

16
2ej.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA

DETERMINACION DE GASTOS VOLUMETRICOS
AIRE-GAS MEDIANTE COMPUTADORAS
PERSONALES, DURANTE LA PERFORACION CON
AIRE DE POZOS GEOTERMICOS

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO PETROLERO
P R E S E N T A
ADOLFO GARCIA CRUZ



MEXICO, D. F.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

1997



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.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE INGENIERIA

TESIS:

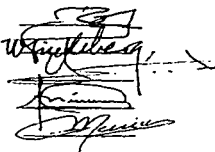
**DETERMINACION DE GASTOS VOLUMETRICOS AIRE-GAS MEDIANTE
COMPUTADORAS PERSONALES, DURANTE LA PERFORACION CON AIRE DE
POZOS GEOTERMICOS**

REALIZADA POR:

ADOLFO GARCIA CRUZ
NO. DE CTA. 8129511-5

JURADO DE EXAMEN PROFESIONAL

PRESIDENTE:	M.I. RAFAEL RODRIGUEZ NIETO
VOCAL:	ING. WALTER FRIEDEBERG MERZBACH
SECRETARIO:	DR. EDUARDO GONZALEZ PARTIDA
1ER. SUPLENTE	ING. NESTOR MARTINEZ ROMERO
2DO. SUPLENTE:	ING. SALVADOR MACIAS HERRERA



CD. UNIVERSITARIA A 2 DE SEPTIEMBRE DE 1996



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-019

SR. ADOLFO GARCIA CRUZ
Presente.

En atención a su solicitud, me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor Dr. Eduardo González Partida, y que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de ingeniero petrolero:

DETERMINACION DE GASTOS VOLUMETRICOS AIRE-GAS MEDIANTE COMPUTADORAS PERSONALES, DURANTE LA PERFORACION CON AIRE DE POZOS GEOTERMICOS

I	INTRODUCCION
II	ANALISIS BIBLIOGRAFICO
III	ESTRUCTURA DEL PROGRAMA
IV	VALIDACION DEL PROGRAMA
V	CONCLUSIONES
	REFERENCIAS

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.

A t e n t a m e n t o
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, 5 de marzo de 1993.
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS*EGL*ggT*





UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-I-020

SR. ADOLFO GARCIA CRUZ
Presente.

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

DETERMINACION DE GASTOS VOLUMETRICOS AIRE-GAS MEDIANTE COMPUTADORAS PERSONALES, DURANTE LA PERFORACION CON AIRE DE POZOS GEOTERMICOS

I	INTRODUCCION
II	ANALISIS BIBLIOGRAFICO
III	ESTRUCTURA DEL PROGRAMA
IV	VALIDACION DEL PROGRAMA
V	CONCLUSIONES
	REFERENCIAS

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 sustantar examen profesional.

A t e n t a m e n t e
"POR MI REY HABLARA EL ESPIRITU"
Ciudad Universitaria, 5 de marzo de 1993.
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS•EGLM•ggt•

JA

ESTE TRABAJO LO DEDICO CON MUCHO CARIÑO A:

Mis padres:

Sra. Margarita Cruz López

Sr. Onesimo García Pérez

Quienes con su amor y apoyo me ayudaron a realizar un gran sueño.

A mi familia:

Les agradezco a todos el apoyo que siempre me brindaron.

C O N T E N I D O

Resumen

CAPITULO I INTRODUCCION

I.1	Definición de geotermia	1
I.2	Problemas en la perforación de pozos geotérmicos	2
I.3	Aspecto general en la perforación geotérmica	3
I.4	Tipos de pozos geotérmicos	4
I.5	Equipo para perforación de pozos geotérmicos	5
I.6	Función y diseño de tuberías revestidoras	9
I.7	Fluidos de perforación en pozos geotérmicos	11

CAPITULO II ANALISIS BIBLIOGRAFICO

II.1	Introducción	17
II.2	Ventajas y desventajas en la perforación con aire	20
II.3	Lodo contra aire de perforación	21
II.4	Velocidad de penetración	28
II.5	Funcionamiento de las barrenas	29
II.6	Detección de zonas de baja presión	29
II.7	Perforación a través de zonas de pérdida	30
II.8	Costos de material de lodo	30
II.9	Daño a la formación minimizado	30
II.10	Clasificación de las técnicas de perforación con aire	31
II.11	Medición del volumen de aire	39
II.12	Operaciones y equipo en la perforación con aire y gas	40

CAPITULO III
DESARROLLO DEL PROGRAMA

III.1 Procedimiento de cálculo para determinar el gasto volumétrico en la perforación con aire/gas	54
III.2 Operación de perforación con lodo	55
III.3 Operación de perforación con aire/gas	58
III.4 Cálculo del gasto volumétrico de aire/gas	60
III.5 Cálculo de la presión de aire y gas	72
III.6 Desarrollo del programa	82

CAPITULO IV
VALIDACION DEL PROGRAMA

IV.1 Análisis de resultados	88
---------------------------------------	----

CAPITULO V
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1 Conclusiones	94
V.2 Recomendaciones	95

Apéndice
Nomenclatura
Referencias
Bibliografía

RESUMEN

En el Capítulo I, se da una breve descripción de lo que es la geotermia, los equipos utilizados para perforar los pozos geotérmicos y las diferencias con respecto a los equipos utilizados para perforar los pozos petroleros. Además se mencionan los problemas que se presentan durante la perforación geotérmica y las diferentes tuberías de ademe que se usan.

En el Capítulo II se presentan los resultados de una recopilación de trabajos sobre el tema, y el análisis bibliográfico de las diferentes técnicas que se aplican hasta la fecha, para perforar con aire o gas, pozos geotérmicos; así como los problemas que se presentan al usar dichas técnicas. También se hace referencia de los diferentes equipos adicionales que se requieren para perforar con aire.

En el Capítulo III se presenta la descripción paso a paso, del método más usado para determinar el gasto volumétrico de aire que se requiere para una operación de perforación normal con aire. Además se describe la implantación de un programa de cómputo para calcular la presión de inyección y el diámetro de toberas que se requieren en la barrena.

En el Capítulo IV, se comparan los resultados presentados en el problema "ejemplo" del capítulo IV del "AIR DRILLING AND GAS MANUAL" (CAP. IV) y los del programa realizado "PERFAIRE".

En el Capítulo V, se presentan las conclusiones y recomendaciones de las diferentes técnicas que se incluyen, así como las del programa "PERFAIRE".

CAPITULO I

INTRODUCCION

I.1 DEFINICION DE GEOTERMIA

En general se puede decir que el término geotermia se refiere al calor natural existente en el interior de la tierra; independientemente de los factores que intervienen en las manifestaciones superficiales. Este calor fluye por conducción directa a través de las rocas o bien es transportado por fluidos que ascienden por fracturas hasta zonas porosas y permeables no muy profundas (1000 - 3000 m), para constituir los yacimientos geotérmicos.

Sin embargo, es de uso común que al hablar de geotermia se refiera a la utilización de dicho calor interno principalmente para generar electricidad y, ocasionalmente, para aprovechar la energía térmica, con el fin de satisfacer diversas necesidades del hombre.

Más específicamente, el término geotermia se aplica a la energía del agua caliente o vapor del subsuelo y a los procesos que se realizan para su obtención, conducción y utilización en la generación de electricidad.

"La energía geotérmica está asociada a los procesos volcánicos y tectónicos terrestres. La teoría más aceptada sobre su ocurrencia establece que masas magmáticas, que no afloran a la superficie y que quedan atrapadas a pocos kilómetros de la misma, liberan su energía al medio circundante (roca y agua), en donde a través de miles de años y mediante procesos convectivos se forman grandes yacimientos de agua caliente o vapor. Este proceso origina gradientes térmicos de hasta 200 °C por kilómetro, siendo el gradiente normal de 30 °C por kilómetro de profundidad" [Arellano 1988].

Para que un yacimiento geotérmico sea económicamente explotable requiere de cuatro características principales:

- a) Una fuente de calor
- b) Un acuífero
- c) Una capa sello
- d) Estar situado a una profundidad económica adecuada; considerándose actualmente como profundidad máxima económica los 3000 m.

La geotermia es una energía que presenta buenas perspectivas para el futuro, ya que es económicamente competitiva en comparación con otras fuentes de energía; presenta menos riesgos estratégicos, tiene una gran cantidad de usos no eléctricos (que se pueden comercializar en México) y se encuentra ampliamente distribuida en el mundo.

En general se puede decir que la geotermia es una energía que siempre ha existido y no ha sido aprovechada ampliamente; a principios de este siglo se inició su aprovechamiento a nivel comercial, acelerándose su desarrollo hace tres décadas. Actualmente, con los incrementos en los precios de los combustibles tradicionales (carbón, petróleo etc.), se le ha dado una importancia relevante debido a que representa una alternativa económica, para los países que carecen de los combustibles anteriores y cuentan con este recurso energético. Hoy en día existe un gran interés de muchos países por desarrollar campos geotérmicos, especialmente aquellos que circundan el Océano Pacífico, ya que en éstos existe una gran actividad geotérmica. Además este recurso no presenta riesgos estratégicos ni tampoco peligros de contaminación.

I.2 PROBLEMAS EN LA PERFORACION DE POZOS GEOTERMICOS

En la actualidad la energía geotérmica ha tomado gran importancia a nivel nacional, como complemento de los combustibles fósiles, la energía nuclear y otras fuentes utilizadas para

producir electricidad.

Es importante mencionar que la perforación de pozos ha tenido varios problemas técnicos muy complejos, a los que los ingenieros en perforación se han enfrentado. Uno de los problemas más fuertes que se tienen en la actualidad es la pérdida de circulación en la zona productora, ocasionando que los fluidos de perforación entren a las formaciones y debido a las altas temperaturas existentes, se hornen los sólidos (recortes y aditivos) de lodo, dañando la formación y ocasionando baja producción de vapor en los pozos.

La pérdida de circulación durante la perforación es uno de los problemas más complejos y costosos, llegando en ocasiones a ser necesario desviar el pozo y hasta perderlo. En este trabajo se estudia el aire como fluido de perforación en dichas zonas, para contrarrestar los problemas mencionados. Este fluido tiene ventajas y desventajas, las cuales se discutirán más adelante.

I.3 ASPECTO GENERAL EN LA PERFORACION GEOTERMICA

La tecnología empleada en la perforación de pozos geotérmicos se basa en la desarrollada por la industria petrolera; sin embargo, al enfrentar condiciones críticas como son los elevados gradientes de temperatura y el intenso fracturamiento de las formaciones en los diferentes campos geotérmicos del mundo, se ha desarrollado una tecnología especial que está en constante mejora e innovación y que presenta variantes especiales como:

- a) Torre de enfriamiento para el lodo, debido a las altas temperaturas del medio geotérmico.
- b) Fluidos de perforación y cementos especiales para soportar las altas temperaturas y solucionar más apropiadamente los problemas surgidos durante la perforación geotérmica.
- c) Tuberías de ademe que tienen una composición metalúrgica especial, para las condiciones particulares de cada campo

geotérmico.

- d) Registros resistentes a la temperatura (200 - 350 °C), para auxiliar en la elección correcta de la zona productora en el pozo.

Estas diferencias aunadas, a las técnicas a seguir de acuerdo con la gravedad e incidencia de los problemas presentados, implican un mayor costo en la perforación geotérmica. Por esto se requiere que en la construcción de pozos geotérmicos se tenga una planeación especial en los programas de perforación y terminación, tratando de obtener con ésto una vida útil en el pozo de por lo menos 10 años [Santollo Gutiérrez 1988].

I.4 TIPOS DE POZOS GEOTERMICOS

El programa de perforación de pozos geotérmicos expone criterios aplicados al diseño de tuberías revestidoras, tipo de sartas de perforación, equipo para control en superficie y la distribución de tiempo por actividad durante la construcción del pozo.

Hay tres tipos de pozos geotérmicos: **Exploratorio de gradiente, desarrollo e inyector.**

Exploratorio de gradiente.- Verifica con la menor inversión económica, la existencia de un intervalo productor de fluidos geotérmicos, con el fin de establecer un programa de perforación que permita evaluar el potencial de una zona.

Desarrollo.- Permite el conducto adecuado para la extracción de energía geotérmica, garantizando una vida útil y seguridad en la instalación.

Inyector.- Es aquél usado para inyectar agua separada del vapor y drenes de las unidades generadoras a una zona del yacimiento para recargarlo hidráulicamente.

La localización de pozos se establece con los estudios realizados en la etapa exploratoria, que incluyen técnicas geológicas, geoquímicas, geoeléctricas, magnetométricas, gravimétricas, sismológicas y la información obtenida en pozos de gradiente.

1.5 EQUIPO PARA PERFORACION DE POZOS GEOTERMICOS

Los equipos usados en la perforación geotérmica son similares a los usados en la industria petrolera. Pero a diferencia de aquellos, éstos cuentan con un sistema de enfriamiento para bajar la temperatura de los lodos y, en caso de perforación con aire, se tiene un sistema de compresores para comprimir el aire que se inyecta al pozo.

La capacidad de estos equipos depende de la profundidad a perforar y se requiere de un análisis de los programas de perforación y colocación de tuberías revestidoras, el tipo de sarta que se utilizará, diámetros de agujero, necesidades de bombeo, formaciones por atravesar, costo del equipo, velocidad de penetración y seguridad en la operación.

SISTEMAS PRINCIPALES DEL EQUIPO DE PERFORACION

- a) **Sistema de soporte o levante;** esta formado por: El malacate, el mástil, la corona, el block y la polea viajera (Figs. I.1 y I.2).
- b) **Sistema rotatorio;** lo forman: La mesa rotatoria, la sarta de perforación (unión giratoria, la flecha, la tubería de perforación y los lastrabarreras), y la barrena (Fig. I.3).
- c) **Sistema de circulación;** se compone de: Fluido de perforación, presas para preparación, asentamiento y succión del fluido de perforación, las bombas de lodo, etc. (Fig. I.4).
- d) **Sistema de potencia;** se forma de: Generadores de corriente eléctrica con combustión interna y sistemas de transmisión de energía eléctrica y mecánica.

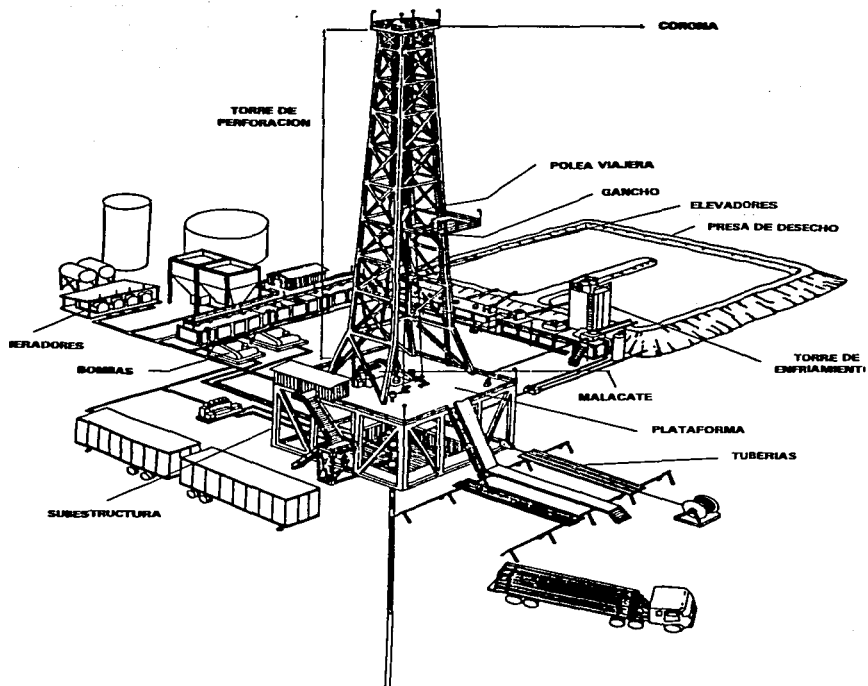


FIG. I.1 EQUIPO DE PERFORACION Y SUS COMPONENTES

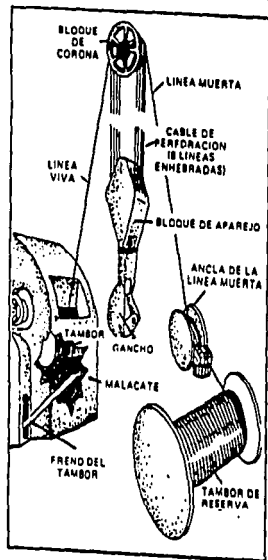


FIG. I.2 UN SISTEMA DE ELEVACION

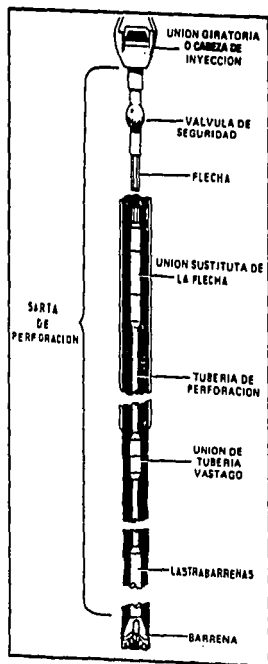


FIG. I.3 UN SISTEMA ROTATORIO

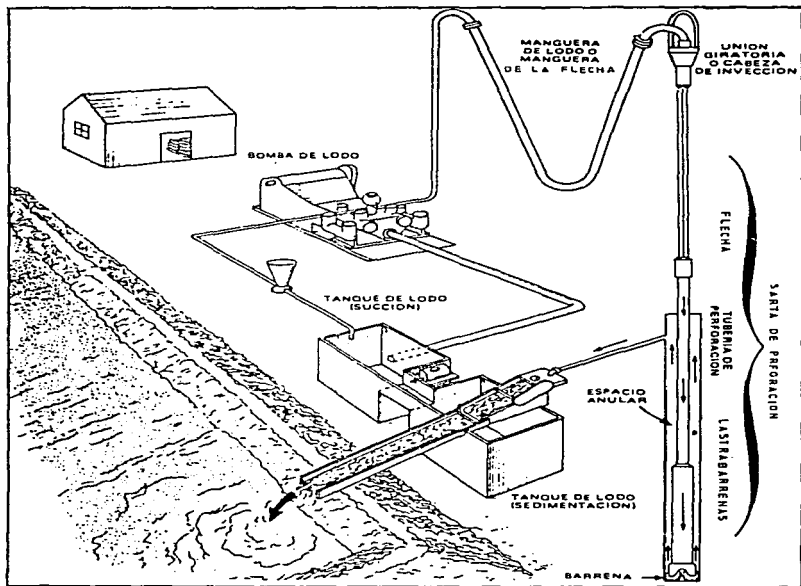


FIG. 1. 4 SISTEMA DE CIRCULACION DE LODO

e) **Equipo auxiliar;** lo comprenden: el sistema de preventores de reventones y las herramientas de piso.

I.6 FUNCION Y DISEÑO DE TUBERIAS REVESTIDAS

La tubería de revestimiento (o ademe), representa la tercera parte o más del costo de perforación del pozo y la selección adecuada de la misma permite obtener importantes ahorros.

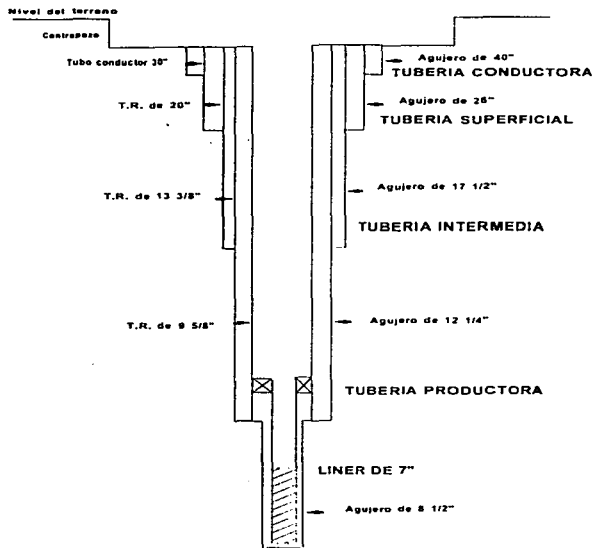
Las funciones del ademe son:

- a) Soportar las paredes del pozo y evitar los derrumbes de formaciones no consolidadas.
- b) Proporcionar un agujero de diámetro conocido, a través del cual, se puedan efectuar las operaciones subsecuentes de perforación, terminación y producción.
- c) Proporcionar un medio para controlar las presiones internas (del fluido geotérmico) y externas (de los fluidos de las formaciones) en el pozo.
- d) Proporcionar un soporte adecuado para las válvulas y conexiones en la superficie, necesarias para el control y manejo de los fluidos producidos.
- e) Evitar flujos de una formación a otra y, permitir la producción desde una zona específica.

De acuerdo con lo anterior la tubería de revestimiento se clasifica en:

Tubería conductora .- Su objetivo primordial es: evitar la erosión e inundación del área en la base del equipo, además, proporcionar un conducto para elevar el fluido de perforación hasta la superficie. También se usa para evitar fricción en las sartas siguientes.

FIG. 1.5 DIAGRAMA DE TUBERIAS REVESTIDAS



Tubería superficial.- Esta sección, se introduce para proteger el pozo de actividades internas o, fallas que se presentan generalmente cerca de la superficie. También protege al pozo de las filtraciones de agua de los mantos acuíferos y para soportar las formaciones no consolidadas.

Tubería intermedia .- Su objetivo es aislar zonas con pérdida de circulación y, proporcionar el anclaje del árbol de válvulas.

Tubería productora .- Con esta tubería se alcanza la zona productora, se solucionan problemas tales como zonas con tendencia a la fractura, se aísla la zona de producción evitando flujos de otras formaciones y es el conducto por el cual se tendrá el flujo de fluidos desde el intervalo productor.

Por lo general se utiliza tubería corta "LINER", la cual va colgada de la productora, atraviesa el intervalo productor, y tiene ranuras en su parte inferior para permitir el flujo.

El diseño de los ademes en los pozos geotérmicos es complejo debido a los esfuerzos originados por la temperatura y la corrosión por fluidos. Los factores de diseño deberán contemplar esfuerzos mecánicos, térmicos, inducidos por la formación y por el tipo de fluido.

1.7 FLUIDOS DE PERFORACION EN POZOS GEOTERMICOS

La perforación geotérmica, presenta una fuerte problemática debido a las severas condiciones a las que se enfrenta. Las medidas adoptadas para solucionarlas se basan en el establecimiento de un control adecuado de los lodos utilizados.

La tecnología de perforación, empleada en pozos geotérmicos es similar a la usada en pozos petroleros, aunque las condiciones a las que se enfrenta son más críticas, debido a la presencia de altas temperaturas (mayores de 250°C) a profundidades someras, pérdidas totales del lodo y contacto con fluidos de alta

salinidad.

Es conveniente mencionar que el costo del sistema de lodos representa entre el 6% y el 8% del costo total del pozo, mientras que los problemas relacionados con éste, como la estabilidad de las paredes, pegadura de tubería, pesca y pérdidas de circulación, tienen un efecto mayor en el tiempo total para la perforación, y afectan directamente el costo total. Por eso se le debe dar gran importancia, al diseño adecuado de los fluidos y tratar de que sus propiedades sean las mejores.

De acuerdo con la definición del API, el fluido de perforación se define como: Es un fluido circulante usado en la perforación rotatoria, para ejecutar alguna o todas las operaciones de perforación requeridas.

Se necesita que un fluido de perforación, proporcione el flujo y la potencia hidráulica necesaria para limpiar el agujero y la barrena, a un peso y velocidad de rotación dado. De aquí que este fluido óptimo debe cumplir las siguientes funciones.

FUNCIONES DE UN FLUIDO DE PERFORACION

- a) Transporte y eliminación de recortes desde el fondo hasta la superficie, lo cual repercute directamente en la velocidad de penetración y la vida útil de la barrena.
- b) Mantener el control de las presiones en el pozo, mediante la carga hidrostática de la columna de lodo, evitando la entrada de los fluidos que existen en la formación.
- c) Enfriar, lubricar y proporcionar potencia hidráulica a la sarta de perforación y a la barrena respectivamente. Esta función es auxiliada incorporando al sistema de circulación, una torre de enfriamiento, para eliminar el calor contenido en el lodo al salir del pozo.

- d) Estabilizar las paredes del pozo por medio de un enjarre apropiado, evitando la pérdida de fluido hacia la formación.
- e) Facilitar la introducción y el transporte de los registros, para obtener información precisa de las formaciones penetradas.
- f) Brindar protección contra la corrosión y erosión de la sarta; que es provocada por la presencia de gases como H_2S , O_2 y CO_2 .
- g) Proporcionar información, a partir de los análisis químicos del mismo, obteniéndose perfiles químicos de la formación.

PROPIEDADES DEL FLUIDO DE CONTROL

La mayoría de los fluidos, empleados en la perforación de pozos geotérmicos son lodos base-agua, es decir emplean agua como fase continua para que ciertos materiales sólidos se mantengan en suspensión y otros en disolución. Estos materiales comprenden los sólidos comerciales, las lutitas, las arcillas hidratables de la formación, los aditivos químicos y los sólidos inertes químicamente como la arena, dolomía y barita. Los efectos que éstos producen en el lodo, son determinados cuantitativamente sobre sus propiedades reológicas, de filtración y químicas. Los parámetros reológicos del lodo son:

- a) La viscosidad plástica, que indica el grado de actividad mecánica entre sólido-sólido y sólido-líquido, proporciona cualitativamente la concentración de éstos y su estado de asociación.
- b) El punto de cedencia, es la fuerza que contribuye a sostener el flujo una vez que el fluido está en movimiento, se debe a las fuerzas de atracción entre las partículas de arcillas reactivas.
- c) La resistencia del gel, es la fuerza necesaria para iniciar el flujo a partir de una condición estacionaria, se debe a las

fuerzas de repulsión-atracción entre las partículas arcillosas.

Estas propiedades son medidas, empleando viscosímetros rotacionales recomendados por la API. Los datos obtenidos, son lo suficientemente prácticos y precisos para predecir el comportamiento de flujo de lodo, empleando el modelo plástico de Bingham, que es el más popular entre los ingenieros de campo.

PRINCIPALES PROBLEMAS QUE SE PRESENTAN EN LA PERFORACION DE POZOS GEOTERMICOS

Típicamente, los principales problemas que se tienen durante la perforación son:

- a) Pérdidas de circulación.
- b) Gelación del lodo por temperatura.
- c) Inestabilidad de las paredes del agujero.
- d) Pegaduras de tubería.

Sólo se ahondará un poco en el inciso (a) debido a que en este trabajo se trata de dar alguna solución a este problema.

Pérdida de circulación .- Es el problema más serio y costoso de la perforación geotérmica, debido al elevado consumo de materiales para el lodo, el tiempo por renta de equipo parado y al número de pozos abandonados. Este problema consiste en la pérdida de lodo hacia la formación y se manifiesta como una disminución gradual del nivel en las presas o como pérdida total del lodo.

Comúnmente, este fenómeno se presenta en formaciones poco consolidadas o de alta permeabilidad, fracturas naturales, fracturas horizontales inducidas, cavernas (cavidades y canales) y fracturas verticales naturales. Las Zonas de Pérdida se clasifican en dos grupos: verticales y horizontales.

El control típico, para solucionar la pérdida de circulación es taponar la fractura sin cambiar la sarta, siendo ésta una

medida adecuada porque se optimiza en tiempo y costo. Sin embargo, es importante señalar, que tal procedimiento se realiza sin establecer una metodología definida, para solucionar el problema.

Un procedimiento adecuado para combatir este problema, es la identificación de las causas que la originan, de manera que se puedan implantar medidas o acciones correctas para su solución. Para realizar esto, es indiscutible que sin el conocimiento de la porosidad o la geometría de la fractura, la adición de materiales obturantes debe ser realizada de acuerdo a las siguientes consideraciones:

- a) Al presentarse el problema pérdida parcial, la acción inmediata es agregar el material obturante más pequeño disponible, si no se obtiene éxito, progresivamente agregar material más grande. Sin embargo, es costumbre que primero se utilicen los materiales más grandes, con la esperanza de solucionar el problema rápidamente, lo cual nos puede llevar a problemas mayores. La ventaja de utilizar los materiales por tamaños, desde el más pequeño hasta el más grande, es que se define el problema y la solución para operaciones posteriores.
- b) Evaluación de la capacidad de sellamiento, de los materiales disponibles localmente, de acuerdo con la prueba estipulada en las normas API o pruebas a nivel piloto.

Otra técnica es usar fluidos de baja densidad, los cuales se ven en el próximo capítulo.

TIPOS DE FLUIDOS DE PERFORACION

Todos los fluidos de perforación pueden ser subdivididos en dos grandes grupos: Densificados y no densificados.

De acuerdo a la clasificación de los fluidos de perforación en base a su peso específico, tenemos que cualquier fluido de perforación cuyo peso específico sea de 80 lb/pie³ o menor, puede

ser considerado como no densificado, debido a que no requiere del uso de materiales densificantes, como es el caso de la barita. Aquellos fluidos que tengan un peso específico mayor de 80 lb/pie³ (1.28 gr/cm³) pueden ser clasificados como densificados.

Dentro de los fluidos de perforación no densificados, es posible incluir los fluidos de perforación libres de partículas sólidas, compuestos principalmente de pequeñas concentraciones de bentonita y/o arcillas con agua congénita, agua y polímeros; también se pueden considerar las emulsiones de agua en aceite (directas) o de aceite en agua (inversas).

Otros fluidos de perforación no densificados que alcanzan máximas velocidades de penetración son el aire, el gas, los lodos aireados y las espumas rígidas, de estos cuatro últimos se va a ocupar el próximo capítulo de esta tesis.

CAPITULO II

ANALISIS BIBLIOGRAFICO

II.1 INTRODUCCION

El éxito en la perforación de pozos geotérmicos, depende de la selección apropiada del fluido de perforación. Usando un sistema de lodo convencional, ocurren frecuentemente pérdidas de circulación, daños a la formación y elevados costos de lodo. La pérdida de circulación es controlada generalmente mediante dos técnicas:

- 1) Sellar la formación de modo que el fluido de perforación no pueda pasar a través de esta.
- 2) Reducir la presión del fluido en la cara del pozo de modo que no sobrepase la presión en la formación.

La pérdida de fluido y su consecuente costo, es solamente uno de los efectos perjudiciales experimentados, cuando hay pérdida de circulación. La pérdida de tiempo en la perforación, el taponamiento de formaciones potencialmente productoras, pegaduras de la tubería de perforación, reventones, excesiva entrada de agua y excesivos derrumbes de formaciones, son otros efectos que hacen del control y prevención de las pérdidas de circulación, uno de los más desafiantes problemas de la industria de la perforación geotérmica. No es raro abandonar pozos debido al fracaso de intentar recobrar la circulación.

Cuando se perfora con lodo y ocurre pérdida de circulación, es una práctica común reponer el material perdido (ver secc. I.7), taponar los huecos o inyectar cemento en esos huecos. Esta técnica es efectiva en la perforación de formaciones con aceite y gas, sin embargo es frecuentemente ineficiente en la perforación geotérmica, debido a que los huecos naturales son grandes.

Comúnmente se usa cemento para combatir las pérdidas de circulación en pozos geotérmicos, sin embargo, este método resulta muy costoso y se pierde mucho tiempo.

Las técnicas de perforación con aire, abaten la presión del fluido en el fondo del pozo, evitando el desarrollo de estos problemas comunes y pueden mejorar la producción de los yacimientos geotérmicos.

La perforación con aire se refiere al uso de este fluido en el sistema de circulación. El propósito de utilizar un método de perforación con aire es perforar formaciones de baja presión.

Durante los últimos 21 años, las técnicas de perforación con aire han sido aplicadas mundialmente y han resultado exitosas para obtener la energía geotérmica.

Aunque los intentos iniciales de perforación con aire y gas siempre fueron fallidos, se obtuvieron significativos incrementos en la velocidad de penetración y vida de la barrena. Desde esos primeros intentos, se ha expandido el desarrollo de técnicas de perforación con aire y gas. Estas son ampliamente aceptadas en la actualidad, como un método para reducir el tiempo de perforación y los costos en muchos pozos. Junto con los ahorros de tiempo y por lo tanto de dinero, se obtienen otras ventajas tales como la inmediata y continua detección de la zona productora, mínimo daño a zonas productoras sensibles al líquido, mejor control de pérdida de circulación y núcleos más limpios. La perforación con fluidos aireados (aire seco o gas, niebla, espuma y lodo aireado) es especialmente ventajosa en rocas altamente fracturadas y cavernosas, como los carbonatos con permeabilidad secundaria. La pérdida de fluidos de perforación, usando lodo convencional es no solamente muy costosa de corregir sino que se ocasiona un taponamiento de la formación productora.

La falta de conocimiento más que la inexperiencia, es

frecuentemente, la razón principal para no aceptar la perforación con fluidos aireados. La perforación con aire involucra consideraciones especiales en el uso de equipo y las técnicas de perforación que son encontrados con otro medio perforador. Por ejemplo, el aire, a diferencia del lodo se comprime rápidamente. Así, en la perforación con fluidos aireados se encuentra el fenómeno de flujo multifásico, incluyendo el flujo concurrente de gases, líquidos y sólidos libres en tuberías. Esto requiere de un desarrollo de ingeniería más sofisticado, para alcanzar los resultados deseables.

Uno de los principales objetivos, cuando usamos fluidos de perforación aireados, es incrementar la velocidad de penetración al bajar la presión diferencial. El efecto de la presión ejercida por la columna de fluido, sobre la velocidad de penetración se muestra en la Figura II.1. El rompimiento o corte real de la roca, es hecho al someterla a cargas compresivas mayores a su último (máximo) esfuerzo.

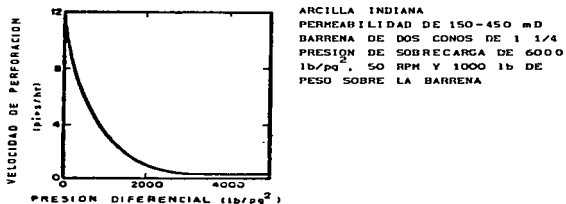


FIG. II.1 EFECTO DE LA PRESION DIFERENCIAL SOBRE LA VELOCIDAD DE PERFORACION

Conforme la barrena da vueltas causa que la roca falle o se fracture bajo estas cargas dinámicas. Los trozos o fragmentos literalmente estallan en el fondo y son arrastrados dentro de la

corriente de aire y llevados a la superficie. Esta explosión es un resultado de la máxima presión diferencial dentro del pozo. Los fragmentos que son removidos del fondo, varían en su tamaño desde finos a gruesos. Conforme dichas partículas empiezan subir por el espacio anular, los tamaños grandes son molidos y pulverizados por los lastrararreas y por los choques de unos con otros. Estas acciones reducen el tamaño de los recortes perforados, hasta las pequeñas partículas parecidas al polvo que se ven en la superficie.

ALGUNAS APLICACIONES DE LA PERFORACION CON AIRE

Las técnicas de perforación con aire y gas son usadas principalmente, para perforar pozos de reposición (pozos productores) donde la geología del pozo es bien conocida y las formaciones productoras potenciales son de muy baja presión.

Las técnicas de perforación con aire y gas también han sido usadas para perforar pozos descontrolados. Esta es un aplicación limitada, excepto para problemas con formaciones muy especiales o riesgosas.

II.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS EN LA PERFORACION CON AIRE

Las técnicas de perforación con aire ofrecen las siguientes ventajas y desventajas, cuando se comparan con el uso de sistemas de lodo convencional.

VENTAJAS

- * Se minimiza el daño a la formación potencialmente productora.
- * Los problemas de pérdida de circulación son virtualmente eliminados.
- * Se consigue mayor capacidad para analizar las zonas potencialmente productoras.
- * La velocidad de penetración es mayor. A mayor profundidad en el pozo se obtiene la mejor velocidad de penetración

relativa.

- * Las barrenas duran más tiempo.
- * La habilidad para tratar formaciones duras es mucho mayor.
- * Bajo condiciones normales de perforación, los pozos son perforados en forma más recta debido al menor peso sobre la barrena.
- * Las condiciones de operación son más limpias.
- * Los costos totales, para las operaciones de perforación, son menores debido a que éstas toman menor tiempo que con el lodo de perforación.

DESVENTAJAS

- * El control de la presión en la formación es mínimo y por eso su aplicación es limitada a regiones geológicas donde las presiones de poro del yacimiento son bajas.
- * La perforación es limitada a regiones geológicas donde las formaciones rocosas son más duras y compactas por que hay pequeña o no hay presión del fluido para soportar las paredes del pozo y prevenir los derrumbes.
- * Hay una habilidad limitada para manejar volúmenes significativos de agua que entra de formaciones productoras de agua, hacia el espacio anular.
- * El calibre (diámetro exterior), de la barrena puede ser reducido apreciablemente durante la perforación.
- * La tubería de perforación puede experimentar desgaste anormalmente alto, debido a las características de chorro de arena en la corriente de flujo anular.
- * Hay poco o no existe el efecto de amortiguamiento, que resulta del fluido en el pozo durante los contratiempos en el manejo de la tubería de perforación.
- * Hay gran peligro de incendio en el fondo.

II.3 LODO CONTRA AIRE DE PERFORACION

En general, las funciones básicas del lodo y aire como fluidos de perforación siguen siendo las mismas; por ejemplo,

proveer un fluido que enfríe la interfase barrena-roca, limpiar el fondo del agujero y acarrear los recortes hasta la superficie. Sin embargo, cada tipo de fluido cumple estas funciones con alguna diferencia. Para el operador experimentado en perforación con lodo, los procesos y características del aire le parecerán inusuales cuando las compare con una situación de perforación con lodo.

Para ilustrar estas diferencias, se presenta un ejemplo de operación de perforación con lodo y se compara con una operación similar de perforación con aire, basada en la siguiente situación general (ver Figura II.2):

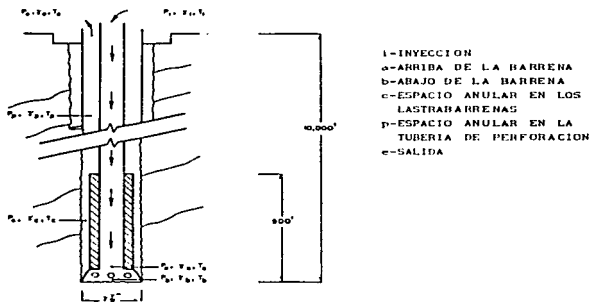


FIG. II.2 TÍPICA OPERACION DE PERFORACION CON AIRE O LODO

Profundidad: 10000 pies

Barrena (equivalente al diámetro interior del agujero) de 7^{7/8} pg.
 Longitud de la Tubería de Perforación de 4^{1/2} pg. (3.8 pg. D.I.):

9 500 pies

Longitud de Lastrabarrenas de $6\frac{3}{4}$ pg. X $2\frac{13}{16}$ pg.: 500 pies

Gradiente Térmico de 0.01 °F/pie

Velocidad de Penetración 60 pie/h

Superficie Localizada a Nivel del Mar

Datos del lodo

$Q_i = 308$ (gal/min)

$\rho_i = 10$ (lb/gal)

Datos de aire

$Q_a = 2\ 400$ (pies³/min a C.S.)

PERFORACION CON LODO

La Figura II.3 muestra la variación de la presión promedio (bomba y carga hidrostática) en el sistema de circulación, como una función de la profundidad. En la superficie, antes de entrar a la sarta de perforación, la presión real de la bomba es aproximadamente de 1,400 lb/pg² (posición i). Conforme el flujo desciende dentro de la sarta, las pérdidas por fricción disminuyen la presión, pero la carga hidrostática se incrementa, ésta sobrepasa cualquier pérdida por fricción. En los lastrabarrenas las pérdidas de presión se incrementan. Hay una gran pérdida de presión (por ejemplo, 580 lb/pg²) a través de la barrena (posiciones * y v), y el flujo regresa a través del espacio anular hasta que alcanza la superficie y la presión del fluido "cero" (posición inicial «).

Si se toma un gradiente geotérmico de 1 °F/100 pies de profundidad, entonces usando una temperatura de superficie de 60 °F, el fondo del pozo tendrá una temperatura de 160 °F. La Figura II.4 muestra una gráfica idealizada de la temperatura del lodo de perforación, como una función de la profundidad. Aquí se supone que el lodo de perforación saldrá del sistema con una temperatura que es un promedio de la temperatura de inyección (estimada en 60 °F) y la temperatura en el fondo del pozo (cerca de 110 °F).

También en la Figura II.4 hay un diagrama del peso específico del fluido. Puesto que el fluido es incompresible, el peso específico del lodo de 10 lb/gal no cambiará a través del sistema.

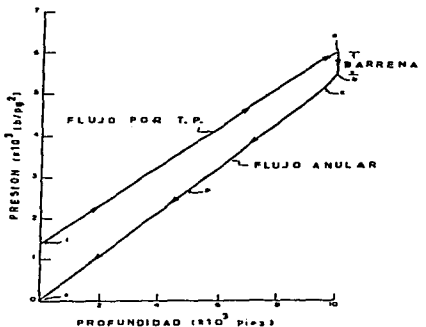


FIG. II.3 PRESION CONTRA PROFUNDIDAD (PERFORACION CON LODO)

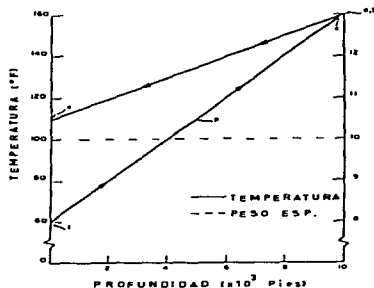


FIG. II.4 PESO ESPECIFICO Y TEMPERATURA CONTRA PROFUNDIDAD (PERFORACION CON LODO)

PERFORACION CON AIRE

La operación de perforación con aire, contrastará dramáticamente con la anterior operación de perforación con lodo. En la operación con aire, se supone que el sistema de compresor y amplificador, han alimentado aire comprimido a la sarta de perforación, con una presión de 418.4 lb/pg² absolutas (403.7 lb/pg² manométricas) y 160°F (posición i en la Figura II.6). Los orificios (toberas) de la barrena están calibrados (en diámetro) para permitir gasto o velocidad de flujo (lb/seg) a través de la barrena, la cual requiere de una presión de aproximadamente 622.2

lb/pg² absolutas directamente arriba de la barrena (ver figura II.5). En este punto hay una gran variación en la presión del aire dentro de la sarta de perforación por que la ganancia hidrostática en presión, contrarresta las pérdidas debido a la fricción.

Conforme el aire comprimido pasa a través de los orificios de la barrena (toberas), el aire se expande a la salida de las toberas proporcionando muy altas velocidades (por ejemplo, flujo supersónico y bajas temperaturas). Esta expansión ocurre por que la presión normal en el fondo del pozo es bastante baja, en el orden de 118 lb/pg² absolutas. La Figura II.6 muestra una aguda

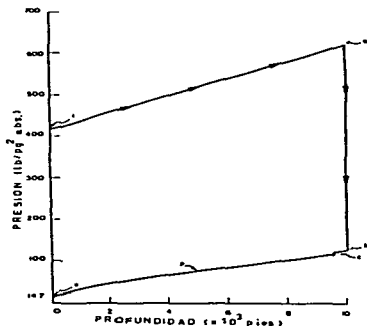


FIG. II.5 PRESION CONTRA PROFUNDIDAD (PERFORACION CON AIRE)

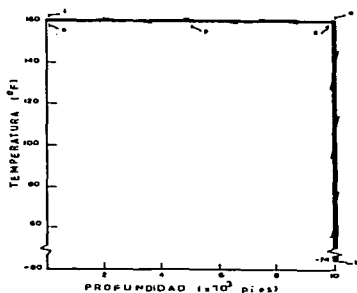


FIG. II.6 TEMPERATURA CONTRA PROFUNDIDAD (PERFORACION CON AIRE)

reducción en la temperatura del aire conforme este pasa a través de la barrena.

La alta energía cinética en el flujo de las toberas es

disipada como turbulencia en el fondo del pozo, y la energía cinética de los chorros cambia a energía interna, conforme el aire pierde velocidad y sube por el espacio anular. El flujo de aire regresa (casi) a la temperatura normal de flujo (por ejemplo, cerca de la temperatura en el fondo del pozo).

El peso específico en el flujo de aire subiendo en el espacio anular, también presenta un contraste marcado con la situación del lodo.

El aire que baja dentro de la sarta varía de 1.8 lb/pie³ a 2.7 lb/pie³ (hasta una posición arriba de la barrena, posición a). El peso específico del aire cae rápidamente, en casi un orden de magnitud, conforme éste pasa hacia el fondo abierto desde la sarta (por ejemplo, hasta cerca de 0.51 lb/pie³ en la posición b de la Figura II.7). Entonces, conforme el aire se mueve hacia arriba en el espacio anular, el peso específico disminuye mas aún (en proporción a la presión y a la temperatura) hasta que el aire sale a la presión atmosférica pero con un promedio de temperatura de 160 °F.

Los ejemplos previos ilustran algunas diferencias entre la perforación con lodo y aire. En particular, las presiones en la perforación con aire son bastante bajas a través del sistema, en relación con la situación de perforación con lodo. Pero en general, el peso específico del aire es bastante bajo en todas las posiciones del sistema.

Todas estas características físicas del flujo, muestran un extraordinario contraste en la velocidad de flujo para los dos sistemas. La Figura II.8 proporciona las velocidades de flujo aproximadas en el espacio anular, para las condiciones de aire y lodo. Las velocidades en la situación del aire son mucho más altas, que aquellas de la situación de lodo. Sin embargo, las dos energías cinéticas del fluido fluyendo para un pie de longitud de

sección transversal en el espacio anular (a 5,000 pies), muestra una interesante semejanza en la magnitud de los valores. La energía cinética es:

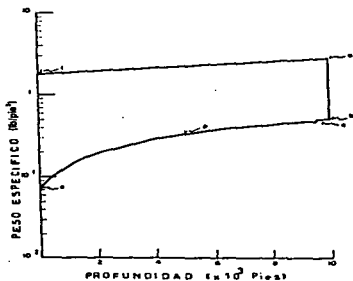


FIG. II.7 PESO ESPECIFICO CONTRA PROFUNDIDAD (PERFORACION CON AIRE)

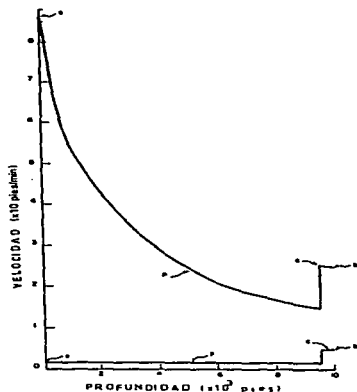


FIG. II.8 VELOCIDADES ANULARES DEL AIRE Y LODO

$$KE = 1/2 \frac{\gamma}{g} V^2 A_a \quad (II-1)$$

dode: γ = Peso específico (lb/pie³)

V = Velocidad (pies/s)

g = Constante gravitacional la cual es 32.2 pies/seg²

A_a = Area de la sección transversal (pie²) en el espacio anular para 5,000 pies

Entonces, para la perforación con lodo en la posición p:

$$KE = \frac{1}{2} \frac{(7.48)(10)}{32.2} \left[\frac{180}{60} \right]^2 (0.228) = 2.38 \text{ pie-lb} \quad (\text{II-2})$$

y para la perforación con aire en la posición p:

$$KE_a = \frac{1}{2} \frac{0.334}{32.2} \left[\frac{2442}{60} \right]^2 (0.228) = 1.96 \text{ pie-lb} \quad (\text{II-3})$$

En general, la perforación con aire proporciona casi la misma energía cinética para el fluido en el espacio anular que el lodo de perforación. Aunque la mecánica detallada de los procesos es bastante diferente, el efecto en el flujo de fluido en el espacio anular es casi el mismo, en cuanto a lo relacionado al transporte de recortes.

II.4 VELOCIDAD DE PENETRACION

La densidad de circulación en el fondo del pozo para un sistema de perforación con aire, es baja comparada con un sistema tradicional de lodo. La disminución en la presión del fluido circulante sobre las paredes del pozo, incrementa la descarga de esfuerzos axiales y verticales en las formaciones. Esto ocasiona un gradiente de presión que incrementa la perforabilidad de las rocas.

Conforme la presión del fluido circulante se reduce, a valores inferiores que la presión de formación, la roca tiende a explotar en los dientes de la barrena. Esto da como resultado mayor velocidad de penetración siempre y cuando se tenga suficiente volumen de fluido para limpiar los recortes en el pozo.

El incremento en la velocidad de penetración puede ser entre

2 y 5 veces la velocidad de perforación en el pozo con un lodo convencional. Esto puede reducir el número de días necesarios para terminarlo y reducir los costos de perforación.

II.5 FUNCIONAMIENTO DE LAS BARRENAS

Son comunes las temperaturas elevadas cuando se perforan pozos geotérmicos. Uno de los principales factores que afectan el rendimiento de una barrena es la vida de los baleros. Conforme se encuentran las altas temperaturas, la vida de los baleros se puede reducir. Un sistema de perforación con aire proporciona a la barrena una corriente de aire frío, que fluye alrededor de los baleros, disminuyendo su temperatura e incrementando su rendimiento.

Un sistema de perforación con aire, provee suficiente turbulencia en el fluido para asegurar una limpieza apropiada de recortes. Los recortes abrasivos son llevados lejos de la barrena a través del espacio anular, más rápidamente que en un sistema de lodo convencional. Esto disminuye el remolido de los recortes, incrementando la eficiencia de remoción en el equipo de control de sólidos y mejora la eficiencia de la barrena.

Dismunuyendo la temperatura de los baleros y el molido de los recortes, se aumentan los metros que pueden ser perforados por una barrena. Esto puede resultar en menos barrenas y menos viajes para terminar un pozo reduciendo los costos [Lin, 1981].

II.6 DETECCION DE ZONAS DE BAJA PRESION

La disminución en la presión de circulación en el fondo del pozo, permite que los fluidos geotérmicos procedentes de zonas con baja presión, sean registrados durante la perforación. Esta información puede ser usada como ayuda, para reducir las posibilidades de dañar estas zonas conforme continúa la perforación.

II.7 PERFORACION A TRAVES DE ZONAS DE PERDIDA

Cuando son encontradas zonas de producción o pérdida, la perforación puede continuar a través y más allá de estas formaciones con baja presión. El operador puede incrementar la producción de cada pozo perforando más profundamente para encontrar nuevas zonas productoras.

La existencia de un sistema de circulación con aire puede ser cambiado para mantener circulación completa. Un sistema para perforación con aire diseñado apropiadamente, permitirá una rápida conversión de una técnica a otra sin una excesiva demora.

II.8 COSTOS DE MATERIAL DE LODO

La presión del fluido circulante en el fondo del pozo, puede ser mayor que la presión de formación, cuando perforamos en zonas de baja presión con un sistema de lodo convencional. Esto puede inducir fracturas permitiendo que el fluido de perforación se pierda en una formación porosa. Los mayores costos en la perforación, resultan del incremento en materiales para lodo que son necesarios para reponer el lodo perdido [Carson y Lin, 1982].

Las menores presiones de circulación en un sistema de perforación con aire generalmente permiten una perforación efectiva a través de zonas con baja presión, disminuyen las pérdidas de fluido de perforación y permiten el regreso de todo el lodo a la superficie.

Al reducir las pérdidas de circulación, el número de días de perforación y los productos requeridos para mantener el sistema de circulación, los costos por lodo y perforación se reducen mediante el uso de un sistema de perforación con aire.

II.9 DAÑO A LA FORMACION MINIMIZADO

Cuando perforamos en zonas productoras con un sistema de lodo convencional, con la mayor presión del fluido circulante, los recortes pueden ser forzados hacia la formación donde ocasionan el

sello de las fracturas productoras. En yacimientos geotérmicos, las altas temperaturas pueden hornear este lodo de perforación atrapado, causando aún más daño. Estas fracturas selladas inhiben una parte o todo el flujo de los fluidos desde la formación hacia el agujero, resultando en una producción menor que la máxima [Dareing y otros, 1981].

La invasión de fluidos hacia las fracturas, en el perímetro de las paredes del agujero, es reducida o eliminada cuando la presión del fluido circulante, cae abajo de la presión de la formación [Dareing y otros, 1981]. El aire permite incrementar la producción a largo plazo en los yacimientos geotérmicos.

II.10 CLASIFICACION DE LAS TECNICAS DE PERFORACION CON AIRE

La clasificación general de las técnicas de perforación con aire es la siguiente:

1. Perforación con aire-polvo.
2. Perforación con niebla.
3. Perforación con fluidos aereados.
4. Perforación con espuma.

PERFORACION CON AIRE-POLVO

El aire es comprimido e inyectado dentro de la tubería y circula a través de la sarta de perforación, siguiendo el mismo camino que un lodo convencional. La técnica de aire-polvo es usada cuando perforamos formaciones secas o cuando cualquier entrada de agua es lo suficientemente ligera para ser absorbida por la corriente de aire. El nombre de aire-polvo fue seleccionado porque los recortes llegan a la superficie como una nube de polvo.

La perforación con aire-polvo es la última etapa desde un fluido de perforación con alta densidad hacia los de baja densidad. La presión en el fondo del pozo ligeramente excede el valor de la presión de carga de columna de aire en el pozo, más el

peso de los recortes acarreados. Esto permite una descarga de los esfuerzos axiales o verticales remanentes en las formaciones. Este procedimiento ofrece las velocidades de penetración más rápidas y una mejor economía en la perforación.

LIMPIEZA DEL AGUJERO EN LA PERFORACION CON AIRE-POLVO

El poder de acarreo en un sistema de perforación con aire es proporcional a la densidad y al cuadrado de la velocidad. La densidad y con ella las propiedades de suspensión de una corriente de aire, es mucho menor que la de un sistema de lodo convencional. Por lo tanto, la velocidad anular es el principal factor para el transporte de recortes a la superficie.

Los volúmenes de aire que generan velocidades anulares de 3000 pie/min son normalmente adecuados para perforar con aire-polvo. Sin embargo cuando la velocidad de penetración excede los 60 pie/h o cuando los recortes son grandes o húmedos, pueden requerirse mayores velocidades anulares para limpiar eficazmente el pozo.

Conforme un pozo se profundiza se requiere inyectar un mayor volumen de aire a mayor presión, para mantener la velocidad requerida en el espacio anular. Esto ocasiona también altas pérdidas por fricción en el fondo del pozo, que son causadas por el incremento en la densidad del aire y la cantidad de recortes en el espacio anular. El equipo para perforar con aire debe tener capacidades adecuadas en volumen y presión para una limpieza efectiva del pozo.

Una partícula cayendo bajo la influencia de la gravedad, puede acelerarse hasta que la fuerza de arrastre se balancea con la fuerza de gravedad. La partícula continuará cayendo a una velocidad constante conocida como "velocidad terminal". La velocidad terminal para una partícula esférica puede ser estimada como sigue según [Ikoku, C.U. y Otros, 1980]:

$$V_a = \frac{4gd_p(q_p - q_f)^{1/2}}{3C_d q_f}$$

V_a = Velocidad terminal (pie/seg).

g = Aceleración de la gravedad (pie/seg²).

d_p = Diámetro de la partícula (pie).

q_p = Densidad de la partícula (lb/pie³).

q_f = Densidad del fluido (lb/pie³).

C_d = Coeficiente de arrastre (adimensional).

La fórmula anterior muestra que la "velocidad terminal" (de asentamiento) de un recorte, es inversamente proporcional a la densidad del fluido. Conforme la densidad del fluido disminuye la velocidad terminal se incrementa. Usando esta lógica la velocidad terminal de un recorte típico en el aire, será muy alta comparada con la velocidad terminal de asentamiento para el mismo recorte en el lodo. La velocidad del aire debe ser mayor que la velocidad terminal de los recortes, para moverlos hacia arriba en el espacio anular. El uso del aire como fluido de circulación, requiere de una alta velocidad anular para limpiar exitosamente de recortes el pozo.

EROSION EN LA SARTA DE PERFORACION Y EN LA FORMACION

Una alta velocidad anular puede causar erosión en las formaciones suaves del pozo. Si el uso de una técnica de perforación con aire causa erosión en las paredes del pozo, la adición de un agente estabilizador o el cambio en la técnica de perforación con aire puede ser requerido para disminuir este problema.

La erosión en la sarta de perforación puede ser causada por las altas temperaturas y velocidades anulares generadas cuando son encontradas zonas de vapor. Algunas personas estiman que la velocidad puede exceder los 10,000 pie/min en el espacio anular. La inyección de barreras de tipo químico puede inhibir este tipo

de erosión.

CONTROL DE LA CORROSION EN LA SARTA DE PERFORACION

La corrosión debe ser considerada seriamente antes de empezar el uso de una técnica de perforación con aire [Bannerman y otros, 1978)]. Cuando perforamos a través de formaciones con contaminación ácida (CO_2 y H_2S), el problema puede ser mucho peor. Mezclas de peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y sosa cáustica (NaOH) pueden ser usadas para solubilizar y precipitar la contaminación de H_2S . Un fosfato orgánico, inhibidor de incrustaciones previene la depositación de incrustaciones del metal alcalino-térreo.

Una mezcla de aminas diseñada para disminuir la erosión y la corrosión de superficies metálicas, en ambientes geotérmicos de alta temperatura, ha incrementado la vida de la sarta de perforación en el campo "Los Geysers", USA. El inhibidor es premezclado con agua e inyectado al fondo del agujero con el aire, normalmente después de que ha sido encontrado el vapor. La amina cubre la tubería y crea una barrera protectora en las superficies de la roca y el metal a alta temperatura.

La técnica de perforación Aire-polvo es un método probado de perforación efectiva para zonas con baja presión y en fracturas de vapor seco sin dañar las formaciones. Compañías conedoras del servicio con el equipo apropiado para perforar con aire, pueden ser utilizadas para obtener los beneficios máximos que proporcionan las técnicas de perforación con aire.

Mientras perforamos con aire, la presión de inyección puede variar de 150 a 700 lb/pg^2 , dependiendo del volumen de vapor, el diámetro del agujero, la profundidad, las restricciones en las herramientas de fondo, el tipo de técnica de perforación con aire, etc.. Las presiones de circulación pueden cambiar rápidamente demandando que el equipo de aire se ajuste a los cambios de presión sin interrumpir la perforación.

PERFORACION CON NIEBLA

Esta técnica es usada cuando la cantidad de agua que entra es demasiado alta, para evitar que la perforación con polvo cause problemas de limpieza en el pozo. El nombre de niebla fue elegido porque un lodo de perforación es inyectado con el aire y la combinación regresa a la superficie en forma de niebla.

Escencialmente el equipo para una exitosa aplicación de la perforación con aire-polvo y lodo-niebla es el mismo. Las principales diferencias son el incremento en el volumen de aire requerido y la inyección de un lodo de perforación pretratado.

LIMPIEZA DEL AGUJERO EN LA PERFORACION CON NIEBLA

Cambiar a una técnica de perforación con niebla requiere de un incremento de por lo menos 30% en el volumen de aire. El volumen adicional es necesario para vencer las mayores pérdidas de presión friccionales causadas por recortes mojados adheridos a la sarta de perforación y al agujero, mayores velocidades de resbalamiento de recortes húmedos más grandes y el transporte de una columna de aire húmedo más densa.

El lodo es inyectado en la corriente de aire para dispersar los recortes e inhibir su adherencia a la sarta de perforación y al agujero. La lubricación de la sarta de perforación y del agujero reduce los requerimientos en el volumen de aire y disminuye la formación de anillos de lodo.

Aunque presiones de inyección desde 100 hasta 200 lb/pg² son normalmente suficientes para perforar con aire-polvo; presiones en exceso de 350 lb/pg² pueden ser encontradas mientras perforamos con lodo niebla. Presiones de 1250 lb/pg² pueden requerirse cuando grandes cantidades de fluido están presentes en el espacio anular.

La velocidad de invasión de fluido de la formación dictaminará la cantidad de aire y fluido de perforación que debe ser inyectado para limpiar eficientemente el agujero. Entradas de

fluido de la formación de hasta 150 bl/h han sido perforadas existosamente con lodo niebla.

CONTROL DE LA CORROSION EN LA PERFORACION CON NIEBLA

Las propiedades del fluido requeridas para perforar con lodo niebla son menores que en un sistema de lodo convencional; pero es necesario un tratamiento químico para disminuir la corrosión causada por el fluido y aire adicionales.

El control de corrosión básico es proporcionado manteniendo el pH del sistema de lodo arriba de 10.5 y tratando cualquier dureza o carbonatos con los químicos apropiados. Las incrustaciones de carbonatos y sulfuro de hidrógeno son tratados de manera muy similar que con un sistema convencional de lodo.

Muestras de acero para corrosión (cupones) deben ser corridos en el equipo de fondo para monitorear el tipo y la velocidad de la corrosión. La selección del mejor tratamiento químico o producto para controlar la corrosión, debe basarse en el análisis de dichos cupones de acero.

Si se encuentra H_2S , la primera medida de protección es mantener el pH en/o arriba de 11. Para precipitar los sulfuros, una fuente de zinc deberá ser agregada basándose en el nivel de contaminación y el tipo del sistema de lodo.

Para reducir la corrosión por carbonatos se usa cal para su tratamiento y se mantiene algún exceso para prevenir este tipo de corrosión.

La corrosión por oxígeno es la más difícil de combatir en un sistema de perforación con aire, porque éste suministra grandes cantidades de oxígeno al sistema de circulación húmedo. Existen muchas clases de químicos que pueden ser utilizados para minimizar este tipo de corrosión.

La incrustación es un problema común con algunos tipos de fluidos. Usar un fluido alcalino, tratando los carbonatos y la dureza con los químicos apropiados reducirá grandemente la tendencia en la ocurrencia de las incrustaciones.

Si el sistema circulante de fluido es correctamente pretratado, cualquier problema de corrosión puede ser mantenido en un nivel aceptable.

PERFORACION CON FLUIDOS AIREADOS

La mayoría de los pozos geotérmicos tienen formaciones de agua dominante. La técnica de perforación con fluidos aireados proporciona el mejor medio de circulación para disminuir el daño a la formación, las pérdidas del fluido y reducción de costos en el pozo para perforar efectivamente este tipo de yacimientos.

Las cantidades apropiadas de aire y fluido de perforación se combinan en el cabezal de la mesa rotaria. La presión de circulación del fluido aireado aumenta gradualmente conforme este viaja hacia abajo en la sarta de perforación. Esto es debido al incremento neto en la combinación de presiones hidrostáticas, las pérdidas por fricción y la expansión térmica. Este incremento neto en la presión del fluido circulando comprime el aire en pequeñas burbujas en el sistema de dos fases. Al tiempo en que el fluido llega a la barrena, el volumen de aire se comprimirá en una proporción pequeña del volumen en el fluido. Después de que el fluido aireado pasa a través de la barrena, el aire se expande debido a la caída de presión asociada. La combinación de las energías neumática (aire) e hidráulica (lodo) mejora la limpieza del agujero cuando se compara con un sistema convencional de agua o lodo.

Conforme el fluido aireado sube por el espacio anular, existe una disminución en la presión hidrostática sobre la columna del fluido. Esto le permite al aire una mayor expansión dentro del

pozo, incrementando la velocidad anular para un gasto de fluido determinado. Conforme el fluido convencional es desplazado fuera del espacio anular, la presión de circulación en el fondo y en la barrena disminuye, lo que aumenta la perforabilidad de la formación.

PERFORACION CON ESPUMA RIGIDA

La técnica de perforación con espuma-rígida, utiliza una emulsión estable de aire en lodo. El fluido circulante es formulado con aditivos de lodo, agentes espumantes, y aire comprimido. Esta técnica se usa cuando las técnicas de perforación con aire-polvo, niebla-lodo o fluido aireado no son las apropiadas por causas económicas, mecánicas o de otro tipo.

Esta técnica presenta menores requerimientos en volumen de aire, volumen de fluido y velocidades anulares. Sin embargo los problemas del agujero dictaminarán la cantidad exacta de aire y las velocidades de inyección del fluido.

Los menores requerimientos en el volumen de fluido, mejorarán la habilidad de perforar agujeros de gran diámetro homogéneos. El decremento en la presión de circulación, permite perforar zonas de severas pérdidas con un mínimo de fluido perdido.

Los productos de lodo proporcionan estabilidad en el agujero, capacidad de acarreo, características espumantes y combaten la corrosión. Esto también disminuye la tendencia del aire a romper la espuma en el espacio anular. El aire aligera la presión de circulación en el fondo del agujero.

Conforme el flujo de la formación entra al pozo la fuerza de la espuma se reduce, disminuyendo la habilidad del sistema circulante para limpiar el agujero de recortes. Esto requiere un incremento en la concentración de materiales en lodo para reforzar la espuma, incrementando los costos de perforación.

II.11 MEDICION DEL VOLUMEN DE AIRE

Para aplicar eficazmente cualquier técnica de perforación con aire, es importante medir y registrar el volumen de aire inyectado y la presión de circulación. El método más comunmente utilizado en la industria geotérmica es el método de medición por orificio. El medidor de flujo por orificio determina la caída de presión diferencial a través de una placa de orificio colocada entre la línea del aire y la línea de presión estática. Estos valores son registrados usando una carta estándar con dos plumas para 24 horas. El volumen real de aire y la presión de circulación pueden calcularse mediante el uso de la norma API estandar 2530 y las presiones registradas.

Estos registros son valiosos para el operador geotérmico por que ellos pueden indicar las áreas con problemas potenciales tales como pérdida de circulación, intrusión de fluido, rotura en la tubería de perforación, etc.. Un operador de aire experimentado puede interpretar las cartas de aire para informar al jefe de pozo de cualquier problema. Esto puede reducir los costos de perforación.

DETERMINACION DEL GASTO VOLUMETRICO DE AIRE

La determinación del gasto volumétrico de aire requerido para mantener una adecuada circulación, puede ser realizada mediante el uso del análisis desarrollado por R. R. Angel [Angel, 1981]. El gasto volumétrico de aire para varios diámetros de agujero, tubería y velocidad de penetración pueden encontrarse en su libro.

Las curvas de Angel proporcionan un buen punto de partida para empezar un programa de perforación con aire-polvo. Sin embargo hay alguna suposiciones que necesitan considerarse al utilizar estas curvas de flujo. Angel supone que los recortes estan moviéndose a la misma velocidad que el aire. Angel indica que ésta es una suposición conservadora y un análisis nos ha mostrado que los rangos de en la velocidad de flujo pueden ser desde 20% hasta 30% menores.

Las temperaturas en el fondo del agujero usadas para calcular estas cartas están suponiendo que en la superficie hay 80 °F y se incrementa 1 °F/100 pies de profundidad. Angel no incluye una manera de convertir a otros gradientes de temperatura.

Finalmente, las cartas de Angel necesitan modificaciones para poderse aplicar a los métodos de perforación con niebla-lodo.

En un trabajo más reciente de Ikoku, Azar y Williams, se incluyó el movimiento de los recortes de roca en el espacio anular a una velocidad que es menor que la del aire y que es una función de las condiciones del aire en el espacio anular. El movimiento relativo entre el aire y las partículas de roca, incrementa las pérdidas por fricción y reducen la energía disponible para mover la mezcla aire-recortes hacia arriba, en el espacio anular.

Si el volumen de aire es insuficiente, la roca se moverá más lentamente en relación al aire, y las pérdidas por fricción entre la roca y el aire aumentarán. Conforme la energía disponible para mover el aire y la roca disminuye, se incrementará la densidad de roca en el espacio anular y el sistema de flujo se estrangulará. Conforme el sistema de flujo se estrangula (dependiendo del volumen de aire), la presión en el fondo del pozo se incrementará y se requerirá mayor presión en el equipo de superficie. Esta mayor presión alcanzará condiciones de flujo inestable puntuales que mueven la roca hacia arriba en el espacio anular. Estas condiciones de estrangulamiento ciclarán hasta que el flujo volumétrico apropiado se establezca en el sistema.

Las condiciones de velocidad de flujo volumétrico que causan un flujo en estado estable de aire y roca (eliminando la situación de estrangulamiento) fueron calculadas y son ligeramente mayores que los determinados por Angel.

II.13 OPERACIONES Y EQUIPO EN LA PERFORACION CON AIRE Y GAS

Estas operaciones requieren de equipo especial normalmente no

usado en operaciones de perforación rotatoria con lodo. Las descripciones de este equipo son las siguientes.

EQUIPO DE SUPERFICIE

La mayor parte del equipo para perforación con aire y gas está disponible en base a renta con varios contratistas de equipos de perforación con aire y gas. Estos contratistas proporcionan, a cualquier contratista de perforación rotatoria normal, todos los equipos de superficie necesarios para realizar una operación de perforación con aire.

La figura II.10 muestra un plano de localización típico para perforación con aire alrededor de la torre para perforación con lodo, además se muestran los equipos adicionales necesarios para una correcta operación. Las Figuras II.11 y II.12 muestran la configuración típica del conjunto de superficie (preventores, líneas de aire y empacador para la perforación con aire).

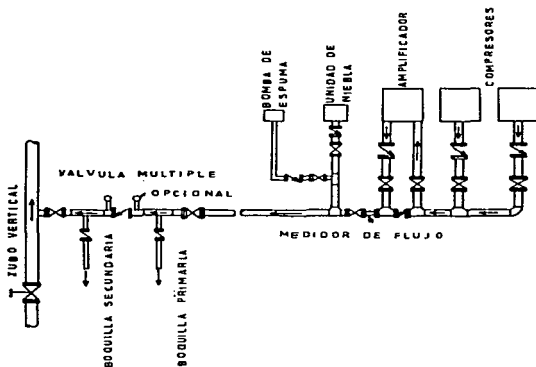


FIG. II. 9 CONEXIONES DEL EQUIPO DE SUPERFICIE

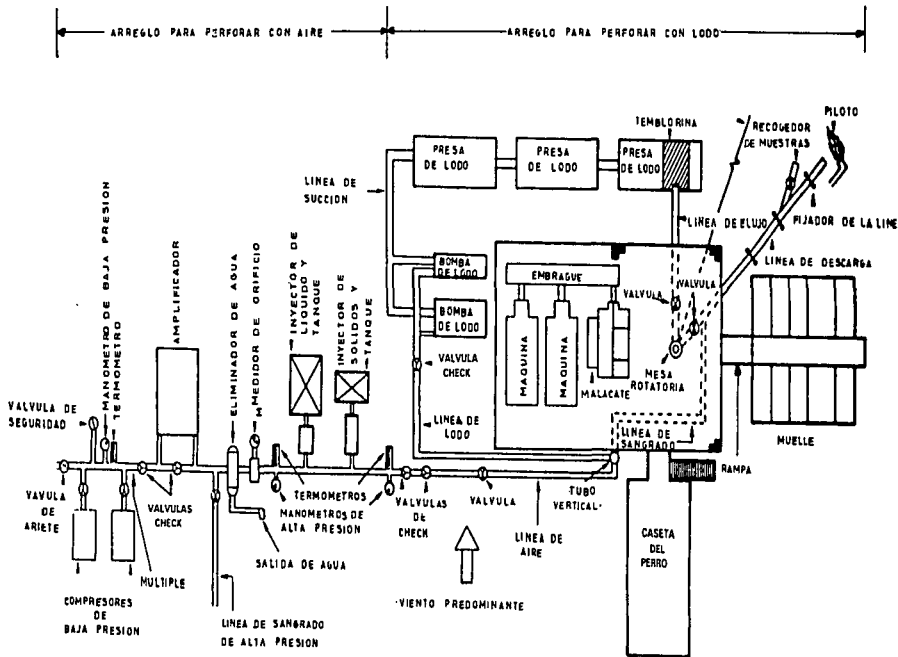


FIG. II.10 PLANO DEL EQUIPO DE PERFORACION CON AIRE

Línea de descarga.— Esta desvía la mezcla de aire y los recortes que vienen del espacio anular hacia la presa de desperdicios. La longitud en la línea de descarga debe ser suficiente, para evitar que el flujo de polvo interfiera las operaciones en el área del equipo. La longitud normalmente usada es entre 30 y 100 metros. La línea de descarga no debe tener ninguna junta curva y debe ser fijada a la superficie con soportes rígidos. El final de la línea de descarga debe terminar en el sentido del viento predominante en el sitio de perforación.

Es muy importante que el área de la sección transversal en la abertura interna de la línea de descarga sea 10% mayor que el área anular cerca de la superficie del pozo. Esa área ligeramente mayor (con la cual se determina el diámetro interno del tubo) ayudará a compensar la pérdida de energía en el fluido que ocurrirá cuando en el flujo de aire (o gas) y recortes cambia 90° desde flujo vertical hasta flujo horizontal bajo el piso del equipo.

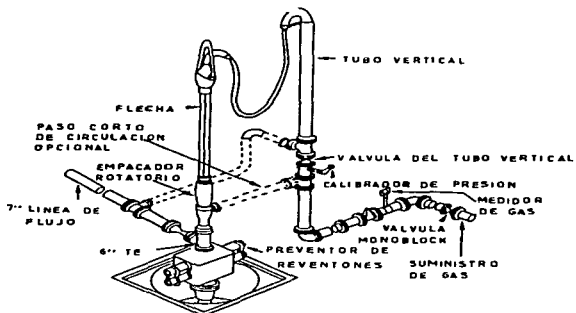


FIG. II.11 CONEXIONES EN LA PERFORACION CON AIRE O GAS

Línea Para Alivio de Presión.— Esta línea de alivio descarga la presión existente en el tubo vertical, la mesa rotaria, la flecha y la tubería de perforación hasta la profundidad de la válvula flotadora. La línea de alivio permite que el aire o gas bajo presión sea alimentado directamente a la línea de descarga. La línea de alivio es generalmente usada cuando se hacen conexiones y permite a los operadores reducir rápidamente la presión en las líneas de flujo, antes de hacer conexiones o viajes.

Boquillas de Aire (o gas).— Estas son frecuentemente usadas cuando existe la posibilidad de que cantidades de gas natural relativamente grandes puedan entrar al espacio anular, conforme una operación de perforación se realiza. Las Figuras II.9 y II.13 muestran una típica conexión para boquillas de aire o gas primario

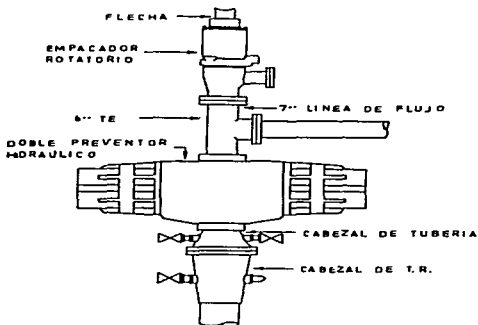


FIG. II.12 SISTEMAS DE CONTROL EN LA PERFORACION CON AIRE O GAS
y secundario cerca del final de la línea de descarga. En esencia

el uso de las boquillas de aire o gas es una alternativa para el uso de la línea de alivio estándar. Las boquillas de aire/gas son usadas para provocar un vacío en la línea de descarga y por consiguiente en el espacio anular, por lo tanto mantiene a los gases en el espacio anular moviéndose hacia afuera de la línea de descarga. Esto también evita que el gas natural de la formación

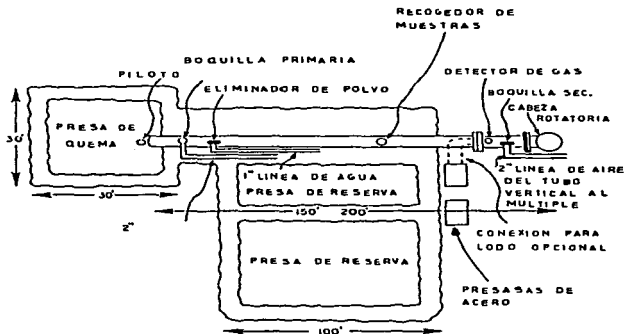


FIG. II.13 PRESAS Y LÍNEA DE DESCARGA

pase al piso del equipo durante las conexiones o los viajes, permitiendo que un flujo reducido de aire de los compresores (y el amplificador) pase directamente a la línea de descarga.

Compresor y amplificador.— Los compresores proporcionan el aire inicial con presión desde 100 lb/pg² hasta 300 lb/pg² manométricas para perforar o cargar el amplificador. Si es necesaria presión adicional, para perforar, el amplificador puede utilizar la salida de los compresores y puede incrementar la presión en la línea hasta 1500 lb/pg² manométricas. Comúnmente un contratista de perforación con aire o gas proporcionará varios

compresores y sólo un amplificador para la operación de perforación típica. Todos los compresores son provistos con sistemas que enfrían la corriente del fluido hasta límites aceptables (de 150 °F a 190 °F). El número de compresores necesarios dependerá de las características del pozo a ser perforado y la localización superficial (elevación) de la operación.

Tanque y Bomba Para Aditivos Químicos (y agua).— La bomba inyecta agua, inhibidores químicos de corrosión y líquidos espumantes dentro de la línea de alta presión de aire/gas después de la compresión inicial y la amplificación de la compresión del aire/gas. Aún en la perforación con aire seco (o polvo), se puede inyectar algo de agua e inhibidores químicos de corrosión. En la perforación con niebla, un inhibidor de corrosión debe inyectarse con el agua. En perforación normal con espuma estable, se inyecta un espumante líquido, el cual comúnmente tiene un inhibidor de corrosión.

Inyector de Sólidos.— Este es usado para inyectar polvo deshumecedor al pozo, para absorber el agua que está entrando de formaciones con agua. Es usado también para inyectar sólidos que reducen el torque entre la sarta de perforación y las paredes del pozo.

Empaque de la Flecha Rotatoria.— También llamada cabeza rotatoria o preventor de reventones rotatorio, esta pieza del equipo de superficie, sella contra la flecha rotatoria y desvía el flujo ascendente de aire (o gas) y los recortes hacia la línea de descarga. Las Figuras II.11 y II.12 muestran el típico arreglo superficial para perforación con aire/gas y la Figura II.14 muestra los detalles de la cabeza rotatoria. Además de la cabeza rotatoria (preventor de reventones rotatorio), deben ser usados preventores de reventones hidráulicos estándar dobles.

Flecha.— Debido a su mayor efectividad en el sello dentro de

la cabeza rotatoria, debe ser usada una flecha hexagonal.

Deshumecedor "Scrubber".- Este remueve el exeso de agua en la corriente de aire (o gas) inyectada para asegurar que un mínimo de humedad está circulado (si es requerido aire seco para perforar) y/o para proteger el amplificador.

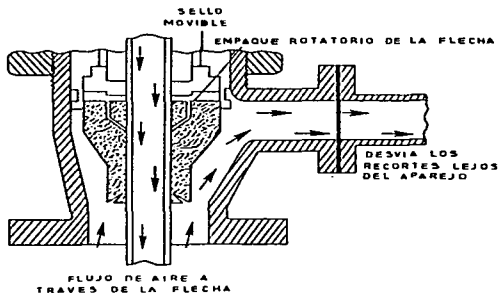


FIG. II.14 CABEZA ROTATORIA

Muestrador.- Un tubo con diámetro pequeño (aproximadamente 2 pg.) es fijado al final de la línea de descarga, y continúa dentro de ella con un ángulo que se muestra en la Figura II.15. El extremo del muestrador es fijado a la línea de descarga por un soporte estructural soldado al tubo de diámetro pequeño y a la misma línea. Dicho tubo está abierto hacia el flujo que regresa del espacio anular pasando a través de la línea de descarga. Una válvula es puesta en la salida del tubo de diámetro pequeño fuera de la línea de descarga para facilitar el muestreo. Para muestrear, la válvula es abierta, se permite ventear el material residual y se toma una muestra del flujo de recortes. El muestrador es colocado corriente arriba del eliminador de polvo.



FIG. II.15 RECOGEDOR DE MUESTRAS

Eliminador de Polvo.— Este es un arreglo de tubería que acarrea agua, de la bomba de agua a la línea de descarga, para mojar las partículas que salen del espacio anular de modo que el polvo que sale de la línea de descarga es reducido. El eliminador de polvo es generalmente usado solamente cuando el viento choca y desvía el polvo en dirección de la torre u otro equipo importante, o en áreas donde es necesario eliminar el polvo. El agua usada para eliminar el polvo puede ser bombeada desde la presa de reserva o quema.

Detector de Gas.— Este puede ser conectado dentro de la línea de descarga para detectar cantidades muy pequeñas de gas que entran al flujo que regresa con recortes del espacio anular. El detector de gas está localizado en la línea de descarga, justo después que el flujo regresando del espacio anular entra en la línea de descarga (ver figura II.13).

Piloto.— Una pequeña luz o flama piloto debe ser mantenida al final de la línea de descarga. Esta encenderá cualquier gas que sea encontrado mientras perforamos (ver Figura II.10 y II.13). Cuando perforamos con gas natural, la flama debe ser apagada hasta que esté disponible el flujo total en la línea de descarga.

Presa de Quema.— Esta debe ser acondicionada al final de la línea de descarga para una operación de perforación con aire (o gas) (ver Figuras II.10 y II.13). Esta presa de quema debe ser localizada lejos de la presa de reserva estándar para lodo. La

presa de quema evitará que cualquier hidrocarburo líquido se encienda o fluya dentro de la presa de reserva y así evitará el fuego en la presa de reserva cerca de la torre.

Medidor para Volúmenes de Aire (o Gas).— Un medidor estándar con placa de orificio es generalmente usado para medir los volúmenes inyectados de aire (o gas) ver sección II.11.

Instrumentación.— Además de la instrumentación normal del equipo, deben ser instalados manómetros de presión en las líneas de alta y baja presión de aire (o gas). En particular, un manómetro debe ser instalado en el tubo vertical y otro en el medidor colocado después del compresor (o amplificador). Si es posible ambos manómetros de presión deben estar equipados con registradores de 12 o 24 horas. El registrador en el medidor es parte del medidor de orificio cuando se mide presión constante y diferencias de presión. Las mediciones en ambas estaciones permitirán calcular fácilmente el volumen de aire, a la salida lo cual será muy importante si la presión del aire debe disminuir o incrementarse durante la perforación. Esos cambios de presión son muy importantes para predecir los problemas esperados en el fondo. También debe instalarse en el piso de la torre una alarma de alta presión colocada para indicar un incremento inusual en la presión de inyección de aire o gas durante la perforación. Estos incrementos de presión son generalmente señales de problemas en el fondo.

EQUIPO DE FONDO

Hay paquetes de equipo especial para el fondo y consideraciones especiales que deberán ser utilizados cuando se perfora con aire/gas.

Válvulas Flotadoras.— Estas están colocadas en el fondo del pozo y cerca del tope de la sarta de perforación. La válvula flotadora de fondo previene el contraflujo de los recortes dentro de la sarta de perforación durante las conexiones u otras

suspensiones del flujo de aire (o gas), que de otro modo tapanían la barrena. La válvula flotadora también ayudará en la prevención de un daño extensivo a la sarta de perforación en caso de fuego en el fondo. La válvula flotadora de fondo superior (opcional) ayudará a retener la alta presión en la sarta de perforación mientras se hacen conexiones. La válvula flotadora superior necesita ser liberada abriéndola cuando sale del pozo. Esto puede ser hecho con una barreta o una barra de acero, o preferiblemente la válvula flotadora superior deberá tener pequeños hoyos perforados en ella, para permitir una sangría lenta de la presión en la sarta de perforación cuando viaja.

Ensamblajes de Fondo.— En general, la tubería de perforación y en particular los ensambles de fondo para perforar con aire y gas son los mismos que aquellos usados en perforación con lodo. Debido a que la velocidad de penetración en la perforación con aire (o gas) es muy rápida, deben tomarse precauciones especiales para prevenir desviaciones en el pozo. El problema de desviación del pozo en la perforación con aire (o gas) es reducido por el menor peso sobre la barrena requerido para velocidades de penetración sustanciales. Sin embargo, se recomienda el uso de ensambles (sartas) empacados o rígidos en el fondo. La Figura II.16 muestra algunos ensambles de fondo típicos. La desviación debe ser controlada a través del agujero, particularmente en la parte superior del pozo, por que ahí creará puntos de fricción y desgaste excesivos en la tubería de perforación y las juntas, cuando perforamos pozos profundos con aire (o gas). Lastrarbarrenas cuadrados deberán ser puestos directamente arriba de la barrena, ya que estos lastrarbarrenas dan casi 60% más rigidez que los redondos. También, los lastrarbarrenas cuadrados proveen un efecto de ampliación más allá de la barrena. Los lastrarbarrenas cuadrados tienen comunmente un diámetro diagonal que es aproximadamente 1/16 ó 1/8 pg menor que el diámetro de la barrena. Si el lastrarbarrena cuadrado es usado, éste debe ser fijado con incertos de carburo de tungsteno o paletas en el fondo y en la cima de los lastrarbarrenas. Los estabilizadores con un paquete de insertos de

carburo de tungsteno reemplazables son esencialmente lastrarrenas cuadrados cortos.

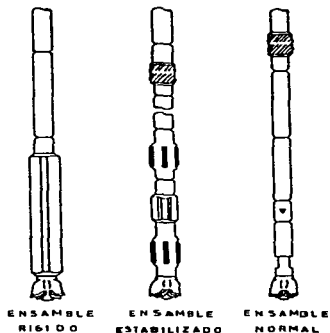


FIG. II.16 ENSAMBLES DE FONDO TÍPICOS

Debido a la falta de fuerzas contenedoras del líquido (por ejemplo, agua o lodo de perforación) en el pozo, cuando perforamos con aire o gas, la sarta de perforación particularmente el ensamble de fondo y la conexión entre este ensamble y la tubería de perforación, pueden estar sujetos a altas cargas vibratorias. Esto es especialmente cierto cuando perforamos formaciones duras, dichas cargas transitorias pueden fatigar las juntas y causar fallas prematuras en la sarta de perforación. Para prevenir dichas fallas, la longitud de los lastrarrenas deberá ser determinada para que el punto neutral entre los esfuerzos axiales, tensionales y compresivos que ocurren durante la perforación normal, esté bien localizado dentro de los lastrarrenas y no esté localizado en la interfase lastrarrenas-tubería de perforación, como es usual en la perforación con lodo. Por lo tanto se utilizará la siguiente

formula:

$$L_c = \frac{W_b}{NP(w_c)} \quad (2-1)$$

donde L_c = longitud requerida de los lastrabarrenas (pies)
 W_b = Cantidad de peso por aplicar sobre la barrena
 w_c = Peso por unidad de longitud de los lastrabarrenas
(lb/pie)
NP = Factor de seguridad para ajustar el punto neutral
dentro de los lastrabarrenas (comunmente 0.85)

La deformación de los lastrabarrenas contribuye sustancialmente a la desviación, por lo tanto es muy importante que los lastrabarrenas estén soportados por estabilizadores para prevenir torceduras.

Desgaste de la Tubería de Perforación.- En pozos perforados con aire (o gas), el desgaste de la tubería de perforación no parece ser excesivo. Hay evidencia de que ocurre erosión en la tubería de perforación con banda dura y junta de metal; cuando la terminación de la caja es banda dura. Esta erosión se debe a que los recortes en el flujo anular bombardean estas juntas.

Barrenas.- Aquellas barrenas que ofrecen la mejor protección del calibre deben ser seleccionadas. Barrenas con juntas baleros sellados con dientes cortos o con carburo de tungsteno son recomendadas. Barrenas de toberas son requeridas para dar la turbulencia máxima en el fondo del pozo.

Casi todas las barrenas se desgastan en su calibre cuando se perfora con aire (o gas). La protección del calibre ayudará a disminuir este problema mientras se perfora con aire/gas, pero este desgaste debe ser planeado para que ocurra el tiempo que dura la operación de perforación. Reentrar en un pozo que se perfora

con aire/gas utilizando una barrena del mismo diámetro, después que una larga sección del pozo ha sido perforada, es muy riesgoso. El agujero debe ser cuidadosamente repasado antes de reentrar con una barrena del mismo calibre; esto es consumidor de tiempo y por lo tanto costoso, el procedimiento óptimo es planear una reducción de diámetro entre 1/16 pg. y 1/8 de pg. por cada 1000 pies de sección perforada. La reducción del calibre dependerá conforme se ha usado la barrena con calibre protegido y el tipo de formación. Por ejemplo, si una barrena con calibre protegido de 6³/₄ pg es usada para perforar 1000 pies de agujero en una formación dura, entonces una barrena de 6¹/₂ debe ser usada para continuar perforando más abajo de la sección de 1 000 pies.

Es una práctica común en la perforación con aire y gas bloquear un orificio de la barrena (tobera). Si se tiene una configuración con dos toberas una es cerrada. Esta tobera cerrada debe estar entre los conos con la mayoría de los incertos. La razón para cerrar la tobera es que los conos a cada lado de la tobera cerrada soportarán la mayor carga de recortes cuando se perfora. Por lo tanto, estos conos tendrán la mayoría de los insertos y la mejor protección en el calibre.

Martillo de Aire.— Esta es una herramienta especial de fondo para controlar problemas severos de desviación y para perforar formaciones muy duras. El martillo de aire es básicamente un sistema de martillo por percusión que es colocado justo arriba de la barrena.

Cuando usamos un martillo de aire, una junta de tubería de perforación de gran peso deberá ser usada en la interfase lastrabarrenas-tubería de perforación para permitir, agregar protección a la interfase entre los lastrabarrena y la tubería de perforación contra los esfuerzos transitorios debido a la vibración.

CAPITULO III
DESARROLLO DEL PROGRAMA

**III.1 PROCEDIMIENTO DE CALCULO PARA DETERMINAR EL GASTO
VOLUMETRICO EN LA PERFORACION CON AIRE/GAS.**

Es importante delinear las técnicas de cálculo utilizadas en la perforación con aire (o gas). Estas técnicas deben ser entendidas antes de usarse por lo que se describirán en detalle las siete etapas de cálculo.

a) **Velocidad de Flujo Volumétrico Necesaria.** Conociendo el diámetro del pozo a ser perforado y el diámetro exterior de tubería de perforación más chica (o la sección transversal en el espacio anular más grande), se determina el gasto volumétrico (velocidad de flujo) mínimo necesario para perforar con aire/gas.

b) **Gasto Volumétrico Ajustado por la Elevación.** Para una superficie (base del equipo) localizada arriba del nivel del mar, el gasto volumétrico mínimo aire/gas debe ser ajustado para las condiciones atmosféricas reales, correspondientes a su elevación.

c) **Gasto Volumétrico Real.** Se determina el gasto volumétrico real de aire/gas a la entrada de los compresores para determinar la capacidad de los equipos a usar en el campo.

d) **Presión Anular en el Fondo del Pozo.** Conociendo el gasto volumétrico real de aire/gas, se determina la presión anular en el fondo del agujero.

e) **Presión Arriba de la Barrena Para el Flujo en la Tobera.** conociendo la configuración por usar en la barrena, dos o tres toberas o usando dos o tres orificios abiertos se determina la presión directamente arriba de la barrena. Esta debe ocasionar la máxima turbulencia en los recortes.

f) **Presión de Inyección.** Conociendo los requerimientos de presión

directamente arriba de la barrena, se determina la presión de inyección necesaria en la superficie del tubo vertical (stand pipe).

g) Caballos de Fuerza Requeridos en el Compresor y en el Amplificador. Con el volumen real requerido y la presión de inyección, se determinan las unidades de compresores y los caballos de fuerza necesarios en el amplificador. Esos caballos de fuerza requeridos entonces son comparados con la potencia disponible correspondiente a la localización de la superficie (elevación).

III.2 OPERACION DE PERFORACION CON LODO

EL sistema compresor de superficie - amplificador de compresión, es usado para acumular aire del medio ambiente (o el gas de la línea), para comprimirlo y enviarlo al tubo vertical, impulsarlo a través de la sarta de perforación, las toberas de la barrena y subirlo por el espacio anular. El flujo de aire comprimido en un sistema de perforación rotaria tiene básicamente las mismas funciones que el flujo de agua o lodo, en las operaciones de perforación, las cuales son:

1. Limpiar el fondo del agujero de recortes.
2. Acarrear los recortes hasta la superficie.
3. Enfriar los componentes de la barrena.

En las operaciones con lodo de perforación, el interés principal es proporcionar la cantidad apropiada en el flujo volumétrico de líquido a través del sistema, lo que asegurará llevar a cabo las tres principales funciones mencionadas anteriormente. El gasto de lodo de perforación (por ejemplo, en galones por minuto) debe ser suficiente para transportar los recortes en la sección con mayor área en el espacio anular, donde la velocidad de flujo es mínima. Dichos recortes deben ser transportados hasta la superficie con un gasto, que debe mantener el espacio anular libre de asentamiento de recortes en la barrena.

En esencia, la velocidad de circulación hidráulica para las operaciones de perforación con lodo debe asegurar que la remoción de recortes de roca en todo el sistema, sea cuando menos igual o mayor que la adición de estos, conforme la barrena perfora. Por lo tanto, se puede seleccionar la velocidad de circulación hidráulica para reflejar (aunque indirectamente) la velocidad de perforación, la geometría del agujero y la sarta de perforación.

Las bombas de lodo con desplazamiento positivo proporcionan en la superficie, la energía requerida para forzar el volumen de fluido necesario a través del sistema hidráulico, con un gasto volumétrico apropiado a los requerimientos particulares de perforación. La potencia de la bomba de lodo proporciona la presión necesaria, para cubrir tanto los requerimientos volumétricos de lodo como para vencer la resistencia ocasionada por las fuerzas de fricción en el sistema hidráulico y ésto permite que el volumen requerido pase a través del sistema. El volumen de lodo que entra a la bomba, proveniente de las presas de lodo, debe ser igual al volumen de lodo que sale del sistema hidráulico en la temblorina (criba), durante el mismo periodo de tiempo, suponiendo que no hay pérdidas de circulación en el sistema. El lodo de perforación es un fluido incompresible; Por lo tanto, una unidad de volumen de lodo no cambia sus dimensiones ni su peso específico durante el viaje completo a través del sistema hidráulico. La potencia teórica (caballos de fuerza) de una unidad de bombeo de lodo será calculada por la siguiente ecuación:

$$HP_t = \frac{Q_1 p}{1714} \quad (III-1)$$

donde Q_1 = Velocidad flujo volumétrico teórico a través de la bomba (gal/min).

p = Presión en el flujo del fluido en la bomba (lb/pg² grav.).

La ecuación III-1 es solamente una forma general para las

características de una bomba.

En el pozo la velocidad volumétrica de la bomba está determinada por el tamaño de las camisas; para una bomba tipo duplex, utilizaremos la siguiente ecuación:

$$Q_1 = \frac{\pi}{4} d_1^2 (\ell_m) (4N) \frac{1}{231} \quad (\text{III-2})$$

donde d_1 = Diámetro de la camisa en (pg.).

ℓ_m = Carrera del embolo (pg.).

N = Número de emboladas por minuto (rpm).

Como ejemplo de operación con la bomba de lodo, utilizaremos el lodo de perforación de la sección II.3, con un gasto volumétrico de lodo de 308 gal/min. Para una bomba duplex con camisas de 6 pg. y carrera de 14 pg. la ecuación III-2 se reduce a:

$$Q_1 = 6.854 N$$

Entonces para $Q_1 = 308$ gal/min, el valor de N será:

$$N = 45 \text{ rpm}$$

La bomba debe dar 45 emboladas por minuto, con el objetivo de mantener un gasto volumétrico de 308 gal/min y la ecuación III-1 se transforma:

$$p = 5.565 \text{ HP}_t$$

Usando la expresión anterior, puede obtenerse la relación entre los caballos de fuerza teóricos y la presión en la descarga (ver Figura III.1). Los caballos de fuerza de la bomba pueden ser ajustados (mediante la válvula reguladora) para dar mayores presiones con mayor potencia a la entrada. También pueden hacerse algunos ajustes en el gasto pero solamente dentro de las

limitaciones de la bomba duplex, por ejemplo, la N máxima es aproximadamente de 65 rpm.

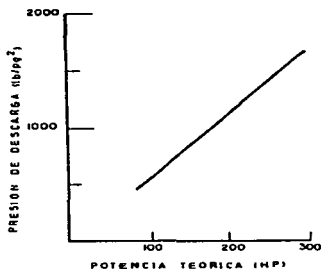


FIG. III.1 PRESION A LA SALIDA DE LA BOMBA DE LODO CONTRA POTENCIA

III.3 OPERACION DE PERFORACION CON AIRE/GAS

Para la operación de perforación con aire y gas, una situación similar a la anterior ocurre con respecto a los sistemas de compresión. La potencia teórica para una unidad típica de compresión por etapas de aire (o gas) está dada por la siguiente ecuación:

$$HP_L = n_s \frac{P_s Q_s}{229} \left(\frac{k}{k-1} \right) \left[\left(\frac{P_D}{P_s} \right)^{\frac{k-1}{n_s k}} - 1 \right] \quad (III-3)$$

donde n_s = Número de etapas interconectadas (comúnmente 1, 2 ó 3).
 P_s = Presión del aire (o gas) entrando al compresor (lb/pg.² abs.).
 Q_s = Volumen de aire (o gas) a la entrada (pie³/min)

estándar).

P_D = Presión de aire (o gas) a la salida (lb/pg² abs.).

k = Constante del gas definida como la relación de los calores específicos; para el aire k = 1.4.

En el ejemplo de la sección II.3 fue usado un gasto volumétrico de 2 400 pie³/min de aire estándar. Este es el gasto volumétrico en atmósfera estandar. Las unidades de compresión están clasificadas principalmente por su gasto volumétrico a la entrada. Si las unidades de compresión típicas, tienen un gasto volumétrico a la entrada bajo las condiciones del nivel del mar de Q = 1 200 pie³/min de aire estándar, entonces se requieren dos unidades, como está operando en paralelo, para proporcionar el gasto volumétrico necesario. Suponiendo que cada una de las unidades de compresión, tiene tres etapas iguales con perfecto enfriamiento, entonces la ecuación III-3, para una sólo unidad de compresión puede ser reducida a:

$$P_D = 14.696 \left[\left(\frac{HP_t}{808.8} \right) + 1 \right]^{10.5000}$$

Usando esta expresión, podemos obtener la relación entre los caballos de fuerza teóricos y la presión de descarga para cada unidad de compresión (ver Figura III.2).

Cada unidad de compresión puede ser ajustada para proporcionar alta presión a mayor potencia en la alimentación. En el caso de las unidades de compresión (diferentes a la bomba de lodo) se puede o no hacer un pequeño ajuste en la velocidad de flujo. La unidad de compresión debe operar a revoluciones por minuto (rpm) constantes para mantener la velocidad de flujo.

En esencia, la unidad de compresión de aire opera en forma muy parecida a una bomba de lodo con un tamaño de camisa fijo. El compresor de aire tiene un gasto volumétrico fijo, pero la

potencia en la alimentación puede incrementarse al aumentar la presión en la descarga. En la bomba de lodo (con tamaño de camisa fijo) se tiene la posibilidad de ajustar el rendimiento volumétrico a través de cambios en las rpm. Pero el principal ajuste para esto también es vía un incremento en la potencia descargada para incrementar la presión a la salida.

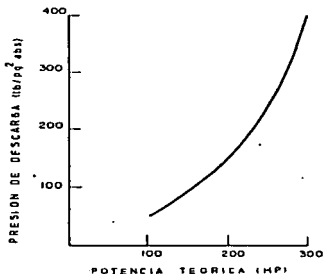


FIG. III.2 PRESION DE DESCARGA CONTRA POTENCIA DE UNA UNIDAD DE COMPRESION

III.4 CALCULO DEL GASTO VOLUMETRICO DE AIRE/GAS

Como se vió en las dos secciones anteriores, tanto para la perforación con lodo como en la perforación con aire (o gas), un gasto volumétrico específico de circulación de lodo o aire (o gas) es necesario para una operación de perforación. En las dos secciones anteriores se vió que tanto las bombas en la perforación con lodo, como las unidades de compresión de aire (o gas), son capaces de operar proporcionando un gasto volumétrico determinado a varias presiones. Es importante, por lo tanto en la perforación con aire o gas, determinar el gasto volumétrico necesario para una operación de perforación particular y especificar si el equipo de superficie tiene la capacidad para proporcionar el gasto volumétrico apropiado. Debido a que las unidades de compresión de

aire (o gas) son capaces de comprimir el aire (o gas) hasta altas presiones (y por lo tanto a diferentes volúmenes a la salida), el gasto volumétrico de aire (o gas) a la entrada es usado como la principal especificación para las unidades de compresión. Este gasto volumétrico a la entrada es comúnmente fijado en pies cúbicos estandar por minuto (pie^3/min estandar). Un pie cúbico de aire a condiciones atmosféricas de latitud promedio estandar (14.696 lb/pg^3 abs y 59°F), tiene un peso específico de 0.0765 lb/pie^3 .

En perforación con aire (o gas), el gasto volumétrico mínimo requerido está en función de la profundidad de la perforación, el área de la sección transversal en el espacio anular (por ejemplo, diámetro del agujero y de la tubería de perforación) y la velocidad de penetración.

En 1957 Angel publicó el primer trabajo extenso para el cálculo de los gastos volumétricos mínimos de flujo para aire o gas, con los parámetros específicos mencionados anteriormente (ver sec.II.11).

Las suposiciones básicas usadas por Angel son las siguientes:

- * Las condiciones de flujo a través del espacio anular en el sistema son estables.
- * Los recortes de roca y el aire (o gas) se mueven a la misma velocidad ascendente en el espacio anular (por lo tanto, la pérdida de energía entre el flujo de aire moviéndose mas rápido en el espacio anular y las partículas de roca más lentas se ignora).
- * La energía cinética mínima, para levantar los recortes en el fondo del espacio anular, es equivalente a un aire estándar moviéndose a una velocidad de 3000 pies/min.
- * La temperatura en el flujo de aire y gas saliendo del espacio anular (línea de descarga), está a la temperatura atmosférica de la superficie.

Angel presenta el gasto de flujo volumétrico mínimo de aire y gas para varias situaciones de perforación en forma gráfica para utilizarlos fácilmente. La figura III.3 presenta una gráfica típica de este trabajo que sirve para el ejemplo de la operación de perforación con aire de la sección II.3 (agujero con diámetro de 7 7/8 pg. y tubería de perforación con diámetro exterior de 4 1/2 pg.). La figura III.3 da el gasto de circulación volumétrico mínimo en pies³/min de aire estándar, como una función de la profundidad del agujero, para varias velocidades de perforación (0 pies/h, 30 pies/h, 60 pies/h, 90 pies/h y 120 pies/h). La ecuación básica para la presión anular en el fondo del pozo P_b (lb/pie² abs.) es:

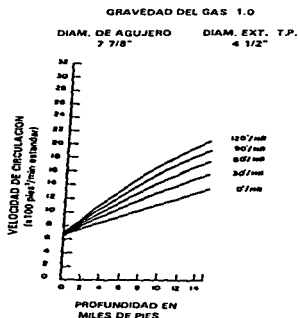


FIG. III.3 VELOCIDAD DE CIRCULACION CONTRA PROFUNDIDAD

$$P_b = \left[\left(P_{dl}^2 + bT_m^2 \right) e^{\frac{2.44h}{T_m}} - bT_m^2 \right]^{0.5} \quad (\text{III-4})$$

donde: P_a = Presión atmosférica de la superficie a la salida del espacio anular (lb/pie² abs.).

T_m = Temperatura promedio del aire (o gas) fluyendo °R (promedio de la temperatura de inyección del aire (o gas) y la temperatura en el fondo del agujero).

h = Profundidad vertical del agujero (pies).

y la ecuación para determinar el gasto de flujo volumétrico mínimo Q (pies³/min), es:

$$\frac{C_1 S (T_a + \beta h) Q^2}{(D_h^2 - D_p^2)^2 v_{min}^2} = \left[(P_a^2 + b T_m^2) e^{\frac{2.4h}{T_m}} - b T_m^2 \right]^{0.5} \quad (III-5)$$

donde: D_h = Diámetro del agujero en (pies).

D_p = Diámetro exterior de la tubería de perforación (pies).

S = Gravedad específica del gas (aire es 1.0).

T_a = Temperatura atmosférica en la superficie (°R).

β = Gradiente geotérmico (0.01 °F por pie).

v_{min} = Velocidad mínima equivalente de un aire estándar para remover los recortes ($v_{min} = 3\ 000$ pie/min).

Los términos a y b en la ecuación anterior son:

$$a = \frac{SQ + C_2 K D_h^2}{53.3Q} \quad (III-6)$$

$$b = \frac{C_3 Q^2}{(D_h - D_p)^{1.333} (D_h^2 - D_p^2)^2} \quad (III-7)$$

donde K = Velocidad de penetración (pies/h).

La derivación original de las ecuaciones anteriores y todos los datos subsecuentes fueron realizados para operaciones de

perforación con aire/gas localizadas a nivel del mar. Debido a que los requerimientos de gasto volumétrico de aire y gas para la perforación son extremadamente sensibles a la localización real del sistema de compresión en la superficie, las constantes C_1 , C_2 y C_3 deben ser calculadas para otras elevaciones (altura sobre el nivel del mar). Las ecuaciones de las constantes anteriores son las siguientes:

$$C_1 = \left(\frac{4}{\pi} \right)^2 \left[\frac{T_{nm}}{P_{nm}} \right] \left[\frac{P_o}{T_o} \right] \quad (\text{III-8})$$

$$C_2 = \frac{\frac{\pi}{4} (62.2) (2.7)}{60 \left[\frac{P_o}{RT_o} \right]} \quad (\text{III-9})$$

$$C_3 = \frac{0.014}{2g(3600)} \left(\frac{4}{\pi} \right)^2 \left[\frac{P_o}{T_o} \right]^2 \quad (\text{III-10})$$

- g = Aceleración de la gravedad (32.2 pies/seg²).
 P_o = Presión atmosférica de operación (lb/pie² abs.).
 P_{nm} = Presión atmosférica a nivel del mar (lb/pie² abs.).
 R = Constante universal de los gases (pie-lb/lb-°R).
 T_{nm} = Temperatura atmosférica a nivel del mar (lb/pie² abs.).
 T_o = Temperatura atmosférica de operación (°R).

En las figuras III.4, III.5 y III.6 están graficadas las constantes C_1 , C_2 y C_3 como función de la elevación de la superficie en el sitio. Con esas gráficas los valores de C_1 , C_2 y C_3 pueden encontrarse para cualquier localización de la superficie arriba del nivel del mar.

Angel usó una temperatura en superficie de $t_a = 80$ °F y un gradiente $\beta = 0.01$ °F/pie.

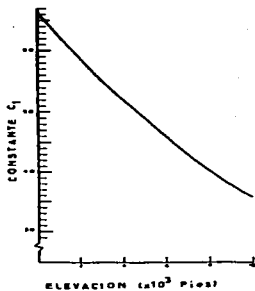


FIG. III.4 CONSTANTE C_1 CONTRA ELEVACION DE LA SUPERFICIE

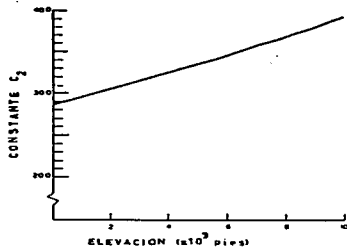


FIG. III.5 CONSTANTE C_2 CONTRA ELEVACION DE LA SUPERFICIE

Por lo tanto:

$$T_a = 540 \text{ } ^\circ\text{R}$$

y T_m fue determinada como el promedio de la temperatura en el fondo del agujero

$$T_b = T_a + \beta h$$

$$T_b = 540 + 0.01h$$

y la temperatura de superficie anterior

$$T_m = \frac{T_a + T_b}{2}$$

para $h = 10\ 000$ pies

$$T_m = \frac{540 + 640}{2} ; T_m = 590 \text{ } ^\circ\text{R}$$

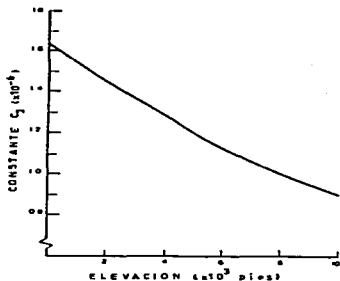


FIG. III.6 CONSTANTE C_2 CONTRA ELEVACION DE LA SUPERFICIE

Simulaciones numéricas extensas de transferencia de calor en estado transitorio, para operaciones de perforación con aire seco y gas, verificadas con datos de campo, muestran que la temperatura del flujo de aire y gas del espacio anular, es casi la misma temperatura del aire y gas inyectado dentro de la sarta de perforación, por lo tanto la temperatura promedio usada debe ser:

$$T_m = \frac{T_1 + T_b}{2} \quad \text{(III-11)}$$

Por ejemplo, con $t_1 = 160 \text{ } ^\circ\text{F}$

$$T_m = \frac{620 + 640}{2}$$

$$T_m = 630$$

Este cambio en la definición de T_m , altera ligeramente el resultado del gasto de flujo volumétrico mínimo dado en la referencia 1. Sin embargo debe notarse que para variaciones grandes de t_a y β con respecto a las usadas para los cálculos en la referencia 1, tendrán que realizarse cálculos específicos con la ecuación III-5.

En las figuras III.7, III.8 y III.9 se presentan gráficas de los promedios de presión atmosférica, la temperatura y el peso

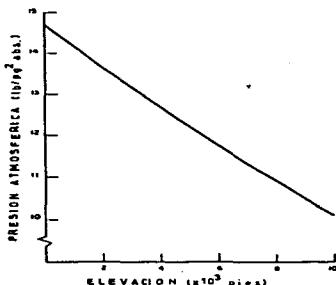


FIG. III.7 PRESION ATMOSFERICA ARRIBA DEL NIVEL DEL MAR (LATITUD MEDIA)

$$P_{eiv} = a - bH_{nm} + cH_{nm}^2 + dH_{nm}^3 - eH_{nm}^4 \quad (III-12)$$

donde:

P_{eiv} = Presión de superficie a cualquier elevación sobre el nivel del mar (lb/pg² abs.).

H_{nm} = Altura sobre el nivel del mar (pies).

$$a = 14.7306$$

$$c = 2.60422 \cdot 10^{-9}$$

$$e = 1.61458 \cdot 10^{-16}$$

$$b = 0.000554802$$

$$d = 2.25694 \cdot 10^{-12}$$

específico en latitud media contra la elevación, después de cada gráfica aparece su ecuación.

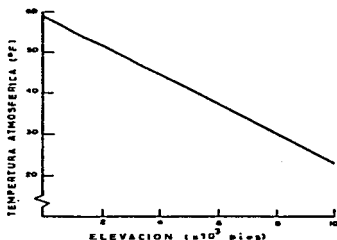


FIG. III.8 TEMPERATURA ATMOSFERICA ARRIBA DEL NIVEL DEL MAR (LATITUD MEDIA)

$$T_{eliv} = - 0.003533 \cdot H_{nm} + 58.9067 \quad (\text{III-13})$$

donde:

T_{eliv} = Temperatura de superficie a cualquier elevación sobre el nivel del mar (°F).

Con las ecuaciones y las constantes apropiadas, se pueden encontrar el gasto de flujo volumétrico mínimo de aire (o gas) y la presión en el fondo del agujero, para una operación de perforación con superficie localizada arriba del nivel del mar. El procedimiento para encontrar el gasto de flujo volumétrico mínimo

$$\gamma_{el} = f - iH_{nm}^2 + jH_{nm}^3 \quad (\text{III-14})$$

donde:

γ_{a1} = Peso específico del aire atmosférico a las condiciones atmosféricas reales (lb/pie³).

$$f = 0.764745 \quad i = 2.72661 \cdot 10^{-11}$$

$$l = 2.299 \cdot 10^{-6} \quad j = 6.39224 \cdot 10^{-16}$$

con la ecuación III-5 es un proceso iterativo y un proceso

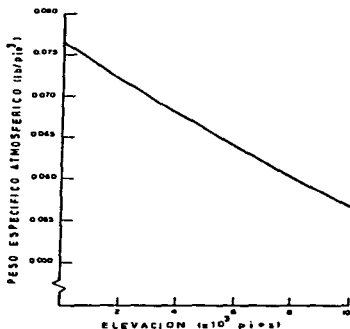


FIG. III.9 PESO ESPECIFICO ATMOSFERICO DEL AIRE ARRIBA DEL NIVEL DEL MAR (LATITUD MEDIA)

aproximado alternativo utiliza los datos presentados por Angel [Ref. 1] o los datos de la figura III.3 junto con los datos atmosféricos de las ecuaciones III-12, III-13 y III-14 (o figuras III.7 III.8 y III.9).

Para el ejemplo de perforación con aire en la sección II.3 (superficie localizada a nivel del mar), el gasto de flujo volumétrico mínimo de aire (puede ser encontrado en la figura

III.3 ó en la referencia 1). Para las siguientes condiciones: agujero con diámetro de 7 ⁷/₈ pg. tubería de perforación con diámetro exterior de 4 ¹/₂ pg. con una velocidad de perforación de 60 pies/h y una profundidad vertical en el pozo de 10 000 pies; Q = 1 442 pies³ de aire estándar/minuto.

Si la localización de la superficie, en el ejemplo de perforación con aire se cambia a 2,000 pies sobre el nivel del mar; entonces como el gasto en el flujo de aire para esta elevación debe ser el mismo que el anterior al nivel del mar, debe ser encontrado el gasto para las nuevas condiciones atmosféricas, Q_{e1}, mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{e1} = Q_{nm} \left(\frac{\gamma_{nm}}{\gamma_{e1}} \right) \quad \text{(III-15)}$$

donde: γ_{nm} = Peso específico del aire a las condiciones atmosféricas del nivel del mar (lb/pie³).

γ_{e1} = Peso específico del aire a las condiciones atmosféricas reales (lb/pie³).

Para la superficie localizada a una altura de 2 000 pies (sobre el nivel del mar), la ecuación III-15 se reduce a lo siguiente:

$$Q_{e1} = 1,442 \left(\frac{0.0765}{0.0721} \right)$$

$$\text{ó } Q_{e1} = 1,530 \text{ pies}^3/\text{min}$$

Para el ejemplo de perforación con aire en la sección II.3, la tabla III.1 muestra los requerimientos mínimos aproximados para el gasto en el flujo volumétrico de aire para diferentes superficies localizadas arriba del nivel del mar. También están dados los gastos volumétricos mínimos exactos para el flujo de

aire determinados con la ecuación III.5 y usando las constantes apropiadas C_1 , C_2 y C_3 .

Comparando las soluciones exactas y las soluciones aproximadas, se observa que el método aproximado produce un gasto volumétrico mínimo ligeramente mayor conforme se incrementa la elevación (1.8 % para 10.000 pies de elevación).

La omisión de la S indica que el gasto volumétrico de aire que entra al compresor no es mayor a las condiciones estándar (en el nivel del mar). Estos gastos volumétricos mínimos son aquellos que el compresor requiere producir para las nuevas condiciones atmosféricas.

TABLA III.1
Comparación de Gastos Mínimos Volumétricos
Exactos* y Aproximados

Superficie Localizada Arriba del Nivel del Mar (pies)	exacto	aproximado
0	1,442 PCMS	1,442 PCMS
2,000	1,523 PCM	1,530 PCM
4,000	1,611 PCM	1,625 PCM
6,000	1,706 PCM	1,726 PCM
8,000	1,808 PCM	1,836 PCM
10,000	1,918 PCM	1,952 PCM

* De la elevación de la superficie corregida por la ecuación de Angel (III-5)

Como se discutió anteriormente, las unidades de compresión están principalmente clasificadas conforme a sus respectivos gastos volumétricos de entrada. Si se supone que un tipo particular de unidad de compresión, tiene un gasto volumétrico de entrada a las condiciones "nivel del mar", de $Q_{nm}=1200$ pies³/min estándar; entonces conforme esta unidad de compresión es movida para operar a una mayor elevación, este gasto volumétrico de

entrada sólo se reducirá ligeramente. Aunque otras características en la unidad de compresión cambiarán sustancialmente con la operación elevada, por ejemplo la potencia en la alimentación, para cálculos de ingeniería en campo, se supondrá que el gasto volumétrico de entrada para una unidad de compresión no varía con la elevación del lugar. Por lo tanto si una unidad de compresión típica es clasificada con un gasto volumétrico a nivel del mar de 1,200 pies³/min estándar, entonces en todos los demás lugares elevados, el gasto volumétrico supuesto a la entrada será:

$$Q_{e1} = 1\ 200 \text{ pies}^3/\text{min}$$

Además, a menos que haya problemas de erosión poco comunes debido a los excesivos gastos volumétricos de circulación, se utiliza la capacidad total del compresor.

Por lo tanto, para el ejemplo de perforación con aire de la sección II.3, si se supone que una unidad típica de compresión tiene un gasto volumétrico a la entrada de 1,200 pies³/min, sin hacer caso de la localización en la superficie, entonces dos unidades de compresores operando en paralelo serán necesarias para abastecer el aire en la operación de perforación.

El gasto volumétrico real de circulación, Q_r , para la localización a nivel del mar será (para el $Q_{nm} = 1,442$ pies³/min estándar)

$$Q_r = 2,400 \text{ pies}^3/\text{min estándar}$$

y para localizaciones con mayor elevación (ver tabla III.1) también será usado el gasto de:

$$Q_r = 2,400 \text{ pies}^3/\text{min. estándar}$$

III.5 CALCULO DE LA PRESION DEL AIRE Y GAS

Como se vio en la sección III.3, hay un gasto volumétrico de

circulación de aire (o gas), el cual debe ser usado en operaciones normales de perforación con aire (o gas). Ese gasto volumétrico es sensible a los parámetros operacionales, la profundidad de perforación, el área transversal en espacio anular, la velocidad de penetración, el fluido de perforación usado (aire o gas) y las condiciones atmosféricas de la superficie.

Las unidades de compresión (y el amplificador de potencia), en orden de cumplir los requerimientos del flujo volumétrico para bajar por la sarta de perforación y subir por el espacio anular, deben comprimir el aire (o gas) hasta un volumen mucho más pequeño (a la salida del sistema compresor amplificador), en orden de alimentar el gasto másico de flujo necesario a través del sistema de circulación.

En este capítulo discutiremos la presión de aire (o gas) requerida por el equipo de superficie para las operaciones normales de perforación con aire (o gas).

El sistema de circulación aire/gas, en relación con la presión requerida, funciona en forma similar a un sistema de circulación con lodo. La presión requerida en el sistema de compresor y amplificador debe ser igual a las pérdidas totales de presión a través del sistema de circulación. Sin embargo, debido a que el aire y el gas son fluidos compresibles, el proceso para calcular la presión requerida es diferente para aire (o gas).

El paso inicial para obtener la presión requerida a la salida del sistema de compresores y amplificador, es calcular la presión en el fondo del espacio anular con la ecuación III-4.

El volumen de aire (o gas) es inyectado con presión a la sarta de perforación por los compresores (y el amplificador). La presión del aire (o gas) cambiará cuando el flujo de fluido alcanza la barrena en el fondo de la sarta de perforación, conforme al diámetro de los orificios (o las toberas) en la

barrena. Una práctica común en operaciones de perforación con aire o gas, es dejar los orificios abiertos a su mayor diámetro posible (sin toberas). En operaciones de perforación normal, ésto resulta generalmente en una significativa caída de presión en el flujo del fluido, desde el equipo en la superficie hasta las toberas de la barrena. La presión producida por el equipo de superficie es disipada por la expansión del aire/gas en la sarta de perforación arriba de la barrena. Bajo esas condiciones, la disipación de energía no ayuda a la operación de perforación global. Conforme el aire (o gas) pasa a través de los orificios abiertos de la barrena, éste se expande mas aún hasta la presión en el fondo del espacio anular y crea algo de turbulencia que a su vez ayuda a limpiar de recortes la superficie de corte barrena/roca.

LIMPIEZA MAXIMA DEL AGUJERO

El efecto limpiador en el fondo del agujero del aire (o gas) expandiéndose en las toberas de la barrena, puede ser optimizado para producir la máxima turbulencia en la superficie de corte barrena-roca. En situaciones de perforación con aire (o gas), hay una pequeña presión del fluido sobre la superficie barrena-roca, en el fondo del espacio anular. Los esfuerzos de roca con una superficie libre de recortes, permiten una fácil destrucción de la roca y el movimiento inicial de las partículas cortadas hacia la corriente de flujo. Esto es al contrario de la situación de perforación con lodo, donde la destrucción de la roca por la barrena es efectuada principalmente por la presión hidrostática del fluido en el fondo del agujero. En la perforación con aire y gas, los cortes de roca de la superficie libre de recortes son capaces de dejar rápidamente el fondo. Por lo tanto, el maximizar la turbulencia en la superficie libre de recortes minimizará remoler dichos recortes.

En la situación de perforación con lodo, el propósito general de las toberas en la barrena es proporcionar un efecto de chorro (fuerza de impacto) que desalojará las partículas de la superficie de corte altamente presurizada y las forzará hacia la corriente de

lodo alrededor de la barrena.

En orden de maximizar la turbulencia del aire (o gas) en la superficie de corte, un flujo supersónico con alta velocidad de aire (o gas), debe ser mantenido en las toberas de la barrena durante las operaciones de perforación normales. Dichas condiciones de flujo están gobernadas por la magnitud de la presión aire/gas justo arriba de las toberas, dentro de la sarta de perforación en la posición (a), de la figura II.2 comparada con la magnitud de la presión aire/gas en el espacio anular en el fondo del pozo, en la posición (b) de la figura II.2. P_a es mantenida en un nivel tan grande como la magnitud de presión en la sarta de perforación arriba de las toberas de la barrena. Entonces

$$P_a = \left(\frac{2}{k+1} \right)_c^{-\frac{k}{k-1}} P_b \quad (\text{III-16})$$

donde k = Relación de calores específicos para aire (o gas).

P_b = Magnitud de la presión en el espacio anular en el fondo del pozo (lb/pie² abs).

P_a = Presión en el aire (o gas) arriba de las toberas en la barrena (lb/pie² abs).

existirá flujo sónico o supersónico a través de las toberas de la barrena. La ecuación III-16 es conocida como la relación de presión crítica. Si esta condición de flujo es mantenida a través de las toberas de la barrena, entonces el flujo de aire (o gas) a través de la barrena estará gobernado solamente por la presión y la temperatura del aire (o gas) arriba de las toberas P_a y T_a , entonces la presión y la temperatura reales del aire (o gas) bajo la barrena en el espacio anular en el fondo del pozo no afectarán el flujo de aire (o gas) a través de las toberas. El flujo de aire (o gas) a través de las toberas es por lo tanto, gobernado por la expresión:

$$G = \left[\frac{S g k}{R} \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right]^{0.5} \frac{A_n P_a}{T_a^{0.5}} \quad (\text{III-17})$$

donde G = Gasto másico en el flujo de aire (o gas) a través de las toberas (el sistema) (lb/seg).

S = Gravedad específica del gas (aire = 1).

R = Constante del gas (53.3 pies-lb/lb-°R).

k = Relación de calores específicos para aire (o gas).

g = Aceleración de la gravedad (32.2 pies/seg²).

A_n = Area total de las toberas en la barrena (pies²).

P_a = Presión en el aire (o gas) arriba de las toberas en la barrena (lb/pie² abs).

T_a = Temperatura del aire (o gas) arriba de las toberas de la barrena (°R).

El aire (o gas) saliendo de una tobera a condiciones de flujo supersónico, tendrá definido un flujo laminar o turbulento dependiendo de su número de Reynolds y de las condiciones de flujo a la salida. La figura III-10 muestra una representación ideal de estas complicadas condiciones de flujo a magnitudes relativas del número de Reynolds. La longitud en el núcleo del chorro especificada como Z_c (pg.), en la figura III-10, ha sido definida experimentalmente como una función del número de Reynolds, que es:

$$Z_c = 2.13 d_n R_e^{0.097} \quad (\text{III-18})$$

donde d_n = Diámetro de la abertura en la tobera (pg.).

R_e = Valor del número de Reynolds, para el flujo a la salida de la tobera adimensional.

La expresión para el número de Reynolds es:

$$R_e = \frac{V_n D_n}{\nu} \quad (\text{III-19})$$

donde V_n = Velocidad promedio del aire (o gas) a la salida de la tobera (pies/seg).

D_n = Diámetro de toberas (pie).

ν = Viscosidad cinemática del aire (pies²/seg).

Ha sido establecido a través de numerosos esfuerzos experimentales que la región de mayor turbulencia ocurrirá a una distancia $\lambda_n = 2Z_c$ aproximadamente, desde la salida de la tobera.

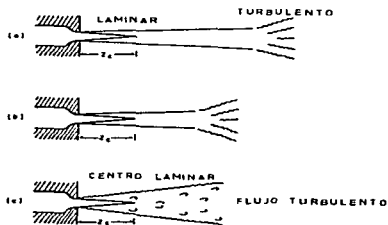


FIG. III.10 TRANSICION DE FLUJO LAMINAR A TURBULENTO

La figura III.11 es una presentación gráfica de la ecuación III-18.

Para la mayoría de las barrenas comerciales, la distancia λ_n (pg.), desde la cara de las toberas hasta la superficie de recortes es aproximadamente (ver figura III.12):

$$\lambda_n = 0.58d_b \quad (\text{III-20})$$

donde d_b = Diámetro de la barrena en (pg.)

Esta relación puede variar dependiendo de la manufactura de la barrena, la barrena real a ser usada debe ser medida para obtener la distancia correcta desde la cara de las toberas hasta la superficie de recortes.

Si la máxima turbulencia de chorro existe a una distancia $2z_c$ desde la cara de tobera, entonces, para obtener la máxima turbulencia en la superficie de corte:

$$\lambda_n = 2z_c \quad (\text{III-21})$$

Sustituyendo las ecuaciones III-18 y III-20, en esta última tendremos:

$$0.58d_b = 2(2.13)d_n R_e^{0.097} \quad (\text{III-22})$$

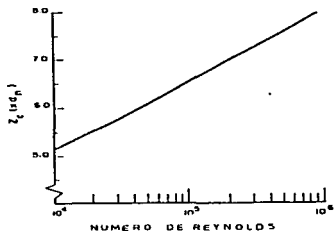


FIG. III.11 LONGITUD DEL CENTRO DEL CHORRO CONTRA EL NUMERO DE REYNOLDS

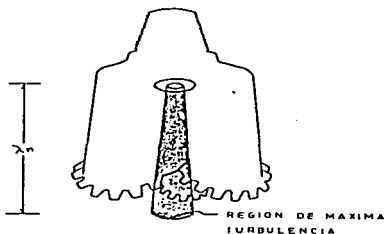


FIG. III.12 LONGITUD DEL CHORRO EN LA BARRENA

El número de Reynolds en la expresión anterior contiene el d_n y V_n . Para simplificar estos cálculos, se ha encontrado en extensos estudios experimentales para el aire y gas que:

$$z_c = 7.0d_n \quad (\text{III-23})$$

Por lo tanto, el diámetro de tobera puede ser obtenido facilmente como:

$$d_n = \frac{\lambda_n}{14.0} \quad (\text{III-24})$$

Se utiliza el treinta y dosavo de pulgada más cercano. Una vez que se ha determinado el diámetro de la tobera a utilizar, puede encontrarse el diámetro total del flujo aire/gas a través de las toberas con la siguiente ecuación:

$$A_n = \left(N_n \right) \frac{\Pi}{4} \left(\frac{d_n}{12} \right)^2 \quad (\text{III-25})$$

donde: A_n = Area total de toberas (pies²).
 N_n = Número de toberas.

y sabiendo el gasto másico del flujo a través del sistema, puede encontrarse la presión P_a arriba de la barrena.

Puede determinarse la velocidad en el flujo saliendo de las toberas V_n con la siguiente ecuación donde $V_n \gg V_a$.

$$\frac{V_n^2}{2g} = \frac{P_a}{\gamma_a} \left[\frac{k}{k-1} \right] \left[1 - \left(\frac{P_b}{P_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (\text{III-26})$$

La temperatura en el flujo de aire a través de las toberas puede ser encontrada de la siguiente forma:

$$V_n^2 - V_a^2 = 2C_p [T_a - T_n] \quad (\text{III-27})$$

donde V_a es despreciable debido a que $V_n \gg V_a$ y C_p es el calor específico del aire (pies²/seg²-°R)

Con la figura III.13 puede obtenerse la viscosidad cinemática del aire a T_n en °F o puede calcularse con la ecuación siguiente:

$$\nu = (0.0058 * T_n + 1.29657) * 10^{-4} \quad (\text{III-28})$$

donde:

ν = Viscosidad cinemática del aire (pie²/seg).

Con el número de Reynolds (de la ecuación III-19) se encuentra Z_c en la figura III.11

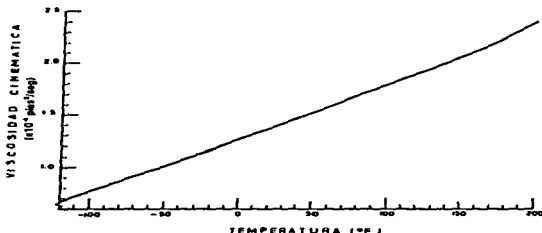


FIG. III.13 VISCOSIDAD CINEMATICA DEL AIRE CONTRA TEMPERATURA (EN ATMOSFERA ESTANDAR)

La presión arriba de la barrena, P_a puede ser usada como la presión de inyección; sin embargo, la presión en la columna de aire se incrementará. Como la velocidad de flujo es constante, la presión se reducirá a P_a justo arriba de la barrena, para permitir que el gasto en peso apropiado fluya a través de las toberas calibradas. Por lo tanto la energía de compresión será otra vez innecesariamente disipada en la sarta de perforación. La presión de

inyección en la sarta de perforación puede ser estimada cuando P_a es conocida, (para detalles usar el apéndice), esta ecuación es:

$$P_i = \left[\frac{P_a^2 + b' T_m^2 \left(e^{\frac{2a'h}{T_m}} - 1 \right)}{\frac{2ah}{e T_m}} \right]^{0.5} \quad (\text{III-29})$$

donde $a' = \frac{S}{53.3}$

$$b' = \frac{C_3 Q^2}{D_i^{5.333}}$$

D_i = Diámetro interior de la sarta de perforación (pies).

Estas ecuaciones nos dan el método para obtener los diámetros de toberas y la presión de inyección mínima, necesaria para producir la máxima turbulencia de flujo en la superficie de corte, en el fondo del pozo.

ORIFICIOS TOTALMENTE ABIERTOS DE LA BARRENA

Como fue mencionado previamente, es práctica común en operaciones de perforación con aire (o gas) el uso de barrenas con orificios totalmente abiertos (sin toberas). Para los ejemplos de perforación con aire, se utilizará el diámetro de los orificios de la barrena.

Suponiendo condiciones subsónicas, el gasto másico del flujo a través de los orificios abiertos está gobernado por la siguiente expresión:

$$G = A_n \left\{ \frac{2gk}{k-1} P_b \gamma_b \left[\left(\frac{P_a}{P_b} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] \right\}^{0.5} \quad (\text{III-30})$$

donde: γ_b es el peso específico del aire en el fondo del pozo (lb/pie³) y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\gamma_b = \frac{P_b}{RT_m}$$

III.6 DESARROLLO DEL PROGRAMA

A partir de las ecuaciones presentadas en las secciones III.4 y III.5 se diseñó el programa "PERFAIRE", para calcular la presión de inyección y el diámetro de toberas en una operación de perforación con aire, usando barrena con orificios abiertos o con toberas.

A las curvas III-7, III-8, III-9 y III-13 se les ajustó una ecuación tipo polinomio para cada una de ellas con el paquete "GRAPHER for DOS", Golden Software Inc. 1992 versión 1.79, para que así el programa pueda generar los datos que producen dichas curvas y se optimize el tiempo de entrada.

CARACTERISTICAS DEL PROGRAMA

El programa de computo fue elaborado en el lenguaje de programación "BASIC" desarrollado con la ayuda del paquete de programación "QUICK BASIC" versión 4.5 en inglés; 1985-1988 microsoft en una computadora personal GAMA 80488, 33 mhz y 16 MB en RAM.

Es un programa muy sencillo que fue diseñado para trabajar con datos del aire e involucra la mayoría de las ecuaciones del presente capítulo. Tiene una subrutina de presentación por pantalla, en seguida viene la alimentación de los datos en la forma siguiente:

E N T R A D A D E D A T O S

Profundidad del pozo	[pies]
Diámetro del agujero	[pg]

Diámetro de barrena	[pg]
Diámetro exterior de TP	[pg]
Diámetro interior de TP	[pg]
Temperatura de inyección	[°F]
Gradiente de temperatura	[°F/pie]
Gasto real de inyección	[pie ³ /min]
Velocidad de penetración	[pies/hr]
Altura sobre N.M.	[pies]

Como se puede ver los datos se manejan en unidades de campo para mejor comprensión del usuario. En seguida viene un menú donde aparecen dos opciones para hacer los cálculos:

- BARRENA CON TOBERAS
- BARRENA CON ORIFICIOS ABIERTOS

Este menú se maneja con las flechas verticales posicionando el cursor en la opción deseada y oprimiendo la tecla enter. La primera opción es para barrena con toberas y la segunda es para barrena con orificios totalmente abiertos. Al terminar de efectuar los cálculos, los presenta en forma tabulada para dos y tres toberas u orificios.

A continuación aparece un último menú en donde aparecen las tres opciones siguientes:

- CALCULAR CON LOS MISMOS DATOS
- CALCULAR CON DATOS NUEVOS
- IRSE A FIN

La primera opción vuelve al menú anterior para poder efectuar los calculos con otra opción, la segunda es para correr el programa con datos nuevos y la tercera es para salir del programa.

APLICACIONES DEL PROGRAMA DE COMPUTO

El programa es una herramienta que sirve para determinar en

forma rápida el diámetro de toberas y la presión de inyección mínima para producir la máxima turbulencia de flujo en la superficie de corte barrena-roca, en la perforación con aire de pozos geotérmicos.

Sabemos por la experiencia que si a un programa de computo lo alimentamos con datos ficticios, los resultados que nos arrojará serán ficticios. Es por eso que debemos darle datos reales. Con ello se garantiza que los resultados del programa serán satisfactorios. El programa se debe aplicar cuando ya se tiene un programa de perforación definido y se necesita saber con que presión vamos a inyectar los volúmenes calculados así como el diámetro de las toberas. Se hacen varias corridas y se comparan los resultados con los límites que nos dan los equipos de compresión con que contamos y por lo tanto se tomará la decisión que más se ajuste a las condiciones de campo, optimizando el proceso de perforación con aire.

ENTRADA DE DATOS AL PROGRAMA

Para correr el programa tenemos que darle diez datos específicos, de los cuales seis se pueden dar directamente debido a que corresponden a datos del pozo, tubería de perforación y altura de operación. Los cuatro restantes deben ser estimados de acuerdo a las referencias y la experiencia con otras perforaciones.

Debe tomarse en cuenta que el diámetro de agujero debe ser donde se presenta el área mas grande del espacio anular.

La temperatura de inyección se debe estimar de acuerdo a los rangos que nos dan los compresores conforme a su enfriamiento.

El gradiente de temperatura se debe estimar de acuerdo con los registros tomados de pozos perforados con anterioridad en la misma zona del campo.

El gasto de inyección se obtiene con las curvas de Angel y se ajusta para la altura donde se esté operando, con la ecuación (III-15).

La velocidad de penetración se debe estimar de la experiencia de perforaciones anteriores hechas con aire.

PRESENTACION DE RESULTADOS

Al final de los cálculos el programa proporciona una impresión de datos así como los resultados obtenidos.

En las siguientes paginas se presentan dos corridas del programa con los mismos datos pero diferentes alturas sobre el nivel del mar, donde:

dn = Diámetro de toberas en la barrena (pg).

do = Diámetro de orificios en la barrena (pg).

G = Gasto másico de aire en las toberas (lb/seg).

Nn = Número de toberas abiertas en la barrena.

No = Número de orificios abiertos en la barrena.

pa = Presión del aire arriba de la barrena (lb/pg² abs.).

pb = Presión del aire a la salida de la barrena (lb/pg² abs.).

pi = Presión de inyección dentro del tubo vertical (lb/pg² abs.).

Re = Numero de Reynolds (adim.).

tn = Temperatura de flujo a través de las toberas (°F).

Vn = Velocidad del aire a la salida de las toberas (pies/seg).

Para que exista levantamiento de partículas de roca debemos tener en la superficie de contacto barrena-roca un flujo turbulento. Tomamos el valor del Número de Reynolds dado por el programa y entramos a la gráfica III.12, obtenemos el valor de $z_c(xd_n)$; si este es mayor de 7.6 tenemos flujo turbulento y por lo tanto los valores estimados son correctos, por el contrario si este valor es menor a 7.6 tendremos problemas en el levantamiento de las partículas. Por lo tanto se modifica el gasto de entrada hasta que el valor de $z_c(xd_n)$ sea adecuado.

D A T O S

Profundidad del pozo (pies) : 10000
 Diámetro del agujero (pg) : 7.875
 Diámetro de barrena (pg) : 7.875
 Diámetro exterior de TP (pg) : 4.5
 Diámetro interior de TP (pg) : 3.8
 Temperatura de inyección (°F) : 160
 Gradiente de temperatura (°F/pie) : .01
 Gasto real de inyección (pies³/min) : 2400
 Velocidad de penetración (pies/hr) : 60
 Altura sobre N.M. (pies) : 0

R E S U L T A D O S

BARRENA CON TOBERAS

Nn	tn °F	dn pg	pc lb/pg ² abs.	pa lb/pg ² abs.	pi lb/pg ² abs.	G lb/seg	Vn pies/seg	Re adim
2	-116.6	0.3125	118.8	932.6	714.9	3.059	1820.14	690691.1
3	-74.4	0.3125	118.6	521.7	497.4	3.059	1675.04	481595.1

Para 2 toberas tenemos flujo supersónico

Para 3 toberas tenemos flujo supersónico

R E S U L T A D O S

BARRENA CON ORIFICIOS ABIERTOS

No	do pg	pb lb/pg ² abs.	pa lb/pg ² abs.	pi lb/pg ² abs.	G lb/seg
2	0.9000	118.8	145.6	219.2	3.059
3	0.9000	118.6	130.1	213.8	3.059

Para 2 orificios tenemos flujo subsónico

Para 3 orificios tenemos flujo subsónico

D A T O S

Profundidad del pozo (pies) : 10000
 Diámetro del agujero (pg) : 7.875
 Diámetro de barrena (pg) : 7.875
 Diámetro exterior de TP (pg) : 4.5
 Diámetro interior de TP (pg) : 3.8
 Temperatura de inyección (°F) : 160
 Gradiente de temperatura (°F/pie) : .01
 Gasto real de inyección (pies³/min) : 2400
 Velocidad de penetración (pies/hr) : 60
 Altura sobre N.M. (pies) : 6000

R E S U L T A D O S

BARRENA CON TOBERAS

Nm	tn °F	dn pg	pb lb/pg ² abs.	pa lb/pg ² abs.	pi lb/pg ² abs.	G lb/seg	Vn pies/seg	Re adim
2	-118.9	0.3125	101.6	769.6	537.0	2.546	1792.41	691929.8
3	-76.9	0.3125	101.6	512.1	408.6	2.546	1645.98	480153.0

Para 2 toberas tenemos flujo supersónico
 Para 3 toberas tenemos flujo supersónico

R E S U L T A D O S

BARRENA CON ORIFICIOS ABIERTOS

No	do pg	pb lb/pg ² abs.	pa lb/pg ² abs.	pi lb/pg ² abs.	G lb/seg
2	0.9000	101.6	122.9	181.5	2.546
3	0.9000	101.6	110.7	177.2	2.546

Para 2 orificios tenemos flujo subsónico
 Para 3 orificios tenemos flujo subsónico

CAPITULO IV
VALIDACION DEL PROGRAMA

IV.1 ANALISIS DE RESULTADOS

El programa fue probado con los datos del ejemplo del "Air and Gas Drilling Manual", sec.1.3 Capítulo I (sec II.3 de esta tesis). Al comparar los resultados del manual con los del programa se tienen ciertos porcentajes de error, los cuales se muestran en las siguientes ocho tablas:

PARA SUPERFICIE LOCALIZADA A NIVEL DEL MAR Y BARRENA CON TOBERAS

2 TOBERAS Y 0 PIES SOBRE EL NIVEL DEL MAR			
VARIABLES	AIR AND GAS DRILLING MANUAL	PROGRAMA DE COMPUTO PERFAIRE	% ERROR
t_n (°F)	-116	-116.6	0.520
d_n (pg)	0.3125	0.3125	0.000
P_b (lb/pg ² abs.)	118.6	118.6	0.000
P_a (lb/pg ² abs.)	933.5	932.5	0.096
p_i (lb/pg ² abs.)	715.6	714.9	0.097
G (lb/seg)	3.060	3.059	0.032
V_n (pies/seg)	1821	1820.14	0.047
R_n (adim.)	6973805	690691.1	0.960

Tabla IV.1 Porcentaje de error al comparar los resultados del "AIR AND GAS DRILLING MANUAL" y los del programa "PERFAIRE", para barrena con dos toberas.

3 TOBERAS Y 0 PIES SOBRE EL NIVEL DEL MAR

VARIABLES	AIR AND GAS DRILLING MANUAL	PROGRAMA DE COMPUTO PERFAIRE	% ERROR
t_n (°F)	-74	-74.6	0.540
d_n (pg)	0.3125	0.3125	0.000
p_b (lb/pg ² abs.)	118.6	118.6	0.000
p_a (lb/pg ² abs.)	622.2	621.7	0.080
p_1 (lb/pg ² abs.)	497.6	497.4	0.040
G (lb/seg)	3.060	3.059	0.032
V_n (pies/seg)	1676	1675.04	0.057
R_e (adim.)	480000	481595.1	0.330

Tabla IV.2 Porcentaje de error al comparar los resultados del "AIR AND GAS DRILLING MANUAL" y los del programa "PERFAIRE", para barrena con tres toberas.

PARA BARRENA CON ORIFICIOS TOTALMENTE ABIERTOS

2 ORIFICIOS Y 0 PIES SOBRE EL NIVEL DEL MAR

VARIABLES	AIR AND GAS DRILLING MANUAL	PROGRAMA DE COMPUTO PERFAIRE	% ERROR
p_b (lb/pg ² abs.)	118.6	118.6	0.000
p_a (lb/pg ² abs.)	153.4	145.6	5.080
p_1 (lb/pg ² abs.)	221.6	219.2	1.080
G (lb/seg)	3.060	3.059	0.033

Tabla IV.3 Porcentaje de error al comparar los resultados del "AIR AND GAS DRILLING MANUAL" y los del programa "PERFAIRE", para barrena con dos orificios totalmente abiertos.

3 ORIFICIOS Y 0 PIES SOBRE EL NIVEL DEL MAR

VARIABLES	AIR AND GAS DRILLING MANUAL	PROGRAMA DE COMPUTO PERFAIRE	† ERROR
P_b (lb/pg ² abs.)	118.6	118.6	0.000
P_a (lb/pg ² abs.)	133.3	130.1	2.400
P_i (lb/pg ² abs.)	214.4	213.8	0.280
G (lb/seg)	3.060	3.059	0.033

Tabla IV.4 Porcentaje de error al comparar los resultados del "AIR AND GAS DRILLING MANUAL" y los del programa "PERFAIRE", para barrena con tres orificios totalmente abiertos.

PARA SUPERFICIE LOCALIZADA A 6000 PIES SOBRE EL NIVEL DEL MAR Y
BARRENA CON TOBERAS

2 TOBERAS Y 6000 PIES SOBRE EL NIVEL DEL MAR

VARIABLES	AIR AND GAS DRILLING MANUAL	PROGRAMA DE COMPUTO PERFAIRE	† ERROR
t_n (°F)	-119.4	-118.9	0.420
d_n (pg)	0.3125	0.3125	0.000
P_b (lb/pg ² abs.)	101.6	101.6	0.000
P_a (lb/pg ² abs.)	773.9	769.6	0.550
P_i (lb/pg ² abs.)	592.8	587.6	0.970
G (lb/seg)	2.556	2.546	0.390
V_n (pies/seg)	1794	1792.41	0.089
R_e (adim.)	700000	691929.8	1.150

Tabla IV.5 Porcentaje de error al comparar los resultados del "AIR AND GAS DRILLING MANUAL" y los del programa "PERFAIRE", para barrena con dos toberas.

3 TOBERAS Y 6000 PIES SOBRE EL NIVEL DEL MAR

VARIABLES	AIR AND GAS DRILLING MANUAL	PROGRAMA DE COMPUTO PERFAIRE	% ERROR
t_n (°F)	-77.5	-76.9	0.770
d_n (pg)	0.3125	0.3125	0.000
p_b (lb/pg ² abs.)	101.6	101.6	0.000
p_a (lb/pg ² abs.)	515.8	513.1	0.520
p_i (lb/pg ² abs.)	412	408.6	0.820
G (lb/seg)	2.556	2.546	0.390
V_n (pies/seg)	1648	1645.8	0.130
R_n (adim.)	480000	480163	0.340

Tabla IV.6 Porcentaje de error al comparar los resultados del "AIR AND GAS DRILLING MANUAL" y los del programa "PERFAIRE", para barrena con tres toberas.

BARRENA CON ORIFICIOS TOTALMENTE ABIERTOS

2 ORIFICIOS Y 6000 PIES SOBRE EL NIVEL DEL MAR

VARIABLES	AIR AND GAS DRILLING MANUAL	PROGRAMA DE COMPUTO PERFAIRE	% ERROR
p_b (lb/pg ² abs.)	101.6	101.6	0.000
p_a (lb/pg ² abs.)	123.2	122.9	5.240
p_i (lb/pg ² abs.)	181.0	181.5	0.270
G (lb/seg)	2.556	2.546	0.390

Tabla IV.7 Porcentaje de error al comparar los resultados del "AIR AND GAS DRILLING MANUAL" y los del programa "PERFAIRE", para barrena con dos orificios totalmente abiertos.

3 ORIFICIOS Y 6000 PIES SOBRE EL NIVEL DEL MAR

VARIABLES	AIR AND GAS DRILLING MANUAL	PROGRAMA DE COMPUTO PERFAIRE	% ERROR
P_b (lb/pg ² abs.)	101.6	101.6	0.000
P_a (lb/pg ² abs.)	110.8	110.7	0.090
P_i (lb/pg ² abs.)	176.5	177.2	0.396
G (lb/seg)	2.556	2.546	0.390

Tabla IV.8 Porcentaje de error al comparar los resultados del "AIR AND GAS DRILLING MANUAL" y los del programa "PERFAIRE", para barrena con tres orificios totalmente abiertos.

A continuacion se presentan las siguientes tablas de las corridas del programa con los mismos datos anteriores pero con gradientes de temperatura más altos.

PARA SUPERFICIE LOCALIZADA A NIVEL DEL MAR Y BARRENA CON TOBERAS

2 TOBERAS Y 0 PIES SOBRE EL NIVEL DEL MAR

Gr (°F)	t_n (°F)	P_b (lb/pg ²) (abs.)	P_a (lb/pg ²) (abs.)	P_i (lb/pg ²) (abs.)	V_n (pies/seg)	R_n (adim.)
0.01	-116.6	118.6	932.6	714.9	1820.14	690691.6
0.02	-90.7	121.1	967.5	759.5	1890.33	602776.8
0.03	-65.1	123.6	1005.0	802.2	1973.33	538660.1
0.04	-39.2	126.1	1039.4	843.3	2045.53	487880.6
0.05	-13.4	128.6	1072.6	882.8	2115.21	451445.1
0.06	12.5	131.1	1104.0	921.0	2182.63	426196.7
0.07	38.3	133.6	1136.2	957.9	2247.99	394025.3

Tabla IV.9 La tabla muestra los resultados del programa para diferentes gradientes de temperatura con $d_n = 0.3125$ pg., $G = 3.059$ lb/seg y dos toberas.

PARA SUPERFICIE LOCALIZADA A NIVEL DEL MAR Y BARRENA CON ORIFICIOS
TOTALMENTE ABIERTOS

2 ORIFICIOS Y 0 PIES SOBRE EL NIVEL DEL MAR

G _x °F	P _b (lb/pg ²) (abs.)	P _a (lb/pg ²) (abs.)	P _i (lb/pg ²) (abs.)
0.01	118.6	145.6	219.2
0.02	121.1	149.7	230.3
0.03	123.6	153.8	241.0
0.04	126.1	157.8	251.2
0.05	128.6	161.8	261.1
0.06	131.1	165.7	270.7
0.07	133.6	169.5	280.0

Tabla IV.10 La tabla muestra los resultados del programa para gradientes de temperatura mas altos con d_a = 0.9 pg. y G = 3.059 lb/seg.

PARA BARRENA CON 3 TOBERAS O CON 3 ORIFICIOS, LOS RESULTADOS PARA GRADIENTES MAS ELEVADOS SON SIMILARES.

PARA MAYORES ELEVACIONES Y BARRENA CON 2 O 3 TOBERAS O CON 2 O 3 ORIFICIOS TOTALMENTE ABIERTOS, LOS RESULTADOS TAMBIEN SON SIMILARES.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

V.1 CONCLUSIONES

Cuando se perfora con un sistema convencional de lodo en una zona productora, la alta presión de circulación y las altas temperaturas, pueden forzar al lodo y los recortes hacia la formación y las fracturas tapándolas (daño a la formación productora). Si se usa un método de perforación con fluido aireado en esa zona, se puede disminuir la presión de circulación, pérdida del fluido hacia la formación y hacia la fractura, disminuyendo el daño a esa zona productora y mejorando la producción de fluido geotérmico.

Se realizó un programa de cómputo que permite calcular la presión de inyección y el diámetro de toberas al perforar con aire formaciones normales (que no tengan problemas de derrumbes, invasión de agua de formación etc.). Este programa está basado en las ecuaciones y gráficas del "Air Drilling Manual", Capítulo IV.

El programa fue diseñado para configuraciones de dos y tres toberas. Los resultados indican que la configuración de dos toberas alcanza mas rápidamente la situación de flujo turbulento en la superficie de corte. Esto verifica la afirmación de algunos operadores de perforación con aire de que la configuración de dos toberas produce mejores resultados en la perforación.

La configuración más apropiada será determinada por la situación de perforación aire/gas real. En situaciones de perforación con aire/gas donde el gasto volumétrico es alto, la configuración de dos toberas producirá presiones de inyección que son demasiado altas para poder usarlas en la práctica.

Estas aplicaciones presentadas presentan errores muy pequeños,

el más grande es de 5.08%. Estos errores se atribuyen a los ajustes en las ecuaciones de las curvas III-7, III-8, III-9 y III-13. Se puede decir que el programa da resultados confiables y se puede usar con confianza para los fines que fue diseñado.

Con las presiones de inyección dadas por el programa se busca facilitar la selección de los sistemas de compresores y amplificadores, que puedan satisfacer estos requerimientos para cualquier elevación de la superficie.

Para superficie localizada a 6000 pies, la configuración de tres toberas requiere menor presión de inyección que la configuración de dos toberas.

Los compresores y amplificadores de potencia normales pueden cumplir estos requerimientos para cualquier elevación.

Hay una ventaja para los orificios abiertos en la barrena. Cuando el flujo es subsónico a través de los orificios abiertos, cualquier incremento en la presión de fondo debido a entrada de agua, desde la formación hacia el fondo del espacio anular (u otros problemas del agujero), pueden ser detectados en la superficie por los incrementos en la presión requerida.

V.2 RECOMENDACIONES

La presencia de agua y las formaciones blandas pueden propiciar derrumbes en el agujero, provocando con ello el atrapamiento de la barrena y la tubería de perforación, llegando en ocasiones hasta perder el pozo. Es por eso que se debe planear muy bien el uso de la perforación con aire, tomando en cuenta todos los antecedentes acerca de las formaciones por atravesar.

Al utilizar la perforación con aire, podemos tener daños severos en la sarta de perforación debido a las altas temperaturas existentes, corrosión, desgaste mecánico de la tubería de perforación ocasionado por los recortes e incrustaciones. Es por

ello que antes de empezar la perforación se debe tomar en cuenta el perfil químico así como la temperatura de las formaciones por atravesar, para poder implementar algún inhibidor de esos daños a la sarta de perforación.

El aire es el fluido de perforación que tiene menor densidad hasta la fecha. Los resultados óptimos y la mayor economía en la perforación con aire dependen de muchos factores. Las formaciones duras secas o que producen pequeñas cantidades de líquido, proporcionan los mejores resultados.

La selección apropiada de una compañía de perforación con aire es importante para llevar a cabo el programa de perforación. La compañía debe indicar y mantener características de calidad, confiabilidad y experiencia. El equipo apropiado y el personal experimentado son esenciales para obtener los máximos beneficios de las técnicas de perforación con aire.

APENDICE

DETERMINACION DE LA PRESION DE FONDO

Se supone que el aire (o gas) de circulación y los sólidos, se mueven en el espacio anular como una mezcla homogénea (sin resbalamiento). La diferencial de presión (dP) a lo largo del espacio anular (dh) (positiva bajo la superficie) puede ser expresada como:

$$dP = \gamma_{mix} \left[1 + \frac{fV^2}{2g (D_h - D_p)} \right] dh \quad (1)$$

donde:

γ_{mix} = Peso específico de la mezcla homogénea de sólidos y aire o gas (lb/pie³).

f = Factor de fricción adimensional.

V = Velocidad del gas (pies/seg).

D_h = Diámetro del pozo (pies).

D_p = Diámetro de la tubería (pies).

g = Aceleración de la gravedad (32.2 pies/seg²).

El peso específico de la mezcla homogénea puede ser expresado como:

$$\gamma_{mix} = \frac{SP}{PT_m} (1 + r) \quad (2)$$

Donde T_m = Temperatura promedio de flujo en el espacio anular (°R).

r = Relación de peso de los sólidos (w_s) contra el peso del gas (w_g).

S = Gravedad específica del aire (o gas).

$$r = \frac{w_s}{w_g} \quad (3)$$

en la cual
$$w_s = \frac{\pi}{4} D_h^2 (62.2) (2.7) K' \quad (4)$$

y
$$w_g = \frac{SP_o}{RT_o} q \quad (5)$$

donde K' = Velocidad de perforación (pies/seg).

T_o = Temperatura de operación en atmósfera estándar (lb/pie² abs.).

P_o = Presión de operación en atmósfera estándar (lb/pie² abs.).

R = Constante universal de los gases (53.3 pies-lb/lb-°R).

q = Gasto volumétrico de flujo estándar (a T_o y P_o) (pie³/seg).

La gravedad específica de los sólidos se supone en 2.7.

La velocidad de flujo en el espacio anular puede ser expresada por:

$$V = q \left[\frac{P_o T_m}{T_o P} \right] \frac{1}{\frac{\pi}{4} (D_h^2 - D_p^2)} \quad (6)$$

El factor de fricción es:

$$f = 0.0014 (D_h - D_p)^{-0.333} \quad (7)$$

Las ecuaciones de la 2 a la 6 se sustituyen en la ecuación 1 para obtener:

$$dP = \left[\left(\frac{aP}{T_m} \right) \left(\frac{abT_m}{P} \right) \right] dh \quad (8)$$

donde:

$$a = \frac{1}{Rq} \left[Sq + \frac{\frac{\pi}{4} D_h^2 (62.2) (2.7) K'}{\frac{P_o}{RT_o}} \right] \quad (9)$$

$$b = \frac{0.014}{2g} \left[\frac{4}{\pi} \right]^2 \left[\frac{P_o}{T_o} \right] \frac{q^2}{(D_h - D_p)^{1.333} (D_h^2 - D_p^2)^2} \quad (10)$$

Las constantes anteriores se pueden cambiar reemplazando q(pies³/seg) por Q(pies³/min) y K'(pie/seg) con K(pie/h). Las constantes a y b llegan a ser:

$$a = \frac{1}{RQ} \left[SQ + \frac{\frac{\pi}{4} D_h^2 (62.2) (2.7) K'}{60 \frac{P_o}{RT_o}} \right] \quad (11)$$

$$b = \frac{0.014}{2g(3,600)} \left[\frac{4}{\pi} \right]^2 \left[\frac{P_o}{T_o} \right]^2 \frac{Q^2}{(D_h - D_p)^{1.333} (D_h^2 - D_p^2)^2} \quad (12)$$

La ecuación 8 puede ser ordenada e integrada

$$\int_{P_o}^{P_b} \frac{P dp}{P^2 + bT_m^2} = \frac{a}{T_m} \int_0^h dh$$

para obtener :

$$P_b = \left[\left(P_o^2 + bT_m^2 \right) e^{\frac{2ah}{T_m}} - bT_m \right] \quad (13)$$

DETERMINACION DE LA PRESION DE INYECCION

Para flujo de aire (o gas) a través de la sarta, la diferencia de pérdida de presión (dp) a lo largo de la tubería (dh) puede expresarse como:

$$dp = \gamma \left[1 - \frac{fV^2}{2gD_1} \right] dh \quad (14)$$

donde:

$$\gamma = \frac{SP}{RT_m} \quad (15)$$

γ = Peso específico del gas (lb/pie³).

D_1 = Diámetro interior de la tubería de perforación (pies).

$$f = 0.014 D_1^{-0.333} \quad (16)$$

$$V = q \left[\frac{P_o}{T_o} \right] \left[\frac{T_m}{P_o} \right] \frac{1}{\frac{\pi}{4} D_1^2} \quad (17)$$

Sustituyendo las ecuaciones 15, 16 y 17 en la ecuación 14 se tiene:

$$P = \left(\frac{a'P}{T_m} - \frac{a'b'T_m}{P} \right) \quad (18)$$

donde:

$$a' = \frac{S}{R} \quad (19)$$

$$b' = C_3 \frac{Q^2}{D_1^{5.333}} \quad (20)$$

La ecuación 18 puede ser ordenada e integrada

$$\int_{P_1}^{P_a} \frac{P dp}{P^2 - b'T_m^2} = \frac{a'}{T_m} \int_0^h dh$$

Lo cual da :

$$P_1 = \left[\frac{\frac{2'a'h}{T_m} (e^{\frac{2'a'h}{T_m}} - 1)}{\frac{2'a'h}{T_m}} \right] \quad (21)$$

donde:

P_1 = Presión de inyección dentro del tubo vertical en la superficie (lb/pie² abs.).

P_a = Presión arriba de la barrena (lb/pie² abs.).

NOMENCLATURA

- A_a = Area de la sección transversal en el espacio anular (pies²).
- A_n = Area total de toberas en la barrena (pies²).
- C_d = Coeficiente de arrastre (adimensional).
- C_p = Calor específico del aire (pies²/seg²·°R).
- D_i = Diámetro interior de la tubería (pies).
- D_h = Diámetro del agujero en (pies).
- D_n = Diámetro de toberas (pie).
- D_p = Diámetro exterior de la tubería de perforación (pies).
- d_b = Diámetro de la barrena en (pg).
- d_1 = Diámetro de camisa de la bomba de lodos en (pg).
- d_n = Diámetro de tobera en la barrena (pg).
- d_o = Diámetro de orificios en la barrena (pg).
- d_p = Diámetro de la partícula (pie).
- G = Gasto másico en el flujo de aire (o gas) a través de las toberas (lb/seg).
- g = Aceleración de la gravedad (32.2 pies/seg²).
- H_{na} = Altura sobre el nivel del mar (pies).
- HP_t = Potencia teórica (caballos de fuerza) de una unidad de bombeo o de compresión.
- h = Profundidad vertical del agujero (pies).
- K = Velocidad de penetración (pies/h).
- k = Constante del gas definida como la relación de los calores específicos; para el aire $k = 1.4$.
- L_c = longitud requerida de los lastrabarreras (pies).
- ℓ_s = Carrera del émbolo (pg).
- N = Número de emboladas por minuto (rpm).
- N_n = Número de toberas.
- NP_n = Factor de seguridad para ajustar el punto neutral dentro de los lastrabarreras (comúnmente 0.85).
- n_s = Numero de etapas interconectadas en un compresor (comúnmente 1, 2 ó 3).
- P_a = Presión atmosférica de la superficie a la salida del espacio

- anular (lb/pie² abs.).
- P_a = Presión en el aire (o gas) arriba de las toberas en la barrena (lb/pie² abs.).
- P_b = Presión del aire en el espacio anular en el fondo del pozo (lb/pie² abs.).
- P_{siv} = Presión de superficie (atmosférica) a cualquier elevación sobre el nivel del mar (lb/pg²).
- P_i = Presión de inyección dentro del tubo vertical en la superficie (lb/pie² abs.).
- p = Presión en el flujo del fluido en la bomba (lb/pg² grav.).
- P_D = Presión de aire a la salida del compresor (lb/pg² abs.).
- P_{na} = Presión atmosférica a nivel del mar (lb/pie² abs.).
- P_o = Presión atmosférica de operación (lb/pie² abs.).
- P_a = Presión en el aire (o gas) arriba de las toberas en la barrena (lb/pg² abs.).
- P_b = Presión del aire en el espacio anular en el fondo del pozo (lb/pg² abs.).
- p_i = Presión de inyección dentro del tubo vertical en la superficie (lb/pg² abs.).
- P_a = Presión del aire (o gas) entrando al compresor (lb/pg² abs.).
- Q_{e1} = Gasto volumétrico de aire a cualquier elevación (pies³/min).
- Q_1 = Velocidad flujo volumétrico teórico a través de la bomba (gal/min).
- Q_r = Gasto volumétrico real de circulación (pies³/min).
- Q_a = Volumen de aire (o gas) a la entrada del compresor (pie³/min estándar).
- q_r = Densidad del fluido. (lb/pie³)
- q_p = Densidad de la partícula. (lb/pie³)
- R = Constante del gas (53.3 pies-lb/lb-°R).
- R_e = Valor del número de Reynolds, para el flujo a la salida de la tobera (adimensional).
- S = Gravedad específica del gas (aire = 1).
- T_a = Temperatura atmosférica en la superficie (°R).
- T_s = Temperatura del aire (o gas) arriba de las toberas de la

barrena ($^{\circ}R$).

- T_b = Temperatura en el fondo del agujero ($^{\circ}R$).
- T_{siv} = Temperatura de superficie a cualquier elevación sobre el nivel del mar ($^{\circ}F$).
- T_i = Temperatura de inyección ($^{\circ}R$).
- T_m = Temperatura promedio del aire (o gas) fluyendo $^{\circ}R$ (promedio de la temperatura de inyección del aire (o gas) y la temperatura en el fondo del agujero).
- T_n = Temperatura de flujo a través de las toberas ($^{\circ}R$).
- T_{na} = Temperatura atmosférica a nivel del mar ($^{\circ}R$).
- T_o = Temperatura atmosférica de operación ($^{\circ}R$).
- t_n = Temperatura de flujo a través de las toberas ($^{\circ}F$).
- V_n = Velocidad del aire arriba de la barrena (pies/seg).
- V_a = Velocidad promedio del aire (o gas) a la salida de la tobera (pies/seg).
- V_t = Velocidad terminal (pie/seg).
- v_{min} = Velocidad mínima equivalente de un aire estándar para remover los recortes ($v_{min} = 3\ 000$ pie/min).
- W_b = Cantidad de peso por aplicar sobre la barrena.
- w_c = Peso por unidad de longitud de los lastrabarreras (lb/pie).
- z_c = Longitud de la región central del chorro de aire desde la salida de la tobera (pg).
- β = Gradiente geotérmico (0.01 $^{\circ}F$ por pie).
- γ_a = Peso específico arriba de la barrena (lb/pie³).
- γ_b = Peso específico del aire en el fondo del pozo (lb/pie³).
- γ_{e1} = Peso específico del aire a las condiciones atmosféricas reales (lb/pie³).
- γ_{na} = Peso específico del aire a las condiciones atmosféricas del nivel del mar.
- ν = Viscosidad cinemática del aire (pies²/seg).

REFERENCIAS

1. Angel, R.R. Volume Requiriments For Air and Gas Drilling Gulf Publishing Company, 1958.
2. Dr. Eduardo Gonzáles Partida, 1993 Seminario de Exploración Geotérmica, Facultad de ingeniería U.N.A.M.
3. V. M. Arellano 1988, La Energía Geotérmica en México y el Mundo. I.I.E.
4. James R. Kelser and Charles C. Carson, 1984. Geothermal Drilling. Sandia Laboratories.
5. Chi V. Ikoku, J.J. Azar, Practical Approach to Volume Requirements for Air and Gas Drilling. SPE 9445.
6. Roy M. Wolke, Ken Deakins, and Roger L. Suter. Air Drilling Tecniques, Geothermal Resourses Council, Bulletin may 1990.
7. C.F.E. Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía, Volumen 11 No. 1, Enero- Abril 1995.

BIBLIOGRAFIA

1. Ellis H. Austin, Drilling Engineering Handbook, 1983.
2. William C. Lions, Air And Gas Drilling Manual, Gulf Publishing Company, 1984.
3. Simposio Internacional sobre Desarrollo y Explotación de Recursos Geotérmicos, Cuernavaca Morelos, México 5-9 Oct. 1987.
4. Sergio Hernández Alavez, Aplicación de la Perforación con Aire En Pozos Geotérmicos, Tesis Profesional 1992.

5. Cutberto López Becerra, Factores Geocientíficos Que Intervienen en la Localización de un Pozo Geotérmico, Tesis Profesional 1992.
6. Benítez Hernández M.A., Garaicochea Petrirena F., Apuntes de Fluidos de perforación. Facultad de Ingeniería U.N.A.M.
7. Benítez Hernández M.A., Apuntes de Tecnología de la perforación (primera parte), Facultad de Ingeniería U.N.A.M., México D.F. 1982.