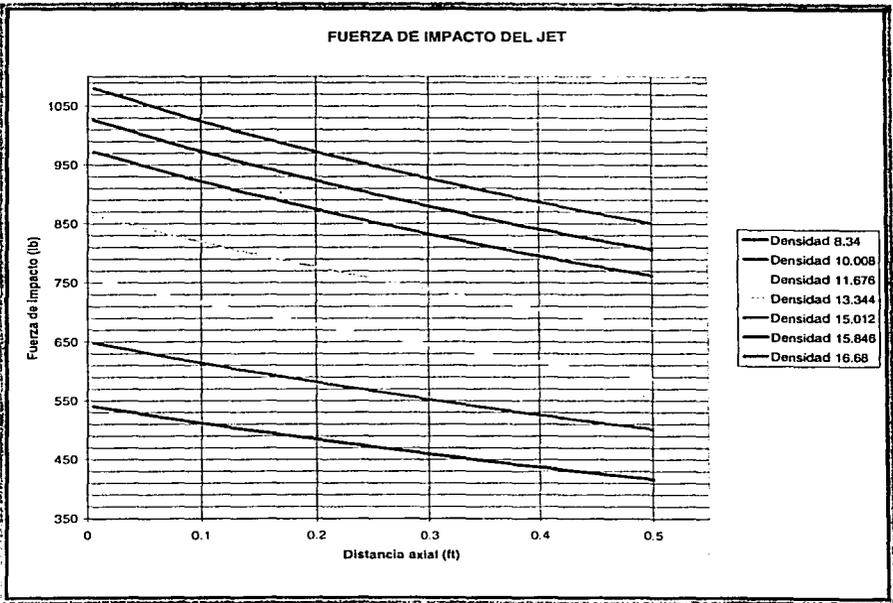
ayuda a evitar pérdidas de presión mayores. Como estudio final sobre las caídas de presión se puede ver que es la segunda mejor opción en lo que se refiere a evitar pérdidas de presión, mejorado solo por el incremento del gasto. Cuando se llegan a evaluar como en este caso, cuatro comparaciones de caídas de presión (figs. 2.3, 2.7, 2.11 y 2.16), es el momento en que se puede decidir cual es la más adecuada para cada una de los casos, ya que un solo estudio, como se ha visto al principio, no define ningún criterio de optimización, teniéndose el mismo caso para la fuerza y área de impacto y velocidad en toberas.



**Fig. 2.16. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra caída de presión del jet (ver Tabla 2.5)**

La fuerza de impacto también se observa beneficiada como se puede notar en la figura 2.17, ya que con el aumento de la densidad del lodo se logra una mejor fuerza de impacto del jet sobre la formación, aunque el hold down también será

mayor, logrando así una mejor remoción de los recortes generados por la acción de la barrena. De igual forma que en el anterior punto, la densidad más pequeña no ayuda que es en este caso a la fuerza de impacto; y aún manejando estas mismas densidades si se aplica un gasto mayor, se puede mejorar la fuerza de impacto, pero los mejores resultados en lo que se refiere a fuerza de impacto los tomarían aquellos fluidos que contienen la densidad más alta, de acuerdo a los gráficos obtenidos hasta el momento.

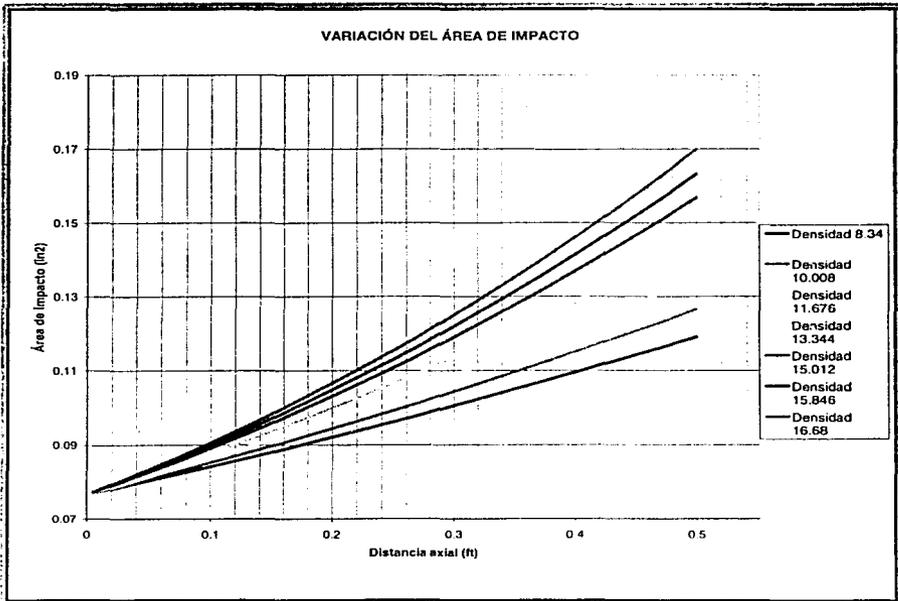


**Fig. 2.17. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra fuerza de impacto del jet (ver Tabla 2.5)**

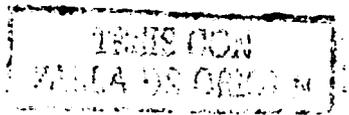
El área de impacto de igual forma se nota beneficiada, como se muestra en la figura 2.18, ya que a medida que el jet avanza, se logra una mejor cobertura del área en exposición, y mejor aún, comparando con la variación de litologías se puede notar que existe una mejor expansión del jet conforme a su avance.

En este caso se puede ver que obtenemos la mejor área de impacto, pese a que lo supera la variación del diámetro de la tobera por la razón de que pierde mucho valor en lo que se refiere a pérdidas de presión y fuerza de impacto. Y además aunque aumentemos el gasto empleado, tomando como ejemplo el estudio del punto que se refiere al gasto en la bomba, no obtendremos una mayor área de impacto a la ya obtenido por la variación de la densidad en el lodo de perforación.

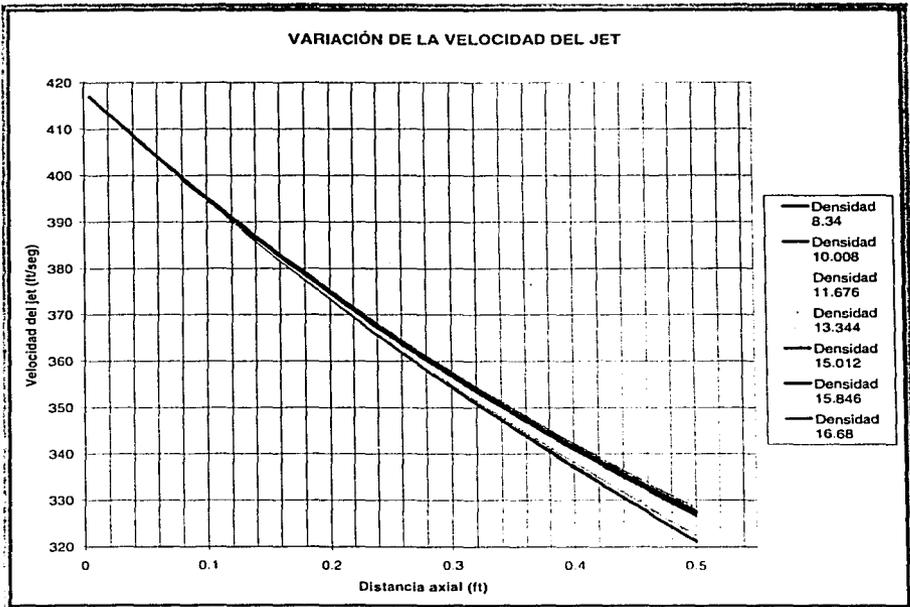
Con este punto se demuestra una vez más que un solo parámetro de estudio no es suficiente, además de que los datos reales y de los aquí empleados pueden tomar una serie de combinaciones infinita de la cual sería imposible determinar un orden o mecánica de respuesta específica para la optimización de la hidráulica en la barrena, además de la hidráulica de la perforación.



**Fig. 2.18. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra área de impacto del jet (ver Tabla 2.5)**



Finalmente al observar la figura 2.19 se nota que la velocidad se mantiene en los rangos de la variación de diámetro de tobera y litología, pero como es más fácil y menos costoso el cambio de la densidad del lodo que en realizar un cambio de toberas o mayor difícil aun, tratar de alterar la densidad de la litología presente, se puede optar como mejor parámetro el cambio de densidad del lodo para mejorar la velocidad del jet. Tomando de igual forma como correlación al ejemplo utilizado en el punto de gasto de bombas, se podría mejorar aún la velocidad, pero observando que la variación entre las diferentes densidades del lodo es pequeña y casi despreciable, basta con aumentar el gasto, sin tomar en cuenta la densidad del lodo, para el aumento de la velocidad del jet. Claro que este análisis puede diferir dependiendo de los objetivos que se necesiten cubrir y de las condiciones las que se tenga que adaptar.



**Fig. 2.19. Distancia axial de la tobera al fondo del pozo del jet contra velocidad del jet (ver Tabla 2.5)**

Finalmente el mejor arreglo de valores, dependiendo de las características del equipo y del pozo, para los cuatro parámetros analizados es la optimización que se estará buscando, la cual reflejará a su vez un mejor ritmo de penetración, por lo que se puede decir que cada uno de los parámetros optimizados estarán en función de ésta, es decir:

$$\text{Potencia hidráulica} \quad ROP = f(BHHP) = f(QV_n^2)$$

$$\text{Fuerza de impacto} \quad ROP = f(I_f) = f(QV_n)$$

$$\text{Velocidad en toberas} \quad ROP = f(V_n)$$

## 2.2.5 Establecimiento de ventana operativa

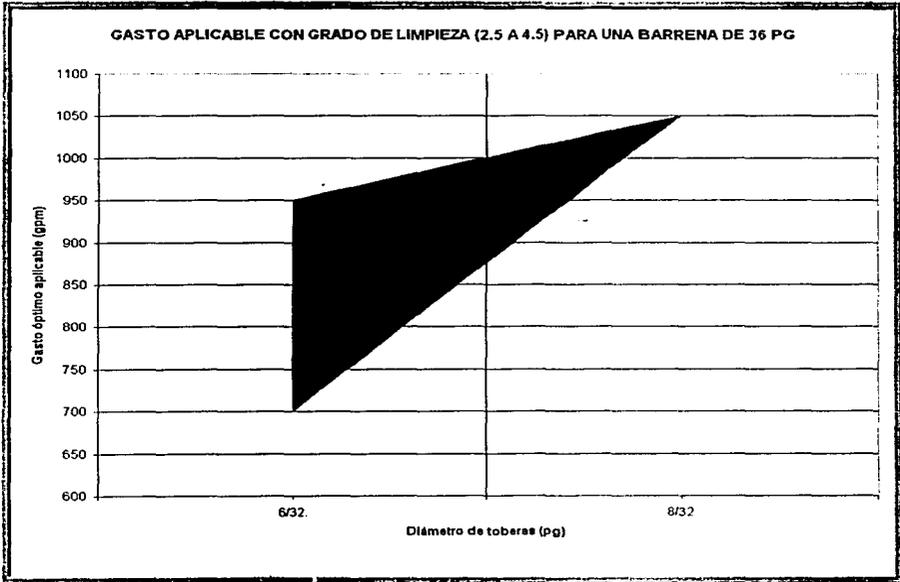
Como resultado final de este análisis se crea una ventana operativa, la cual nos mostrará las ventajas de forma condensada (gráficas) de utilizar el modelo propuesto, tal y como gasto y diámetro de toberas óptimo a utilizar para la etapa a perforar.

De acuerdo a los análisis realizados para el gasto de la bomba, diámetro de las toberas, litología y densidad del lodo y con la ayuda del programa IMPACTO se obtiene finalmente, una serie de gráficos que muestran los arreglos que se pueden obtener para las principales etapas de perforación, teniendo como parámetro de ajuste al rango de valores de 2.5 a 4.5, el cual es el grado de limpieza, que se encuentra referido en el punto 1.2.4. Los arreglos que se obtienen son la gama de valores de diámetros de tobera que se pueden combinar con una gama de gastos los cuales pueden ser entendidos más fácilmente apreciando las figuras siguientes.

Realizando un estudio de los diámetros de barrena más utilizados para cinco pozos reales se obtiene que 5 son los principales diámetros y más comunes. En la figura 2.20 se hace el análisis para una barrena de 36 pg.

Al observar en la figura 2.20, se puede notar que para este diámetro existe la restricción de utilizar solo dos diámetros de toberas en las que se tiene una

limpieza óptima de acuerdo al grado utilizado en el programa IMPACTO. Además de utilizar solo dos diámetros, también el rango de gastos aplicables es pequeño, ya que este cubre los valores de 700 a 950 gpm, para el diámetro de tobera de 6/32 y para la tobera de 8/32 el gasto óptimo aplicable será solo de 1050 gpm.

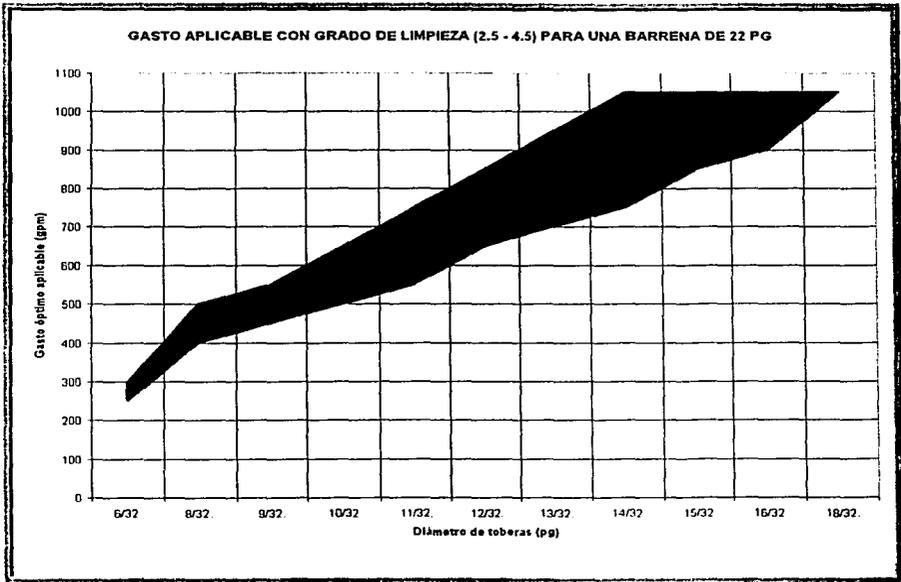


**Fig. 2.20. Gastos y diámetros óptimos aplicables a una barrena de 36 pg.**

De acuerdo al análisis realizado en los pozos reales el uso de toberas para este diámetro de barrena es limitado principalmente por la disponibilidad del diámetro de las toberas para esta barrena y además por el siguiente factor de caballaje específico, el cual será explicado de mejor forma con el uso de la siguiente figura.

Para el caso de la figura 2.21, se puede observar que existe una mayor variedad de aplicación tanto de diámetros de tobera, como gastos, ya que el área que se cubre para limpieza es menor. Esto se puede demostrar apoyándose en la ecuación 1.25 ya que entre menor sea el denominador (área del agujero y que es

proporcional al diámetro de la barrena), mayor será el caballaje específico, lo que significará una mejor limpieza y un mayor rango de cobertura del jet, lo que lleva finalmente a una mayor variedad de aplicación de diámetros de tobera.



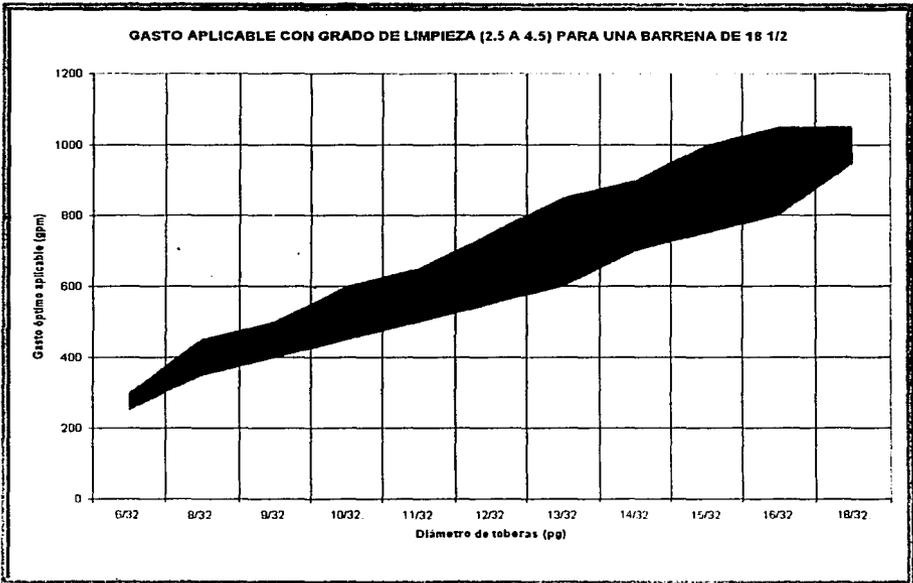
**Fig. 2.21. Gastos y diámetros óptimos aplicables a una barrena de 22 pg.**

La variedad de diámetros de tobera aplicables a la barrena de 22 pg (Fig.2.21) cubren el rango desde los 6/32 pg hasta 18/32 pg; combinado con un rango de valores de gasto desde 250 gpm hasta los 1050 gpm.

Para comprender mejor esta aplicación, tomando este diámetro de barrena y suponiendo que contenga toberas de 12/32, el gasto óptimo aplicable será desde 650 gpm hasta 850 gpm. Y todavía aún con el fin de asegurar una mejor aplicación del gasto óptimo, se recomienda tomarlos valores que se encuentran en el centro de la selección del gasto, que para este ejemplo será el valor de 750 gpm, que de igual forma será el promedio de los valores extremos del gasto. Esto

debido a que va a existir un valor de gasto que cubrirá la mayor parte axial, que para este ejemplo es de 750 gpm; esto no quiere decir que el resto de los valores dentro de los óptimos no se puedan utilizar.

De forma contraria, si contamos con la misma barrena y queremos determinar el diámetro óptimo de toberas, bastará con leer el gasto disponible en las toberas y de ahí tomar el valor correspondiente al diámetro que se encuentre dentro del área sombreada. Para este caso tomando como referencia el ejemplo anterior, si el valor disponible en toberas es de 800 gpm, los correspondientes diámetros óptimos de toberas serán los de 12/32, 13/32 y 14/32 pg.

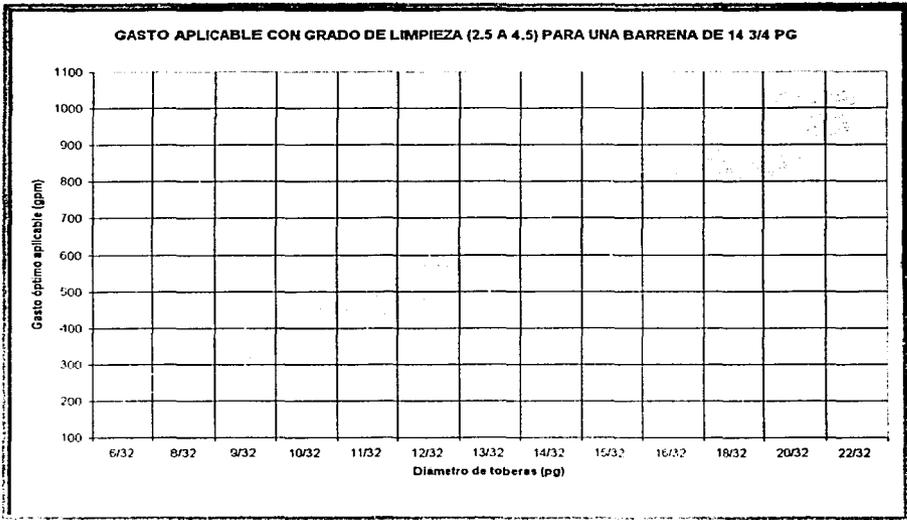


**Fig. 2.22. Gastos y diámetros óptimos aplicables a una barrena de 18 1/2 pg.**

Al observar la figura 2.22 se tiene que los valores óptimos aplicables de gasto a los diámetros de tobera para la barrena de 18 1/2 se encuentran más reducidos en

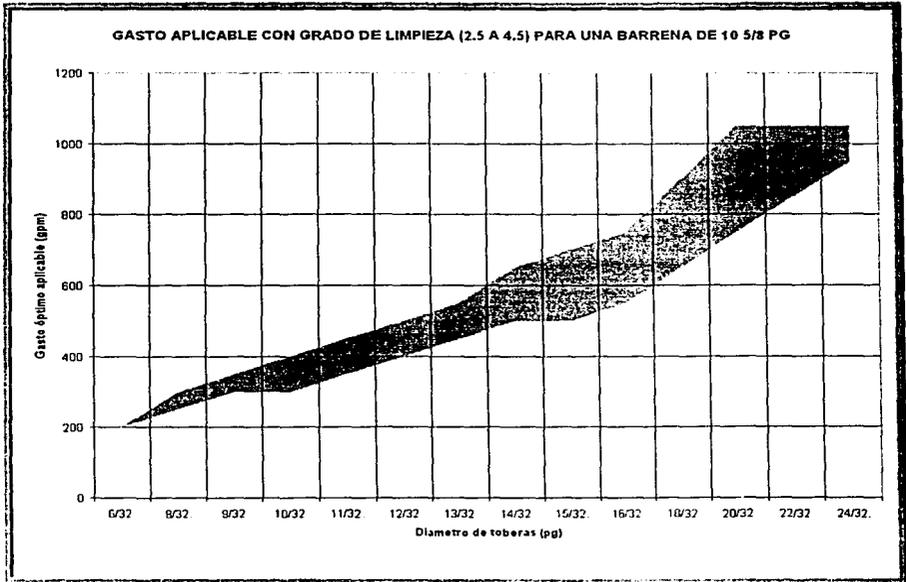
comparación con la barrena de 22 pg, pero que de igual forma se le puede aplicar al mismo rango valores de diámetro de toberas.

Cuando se observa el gasto aplicable a toberas para una barrena de 14 3/4 pg (Fig.2.23) se puede ver que se adicionan dos diámetros de tobera más a la gama de valores de diámetros a diferencia con la barrena de 18 1/2 pg. Y además también se ve disminuido el rango de gastos óptimos aplicables para cada tobera. Otro punto notorio, en comparación con la figura 2.21 es que las áreas sombreadas de valores se encuentran totalmente desfasadas una de otra, con poca diferencia de separación, pero que son de utilidad en el caso de que se cuente con poca disponibilidad de diámetros de tobera, siendo suficiente así contar con estos dos diámetros de toberas para cubrir un amplio rango de valores de gastos óptimos. Aunque esta forma de arreglo sea óptima y práctica, no siempre se contará con el equipo y material necesario para su aplicación por lo que se vuelve a la realidad, donde el pozo es quién tiene la última palabra.



**Fig. 2.23 Gastos y diámetros óptimos aplicables a una barrena de 14 3/4 pg.**

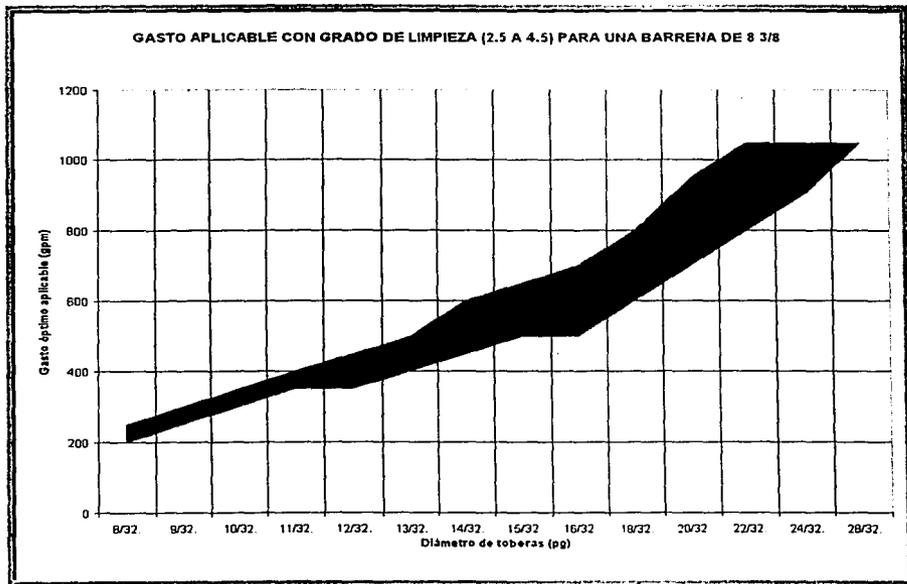
La barrena de 10 5/8 (Fig.2.24) muestra un poca aplicación de gastos óptimos para las toberas de 6/32 a 13/32 pero que de ninguna forma son despreciables, ya que cuentan con los requisitos de limpieza y de distancia axial cubierta por el jet. También se observa que se adiciona más un diámetro de tobera, pero los beneficios de utilizar esta última tobera (24/32) se encuentran perfectamente cubiertos por la tobera anterior (22/32), dándose una alternativa al uso de este diámetro, en caso de no contarse con este.



**Fig. 2.24 Gastos y diámetros óptimos aplicables a una barrena de 10 5/8 pg.**

Así como se puede tomar esta alternativa, de sustitución de diámetro de tobera, de igual forma se le puede aplicar a todos los diámetros y gastos, cuando las condiciones del pozo y de equipo así lo requieran ó se tenga que hacer la adaptación para cumplir con los objetivos establecidos.

El diámetro barrena pequeño de 8 3/8 (Fig.2.25) utilizado más comúnmente de acuerdo al análisis estadístico mostrado en el CAPÍTULO 3 tiene poca aplicabilidad de diámetro de toberas, ya que el rango de gastos óptimos aplicables es pequeño como por ejemplo de 100 gpm para los diámetros de 8/32 a 11/32.

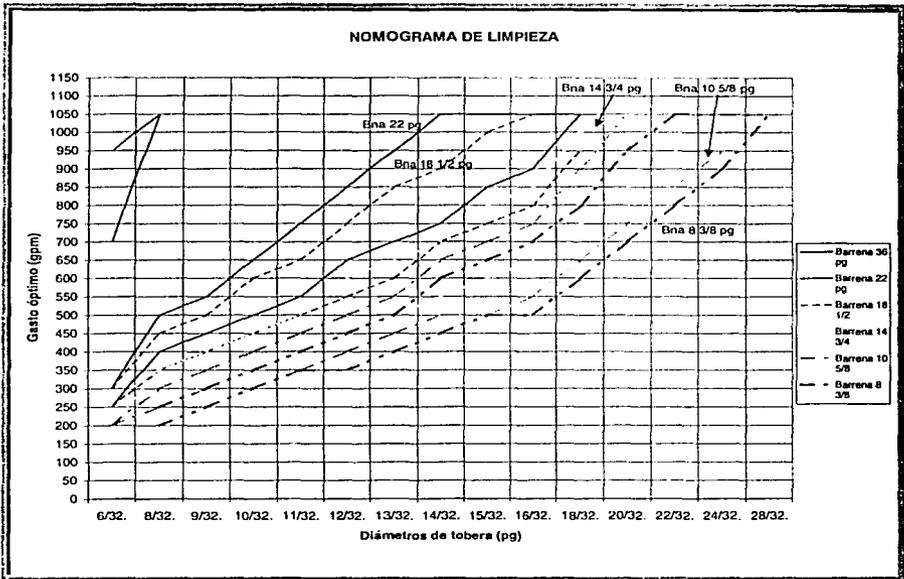


**Fig. 2.25 Gastos y diámetros óptimos aplicables a una barrena de 8 3/8 pg.**

Finalmente y como conclusión general de este punto en un nomograma se presentan los seis principales diámetros de barrena más utilizados (Fig.2.26) en pozos reales y que puede tener una buena aplicación en campo para decidir o saber si la aplicación de gasto es óptima ó el diámetro de toberas es el adecuado de acuerdo al gasto aplicado.

Ya de forma condensada se puede observar que el único diámetro de barrena que se encuentra fuera y alejado del resto de los demás, es el diámetro de 36 pg y los

gastos aplicables son altos en inicio en comparación con el resto de las barrenas y toberas.



**Fig. 2.26** Nomograma para gastos y diámetros óptimos aplicables a barrenas.

Todos los diámetros de toberas llegan al máximo gasto aplicable, delimitado por el programa IMPACTO, y que se puede modificar para probar mayores gastos. Y aún así todos y cada uno tienen su aplicación con diámetros de tobera y gastos específicos.

También se observa que los diámetros de barrena sirven de enlace unas de otras, por lo que cada una de ellas será óptima y hasta en ciertos casos única, para la adecuada optimización de gastos y diámetros de toberas.

## CAPÍTULO 3

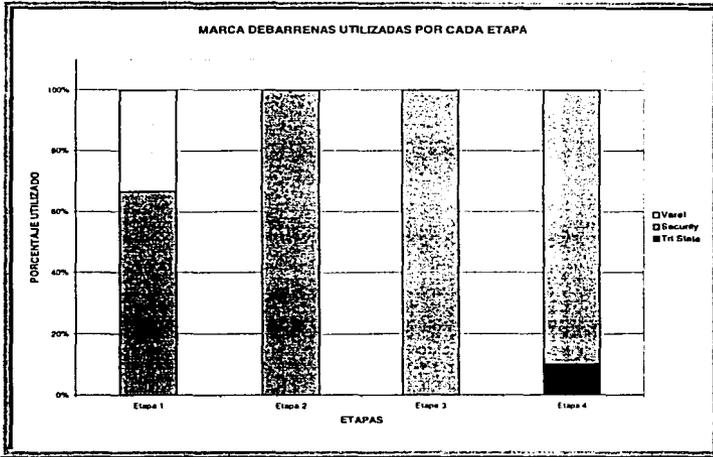
### *APLICACIÓN EN CAMPO DEL MODELO IMPACTO*

El desarrollo tanto del modelo como del programa no es efectivo si no se tiene un uso o aplicación en la realidad, por lo que además de correr el programa que contiene el modelo IMPACTO, con valores teóricos, se ha aplicado a una serie de pozos reales de la zona marina y que de acuerdo a los resultados obtenidos se llega a una serie de resultados que dan confiabilidad a los resultados obtenidos por el modelo IMPACTO.

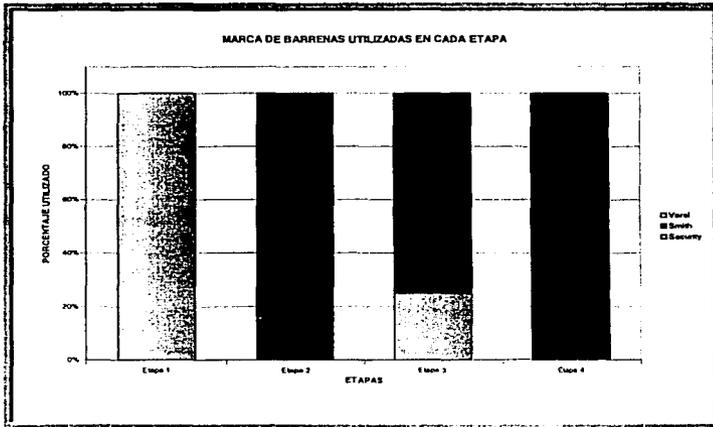
Primeramente se realiza un análisis estadístico del tipo y marca de barrenas utilizadas en la región marina, donde se obtiene que los tipos de barrenas más utilizados en los cinco pozos tomados como ejemplo de la región marina son tricónicas en un 95%, ayudando esto al modelo ya que solo se puede aplicar a este tipo de barrenas. Partiendo de este punto se realizan dos estudios más para que al final se realice un análisis de aplicación del modelo a estos pozos.

#### **3.1 ESTADÍSTICAS DE BARRENAS POR ETAPA.**

Una vez visto el tipo de barrenas más utilizadas, se realiza un análisis estadístico de barrenas utilizadas en cada etapa, donde cabe señalar que cada etapa corresponde a un diámetro de barrena en específico y además la cantidad de veces utilizado, depende de cada pozo debido a las condiciones que presenten cada uno de acuerdo a las condiciones de equipo y de campo. A continuación se muestra un análisis sobre las marcas de barrena utilizadas en cada etapa, esto referido al porcentaje en que se utilizó cada una y en que etapa.



**Fig. 3.1. Marca de barrenas utilizadas dentro de cada etapa (Pozo F.I. 1)**

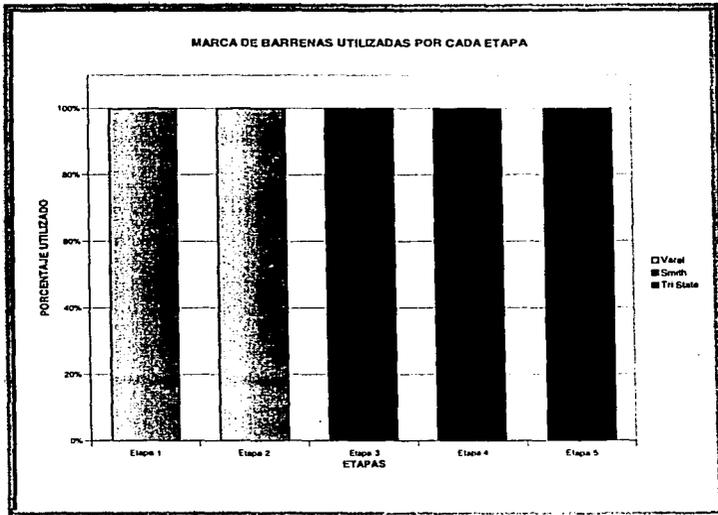


**Fig. 3.2. Marca de barrenas utilizadas dentro de cada etapa (Pozo F.I. 2)**

La figura 3.1 nos muestra que la barrena más utilizada fue la Security, cubriendo por completo dos etapas y la gran mayoría de las otras dos por lo que esta barrena será analizada principalmente para las etapas que cubre mayor rango dentro de este pozo.

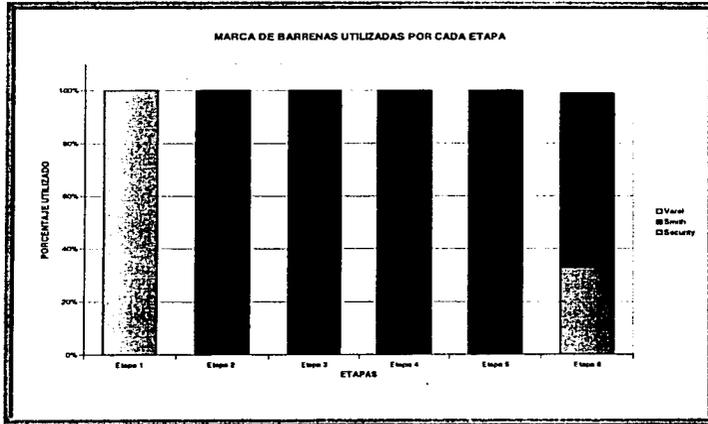
La figura 3.2 muestra que la barrena Smith en la segunda y cuarta etapa fue utilizada al 100% por lo que de igual forma se realizará un análisis para estas etapas de este pozo.

La figura 3.3 muestra que se utilizaron dos barrenas principalmente para llenar por completo dos etapas cada una, por lo que se realizará de igual forma un análisis para estas dos barrenas en cuestión de condiciones de uso.

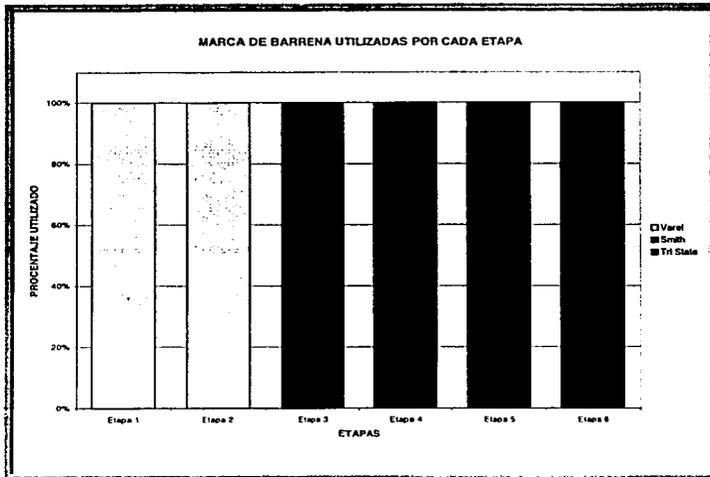


**Fig. 3.3. Marca de barrenas utilizadas dentro de cada etapa (Pozo F.I. 3)**

La figura 3.4 es la que muestra que en este pozo (F.I.4) se llevaron a cabo más etapas donde hubo una que fue la más utilizada cubriendo cuatro etapas.



**Fig. 3.4. Marca de barrenas utilizadas dentro de cada etapa (Pozo F.I. 4)**



**Fig. 3.5. Marca de barrenas utilizadas dentro de cada etapa (Pozo F.I. 5)**

De acuerdo a los análisis realizados para cada pozo se encontró que las etapas intermedias son las que utilizan un mayor número de barrenas, ya que es la etapa que tiene mayor longitud del pozo.

La figura 3.5 muestra la estadística del pozo F.I.5 revelando que también son dos las barrenas más utilizadas, una para dos etapas y otra para tres etapas.

### 3.2 ESTADÍSTICA DE TIPO DE BARRENA POR LONGITUD PERFORADA.

En las siguientes cinco figuras se muestran de acuerdo a los metros perforados las etapas que se manejaron para perforar el pozo en su totalidad que de igual forma que en el punto anterior serán necesarias para realizar el análisis final sobre cual de ellas se operó en forma óptima de acuerdo a las condiciones de operación que se manejaron y que se muestran más adelante.

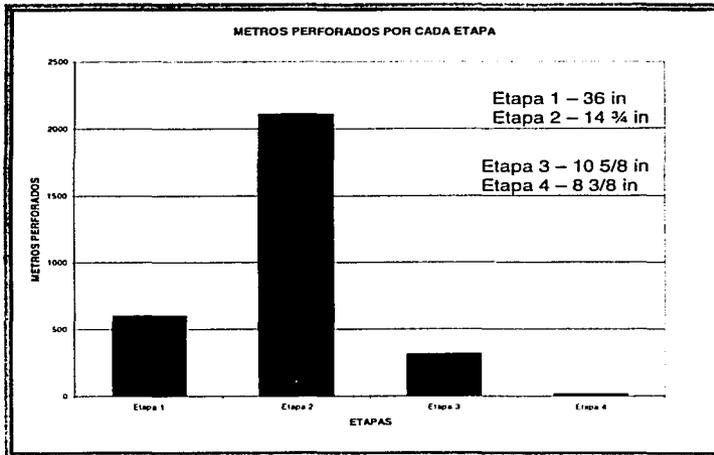
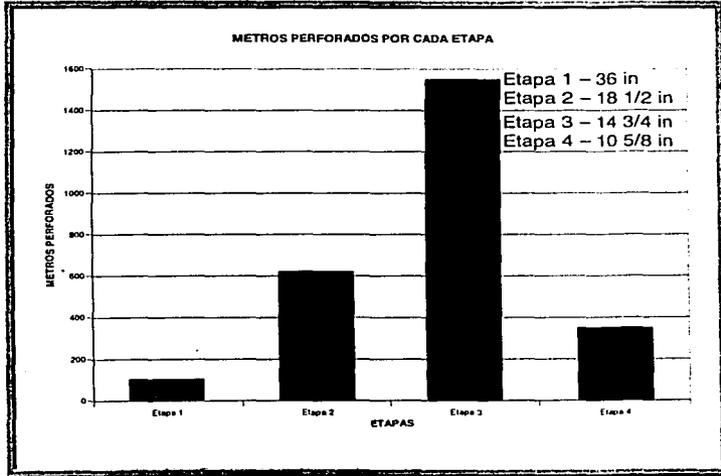


Fig. 3.6. Metros perforados por cada etapa (Pozo F.I. 1)

La gráfica 3.6, nos muestra que el diámetro de barrena de 14 ¾ pg fue el más utilizado durante toda la etapa de perforación por lo que el análisis se enfocará a la aplicación del modelo IMPACTO para la etapa de este pozo con sus condiciones respectivas durante las veces que se utilizó dicha barrena.



**Fig. 3.7. Metros perforados por cada etapa (Pozo F.I. 2)**

La figura 3.7, nos muestra que el diámetro de barrena más utilizado es también de 14 ¾ pg aunque dentro de este pozo se utilizaron diferentes diámetros de barrena en comparación con el pozo anterior y las etapas son diferentes para cada barrena, pero el diámetro más utilizado es el mismo. Lo importante en este caso es el diámetro para tener un parámetro en común en el análisis final.

La figura 3.8 muestra de igual forma el uso de la barrena de 14 ¾ en mayor proporción y esta corresponde a la tercera etapa. Tanto es su uso que prácticamente es la suma del resto de las etapas restantes; de ahí lo importante de considerar las condiciones que se aplicaron para determinar si existió una hidráulica óptima en la barrena.

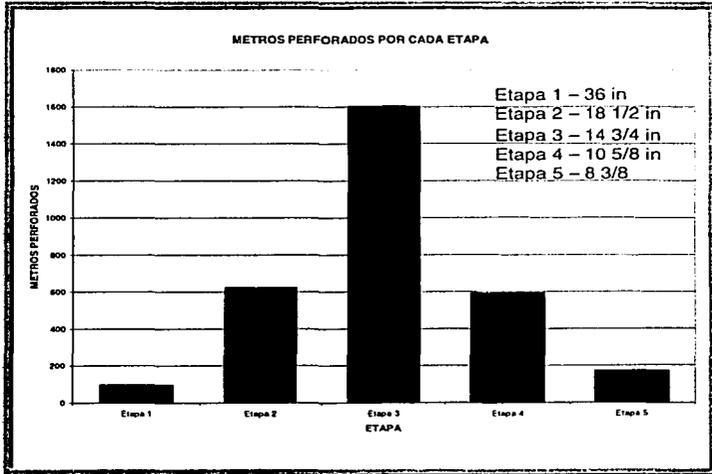


Fig. 3.8. Metros perforados por cada etapa (Pozo F.I. 3)

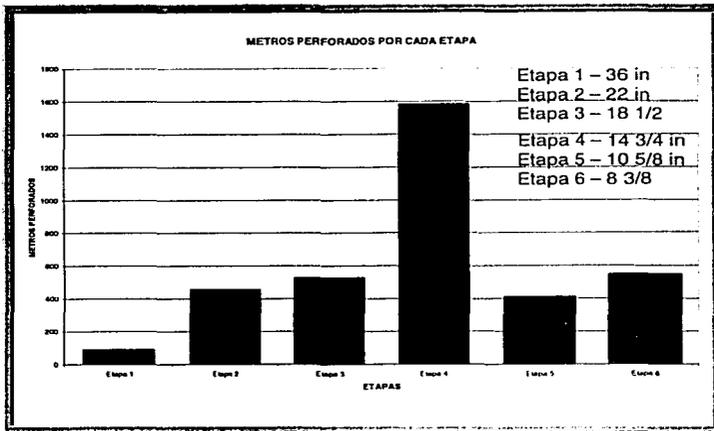
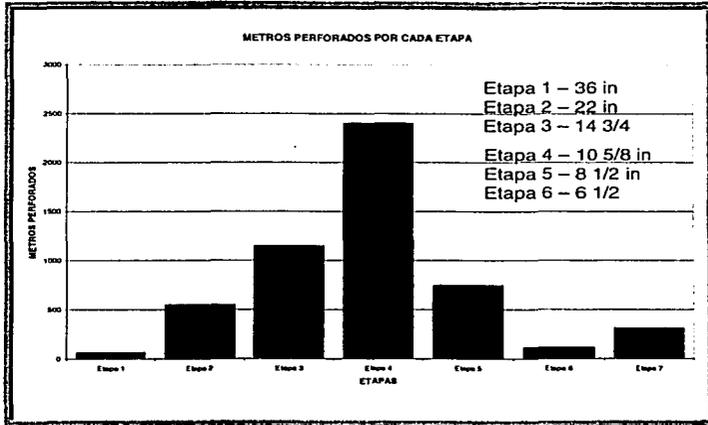


Fig. 3.9. Metros perforados por cada etapa (Pozo F.I. 4)

La figura 3.9 para el pozo F.I.4 muestra la participación de más etapas siendo no obstante, de igual forma la barrena de 14 ¾ pg fue la que tuvo mayor aplicación durante la etapa perforación.



**Fig. 3.10. Metros perforados por cada etapa (Pozo F.I. 5)**

La figura 3.10 muestra que en el pozo F.I.5 se llevaron a cabo más etapas de perforación donde en este caso el diámetro más utilizado fue el de 10 5/8 pg. Dentro de todos y cada uno de los análisis existen etapas que no son importantes ya que estas, además de tener poco uso o avance de metros perforados, se utilizaron como molinos, teniendo como consecuencia que no entre dentro del análisis; además también existen etapas donde no se cuentan con datos de perforación, ya sea gasto de perforación, metros perforados ó tipo de litología perforada para esas barrenas en específico.

Una vez realizado y visto las principales etapas que se aplican para cada pozo, vinculado con sus respectivos diámetros de barrena, se proceden a evaluar las condiciones aplicadas en los pozos reales, si fueron las óptimas y de no ser así, mostrar cual hubiese sido el arreglo para esa etapa de cada pozo en específico.

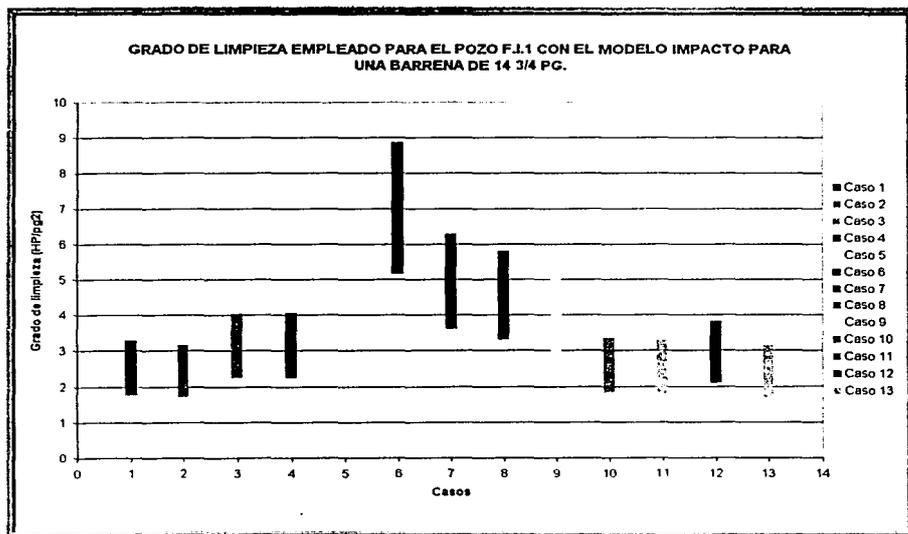
### 3.3 APLICACIÓN DEL MODELO PARA MEDIR EL DESEMPEÑO DE LOS DIFERENTES TIPOS DE BARRENA.

Para realizar la aplicación del modelo IMPACTO, además de tener la estadística de las barrenas empleadas y en orden de frecuencia, nos auxiliamos de la siguiente tabla, para el análisis de la barrena de 14 ¾ pg del pozo F.I.1.

**Tabla 3.1. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 14 ¾ pg en el pozo F.I.1.**

	Gasto (gpm)	Densidad de la formación (lb/gal)	Densidad del lodo (lb/gal)	Diámetro de toberas (1/32pg)
Caso 1	600	23.352	12.51	15
Caso 2	591	23.352	12.5934	15
Caso 3	645	23.352	12.51	15
Caso 4	646	23.352	12.51	15
Caso 5	626	23.352	12.51	22
Caso 6	626	22	12.51	12
Caso 7	557	22	12.51	12
Caso 8	542	22	12.51	12
Caso 9	525	22	12.51	12
Caso 10	449	22	12.51	12
Caso 11	446	22	12.51	12
Caso 12	469	22	12.51	12
Caso 13	440	22	12.4266	12

Esta tabla nos ayuda en conjunto con la figura 3.11 para determinar que tan efectiva fue la aplicación de la hidráulica óptima en la barrena para el primer pozo en estudio y nos muestra que en la mayoría de los casos la hidráulica óptima en la barrena no estuvo bien aplicada, ya que para el caso 6 el gasto fue exagerado de acuerdo al límite de grado de limpieza que es de 4.5 HP/pg<sup>2</sup> al aplicado que es de 8.7 HP/pg<sup>2</sup> y para la mayoría de los casos debió aplicarse un gasto mayor, de tal forma que al avanzar el jet, este se mantuviera dentro del rango de limpieza.



**Fig. 3.11. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.1.**

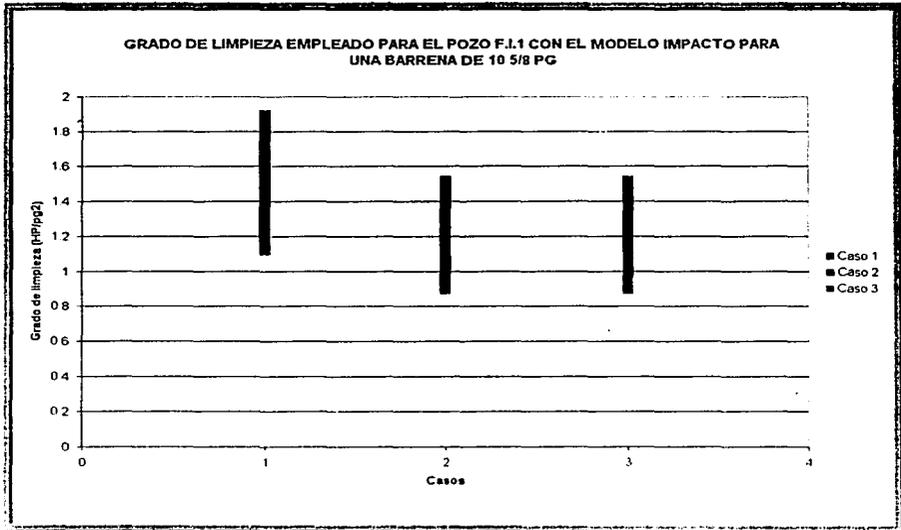
Cabe mencionar y señalar que los valores máximo y mínimo de cada caso de la figura, corresponden a la distancia axial recorrida por el jet medido desde que sale de la tobera que es de 0.005 ft hasta 0.5 ft (15 cm.).

Realizando el mismo análisis para el mismo pozo pero ahora para la siguiente etapa de importancia, que es la etapa de 10 5/8 pg, se inicia con la información mostrada en la tabla 3.2.

**Tabla 3.2. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 10 5/8 pg en el pozo F.I.1.**

	Gasto (gpm)	Densidad de la formación (lb/gal)	Densidad del lodo (lb/gal)	Diámetro de toberas (1/32pg)
Caso 1	440	22.6	7.506	14
Caso 2	410	22.6	7.4226	14
Caso 3	410	23.99	7.4226	14

Los resultados que se generan al aplicar el programa impacto se muestran en la figura 3.12, que aunque son pocos los casos, las condiciones de operación son diferentes y suficientes para cada uno (ver tabla 3.2), tales como gasto y densidad de formación, donde se puede apreciar que los valores aplicados no fueron los óptimos para obtener un mínimo de limpieza.



**Fig. 3.12. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.1.**

Basándose en el estudio del capítulo 2, figura 2.23 ó en el nomograma de la figura 2.26, se puede decir que el gasto aplicado en el pozo real fue bajo. Ya que de acuerdo a la figura 3.12 no se alcanzó el grado mínimo de limpieza, el cual en este trabajo se manejó con un valor mínimo de 2.5 HP/pg<sup>2</sup> y un valor máximo de 4.5 HP/pg<sup>2</sup>. La solución para resolver este problema de limpieza de acuerdo a la figura 2.26, bastaba con incrementar el gasto hasta 500 gpm con ese mismo diámetro de toberas (14/32 pg) ó como segunda opción al obtener el gasto promedio aplicado en los tres casos (420 gpm), bastaba con reducir el diámetro de toberas a 13/32 pg.

Estas dos etapas fueron las principales del pozo F.I.1 mostrando en ambos casos una hidráulica óptima no planeada, ya que en ambos se tuvo una falta de aplicación de gasto ó una disminución de diámetro de toberas de acuerdo a las indicaciones descritas anteriormente para cada caso.

El segundo análisis se aplica al pozo F.I.2 auxiliado con los datos mostrados en la tabla 3.3, los cuales son condiciones de operación para la barrena de 14 3/4 pg.

**Tabla 3.3. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 14 3/4 pg en el pozo F.I.2.**

	Gasto (gpm)	Densidad de la formación (lb/gal)	Densidad del lodo (lb/gal)	Diámetro de toberas (1/32pg)
Caso 1	675	23.352	11.676	20
Caso 2	720	23.352	11.676	20
Caso 3	585	23.352	11.676	20
Caso 4	630	23.352	11.676	20
Caso 5	600	23	11.676	24
Caso 6	603	23	11.676	24
Caso 7	604	23.352	11.676	24

Una vez agrupados y ordenados estos datos para el pozo F.1.2, al correr el programa IMPACTO se obtienen los siguientes resultados, mostrados en la figura 3.13, donde muestran que los valores aplicados no fueron los óptimos para obtener un mínimo de limpieza.

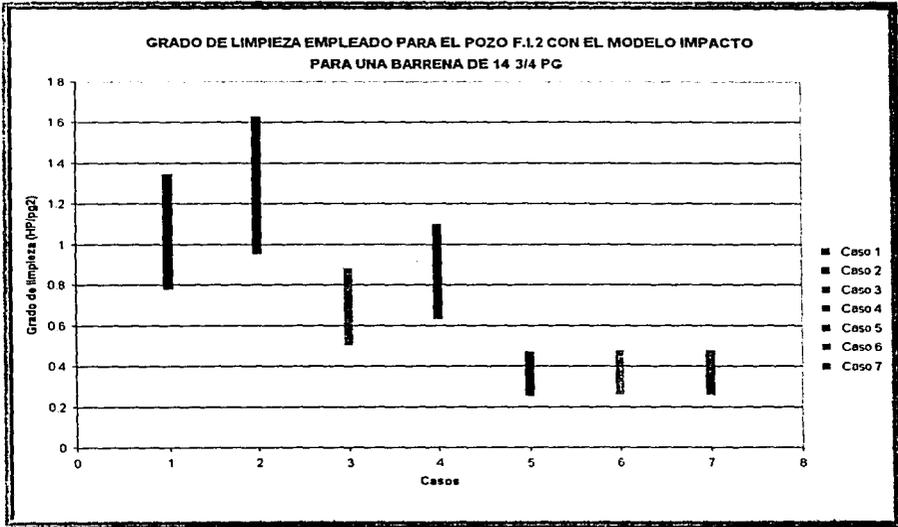


Fig. 3.13. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.1.2.

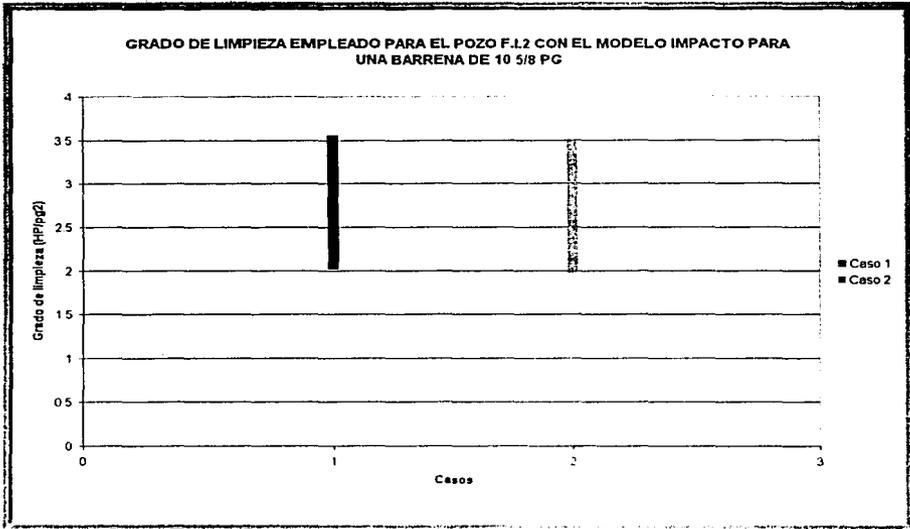
De acuerdo a los resultados de la figura 2.23, se indica que para los casos en que se utilizaron toberas de 20/32 pg, el gasto aplicado debió haber sido como mínimo de 850 gpm. Para el caso de las toberas de 24/32 pg, los valores de gasto no se calcularon debido a que esta tobera no cumple con el rango de limpieza utilizado, esto no quiere decir que haya sido incorrecto utilizar este diámetro, sino que tal vez las condiciones del pozo ó del equipo, así lo requerían. Retomando la figura 3.13 y con ayuda de la figura 2.23, se puede decir que los diámetros empleados de toberas para esta barrena fueron demasiado grandes, por lo que las caídas de presión también son grandes, ocasionando que la energía ó gasto disponible en las toberas sea bajo, teniendo como resultado una deficiente limpieza en el fondo

de la barrena. De forma contraria si el equipo solo puede proporcionar el valor de gasto promedio de acuerdo a la tabla 3.1 de 630 gpm, se podían haber empleado toberas de 13/32, 14/32 ó 15/32, para haber obtenido el grado de limpieza adecuado en la barrena. De igual forma para este mismo pozo pero para la etapa de 10 5/8 pg, se tiene la siguiente tabla:

**Tabla 3.4. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 10 5/8 pg en el pozo F.1.2.**

	Gasto (gpm)	Densidad de la formación (lb/gal)	Densidad del lodo (lb/gal)	Diámetro de toberas (1/32pg)
Caso 1	540	22.6	7.506	14
Caso 2	540	22.6	7.3392	14

Donde se obtiene como resultado la gráfica siguiente:



**Fig. 3.14. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.1.2.**

Para este caso la grafica nos muestra que ambos casos son similares, debido a que las condiciones de gasto, densidad de la formación y diámetro de toberas son las mismas, existiendo solo una pequeña diferencia en las densidades del lodo que no afectan en gran medida. La aplicación del gasto así como la selección del diámetro de toberas es correcta ya que se encuentra dentro del rango de los valores óptimos aplicables para gasto y diámetro de toberas de acuerdo a la figura 2.24.

El siguiente pozo a analizar es el F.I.3 donde se muestran las condiciones empleadas en la tabla 3.3, para una barrena de 18 ½ pg, en la cual se aprecian diferencias notables entre una condición y otra en cuestión de gastos.

**Tabla 3.5. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 18 1/2 pg en el pozo F.I.3.**

	Gasto (gpm)	Densidad de la formación (lb/gal)	Densidad del lodo (lb/gal)	Diámetro de toberas (1/32pg)
Caso 1	992	23.352	8.5902	18
Caso 2	1092	23.352	9.0072	18
Caso 3	1045	23.352	9.591	18

Como resultado de ejecutar el programa IMPACTO con estas condiciones se obtienen los resultados mostrados en la figura 3.15 y al compararlos con la figura 2.22, se puede notar que los gastos aplicados fueron los adecuados, aplicando como mínimo 950 gpm, lo que lleva a una limpieza efectiva del fondo del agujero ayudando a mejorar la velocidad de penetración. La condición de perforar lutita dolomítica (ver tabla 2.3) nos ayuda a comprender y comparar en igualdad de circunstancias y en condiciones reales, además del diámetro de las toberas, la forma en cómo varían los resultados al aplicar diferentes gastos a esta barrena, obteniéndose una diferencia notoria, de acuerdo a la figura 3.15 entre un caso y otro.

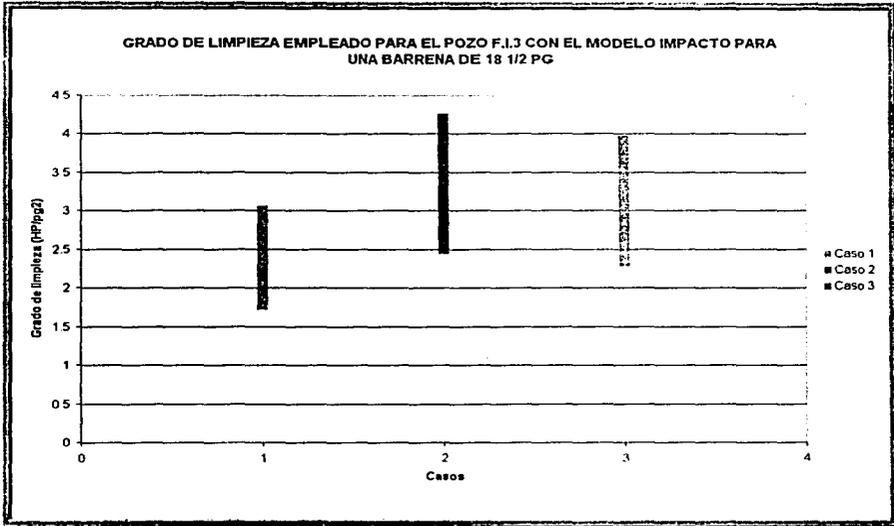


Fig. 3.15. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.3.

Los análisis y respuestas a mejoras con respecto a las condiciones aplicadas, se han basado a partir del desarrollo en el capítulo 2; con los gráficos respectivos para cada diámetro de barrena, toberas y gastos aplicables. La figura 2.26 nos ayuda también de que forma y como pueden influir los diámetros de barrena en la siguiente etapa. Es decir al terminar una etapa, cualesquiera, con ese nomograma se pueden determinar las condiciones de gasto y diámetro de toberas para la siguiente etapa, con el fin de conseguir la hidráulica óptima en la barrena.

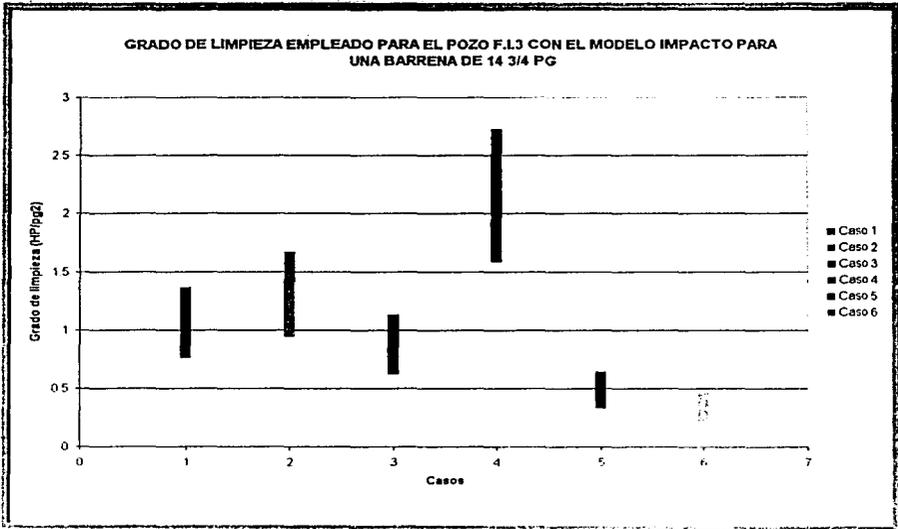
Continuando con el análisis, éste se efectúa ahora a la barrena de 14 ¾ pg para 6 casos que muestran diferencias entre sí (ver tabla 3.6), lo que ayudará para determinar ó conocer cual ó cuales casos deben aplicarse y cuales no, para este pozo con sus condiciones reales.

Los cuatro últimos casos muestran buenas combinaciones que reflejan las condiciones que se pueden presentar en una etapa mostradas en la figura 2.23.

**Tabla 3.6. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 14 3/4 pg en el pozo F.I.3.**

	Gasto (gpm)	Densidad de la formación (lb/gal)	Densidad del lodo (lb/gal)	Diámetro de toberas (1/32pg)
Caso 1	675	23.352	11.676	20
Caso 2	720	23.352	11.8428	20
Caso 3	630	23.352	11.8428	20
Caso 4	630	22.6	11.9262	16
Caso 5	585	22.6	11.9262	22
Caso 6	585	23.352	11.9262	24

Como resultado se obtiene la figura 3.16.



**Fig. 3.16. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.3.**

Los resultados en la figura 3.16 muestran que la aplicación del gasto fue baja, para la mayoría de los casos, ocasionando que la limpieza no sea efectiva. Se puede ver también que para los últimos dos casos a pesar de que tienen el mismo valor del gasto (ver tabla 3.6), los resultados obtenidos son diferentes uno de otro, debiéndose principalmente al diámetro de toberas. Como claro ejemplo, se tiene que al tomar los casos 2 y 4 existe una diferencia notoria entre los grados de limpieza, ya que a pesar de aplicar mayor gasto al caso 2, la mejor limpieza se presenta en el caso 4, esto debido a la diferencia de diámetros entre un caso y otro.

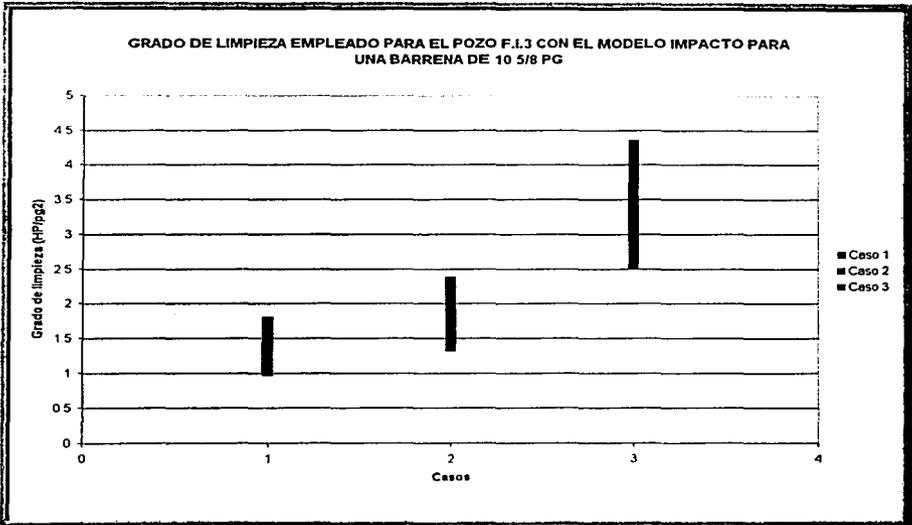
Cuando se tiene un diámetro de tobera pequeño, la caída de presión en las toberas será menor, incrementando a su vez la velocidad, fuerza y potencia de impacto del jet, por ello al observar las unidades de limpieza ó caballaje óptimo se puede notar que la potencia hidráulica es proporcional al caballaje óptimo, por lo que al incrementar la potencia hidráulica, el caballaje óptimo también se verá incrementado.

Realizando un tercer análisis para este pozo a otra etapa mostrando las condiciones en la tabla 3.7, se tiene que se aplica un mismo gasto para dos casos que tienen diferentes diámetros de toberas.

**Tabla 3.7. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 10 5/8 pg en el pozo F.1.3.**

	Gasto (gpm)	Densidad de la formación (lb/gal)	Densidad del lodo (lb/gal)	Diámetro de toberas (1/32pg)
Caso 1	428	23.352	7.506	14
Caso 2	450	23.352	8.5902	14
Caso 3	450	23.352	8.5902	12

Con la diferencia entre estos dos valores de diámetros, al aplicar el mismo valor de gasto, se obtiene una diferencia notable en el grado de limpieza.



**Fig. 3.17. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.3.**

Donde en el tercer caso se obtiene una mejor limpieza. Esto no significa que entre menor sea el diámetro, se tendrá una mejor limpieza, ya que esta condición se define por el diámetro de barrena y gasto aplicable, por lo que la variación de diámetros, estarán en función de estas dos condiciones.

Para esta barrena existe otra etapa, pero no es analizada en el presente trabajo debido a que un solo un caso no muestra la aplicación eficiente de la optimización de la hidráulica en la barrena, y en este trabajo se realiza un análisis comparativo que para ser desarrollado se necesitan al menos dos casos en una etapa.

El siguiente análisis se aplica al pozo F.I.4 a la etapa de 14 ¾ pg. No se considera la etapa de 22 pg debido a que se presenta un solo caso como el discutido en el párrafo anterior. Para la etapa de 14 ¾ pg a pesar de que existe una gran variedad en los gastos aplicables, el diámetro de toberas se mantiene casi

constante por lo que esta etapa presenta similitudes con otras debido a esta condición.

**Tabla 3.8. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 14 3/4 pg en el pozo F.I.4.**

	Gasto (gpm)	Densidad de la formación (lb/gal)	Densidad del lodo (lb/gal)	Diámetro de toberas (1/32pg)
Caso 1	589	23.352	8.9238	20
Caso 2	419	23.352	11.5092	20
Caso 3	600	23.352	11.676	20
Caso 4	638	23.352	11.676	20
Caso 5	590	23.352	11.676	20
Caso 6	638	23.352	12.093	20
Caso 7	638	23.352	12.093	16

Según las condiciones de la tabla 3.8, se perfora un mismo tipo de litología, aunque como ya se mencionó en el capítulo 2, este no es un parámetro que influye considerablemente la optimización de la hidráulica en la barrena y se puede notar de igual forma en la figura 3.18, donde se tiene una misma litología, y diámetro de toberas que no presentan grandes diferencias entre un caso y otro. Los casos 4 y 6 muestran que la diferencia al perforar varios tipos de litologías es mínima, ya que arrojan valores cercanos entre sí para la optimización.

Lo que es importante tomar de esta etapa es que en el último caso se redujo el diámetro de toberas, lográndose así un aumento del grado de limpieza de hasta un 200% mayor, en comparación con los casos aplicados anteriormente para esta etapa y pozo. De acuerdo a la figura 2.23, si se estaban utilizando toberas de 20/32 pg el mínimo gasto aplicable para la optimización debió haber sido al menos de 850 gpm; en caso contrario para las toberas de 16/32 pg el gasto aplicable sería de 650 gpm, cercano al valor real aplicado de 638 gpm.

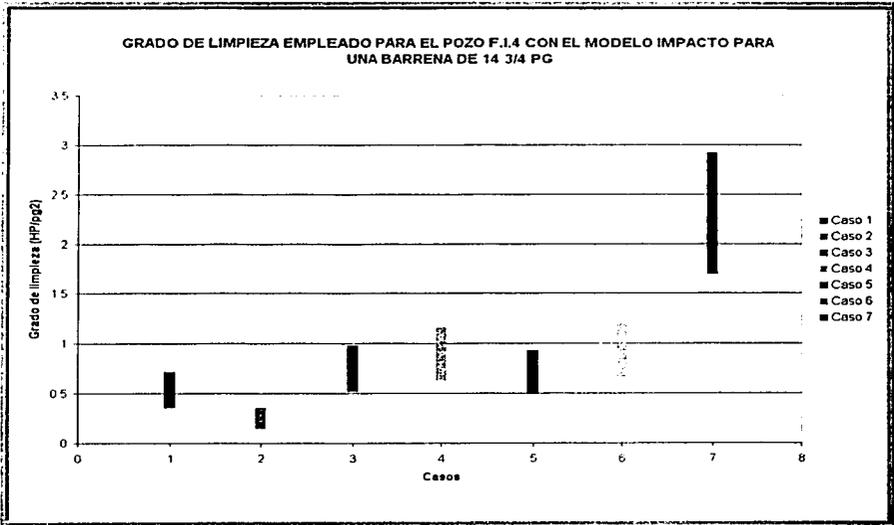


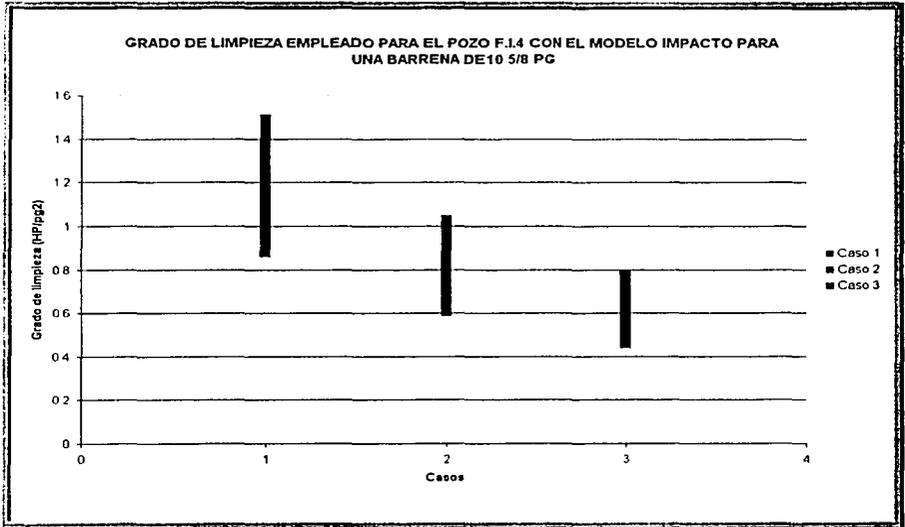
Fig. 3.18. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.1.4.

La siguiente etapa para el pozo F.1.4 es de 10 5/8 pg. Y se vuelve a repetir la situación de mantener casi un mismo diámetro de toberas, lo que indica que es difícil realizar un cambio de diámetros de tobera conforme avanza la operación, por lo que la presentación del nomograma en este trabajo puede ser de gran ayuda para diseñar las etapas siguientes a cada una.

Tabla 3.9. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 10 5/8 pg en el pozo F.1.4.

	Gasto (gpm)	Densidad de la formación (lb/gal)	Densidad del lodo (lb/gal)	Diámetro de toberas (1/32pg)
Caso 1	491	22.6	7.2558	16
Caso 2	432	22.6	7.3392	16
Caso 3	393	22.6	7.3392	16

En esta etapa no se consiguió el grado de limpieza adecuado, además de que el valor del gasto fue disminuyendo, contrario a la solución que se propone a partir de la figura 2.24, que sugiere un gasto mínimo aplicable de 550 gpm de acuerdo a los diámetros de tobera aquí empleados.



**Fig. 3.19. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.14.**

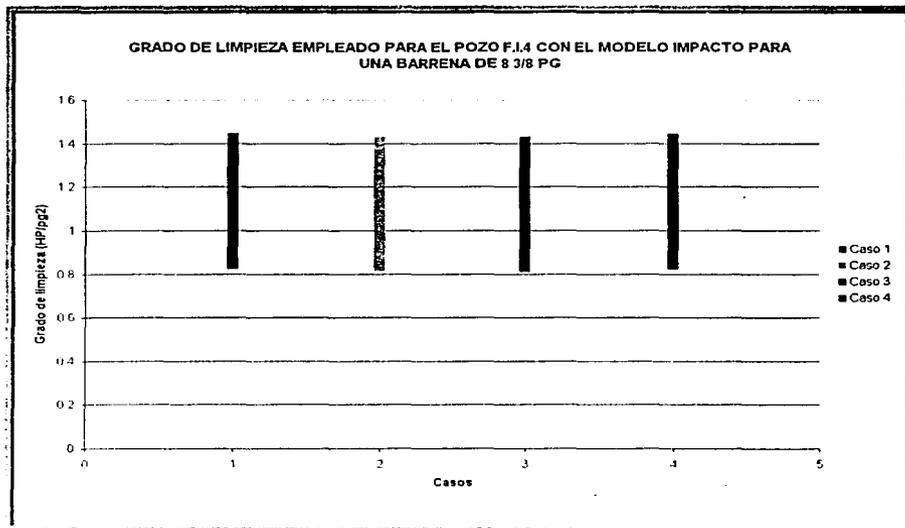
Como última etapa de este pozo se presenta la de 8 3/8 pg, teniendo la característica de mantener el gasto y diámetro de toberas constantes (ver tabla 3.10), las cuales son los principales parámetros que se pueden ajustar y variar, dependiendo de las etapas para mejorar la optimización en la barrena.

Las condiciones se presentan según las características de equipo y del pozo, y de alguna forma coincide en mantener constantes el diámetro de toberas y el gasto, notándose una diferencia prácticamente nula entre todos los casos presentados en esta etapa aún y cuando existió una variación entre la densidad del lodo y la formación.

**Tabla 3.10. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 8 3/8 pg en el pozo F.I.4.**

	Gasto (gpm)	Densidad de la formación (lb/gal)	Densidad del lodo (lb/gal)	Diámetro de toberas (1/32pg)
Caso 1	344	23.3	7.3392	14
Caso2	344	22.6	7.2558	14
Caso 3	344	23.99	7.2558	14
Caso 4	344	23.99	7.3392	14

No obstante el gasto aplicado fue bajo, ya que en la figura 2.25 se sugiere un valor aplicado de 450 gpm para conseguir el grado de limpieza adecuado. De forma contraria si el gasto no se puede aumentar, el diámetro de toberas debió haber sido de al menos 1/32 pg.



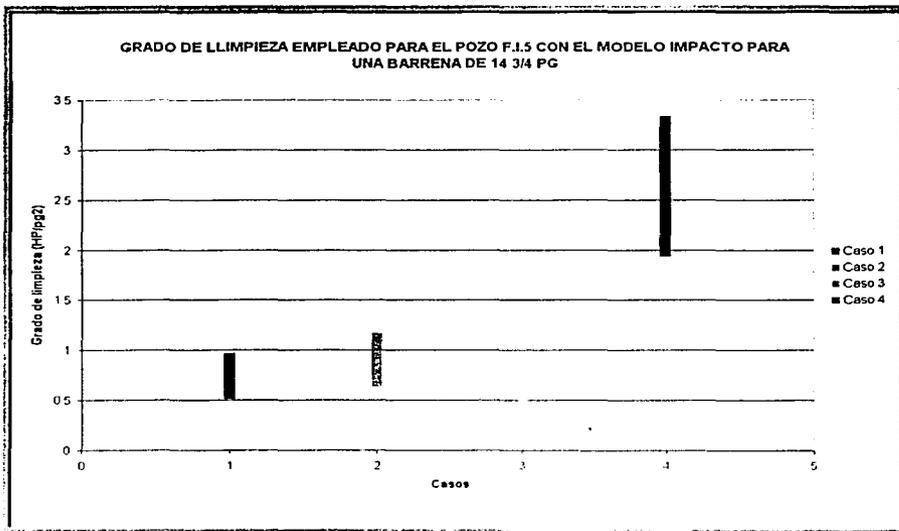
**Fig. 3.20. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.4.**

Se realiza un último análisis, ahora al pozo F.I.5, notándose una mayor variedad de aplicación del gasto y de diámetro de toberas.

**Tabla 3.11. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 14 3/4 pg en el pozo F.I.5.**

	Gasto (gpm)	Densidad de la formación (lb/gal)	Densidad del lodo (lb/gal)	Diámetro de toberas (1/32pg)
Caso 1	687	22	11.259	22
Caso 2	735	22	11.259	22
Caso 3	687	22	11.3424	24
Caso 4	687	22	11.259	16

Como resultado de aplicar estos parámetros tenemos la figura 3.21.



**Fig. 3.21. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.5.**

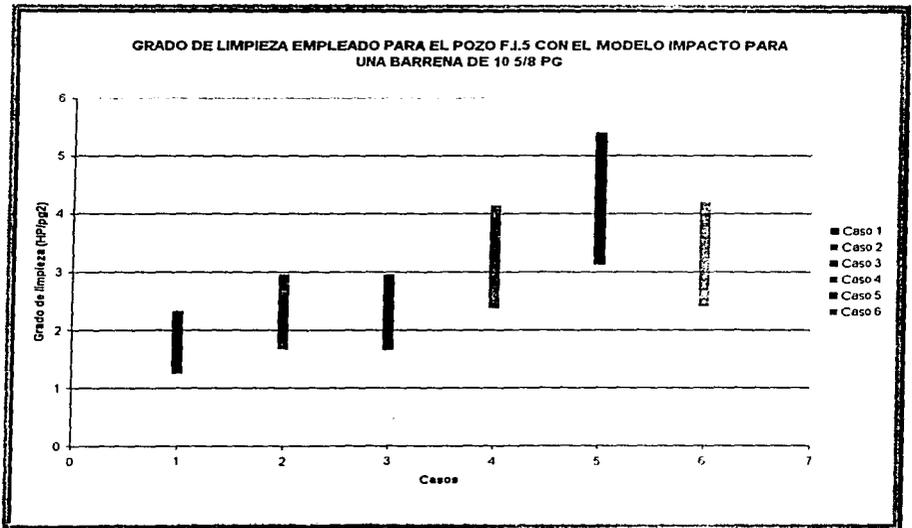
Donde se puede observar que el tercer caso tiene la desventaja de aplicársele un gasto ya que no cubre el grado mínimo de limpieza. Al observar la figura 2.23 nos damos cuenta que este caso no se encuentra dentro del rango de valores propuestos, por lo que entonces se puede decir que este diámetro no cubre con el mínimo de limpieza que se requiere. Para los casos 1 y 2 se observa que el gasto aplicado fue bajo, ya que se requería como mínimo un valor de gasto de 950 gpm y para el caso 4 según la misma figura 2.23 la aplicación del gasto fue correcta ya que el diámetro de tobera es más reducido, ocasionando que la potencia en la barrena sea incrementada, seguido de un incremento en el valor del grado de limpieza que entra en el rango de limpieza óptima.

Como último caso se analiza la etapa de 10 5/8 pg, observando que se incluyen 3 diferentes diámetros de toberas y todos entran al rango de limpieza óptima con sus respectivos gastos aplicados, los cuales se muestran en la tabla 3.12

**Tabla 3.12. Datos utilizados en el programa IMPACTO para la barrena de 10 5/8 pg en el pozo F.1.5.**

	Gasto (gpm)	Densidad de la formación (lb/gal)	Densidad del lodo (lb/gal)	Diámetro de toberas (1/32pg)
Caso 1	510	22	7.506	15
Caso 2	442	20.016	11.259	14
Caso 3	441	20.016	11.259	14
Caso 4	491	20.016	11.5926	14
Caso 5	491	23.352	11.259	13
Caso 6	451	23.352	11.259	13

En el primer caso se observa que tiene el menor valor de grado de limpieza pero conforme avanza la operación se mejora la limpieza, como es el ejemplo de los casos 2, 3 y 4 que tienen un menor gasto aplicado, pero también un diámetro menor, lo que mejora la potencia en la barrena.



**Fig. 3.22. Resultado final aplicando el programa IMPACTO para el pozo F.I.5.**

Para los últimos dos casos se mantiene un gasto promedio a los tres casos anteriores, pero se vuelve a reducir el diámetro de toberas, mejorando aún más este parámetro de limpieza.

Según para esta etapa se puede notar la mejora del grado de limpieza conforme se avanza en la operación, suponiendo que se mostraron mejoras en la velocidad de penetración. Lo que se puede notar también de todos los pozos analizados es que en ningún caso se exageró la aplicación del gasto, concluyendo que se tiene un mal análisis de la hidráulica en la barrena, el equipo superficial no cuenta con la energía necesaria para aplicarse en la barrena ó ambos. Para el caso de los diámetros de toberas también se puede decir que no se aplican los criterios de optimización, que conllevan además de otros factores, a determinar cual diámetro de toberas es el más adecuado para cada etapa ó no se cuenta con diámetros de toberas disponibles para cada etapa.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente trabajo fue desarrollado basándose en los requerimientos mínimos de limpieza de la barrena, así como en determinar la velocidad de flujo en toberas, fuerza y potencia de impacto, los cuales son los parámetros de optimización de la hidráulica en la barrena.

Se concluye que para un análisis de optimización en la barrena, la litología es un factor con una contribución mínima a los efectos sobre la caída de presión y por ende, sobre el grado de limpieza de la barrena.

Se demuestra con este estudio que un solo parámetro para optimizar la hidráulica en la barrena no es suficiente, ya que las combinaciones que se podrían dar serían infinitas, por lo cual sería imposible determinar un orden o mecánica de respuesta específica para la optimización de la hidráulica en la barrena, además de la hidráulica de la perforación.

El realizar comparaciones entre los parámetros de gasto, diámetro de toberas, densidad de lodo y densidad de la formación, ayudaron a saber cuál de ellos se debe tomar primero y en que proporción. Por orden jerárquico se tiene que el gasto es el parámetro que más se puede variar para obtener o acercarse a las condiciones necesarias para lograr la optimización, como segundo lugar se tiene el diámetro de toberas; como tercero, la densidad del lodo y como último lugar al parámetro de litología.

El incremento del gasto y la reducción o aumento del diámetro de toberas en los análisis realizados, beneficia en gran medida a la obtención del grado de limpieza adecuado, pero no obstante, deja de ser importante considerar las condiciones de

densidad del lodo y de litología presentes, ya que aunque afectan en forma mínima, constituyen parte de un todo que es el equipo y el pozo.

El modelo aquí propuesto sirve de alternativa para mejorar la aplicación de gastos y diámetros de toberas, siendo los más flexibles de variar en comparación con las densidades del lodo y de la formación, y que finalmente contribuye a la optimización de la hidráulica en la barrena.

Con los análisis realizados se obtiene también que la fuerza de impacto no decae con la distancia axial tan rápidamente como la caída de presión. Además el área de impacto calculada muestra que ésta es independiente del gasto aplicado, por lo que el área de limpieza no depende del gasto aplicado.

Se obtiene finalmente que el grado de limpieza es el parámetro que va a definir los límites de optimización, ya que de acuerdo a este valor, se definen los valores de gasto y diámetro de toberas, que traen consigo dentro del modelo a la máxima fuerza de impacto, potencia hidráulica y velocidad en toberas.

Se recomienda como complemento de este trabajo, considerar las caídas de presión que se generan en todo el sistema y entrar con esos datos al modelo, para que después se realice un análisis para saber cómo se comporta la hidráulica después de la barrena.

## Nomenclatura

A	Área	[pg <sup>2</sup> ]
A <sub>a</sub>	Área del agujero del pozo	[pg <sup>2</sup> ]
A <sub>n</sub>	Área total de toberas	[pg <sup>2</sup> ]
A <sub>n opt</sub>	Área total de toberas	[pg <sup>2</sup> ]
BHHP	Potencia hidráulica en la barrena	[HP]
C <sub>1</sub>	Constante	[6.3-Adimensional]
C <sub>2</sub>	Constante	[50-Adimensional]
C <sub>d</sub>	Coefficiente de descarga	[0.95-Adimensional]
C <sub>n</sub>	Coefficiente de toberas	[Adimensional]
D	Profundidad	[ft]
D <sub>b</sub>	Diámetro de la barrena	[pg]
D <sub>h</sub>	Diámetro del agujero	[pg]
d <sub>j</sub>	Diámetro del jet	[pg]
d <sub>j</sub> <sup>*</sup>	Diámetro adimensional del jet	[d <sub>j</sub> / D <sub>n</sub> ]
D <sub>n</sub>	Diámetro de la tobera	[pg]
D <sub>i</sub>	Diámetro interior de la tubería	[pg]
D <sub>T</sub>	Diámetro exterior de la tubería	[pg]
F	Pérdida por fricción	[psi]
g	Aceleración de la gravedad	[ft/seg <sup>2</sup> ]
h	Distancia desde la tobera al fondo del pozo	[pg]
H.P.e	Potencia hidráulica por pulgada cuadrada de agujero	[HP / pg <sup>2</sup> ]
I <sub>i</sub>	Fuerza de impacto del chorro	[lb]

K	Constante que depende de la geometría del pozo y características del fluido	[psi / gpm]
k	Constante de entrada turbulenta del fluido	[adimensional]
K <sub>f</sub>	Pérdida de presión por fricción por gasto unitario	[psi / gpm]
L <sub>T</sub>	Longitud de la tubería	[ft]
L	Longitud	[L]
M	Momentum	[ ]
m <sub>a</sub>	Masa	[M]
m	Constante que depende de las propiedades del lodo y el régimen de flujo	[1.86-Adimensional]
N <sub>Fr</sub>	Número de Froud ( $v_j^2 / D_n / g$ )	[Adimensional]
n	Índice de comportamiento de flujo o exponente de ley de potencias	[Adimensional]
P <sub>m</sub>	Presión máxima total bajo el chorro	[psi]
P <sub>s max</sub>	Presión superficial máxima	[psi]
$\overline{PV}$	Viscosidad plástica	[cp]
Q	Velocidad de flujo	[gpm]
$\dot{Q}$	Flujo másico	[ ]
Q <sub>min</sub>	Velocidad de flujo mínimo necesario para limpiar el agujero de recortes	[gpm]
Q <sub>opt</sub>	Velocidad de flujo óptimo	[gpm]
r	Distancia radial desde el punto de estancamiento bajo el chorro	[pg]
t	Tiempo	[seg, min]

$u_c$	Velocidad de flujo cruzado	[ft/seg]
$u_m$	Máxima velocidad de flujo cruzado	[ft/seg]
$u_0$	Velocidad del chorro en la tobera	[ft/seg]
$u_x$	Velocidad sobre el eje del chorro	[ft/seg]
$\bar{v}$	Velocidad	[ft/seg]
$v_j$	Velocidad del jet	[ft/seg]
$v_j^*$	Velocidad adimensional del jet	[ $v_j/v_n$ ]
$v_n$	Velocidad en las toberas del jet	[ft/seg]
$W$	Trabajo	[Joules]
$x$	Distancia axial desde la tobera	[pg]
$z$	Distancia axial del jet	[pg]
$z^*$	Penetración adimensional	[ $z/D_n$ ]
$\Delta p$	Pérdida ó caída de presión	[psi]
$\Delta p_b$	Caída de presión en la barrena	[psi]
$\Delta p_p$	Caída de presión en la bomba	[psi]
$\Delta p_{b \text{ opt}}$	Caída de presión óptima en la barrena	[psi]
$\Delta p_{\text{Par}}$	Caída de presión parásita	[psi]
$\Delta p_{\text{Par opt}}$	Caída de presión parásita óptima	[psi]
$\mu$	Viscosidad absoluta	[cp]
$\rho$	Densidad del fluido	[lb/gal]
$\rho_j$	Densidad del jet a la salida de la tobera	[adimensional]
$\rho_j^*$	Densidad adimensional del jet ( $\rho/\rho_j$ )	[adimensional]
$\Gamma$	Relación de densidades ( $\rho/\rho_j$ )	[adimensional]
$\Psi_m$	Máximo esfuerzo cortante sobre el fondo del pozo	[psi]

---

# BIBLIOGRAFÍA

- ◆ Adams Neal. *Drilling Engineering*. Tulsa, Oklahoma. Cap. 18. 1985.
- ◆ Allen, J.H. How to Relate Bit Weight and Rotary Speed to Bit Hydraulic Horsepower. *Drilling-DCW*. 36(8, May, 1975): 53-55.
- ◆ Baker Hughes. *Drill Bit Catalog*. Hughes Christensen. Febrero 2002.
- ◆ Beltaos, Spyridon y Rajaratnam, Nallamuthu. Impinging Circular Turbulent Jets. *Proc. ASCE, J. Hydraulics Div.* 100:1313-1328. 1978
- ◆ Benítez Hernández Miguel A. *Apuntes de Tecnología de Perforación*. Primera parte. Ed. F.I. México.
- ◆ Bourgoyne T. Adam Jr., Et al. *Applied drilling Engineering*. SPE TEXTBOOK SERIES. Richardson, Texas. 1991. Vol. 2.
- ◆ Bradshaw, P. and Love, E.M. The Normal Impingement of a Circular Jet on a Flat Plate. Great Britain Aeronautical Research Council. ARC Report No. 21, 268, 1959.
- ◆ Chilingarian George V. and P. Vorabutr. *Drilling and Drilling Fluids*. Ed. Elsevier Scientific Publishing Company. Netherlands, 1981.
- ◆ Davis, M.R. and Winarto, H. Jet Diffusion from a Circular Nozzle above a Solid Plane. *J. Fluid Mech.* Vol. 101. Part. 1. Pp. 201-221. 1980.
- ◆ De la Torre Ramos Emilio. *Hidráulica de Fluidos de Perforación y Terminación de Pozos*. México, 2002.
- ◆ Farias L.R. and Irons G.A. Unified Approach to Bubbling – Jetting Phenomena in Powder Injection into Iron and Steel. *Metallurgical Transactions*, 1985.

- 
- ◆ Foss, J.F. and Kleis, S.J. The Oblique Impingement of an Axisymmetric Jet. Second Annual Report, NASA. Lewis Research Center. (NASA-CR-134961). December. 1972.
  - ◆ Fullerton, H.B. and Fullerton, H.B. Constant Energy Drilling System for Well Programming. Sii Smith Tool. Irvine, California. 1973. Unpublished.
  - ◆ Fullerton, H.B. and Mechem, O.E. Computers Invade the Rig Floor. Oil Gas J. 63(41, Oct. 11, 1965): 125-140.
  - ◆ Gatlin Carl. Petroleum Engineering. Drilling and Well Completions. Ed. Prentice Hall. Englewood Cliffs, N.J. USA. 1960. Cap. 8.
  - ◆ Ghalambor, A., Et al. Intermittent Nozzle Fluid Flow and its Application to Drilling. University of Southwestern Louisiana Hayatdavoudi. SPE 14984. 1988.
  - ◆ Hughes Tool Company. Tri-Cone. Manual de Barrenas. U.S.A. 1982.
  - ◆ J.A. "Jim" Short. Drilling and Casing Operation. Ed. Penwell Book. Tulsa, Oklahoma. 1982. Cap. 3.
  - ◆ Kendall, H.A. and Goins, W.C. Design and Operation of Jet-Bit Programs for Maximum Hydraulic Horsepower, Impact Force or Jet Velocity. Trans. AIME. 1960. 219: 238-250.
  - ◆ León Loya, Juan Gilberto. Hidráulica de Perforación. PEMEX. División Norte. Poza Rica de Hgo., Ver. 2001.
  - ◆ Liao, Rongqing. Increased Rate of Penetration of Jet Drilling from Improvement of the Bottomhole Flow Field. Southwest Petroleum Institute. SPE 14857. 1988.
  - ◆ Linzer, F.D. Exit Cone Angles of Submerged, Confined, Turbulent Jets. Transactions of ASME. Journal of Applied Mechanics. 1971. Pp. 540-541.
-

- 
- ◆ Lummus James L. Drilling Fluids Optimization. a Practical Field Approach. Ed. Pennwell Books. Tulsa, Oklahoma. Cap.1.
  - ◆ Lummus James L. Drilling in the Seventies. Part III. Bit Selection. Pet. Eng. 46(3 March 1974): 82-91.
  - ◆ Lummus James L. Drilling Optimization. Journal Petroleum Technology. Nov. 1970. Pp.1379-1389.
  - ◆ Lummus James L. Drilling Optimization. Pan American Petroleum Corp. SPE Reprint Series. DRILLING No. 22. Ed. Society of Petroleum Engineers. Richardson, Texas. 1987.
  - ◆ M.A. Mian. Petroleum Engineering. Handbook For the Practicing Engineer. Ed. Pennwell. Tulsa, Oklahoma. 1992. Vol. II. Cap.8.
  - ◆ McLean, R.H. Crossflow and Impact Under Jet Bits. Journal of Petroleum Technology. Nov. 1964. Pp. 1299-1306.
  - ◆ McLean, R.H. Velocities, Kinetic Energy and Shear in Crossflow Under Three-Cone Jet Bits. Journal of Petroleum Technology. December. 1965. Pp. 1443-1448.
  - ◆ Platten, J.L. and Keffer, J.F. Entrainment in Deflected Axisymmetric Jets at Various Angles to the Stream. Tech. Rep. 6808. Department of mechanical engineering. University of Toronto. 1968.
  - ◆ Poreh, M., et al. Investigation of a Turbulent Radial Well Jet. Journal of Applied Mechanics, ASME. 1967. Pp. 457-463.
  - ◆ Rajaratnam, N. Turbulent Jets. Elsevier Scientific Publishing Co. Amsterdam. 1976.

- 
- ◆ Rodríguez Hernández, Héctor. Análisis del Proceso de Inyección de Grafito en un Horno de Arco Eléctrico. Tesis de Maestría en Ingeniería Química. ESIQUE. México 1995.
  - ◆ Santana Noriega, Juan Manuel. La Hidráulica en la Perforación de Pozos Petroleros. Tesis de Licenciatura, Ingeniero Petrolero. UNAM. 1995.
  - ◆ Smith Tool. The Technique, Tools and Terminology of Drilling. Irvine, California. 92713:11pp.
  - ◆ Velázquez Cruz, David. Procedimiento para la Determinación de la Hidráulica de Perforación. Instituto Politécnico Nacional. Abril 2001.
  - ◆ Warren M. Tommy and Warren J. Winters. The Effect of Nozzle Diameter on Jet Impact for a Tricone Bit. Amoco Production Co. SPE 11059 New Orleans 1982.
  - ◆ Zhang, Shaohuai and Yao, Caiyin. The Hydraulic Programs for the Maximum Hydraulic Horsepower and Impact Force on the Bottom Hole Rock Surface in Jet—Drilling. Southwest Petroleum Institute. SPE 14851. Beijing, China. 1986.

## ANEXO A

Desarrollo de la ecuación del modelo IMPACTO:

$$z = z^* d_0 \quad (1)$$

$$\rho_j = \rho^* \rho_{sp}^0 \quad (2)$$

$$u_j = u_{sp}^0 u^* \quad (3)$$

$$d_j = d_0 d^* \quad (4)$$

$$\Theta_i = 1 - \frac{u_{sp}^0}{u_j} \cdot \frac{d_0^2}{d_j^2} \quad (5)$$

$$\rho_j = (1 - \Theta_i) \rho_{sp}^0 + \Theta_i \rho_l \quad (6)$$

$$\frac{du_j^2 A \rho_j}{dz} + (\rho_l - \rho_j) g A = 0 \quad (7)$$

$$\frac{d\rho_j u_j A}{dz} = K \rho_j u_j d_j \quad (8)$$

Desarrollando la derivada (7) se tiene:

$$u_j \frac{d\rho_j u_j A}{dz} + \rho_j u_j A \frac{du_j}{dz} = (\rho_j - \rho_l) g A \quad (9)$$

Sustituyendo la ecuación (8) en (9), tenemos:

$$k \rho_j u_j^2 d_j + \rho_j u_j A \frac{du_j}{dz} = (\rho_j - \rho_l) g A \quad (10)$$

despejando  $\frac{du_j}{dz}$  de la ecuación (10) se tiene:

$$\frac{du_j}{dz} = \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_m}\right) \frac{g}{u_j} - \frac{ku_j d_j}{A} \quad (11)$$

sustituyendo las ecuaciones (5) y (6) en la ecuación (8), tenemos que:

$$\frac{d\left(\frac{u_{sp}^0}{u_j} \cdot \frac{d_0^2}{d_j^2} (\rho_{sp}^0 - \rho_l) + \rho_l\right) u_j A}{dz} = k\rho_j u_j d_j \quad (12)$$

$$\frac{d\rho_j u_j A}{dz} = k\rho_j u_j d_j \quad (13)$$

$$u_j \rho_l \frac{dA}{dz} + A\rho_l \frac{du_j}{dz} = k\rho_j u_j d_j \quad (14)$$

Sustituyendo A por  $\frac{\pi d_j^2}{4}$  se tiene:

$$u_j \rho_l \frac{\pi}{2} d_j \frac{dd_j}{dz} + \frac{\pi d_j^2 \rho_l}{4} \frac{du_j}{dz} = k\rho_j u_j d_j \quad (15)$$

despejando  $\frac{dd_j}{dz}$  de 15:

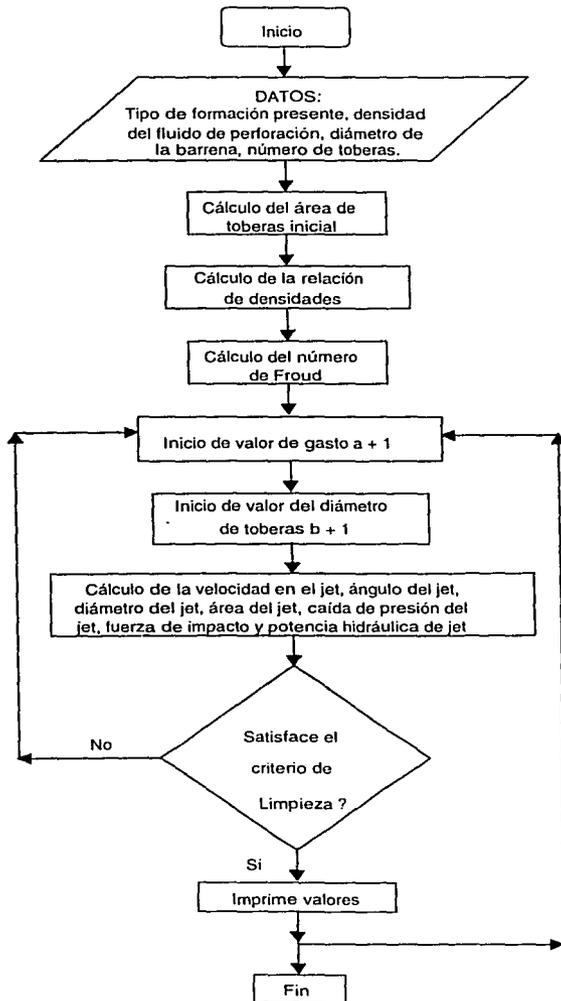
$$\frac{dd_j}{dz} = \frac{2k\rho_j}{\pi\rho_l} - \frac{d_j}{2u_j} \frac{du_j}{dz} \quad (16)$$

sustituyendo (1), (2), (3), y (4) en (11) y (16), tenemos finalmente:

$$\frac{du^*}{dz^*} = \left(1 - \frac{\Gamma}{\rho_l}\right) \frac{4ku^*}{N_{F_l} u^*} \quad (17)$$

$$\frac{dd^*}{dz^*} = \frac{2k}{\pi} \left( 1 + \frac{\rho}{\Gamma} \right) - \frac{\left( 1 - \frac{\Gamma}{\rho^*} \right) d^*}{2N_{E^*} u^{*2}} \quad (18)$$

## ANEXO B



# ANEXO C

## IMPACTO 1

```

C
PRINT *,'          I M P'
PRINT *,'
PRINT *,'          U.N.A.M'
PRINT *,'
PRINT *,'
PRINT *,'
PRINT *,'          DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA'
PRINT *,'
PRINT *,'PROGRAMA PARA OBTENER LA VELOCIDAD DE
PENETRACION,'
PRINT *,'CAIDA DE PRESION EN EL JET, FUERZA DE IMPACTO DEL JET'
PRINT *,'Y AREA DE IMPACTO EN EL FONDO DEL POZO UTILIZANDO
LAS'
PRINT *,'SUBROUTINAS DIVPRQ DE LA BIBLIOTECA IMSL'
PRINT *,'
PRINT *,'
PRINT *,'          PROGRAMA IMPACTO'
PRINT *,'AUTORES '
PRINT *,'
PRINT *,'JESUS RODOLFO GONZALEZ GARCIA '
PRINT *,'DR. HECTOR RODRIGUEZ HERNANDEZ '
PRINT *,'
PRINT *,'

C LISTA DE VARIABLES UTILIZADAS:
C
C I:  VARIABLE UTILIZADA COMO CONTADOR
C III: VARIABLE UTILIZADA COMO CONTADOR
C AJET: AREA DEL JET
C AK:  CONSTANTE DE FLUJO UTILIZADA EN LA TOBERA
C ALFA: ANGULO DE LA TOBERA EN RADIANES MEDIDO DESDE LA
VERTICAL
C At:  AREA DE TOBERAS
C DJET: DIAMETRO DEL JET
C DPJ: CAIDA DE PRESION EN EL JET
C FJ:  FUERZA DE IMPACTO DEL JET
C FRNUM: NUMERO DE FROUD
C GAMA: RELACION DE DENSIDADES (DEL LODO Y DE LA FORMACION)

```

---

C OMEGA: ANGULO DE LA TOBERA EN GRADOS MEDIDO DESDE LA VERTICAL

C PJ: POTENCIA HIDRAULICA DEL JET

C Q: GASTO

C ROF: DENSIDAD DE LA FORMACION

C ROL: DENSIDAD DEL LODO

C TNA: DIAMETRO DE LA TOBERA A

C TNB: DIAMETRO DE LA TOBERA B

C TNC: DIAMETRO DE LA TOBERA C

C UM: VELOCIDAD INICIAL DEL JET EN LA TOBERA

C VNO: VELOCIDAD EN TOBERAS

C VNOO: VELOCIDAD ADIMENSIONAL EN LAS TOBERAS

C

C

C INICIO DEL PROGRAMA

C

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)

DIMENSION Y(10),YPRIME(10),PARAM(50)

COMMON

Q,ROF,ROL,TNA,TNB,TNC,AK,OMEGA,At,VNO,GAMA,FRNUM,UM,ALFA  
EXTERNAL FCN,DIVPRK

OPEN(6,FILE='JETAN.RES')

I=0

III=0

C

C EL PROGRAMA INICIA SOLICITANDO LOS DATOS NECESARIOS PARA CALCULAR LA

C PRIMERA PARTE DEL PROCESO, A PARTIR DEL CUAL INICIARA EL PROCESO DE

C CALCULO PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES

C

PRINT \*,'PROPORCIONA EL VALOR DEL GASTO (gal/min)'

READ(\*,\*)Q

C PRINT \*,'PROPORCIONA LA PRESION DE BOMBEO (kg/cm2)'

C READ(\*,\*)Pp

C Pp=2285

PRINT \*,'PROPORCIONA LA DENSIDAD DE LA FORMACION (lb/gal)'

READ(\*,\*)ROF

PRINT \*,'PROPORCIONA LA DENSIDAD DEL LODO (lb/gal)'

READ(\*,\*)ROL

```
PRINT *,'PROPORCIONA EL DIAMETRO DE LA TOBERA TNA (1/32pg)'  
READ(*,*)TNA  
TNA=TNA/32
```

```
PRINT *,'PROPORCIONA EL DIAMETRO DE LA TOBERA TNB (1/32pg)'  
READ(*,*)TNB  
TNB=TNB/32
```

```
PRINT *,'PROPORCIONA EL DIAMETRO DE LA TOBERA TNC (1/32pg)'  
READ(*,*)TNC  
TNC=TNC/32
```

```
C  
C EL SIGIENTE DATO SE FIJA EN EL PROGRAMA YA QUE ES EL  
C PROPUESTO PARA  
C EL MODELO. ALGUNOS AUTORES CONSIDERAN IGUALMENTE EL VALOR  
C DE 0.06  
C PERO AUN ASI ESTA OPCION SE PUEDE ACTIVAR PARA PODER  
C VARIARLO
```

```
C  
C PRINT *,'PROPORCIONA EL VALOR DE K'  
C READ(*,*)AK  
C AK=0.06
```

```
C PRINT *,'PROPORCIONA EL ANGULO DE LA TOBERA'  
C READ(*,*)OMEGA  
C OMEGA=15
```

```
C  
C LAS CONDICIONES INICIALES PARA PROFUNDIDAD DE PENETRACION,  
C VELOCIDAD DEL JET Y DIAMETRO DEL JET SON LAS SIGUIENTES Y SE  
C RECOMIENDA NO CAMBIARLAS DEBIDO A QUE SE PARTE DE "CERO", ES  
C DECIR  
C EL CALCULO INICIA CUANDO EL CHORRO SALE DE LA TOBERA
```

```
C  
C  
C PRINT *,'PROPORCIONA LAS CONDICIONES INICIALES ZO,UMO,DJO'  
C READ(*,*)Z,Y(1),Y(3)  
C Z=0  
C Y(1)=1  
C Y(3)=1
```

$$At=(3.1416/4096)*((32*TNA)**2+(32*TNB)**2+(32*TNC)**2)$$
$$VNO=Q/(3.117*At)$$

$$GAMA = ((ROF + ROL) / 2) / ROL$$

$$FRNUM = (VNO ** 2) / ((TNA * 0.083) * 32.2)$$

$$ALFA = OMEGA / 57.29577951$$

C

C IMPRESION DE LOS DATOS CON LOS QUE COMENZARA A CORRER EL PROGRAMA

C

PRINT \*, 'EL PROGRAMA IMPACTO DE ACUERDO CON LOS DATOS'  
 PRINT \*, 'PROPORCIONADOS INICIARA CON LAS SIGUIENTES  
 CONDICIONES'

PRINT \*, 'DE OPERACION:'

PRINT \*, 'GASTO DEL LODO =', Q, 'gal/min'

PRINT \*, 'DENSIDAD DEL LODO A LA ENTRADA =', ROL, 'lb/gal'

PRINT \*, 'DENSIDAD DE LA FORMACION =', ROF, 'lb/gal'

PRINT \*, 'DIAMETRO DE LAS TOBERAS =', TNA, 'in'

PRINT \*, 'CONSTANTE DE FLUJO =', AK, 'adimensional'

PRINT \*, 'ANGULO DE LAS TOBERAS =', ALFA, 'RAD'

PRINT \*, 'AREA TOTAL DE LAS TOBERAS =', At, 'in2'

PRINT \*, 'VELOCIDAD DEL LODO A LA ENTRADA =', VNO, 'ft/seg'

PRINT \*, 'RELACION DE DENSIDADES =', GAMA, 'adimensional'

PRINT \*, 'NUMERO DE FROUD =', FRNUM, 'adimensional'

PRINT \*, 'CONDICIONES INICIALES Z =', Z

PRINT \*, ' UM =', Y(1)

PRINT \*, ' DJ =', Y(3)

PRINT \*, ' '

Y(2) = ALFA

PAUSE ''

PRINT \*, 'CONSIDERANDO EL FLUJO COMO JET SE TIENEN LOS  
 RESULTADOS

\*SIGUIENTES:

WRITE(6,50)

50 FORMAT(//, 2X, 'PENETRACION (ft)', 3X, 'VELOCIDAD (ft/seg)', 3X, 'DIAMET  
 \*RO (in)', 5X, 'ANGULO  $\theta$ ', 5X, 'AREA DEL JET (in2)', 4X, 'CAIDA PRESION J  
 \*ET (PSI)', 5X, 'FUERZA JET (lb)', 5X, 'POTENCIA JET (HP)')

40 I=I+1

IMPRESION=50

III=I/IMPRESION

ZEND=0.0001\*I

PRINT \*, 'ZEND=', ZEND

```
TOL=1D-5
IDO=1
NEQ=3
PARAM(10)=1
```

```
CALL DIVPRK(IDO,NEQ,FCN,Z,ZEND,TOL,PARAM,Y)
```

```
IDO=3
CALL DIVPRK(IDO,NEQ,FCN,Z,ZEND,TOL,PARAM,Y)
```

```
IF(ZEND.GE.0.5)THEN
```

```
ZPEN=ZEND
VNOO=Y(1)*VNO
FALA=Y(2)*57.295779
DJET=Y(3)*TNA
AJET=0.785*DJET**2
DPJ=((VNOO**2)*8.074D-4*ROL)/(0.95**2)
FJ=0.01823*0.95*Q*DSQRT(ROL*DPJ)
PJ=(Q*DPJ)/1714
```

```
WRITE(6,21)ZPEN,VNOO,DJET,FALA,AJET,DPJ,FJ,PJ
21 FORMAT(5X,F8.4,11X,F13.7,9X,F9.7,5X,F11.7,9X,F8.7,12X,F16.9,11X,
&F16.8,6X,F14.8)
```

```
STOP
ELSEIF(ABS(III*IMPRE).EQ.I)THEN
```

```
ZPEN=ZEND
VNOO=Y(1)*VNO
FALA=Y(2)*57.295779
DJET=Y(3)*TNA
AJET=0.785*DJET**2
DPJ=((VNOO**2)*8.074D-4*ROL)/(0.95**2)
FJ=0.01823*0.95*Q*DSQRT(ROL*DPJ)
PJ=(Q*DPJ)/1714
```

```
WRITE(6,20)ZPEN,VNOO,DJET,FALA,AJET,DPJ,FJ,PJ
20 FORMAT(5X,F8.4,11X,F13.7,9X,F9.7,5X,F11.7,9X,F8.7,12X,F16.9,11X,
&F16.8,6X,F14.8)
```

```
Z=ZEND
Y(1)=VNOO/VNO
Y(2)=FALA/57.295779
Y(3)=DJET/TNA
```

GOTO 40

ELSE

Z=ZEND

VNOO=Y(1)\*VNO

FALA=Y(2)\*57.295779

DJET=Y(3)\*TNA

Y(1)=VNOO/VNO

Y(2)=FALA/57.295779

Y(3)=DJET/TNA

AJET=0.785\*DJET\*\*2

DPJ=((VNOO\*\*2)\*8.074D-4\*ROL)/(0.95\*\*2)

FJ=0.01823\*0.95\*Q\*DSQRT(ROL\*DPJ)

PJ=(Q\*DPJ)/1714

GOTO 40

ENDIF

END

C

C SUBROUTINA QUE EVALUA EL SISTEMA DE ECUACIONES DIFERENCIALES

C LLAMADO POR DIVPRK

C

SUBROUTINE FCN(NEQ,Z,Y,YPRIME)

IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)

DIMENSION Y(10),YPRIME(10)

COMMON

Q,ROF,ROL,TNA,TNB,TNC,AK,OMEGA,At,VNO,GAMA,FRNUM,UM,ALFA

PRINT \*,Y1=',Y(1)

PRINT \*,Y2=',Y(2)

PRINT \*,Y3=',Y(3)

YPRIME(1)=(((Y(3)\*\*2\*(ROL-GAMA))/FRNUM)-((DCOS(Y(2)))\*\*2\*4\*AK\*

1 ROL\*Y(1)\*\*2\*Y(3))/(3.1416\*DSIN(Y(2))))-((DSIN(Y(2)))\*\*4\*

2 AK\*ROL\*Y(1)\*\*2\*Y(3))/3.1416))/((ROL\*Y(3)\*\*2\*

3 Y(1)\*DSIN(Y(2)))+(ROL\*Y(3)\*\*2\*Y(1)\*DCOS(Y(2)))\*\*2\*

4 DSIN(Y(2))))

PRINT \*,YPRIME1=',YPRIME(1)

YPRIME(2)=(DCOS(Y(2))\*4\*AK\*ROL\*Y(1)\*\*2\*Y(3)/3.1416+DCOS(Y(2))\*

1 Y(3)\*\*2\*(ROL-GAMA)/FRNUM/DSIN(Y(2))-DCOS(Y(2))\*4\*AK\*

---

```
2   ROL*Y(1)**2*Y(3)/3.1416)/(ROL*Y(3)**2*Y(1)**2*
3   DSIN(Y(2))+ROL*Y(3)**2*Y(1)**2*DCOS(Y(2))/DSIN(Y(2)))
```

```
PRINT *,'YPRIME2=',YPRIME(2)
```

```
      YPRIME(3)=2*AK*ROL*Y(3)/GAMA/3.1416-Y(3)*((Y(3)**2*(ROL-GAMA)/
1   FRNUM-(DCOS(Y(2)))**2*4*AK*ROL*Y(1)**2*Y(3)/3.1416/
2   DSIN(Y(2))-DSIN(Y(2))*4*AK*ROL*Y(1)**2*Y(3)/3.1416/
3   (ROL*Y(3)**2*Y(1)*DSIN(Y(2))+ROL*Y(3)**2*Y(1)*
4   (DCOS(Y(2)))**2*DSIN(Y(2))))/2/Y(1)
```

```
PRINT *,'YPRIME3=',YPRIME(3)
```

```
END
```

**IMPACTO 2**

```

IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
DIMENSION Y(10),YPRIME(10),PARAM(50)
DIMENSION DTOB(16)
COMMON Q,ROF,ROL,TNA,AK,OMEGA,At,VNO,GAMA,FRNUM,UM,ALFA
EXTERNAL FCN,DIVPRK
OPEN(6,FILE='JETANSW.RES')

C
PRINT *,'          U.N.A.M.'
PRINT *,'
PRINT *,'          I.M.P'
PRINT *,'
PRINT *,'
PRINT *,'          DIVISION EN CIENCIAS DE LA TIERRA'
PRINT *,'
PRINT *,'PROGRAMA PARA OBTENER LA VELOCIDAD DE PENETRACION,
CAIDA'
PRINT *,'DE PRESION EN EL JET, FUERZA DE IMPACTO DEL JET, AREA
DE'
PRINT *,'IMPACTO, GRADO DE LIMPIEZA, DIAMETRO DE TOBERAS Y
GASTO'
PRINT *,'PROPUESTO EN EL FONDO DEL POZO UTILIZANDO LAS
SUBROUTINAS'
PRINT *,'DE LA BIBLIOTECA IMSL'
PRINT *,'
PRINT *,' JESUS RODOLFO GONZALEZ GARCIA'
PRINT *,' DR. HECTOR RODRIGUEZ HERNANDEZ '
PRINT *,'
PRINT *,'          PROGRAMA IMPACTO 2'
PRINT *,'
PRINT *,'
PRINT *,'

C LISTA DE VARIABLES UTILIZADAS:
C
C AJET: AREA DEL JET
C AK:  CONSTANTE DE FLUJO UTILIZADA EN LA TOBERA
C ALFA: ANGULO DE LA TOBERA EN RADIANES MEDIDO DESDE LA
VERTICAL
C APA:  POTENCIA HIDRAULICA OPTIMA POR PULGADA CUADRADA DE
AGUJERO
C At:  AREA DE TOBERAS
C CRL:  CRITERIO DE LIMPIEZA
C Db:  DIAMETRO DE LA BARRENA
C DJET: DIAMETRO DEL JET
C DPJ:  CAIDA DE PRESION DEL JET

```

---

C DTOB: DIAMETRO DE TOBERAS EXISTENTES  
C FJ: FUERZA DE IMPACTO DEL JET  
C FRNUM: NUMERO DE FROUD  
C GAMA: RELACION DE DENSIDADES (DEL LODO Y DE LA FORMACION)  
C N: NUMERO DE TOBERAS  
C OMEGA: ANGULO DE LA TOBERA EN GRADOS MEDIDO DESDE LA VERTICAL  
C PJ: POTENCIA HIDRAULICA DEL JET  
C Q: GASTO  
C ROF: DENSIDAD DE LA FORMACION  
C ROL: DENSIDAD DEL LODO  
C TNA: DIAMETRO DE LA TOBERA BASE  
C UM: VELOCIDAD INICIAL DEL JET EN LA TOBERA  
C VNO: VELOCIDAD EN TOBERAS  
C VNOO: VELOCIDAD ADIMENSIONAL EN LAS TOBERAS  
C Z: DISTANCIA AXIAL  
C  
C  
C INICIO DEL PROGRAMA  
C  
C LOS SIGUIENTES DATOS CORRESPONDEN AL DIAMETRO DE TOBERAS MAS COMUNES  
C Y DISPONIBLES QUE SE UTILIZAN EN LAS OPERACIONES DE PERFORACION  
C  
C  
C DTOB(1)=6/32  
C DTOB(1)=0.1875  
C DTOB(2)=8/32  
C DTOB(2)=0.25  
C DTOB(3)=9/32  
C DTOB(3)=0.28125  
C DTOB(4)=10/32  
C DTOB(4)=0.3125  
C DTOB(5)=11/32  
C DTOB(5)=0.34375  
C DTOB(6)=12/32  
C DTOB(6)=0.375  
C DTOB(7)=13/32  
C DTOB(7)=0.40625  
C DTOB(8)=14/32  
C DTOB(8)=0.4375  
C DTOB(9)=15/32  
C DTOB(9)=0.46875  
C DTOB(10)=16/32  
C DTOB(10)=0.5  
C DTOB(11)=18/32

---

```
      DTOB(11)=0.5625
C   DTOB(12)=20/32
      DTOB(12)=0.625
C   DTOB(13)=22/32
      DTOB(13)=0.6875
C   DTOB(14)=24/32
      DTOB(14)=0.75
C   DTOB(15)=28/32
      DTOB(15)=0.875
C   DTOB(16)=32/32
      DTOB(16)=1.0

C
C   EL PROGRAMA INICIA SOLICITANDO LOS DATOS NECESARIOS PARA
CALCULAR LA
C   PRIMERA PARTE DEL PROCESO, A PARTIR DEL CUAL INICIARA EL
PROCESO DE
C   CALCULO PARA DIFERENTES PROFUNDIDADES
C
C   EL GASTO COMIENZA INICIANDO CON EL VALOR DE 150 (gal/min)
CONSIDERAN-
C   DO QUE ESTE VALOR ES MINIMO PARA EL INICIO DE UNA OPERACION
DE PERFO-
C   RACION
      Q=150

82 PRINT *, 'CUAL ES EL TIPO DE FORMACION PRESENTE ?'
PRINT *, ''
PRINT *, '1)ARENA'
PRINT *, '2)CALIZA'
PRINT *, '3)DOLOMIA'
PRINT *, '4)SAL'
PRINT *, '5)LUTITA ARENOSA'
PRINT *, '6)LUTITA DOLOMITICA'
PRINT *, ''
PRINT *, ''
READ(*,*)ROF

IF (ROF.EQ.1)THEN
ROF=22.08
ELSE IF (ROF.EQ.2)THEN
ROF=22.6
ELSE IF (ROF.EQ.3)THEN
ROF=23.99
ELSE IF (ROF.EQ.4)THEN
ROF=16.95
```

```
ELSE IF (ROF.EQ.5)THEN
ROF=20.016
ELSE IF (ROF.EQ.6)THEN
ROF=23.352
ELSE IF (ROF.GT.6.0)THEN
PRINT *,'SOLO ESCOGE DEL 1 AL 6'
GOTO 82
END IF
```

```
PRINT *,'PROPORCIONA LA DENSIDAD DEL LODO (lb/gal)'
PRINT *,''
READ(*,*)ROL
```

```
PRINT *,'PROPORCIONA EL DIAMETRO DE LA BARRENA (in)'
PRINT *,''
READ(*,*)Db
```

```
PRINT *,'PROPORCIONA EL NUMERO DE TOBERAS'
PRINT *,''
READ(*,*)N
```

```
C
C EL SIGIENTE DATO SE FIJA EN EL PROGRAMA YA QUE ES EL
PROPUESTO PARA
C EL MODELO. ALGUNOS AUTORES CONSIDERAN IGUALMENTE EL VALOR
DE 0.06
C PERO AUN ASI ESTA OPCION SE PUEDE ACTIVAR PARA PODER
VARIARLO
C
AK=0.06
```

```
C PRINT *,'PROPORCIONA EL ANGULO DE LA TOBERA'
C READ(*,*)OMEGA
OMEGA=15
```

```
C
C LAS CONDICIONES INICIALES PARA PROFUNDIDAD DE PENETRACION,
C VELOCIDAD DEL JET Y DIAMETRO DEL JET SON LAS SIGUIENTES Y SE
C RECOMIENDA NO CAMBIARLAS DEBIDO A QUE SE PARTE DE "CERO", ES
DECIR
C EL CALCULO INICIA CUANDO EL CHORRO SALE DE LA TOBERA
C
Z=0
Y(1)=1
Y(3)=1

ALFA=OMEGA/57.29577951
```

C  
 C IMPRESION DE LOS DATOS CON LOS QUE COMENZARA A CORRER EL PROGRAMA  
 C

PRINT \*, 'EL PROGRAMA IMPACTO DE ACUERDO CON LOS DATOS'  
 PRINT \*, 'PROPORCIONADOS INICIARA CON LAS SIGUIENTES  
 CONDICIONES'

PRINT \*, 'DE OPERACION:'  
 PRINT \*, 'GASTO DE INICIO DEL LODO =', Q, 'gal/min'  
 PRINT \*, 'DENSIDAD DEL LODO A LA ENTRADA =', ROL, 'lb/gal'  
 PRINT \*, 'NUMERO DE TOBERAS =', N  
 PRINT \*, 'DIAMETRO DE LA BARRENA =', Db, 'in'  
 PRINT \*, 'CONSTANTE DE FLUJO =', AK, 'adimensional'  
 PRINT \*, 'DENSIDAD DE LA FORMACION =', ROF, 'lb/gal'  
 PRINT \*, 'CONDICIONES INICIALES Z =', Z  
 PRINT \*, ' UM =', Y(1)  
 PRINT \*, ' DJ =', Y(3)  
 PRINT \*, '  
 Y(2)=ALFA  
 PAUSE ''

PRINT \*, 'CONSIDERANDO EL FLUJO COMO JET SE TIENEN LOS  
 RESULTADOS  
 \*SIGUIENTES:'

WRITE(6,50)  
 50 FORMAT(//,2X,'PENETRACION (ft)',3X,'VELOCIDAD (ft/seg)',3X,'DIAMET  
 \*RO (in)',6X,'ANGULO  $\theta$ ',5X,'AREA DEL JET (in<sup>2</sup>)',4X,'CAIDA PRESION J  
 \*ET (PSI)',5X,'FUERZA JET (lb)',5X,'POTENCIA JET (HP)',5X,'CRITERIO  
 \* DE LIMPIEZA(HP/in<sup>2</sup>)',5X,'DIAMETRO DE TOBERA (in)',5X,'GASTO (gpm)  
 \*)

DO L1=1,18  
 Q=150+L1\*50  
 DO L2=1,16  
 TNA=DTOB(L2)

At=(3.1416/4)\*((TNA\*\*2)\*N)  
 GAMA=((ROF+ROL)/2)/ROL  
 VNO=Q/(3.117\*At)  
 FRNUM=(VNO\*\*2)/((TNA\*0.083)\*32.2)

PRINT \*, 'AREA TOTAL DE LAS TOBERAS =', At, 'in<sup>2</sup>'  
 PRINT \*, 'ANGULO DE LAS TOBERAS =', ALFA, 'RAD'  
 PRINT \*, 'VELOCIDAD DEL LODO A LA ENTRADA=', VNO, 'ft/seg'  
 PRINT \*, 'RELACION DE DENSIDADES =', GAMA, 'adimensional'

---

```
PRINT *, 'NUMERO DE FROUD          =', FRNUM, 'adimensional'
```

```
I=0
```

```
40 I=I+1
```

```
ZEND=0.01*I
```

```
PRINT *, 'ZEND=', ZEND
```

```
TOL=1D-5
```

```
IDO=1
```

```
NEQ=3
```

```
PARAM(10)=1
```

```
CALL DIVPRK(IDO, NEQ, FCN, Z, ZEND, TOL, PARAM, Y)
```

```
IDO=3
```

```
CALL DIVPRK(IDO, NEQ, FCN, Z, ZEND, TOL, PARAM, Y)
```

```
ZPEN=ZEND
```

```
VNOO=Y(1)*VNO
```

```
FALA=Y(2)*57.295779
```

```
DJET=Y(3)*TNA
```

```
AJET=0.785*DJET**2
```

```
DPJ=((VNOO**2)*8.074D-4*ROL)/(0.95**2)
```

```
FJ=0.01823*0.95*Q*DSQRT(ROL*DPJ)
```

```
PJ=(Q*DPJ)/1714
```

```
PRINT *, 'ZEND=', ZEND
```

```
PRINT *, 'VNOO=', VNOO
```

```
PRINT *, 'FALA=', FALA
```

```
PRINT *, 'DJET=', DJET
```

```
PRINT *, 'AJET=', AJET
```

```
PRINT *, 'DPJ=', DPJ
```

```
PRINT *, 'FJ=', FJ
```

```
PRINT *, 'PJ=', PJ
```

```
APA=0.785*(Db**2)
```

```
CRL=PJ/APA
```

```
PRINT *, 'CRL=', CRL
```

```
IF (ZEND.GE.0.5) THEN
```

```
  GOTO 45
```

```
  ENDIF
```

```
IF (CRL.GE.2.5) THEN
```

```
  PRINT, 'CRL=', CRL
```

```
  IF (CRL.LE.4.5) THEN
```

```

PRINT, 'DFOB('L2,')=',DFOB(L2)
PRINT, 'Z=',ZPEN
PRINT, 'Q=',Q

WRITE(6,20)ZPEN,VNOO,DJET,FALA,AJET,DPJ,FJ,PJ,CRL,DFOB(L2),Q
20 FORMAT(5X,F8.4,10X,F13.7,8X,F9.7,6X,F11.7,9X,F8.5,12X,F16.9,7X,
&F16.8,6X,F14.8,15X,F10.6,17X,F14.8,14X,F8.3)

ENDIF
ENDIF

Z=ZEND
Y(1)=VNOO/VNO
Y(2)=FALA/57.295779
Y(3)=DJET/TNA

GOTO 40

45 ENDDO
PRINT, 'DFOB('L2,')=',DFOB(L2)
PRINT, 'L1=',L1
PRINT, 'Q=',Q
ENDDO

STOP
END

C
C SUBROUTINA QUE EVALUA EL SISTEMA DE ECUACIONES DIFERENCIALES
C LLAMADO POR DIVPRK
C
SUBROUTINE FCN(NEQ,Z,Y,YPRIME)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
DIMENSION Y(10),YPRIME(10)
COMMON Q,ROF,ROL,TNA,AK,OMEGA,At,VNO,GAMA,FRNUM,UM,ALFA

YPRIME(1)=(((Y(3)**2*(ROL-GAMA))/FRNUM)-((DCOS(Y(2))**2*4*AK*
1 ROL*Y(1)**2*Y(3))/(3.1416*DSIN(Y(2))))-((DSIN(Y(2))**4*
2 AK*ROL*Y(1)**2*Y(3))/3.1416))/((ROL*Y(3)**2*
3 Y(1)*DSIN(Y(2)))+(ROL*Y(3)**2*Y(1)*DCOS(Y(2))**2*
4 DSIN(Y(2))))

YPRIME(2)=(DCOS(Y(2))*4*AK*ROL*Y(1)**2*Y(3)/3.1416+DCOS(Y(2))*
1 Y(3)**2*(ROL-GAMA)/FRNUM/DSIN(Y(2))-DCOS(Y(2))*4*AK*
2 ROL*Y(1)**2*Y(3)/3.1416)/(ROL*Y(3)**2*Y(1)**2*
3 DSIN(Y(2))+ROL*Y(3)**2*Y(1)**2*DCOS(Y(2))/DSIN(Y(2)))

```

---

```
YPRIME(3)=2*AK*ROL*Y(3)/GAMA/3.1416-Y(3)*((Y(3)**2*(ROL-GAMA)/
1  FRNUM-(DCOS(Y(2))))**2*4*AK*ROL*Y(1)**2*Y(3)/3.1416/
2  DSIN(Y(2))-DSIN(Y(2))*4*AK*ROL*Y(1)**2*Y(3)/3.1416)/
3  (ROL*Y(3)**2*Y(1)*DSIN(Y(2))+ROL*Y(3)**2*Y(1)*
4  (DCOS(Y(2))))**2*DSIN(Y(2)))/2Y(1)
```

END