ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

TEMA :

EQUIPOS ELECTRONICOS APLICADOS A LA INDUSTRIA PETROLERA :

EQUIPOS DE RESISTIVIDAD Y DE POROSIDAD

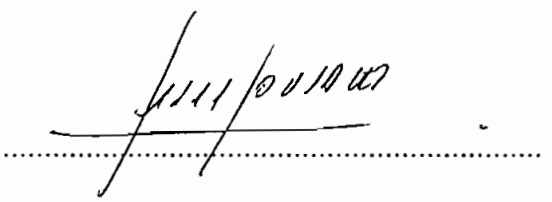
TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE INGENIERO EN LA ESPECIALIZACION DE ELECTRONICA Y TELECOMUNICACIONES

QUITO, DICIEMBRE DE 1993.

CERTIFICACION

Certifico que el presente trabajo de Tesis ha sido realizado en su totalidad por el Señor

CARLOS FABIAN HARO CHAVEZ



DOCTOR LUIS CORRALES

DIRECTOR DE TESIS

AGRADECIMIENTO

Agradezco a todas las personas que depositaron su confianza en mí, que me apoyaron y me dieron continuamente ánimos para terminar este trabajo de tesis. Agradezco sobre todo a mi Director de Tesis por sus consejos, a mi jefes de trabajo Dr. Guímer Domínguez e Ing. Roberto Ahumada por su soporte incondicional, a mi esposa e hijo por su envidiable paciencia, y a todos mis familiares por su valiosa ayuda.

DEDICATORIA

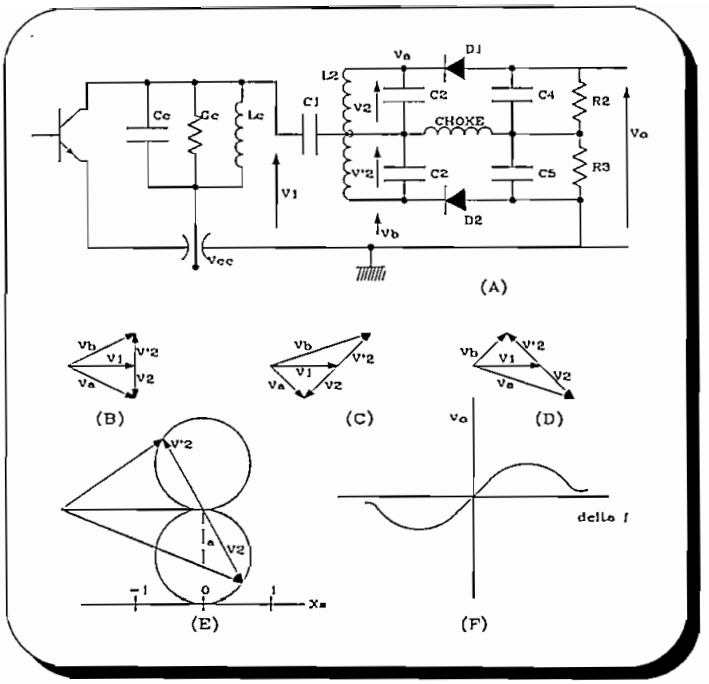
Este trabajo se lo dedico a mi esposa e hijo, y a todos mis familiares que me acompañaron muchas veces en mis desvelos. Se lo dedico también a mi Universidad, a la cual debo todo lo que soy, y de la cual siento un orgullo profundo.

PREFACIO

Esta es una tesis interdisciplinaria, que analiza el uso de los equipos Electrónicos para medir parámetros fundamentales en los pozos petroleros, demostrando que los circuitos electrónicos basados en principios físicos bien definidos, resuelven problemas en Ingeniería de Petróleos, Geología, Geofísica y Petrofísica.

De la gama amplia de equipos Electrónicos, se escogieron únicamente los equipos para medir la Resistividad y porosidad de las formaciones, por ser los más importantes.

Durante el presente trabajo, se enfatiza sobre el diseño especial de estos equipos electrónicos, por las altas temperaturas y presión a las que deben operar. Se describe el entorno en el que se realizan las medidas, y las dificultades en la medición. La tecnología actual se enmarca bajo una perspectiva histórica, para anticipar el futuro promisorio de estos equipos.



INGENIERIA ELECTRONICA

INGENIERIA DE PETROLEOS

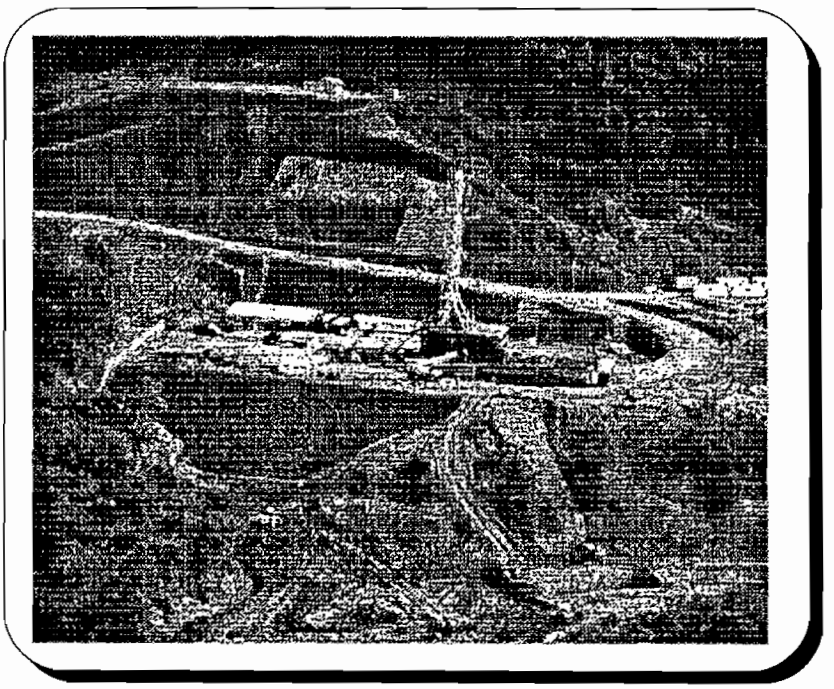


TABLA DE CONTENIDO

CAPITULO PRIMERO / INTRODUCCION Página #

1.1 Importancia de las medidas electrónicas 1

1.2 Evolución de la Tecnología en las medidas. 3

1.2.a Equipos de resistividad 7

1.2.b Equipos de porosidad 8

1.2.c Equipos que detectan la radiactividad natural de las rocas 9

1.2.d Equipos de carbón oxígeno o de espectroscopía de rayos gamma 10

1.2.e Equipos dieléctricos 11

1.2.f Potencial espontáneo (SP) 12

1.2.g Equipos de producción 13

1.2.h Equipos de buzamiento 14

1.2.i Equipos de corrosión 15

1.2.j Multiprobador de formaciones 17

1.2.k Equipos geoquímicos 18

1.2.l Equipos para obtener la geometría del pozo 18

1.2.m Equipos de microresistividad 19

1.2.n Geófonos y equipos para sísmica 19

1.2.o Equipos de cementación 20

1.3 Determinación de las Variables Físicas a medirse 20

1.4 Criterios generales de diseño de los aparatos de medida. Estrategias usadas en Electrónica 28

1.4.a Criterios básicos en el diseño de cualquier equipo de medida. ... 28

1.4.b Criterios de diseño comunes a todos los equipos electrónicos usados para la industria petrolera 29

1.4.b.1 Criterios mecánicos 29

1.4.b.2 Criterios eléctricos 33

1.4.c Factores que afectan la exactitud de las medidas 36

1.4.d Técnicas típicas de medida usadas en Electrónica 38

CAPITULO SEGUNDO / EQUIPOS DE RESISTIVIDAD

(A) EQUIPOS A BASE DE ELECTRODOS 39

2.1.a Principio físico y funcionamiento 39

2.2.a Factores que afectan la exactitud de las mediciones 47

2.3.a Criterios de diseño 49

2.4.a Valores típicos que se obtienen 51

TABLA DE CONTENIDO

(B) EQUIPO DE INDUCCION 51

2.1.b Principio físico y funcionamiento 51

2.2.b Factores que afectan la exactitud de las medidas 56

2.3.b Criterios de diseño 57

2.4.b Valores típicos que se obtienen 59

CAPITULO TERCERO / EQUIPOS DE POROSIDAD

(A) EQUIPO DE DENSIDAD 60

3.1.a Principio físico y funcionamiento 60

3.2.a Factores que afectan la exactitud de las medidas 70

3.3.a Criterios de diseño 72

3.4.a Valores típicos que se obtienen 75

(B) EQUIPO DE NEUTRON 75

3.1.b Principio físico y funcionamiento 75

3.2.b Factores que afectan la exactitud de las mediciones 78

3.3.b Criterios de diseño 79

3.4.b Valores típicos que se obtienen 80

(C) EQUIPO SONICO 80

3.1.c Principio físico y funcionamiento 80

3.2.c Factores que afectan la exactitud de las mediciones 91

3.3.c Criterios de diseño 92

3.4.c Valores típicos que se obtienen 94

3.5 DISEÑO - FUNCIONAMIENTO DE LOS CIRCUITOS DE LOS EQUIPOS DE RESISTIVIDAD Y POROSIDAD 96

3.5.a Multiplicador de voltaje 96

3.5.b Oscilador controlado por voltaje 97

3.5.c Filtro pasabajos 101

3.5.d Amplificadores de señal pequeña 103

3.5.e Divisores por n 105

3.5.f Contadores 108

3.5.g Registros de desplazamiento 109

3.5.h Oscilador de bloqueo 111

3.5.i Schmitt trigger 113

3.5.j Circuito monoestable 114

3.5.k Osciladores (Aestable) 116

3.5.l Osciladores convencionales 117

TABLA DE CONTENIDO

3.5.m Anunciadores piezo eléctricos, sonar y transmisores del sónico .. 120
3.5.n Corrimientos de fase 122
3.5.o Detectores de frecuencia modulada 124
3.5.p Detector de fase y lazo de amarre de fase 126
3.5.q Convertidor de digital a análogo 129
3.5.r Convertidor de análogo a digital 131
3.5.s Control automático de ganancia (variómetro) 132
3.6 LIMITACIONES DE LOS ELEMENTOS ELECTRONICOS . 134
3.6.1 Infuencia de la temperatura 134
3.6.1.a Resistencias fijas 134
3.6.1.b Semiconductores 136
3.6.1.c Ruido térmico en las resistencias 137
3.6.1.d Sueldas 139
3.6.1.e Condensadores 140
3.6.1.f Cristales de cuarzo 142
3.6.2 Atenuación en el cable 144
3.6.3 Ruidos en los equipos 146

CAPITULO CUARTO / AVANCES TECNOLOGICOS
Tendencia en el diseño de las nuevas herramientas 148
4.1 Alternativas en marcha 153
4.2 Alternativas futuras 155

CAPITULO QUINTO / CONCLUSIONES
5.1 Recomendaciones 157
5.2 Conclusiones 157

BIBLIOGRAFIA 159

APENDICE 160
APLICACIONES DE LOS EQUIPOS ELECTRONICOS 160
Aplicaciones en el campo Geológico 160
En Ingeniería de petróleos 161

CAPITULO PRIMERO

INTRODUCCION

1.1 Importancia de las medidas electrónicas en la industria del petróleo

La búsqueda de fuentes energéticas ha sido incansable durante estos últimos años en todas las regiones del mundo. Entre una de estas fuentes, el petróleo siempre ha tenido un papel protagónico. En esta industria tan pujante, la Electrónica ha desempeñado un rol de gran importancia. Las distintas técnicas electrónicas han permitido encontrar nuevos yacimientos, han facilitado la evaluación de reservas, la distribución de los hidrocarburos en forma areal y vertical, y han facilitado la elaboración de distinta clase de mapas geológicos, que han dado mucha luz sobre las riquezas que nuestra tierra posée. La Electrónica permite también hacer un seguimiento del comportamiento de los yacimientos durante su etapa de producción.

Para la industria petrolera siempre será necesaria una evaluación económica de los nuevos hallazgos petroleros, así como también una estrategia de producción óptima. La Electrónica le asiste en todos estos campos. Las medidas electrónicas (más conocidas como **registros eléctricos** en el mundo petrolero) son empleadas durante varias etapas de la prospección petrolera de la siguiente manera :

- *Etapa de búsqueda de hidrocarburos (exploración), mediante equipos especializados en geofisica. Realizando ciertas medidas, se pueden generar mapas aproximados de áreas extensas del subsuelo. En base a los resultados reportados por estos primeros estudios (conocidos como sísmica de superficie), se procede a perforar un pozo exploratorio, o se desiste si los datos indican poca probabilidad para encontrar hidrocarburos.*

- *Una vez perforado el pozo en sentido vertical generalmente, se realizan una serie de medidas de resistividad, nucleares y sónicas, que ayudan a ubicar -en el sentido vertical- las zonas que contienen hidrocarburos. Estas medidas se hacen en hueco abierto, y permiten calcular el espesor vertical de las capas productoras, así como los volúmenes de los fluidos. Estos datos volumétricos sirven para estimar preliminarmente el potencial económico del pozo.*

- *Evaluadas las posibles reservas del pozo, se procede a revestirlo con tubería, y a probar su producción. La tubería se fija a las paredes de las formaciones mediante una operación de cementación. Nuevamente, la tecnología electrónica interviene para comprobar la calidad de la cementación, y realizar una serie de medidas que dan una primera idea de la extensión del campo arealmente mediante medidas de presión. En esta etapa se obtienen varios registros llamados de pozo entubado.*

- *Si las pruebas han sido satisfactorias hasta este momento, se procede a perforar uno o varios pozos más, que nos permitirán encontrar los límites del yacimiento. Medidas electrónicas, llamadas de buzamiento, en*

combinacion con los mapas de geofísica, asisten en la ubicación óptima de los nuevos pozos de avanzada. Establecidos los límites del yacimiento, con datos dados por equipos electrónicos se pueden calcular las reservas totales del campo, su posible grado de recuperación, las estrategias de producción, y el valor económico del hallazgo.

- *Finalmente, los registros eléctricos permiten evaluar el comportamiento del campo, y sugieren las estrategias a seguir para optimizar la producción.*

Los equipos electrónicos para obtener registros eléctricos pueden clasificarse de diferentes maneras. Una primera alternativa es distinguir entre equipos de hueco abierto (el pozo sin revestir), y los equipos de pozo entubado (el pozo revestido con tubería), según ya se mencionó anteriormente. Otra posibilidad es distinguirlos de acuerdo al principio físico de medida, y se puede hablar de registros de resistividad, radiactivos, sónicos, dieléctricos, etc. Algunos registros también pueden ser catalogados de acuerdo a la función principal que cumplen; por ejemplo, registros de porosidad si su objetivo básico es obtener este parámetro; registros de producción, si sirven para monitorar la producción de los pozos. En lo sucesivo, no se adoptará una clasificación específica, sino que se utilizará la denominación que resulta más conocida.

1.2 Evolución de la Tecnología en las medidas

El primer registro eléctrico fue realizado en 1927. Al principio la tecnología era muy incipiente. La técnica básica consistia en una serie de **medidas puntuales** en pozo abierto, realizadas con equipos diseñados a base de

electrodos. Cada medida se tomaba parando a diferentes profundidades. Este proceso se repetía una y otra vez para diferentes estaciones separadas a intervalos constantes. Luego, con los puntos así obtenidos, se calculaba la resistividad, y los resultados se procesaban manualmente para generar el esbozo de una curva. Estos primeros registros se denominaban **registro de resistividad eléctrica,** y daban una idea de la resistividad de la formación, y de los fluidos contenidos en ella.

Cuatro años más tarde se introdujo el registro de **potencial espontáneo** que permitía diferenciar entre arenas y arcillas. Así se podía establecer la llamada litología básica de la formación. Para esta misma época, los avances tecnológicos permitieron empezar a grabar los **registros en forma continua**, lo cual era facilitado con la introducción de una cámara con película fotográfica, provista de galvanómetros. La presentación básica de los registros consistía en tres curvas de resistividad (normal corta, normal larga y lateral larga) junto con el registro de potencial espontáneo.

En la década de los años 40 empezaron a introducirse las herramientas radiactivas como las de **rayos gamma** y **neutrónicas**. Los primeros equipos neutrónicos mostraban una influencia muy pronunciada de los efectos del pozo. A fines de los 40 se reconoció su utilidad como posible herramienta para medir porosidad. Sin embargo, fue solo hasta la década de los 60 en que los registros de neutrón fueron mejorados notablemente, y estas medidas empezaron a ser aceptadas para un cálculo más confiable de las porosidades de la formación.

En los años 50 el avance más sobresaliente fue en cuanto se refiere a equipos de **microresistividad** y **lateroperfiles**. El direccionamiento (focalización) de las corrientes empezó a ser empleada como método para mejorar la respuesta de los equipos de electrodos. Así mismo, en 1949 y años siguientes tomaron auge los registros de inducción, que nacieron de la tecnología de detección de minas, método que fue muy desarrollado y utilizado en tiempos de guerra.

Los equipos **sónicos** fueron aceptados a fines de los años 50 como un registro de porosidad confiable. Estas herramientas fueron mejoradas con el transcurso de los años, en lo que se refiere a compensación por efectos de pozo.

El registro de **densidad** básico se puso a disposición de la industria petrolera en la década de los años 60. Avances posteriores estuvieron encaminados a obtener una mejor compensación por efectos del reboque de lodo, y a obtener información litológica también a partir de este registro.

Las muestras directas, tanto de fluidos como de roca (núcleos), han sido un tema de mucho interés dentro de la industria petrolera, porque ellas nos permiten una visualización mejor de los elementos que se tienen en un pozo determinado. Desde 1937 existían herramientas para sacar **muestras de roca** de la formación, que consistían en una bala cilíndrica hueca que se incrustaba en la formación, y recuperaba la muestra al ser jalada la bala. En 1957 se veían ya avances en la recuperación de **muestras de fluido**, acompañados de la medición de la presión de la formación. Estos equipos solo podían efectuar una sola

medida y recuperaban una sola muestra de fluido en cada bajada de la herramienta al pozo. El avance posterior estuvo encaminado a realizar un número ilimitado de lecturas, y recuperar varias muestras.

A fines de la década de los 70 y posteriores se empezaron a usar las llamadas herramientas **dieléctricas**, que permiten resolver problemas de evaluación cuando el agua de formación es dulce.

Otras medidas importantes desarrolladas últimamente incluyen la **resonancia magnética nuclear**, la **espectrometría nuclear** (natural e inducida), y registros especializados para pozo revestido.

En el presente reseña histórica, se ha querido dar una idea del avance tecnológico que han tenido los equipos electrónicos en la industria del petróleo. La lista mencionada no es exhaustiva, solo se han mencionado los equipos más comunes, y existen muchas medidas que se han dejado sin mencionar. Se puede observar que muchos de los principios físicos que gobiernan su funcionamiento han sido reconocidos desde hace muchos años. Sin embargo, el avance tecnológico es continuo, los nuevos elementos electrónicos que salen al mercado promueven mejoras constantes. La confiabilidad, exactitud, tamaño, la adquisición simultánea de muchas medidas de varias herramientas, etc. son parámetros en continua evolución, y los grandes avances solo han sido posibles en estos últimos años debido a la introducción masiva de computadores, y la miniaturización de los circuitos.

Ahora que ya se conoce la historia de los equipos, se hará un resumen de los principios físicos en que se basan.

Hay que anotar que los equipos para medir **resistividad** y **porosidad** son sin duda los **más importantes**, por eso han sido escogidos para un estudio más detallado. Con la adquisición de medidas de resistividad y de porosidad se resuelven en un 60 a un 70 % los problemas que se necesita definir en la industria petrolera. Los demás registros aquí nombrados, aunque también importantes, son complementarios de los primeros, y ayudan a resolver problemas más específicos.

1.2.a Equipos de resistividad

Los fluidos se encuentran en los espacios porosos de las rocas. Estando por lo general los espacios porosos unidos entre sí, la fase líquida forma un sistema que puede permitir la circulación de corrientes eléctricas. Los hidrocarburos (petróleo y gas) son fluidos que oponen alta resistencia al paso de la corriente, mientras que el agua, dependiendo de su contenido de sales minerales, opone generalmente poca resistencia. Por tanto, existe un gran contraste entre sus valores de resistividad. Esta característica permite utilizar los llamados equipos de resistividad en la industria petrolera para diferenciar entre petróleo y agua. La discusión sobre este tipo de registros se hará más profunda en el capítulo segundo.

1.2.b Equipos de porosidad

Como se anotó anteriormente, el fluido está en los poros. Por tanto, si se estima de alguna forma la porosidad de la roca, se podrá calcular el máximo volumen que puede ser ocupado por los fluidos. Este papel cumplen los equipos de porosidad, los cuales pueden ser del tipo radiactivo o acústicos.

Entre los radiactivos están los que miden densidad, y los neutrónicos. Los acústicos están representados por el equipo sónico.

Los equipos de **densidad** miden directamente la densidad electrónica. Mientras más sólido exista (menos poros), la densidad electrónica será mayor. Si la porosidad de la roca es mayor, la densidad electrónica será menor. Existe una serie de expresiones matemáticas que relacionan densidad electrónica con porosidad.

Los equipos de **neutrón** interactúan con los núcleos de hidrógeno contenido en los fluidos, ya sean hidrocarburos o agua. A mayor contenido de hidrógeno, mayor fluido existe, y por tanto la porosidad debe ser mayor. La señal en estos equipos es enviada por una fuente radiactiva, que bombardea la formación con neutrones rápidos.

El equipo **sónico** se basa en la propiedad de que los sólidos transmiten más fácilmente y más rápido los sonidos que los fluidos. Por tanto, a mayor tiempo

de propagación de una onda de sonido emitida por el equipo, mayor será la cantidad de fluidos y por ende mayor será la porosidad.

Este tipo de equipos también será motivo de una discusión más detallada en el capítulo tercero.

1.2.c Equipos que detectan la radiactividad natural de las rocas

Son los llamados equipos de **rayos gamma**. Sirven para distinguir el tipo de roca que existe en la formación. Con estos equipos se distingue entre las rocas que pueden almacenar y producir fluidos (arenas o carbonatos), y las que no lo pueden producir (arcillas). Por tanto, son las primeras las de interés para la industria petrolera. Las arcillas se caracterizan por su alto contenido de elementos radiactivos naturales, mientras las arenas y carbonatos presentan baja actividad radiactiva.

La mayor parte de las radiaciones naturales por rayos gamma son producidos por tres elementos en las formaciones : Torio, Uranio y Potasio. Como cada uno de estos elementos emite radiaciones de diferentes niveles de energía, es posible separarlos e identificarlos con un equipo llamado de **espectroscopía de rayos gamma naturales**. Este equipo está provisto de cinco ventanas de energía para lograr la identificación de estos elementos.

1.2.d Equipos de carbón oxígeno o de espectroscopía de rayos gamma

El carbón es un elemento constitutivo de los hidrocarburos. El oxígeno es un elemento que se encuentra en mayores proporciones en el agua. Por consiguiente, si de alguna forma se logra medir la relación entre carbono y oxígeno, se está en capacidad de diferenciar entre hidrocarburos y agua existentes en la formación. Esto se logra con la herramienta de **carbono oxígeno**, que en teoría es capaz de reconocer individualmente ocho elementos químicos como el carbono, oxígeno, silicio, calcio, hierro, cloro, hidrógeno y azufre. La concentración de estos elementos sirve para calcular la saturación de hidrocarburos, la salinidad del agua de formación, la litología y la arcillosidad de las formaciones. En la práctica es difícil conseguir este objetivo, porque estos elementos responden a las señales de esta herramienta con niveles de energía bajos. Esto significa que uno de los problemas de diseño de esta herramienta está directamente relacionada con la relación señal a ruido.

En la herramienta existe un acelerador que emite neutrones de alta energía hacia la formación, lo cual activa a varios elementos constitutivos de la roca. El espectro inelástico y de captura de los rayos gamma es medido, y se utilizan varias ventanas de energía para poder individualizar los elementos de interés. La contribución de la señal a cada ventana es baja, lo que limita una mejor respuesta de esta herramienta.

Estos equipos trabajan más confiablemente en pozos de diámetro menor que 9 pulgadas, y cuando el fluido que se encuentra en el hueco es perfectamente conocido.

1.2.e Equipos dieléctricos

Los equipos resistivos distinguen fácilmente entre hidrocarburos y agua con alto contenido de sales. Sin embargo, cuando el agua es dulce (baja concentración de sales), estas herramientas pierden gran parte de su resolución. Los valores de resistividad observados frente a formaciones con petróleo y agua dulce son del mismo orden de magnitud. Afortunadamente, existen los equipos que miden las propiedades dieléctricas de los fluidos, independientemente de su salinidad. Estos equipos trabajan a frecuencias de VHF y micro-ondas. Ya que existe un gran contraste entre los valores dieléctricos del agua dulce y los hidrocarburos, la distinción entre fluidos se logra fácilmente.

El equipo que trabaja en frecuencias de micro-ondas (1.1 GHz) es la **herramienta de propagación electromagnética** (EPT). Este equipo mide la atenuación y el retraso de fase de una onda electromagnética, a medida que se propaga a través de la formación. Esta herramienta investiga la zona invadida, y nos permite el cálculo de las saturaciones en la región invadida. Si el desplazamiento del petróleo movible es total debido al efecto de los fluidos de invasión, este equipo nos permitiría una evaluación directa de la saturación residual de petróleo. Debido a la alta frecuencia y a la ubicación de transmisores y detectores, la respuesta de este equipo es de una excelente

resolución vertical, pero de una profundidad de investigación muy somera. Sus antenas pueden ser conectadas en configuración endfire o broadside. Se utiliza alta frecuencia porque bajo esas condiciones los efectos de salinidad no son importantes en comparación a los dieléctricos (el término real de la impedancia es mucho menor que el término imaginario).

El equipo de VHF (25 MHz) es la **herramienta de propagación profunda** (DPT). Este equipo también mide la atenuación y el retraso de fase de una onda, mientras se propaga a través de la zona virgen de la formación. Por la menor frecuencia, este equipo responde tanto a salinidad como a efectos dieléctricos. Por este motivo, esta herramienta tiene mayor dificultad que el EPT para una fácil distinción entre agua dulce e hidrocarburo.

1.2.f Potencial espontáneo (SP)

Entre los fluidos existentes en las arenas y arcillas, entre el fluido de la arena y el lodo que está en el hueco, y entre la zona invadida y la zona virgen de la arena, se establecen una serie de intercambio de cargas eléctricas, que crean el llamado potencial espontáneo. Por tanto, este podría estar conformado por tres componentes.

Los efectos más fácilmente observables son que frente a las arenas, este potencial es mayor, siendo mínimo frente a las arcillas. A mayor salinidad del agua de formación, mayor es el potencial que se desarrolla. Sus mayores aplicaciones están en interpretación de litología, y cálculo de la resistividad del

agua de la formación. Este tipo de medida va incorporado en herramientas más completas como el lateroperfil. La lectura se hace valiéndose de dos electrodos, uno que va incorporado en el fondo de la herramienta, y el otro está en superficie. Este segundo electrodo se lo conoce comúnmente como pescado porque se lo coloca por lo general en la piscina de lodo.

1.2.g Equipos de producción

Entre los principales está el **medidor de flujo.** Consiste en una hélice muy sensible que se mueve al detectar el paso de los fluidos. Si pasan mayor cantidad de fluidos (mayor producción), mayor será el número de rotaciones. Por tanto, el número de revoluciones determina la producción total de fluidos.

El medidor de flujo solo mide la cantidad de fluidos. Se necesita el llamado **gradiomanómetro** para distinguir si el fluido producido es petróleo, agua o gas. Esta herramienta se basa en el principio de que, dependiendo de la clase de fluido que llene el hueco, será diferente la presión ejercida por la columna hidrostática. Por tanto, si se mide la diferencia de presión entre dos puntos separados siempre por la misma distancia (2 pies), se puede saber el fluido (agua o hidrocarburo) que está llenando ese espacio.

El **equipo de temperatura** también se encuentra entre los de producción. Su ayuda se basa en que los fluidos se encuentran a diferentes temperaturas, de acuerdo a la profundidad en que se encuentran en el pozo. Por ejemplo, si un

fluido es producido de una zona menos profunda, tenderá a enfriar la columna hidrostática.

Como un último complemento están los llamados **equipo de presión,** que sirven para medir el gradiente de presión entre las diferentes formaciones. Este equipo puede ser utilizado también para monitorar transientes de producción creados en los pozos, lo cual permite la evaluación de transmisibilidades de las formaciones.

Todas las medidas arriba mencionadas están integradas en un solo equipo conocido como **herramienta de medición continua de flujo.**

1.2.h Equipos de buzamiento

Son equipos que permiten evaluar la inclinación o buzamiento que pueden tener las capas. Son herramientas que deben estar equipadas en teoría con un mínimo de 3 microelectrodos montados en 3 brazos, posicionados a 120 grados entre sí. Definiendo tres puntos en el espacio, este tipo de distribución permite que se puedan establecer los planos por los que pasan las diferentes capas. De esta forma, se miden los ángulos de inclinación de las capas con respecto a la vertical, así como también el rumbo relativo que guarda su inclinación con respecto al Norte. Como las condiciones del hueco no son óptimas, siempre existe un grado de redundancia en la herramienta, la cual se diseña al menos con 4 brazos para tratar de garantizar que los planos puedan ser determinados, aún

en el caso de que uno de los brazos no pueda ejercer un buen contacto con la formación.

A más de los microelectrodos, estos equipos cuentan con un compás magnético y un inclinómetro, que les permite definir la trayectoria del pozo. Con el sistema de electrodos, se logra definir la orientación de las capas con respecto al pozo. Con el compás e inclinómetro, se corrigen estos valores para referirlos al Norte verdadero y a la vertical.

Los equipos más modernos están provistos de muchos electrodos, ubicados en varios de sus brazos (generalmente entre 4 y 6). Esto permite que no solo se determinen los parámetros básicos de inclinación y rumbo relativo de las capas, sino también que se puedan crear imágenes resistivas de las formaciones, en las que se destacan importantes características texturales de la roca. Estos datos tienen mucha aplicación en estudios de estratigrafía. La resolución vertical de estos equipos es excelente (0.2 pulg).

1.2.i Equipos de corrosión

Estas herramientas permiten evaluar las condiciones en que se encuentra el revestimiento de los pozos (casing), después de un cierto período largo de producción de un pozo.

Los hay de varios tipos. Entre ellos está el equipo **calibrador** (caliper) con muchos brazos, que nos permite medir el diámetro interno del revestimiento,

teniendo un cubrimiento de 360 grados. Los sitios en donde el diámetro de la tubería de revestimiento varía con respecto a un valor nominal pre-establecido para cada tamaño de tubería, presentan muy seguramente algún problema de corrosión.

Existe también un equipo de **análisis de la tubería** que genera corrientes de Eddy de alta frecuencia, y un flujo electromagnético. Cuando la tubería está en buenas condiciones, los campos creados son uniformes. En presencia de corrosión, los campos alteran su forma y se presentan fugas, con lo que se detectan incluso pequeños defectos en la tubería. Con este equipo se detectan problemas en la parte interna y externa de la tubería.

Un equipo diseñado con el principio de inducción también es empleado para evaluar corrosión. Se lo conoce como herramienta **electromagnética para detectar espesor de tubería.** Una bobina genera un campo magnético variable que interactúa con la tubería; una segunda bobina mide los corrimientos de fase de la señal. Estas medidas electromagnéticas se efectúan a diferentes frecuencias, y están relacionadas con el espesor de la tubería. Esta herramienta permite la detección de zonas grandes con problemas de corrosión. También permite la detección la pérdida de metal cuando existen tuberías adicionales externas a la considerada.

Otro equipo utilizado es el equipo llamado **televisor de fondo de pozo.** En este equipo se generan ondas acústicas que chocan con las paredes de la tubería. El barrido que se efectúa con estas ondas es de 360 grados. Midiendo los tiempos

que se demoran las ondas en reflejarse, se puede hacer un cálculo muy exacto de las dimensiones internas de la tubería. A más de esto, se puede generar una imagen continua en colores que emula la cara interna de la tubería de revestimiento. Esto permite localizar visualmente muchos de los problemas que se presentan en las tuberías.

1.2.j Multiprobador de formaciones

Este equipo genera dos períodos de flujo muy cortos, durante los cuales se succiona un total de 20 cc de fluidos de la formación. Esto se logra a través de una punta de prueba, que penetra una cierta distancia en la formación. A continuación se interrumpe el flujo cerrando unas válvulas de paso, y se crea un período de cierre. Durante todo este proceso se graban la presión, y se logra obtener de esta forma la presión de la formación. El análisis de estos transientes de presión también nos permiten calcular índices de permeabilidad, los cuales nos dan una idea de las permeabilidades verdaderas. Las presiones ejercidas por el lodo también son grabadas, y se puede graficar la gradiente de presión hidrostática creada por la columna de lodo.

Las medidas se hacen en estaciones, con paradas sucesivas a diferentes profundidades en el pozo. Con estos equipos también se logran obtener muestras de fluido de formación, que pueden ser analizadas en laboratorios especializados. Estas muestras, en la práctica vienen generalmente contaminadas por lodo, por lo que resulta difícil hacer un análisis confiable.

1.2.k Equipos geoquímicos

Trabajan bajo un principio similar al equipo de carbón oxígeno. Sin embargo, con este equipo se intenta distinguir hasta 12 elementos químicos abundantes en la naturaleza. En teoría se pueden distinguir el aluminio, calcio, cloro, gadolinio, hidrógeno, hierro, potasio, silicio, azufre, torio, el titanio y uranio. En el diseño de esta herramienta, la relación señal a ruido es un factor muy importante a considerar.

1.2.l Equipos para obtener la geometría del pozo

Están provistos de inclinómetros, compás magnético y brazos calibradores (calipers). El inclinómetro nos da la desviación del hueco con respecto a la vertical. El compás nos indica el rumbo con respecto al Norte de la inclinación del pozo. Por último, los calibradores miden constantemente el diámetro del pozo. Con estas medidas es posible calcular las proyecciones horizontales y verticales (con respecto a una referencia) de la trayectoria de un pozo. Así mismo nos permite calcular la profundidad verdadera vertical del pozo, que es la profundidad que se hubiera alcanzado si el pozo hubiera sido perforado verticalmente.

Como estos equipos están equipados con un compás magnético, únicamente pueden ser utilizados en hueco abierto. Para pozo entubado, se utilizan los llamado **gyros**, en cuyo diseño se reemplaza el compás magnético por un giroscopio.

1.2.m Equipos de microresistividad

Estos equipos miden la resistividad en la zona invadida únicamente, valiéndose de varios arreglos de microelectrodos. Los electrodos son de dimensiones pequeñas, y se enuentran separadas pocas pulgadas entre sí. Entre ellos se pueden mencionar el **microperfil**, el registro de **proximidad**, el registro **micro esférico enfocado.** El arreglo de microelectrodos se diseña en tal forma de que el flujo de corrientes sea focalizado, para poder sobrepasar el efecto adverso de la costra de lodo.

1.2.n Geófonos y equipos para sísmica

Son equipos provistos de un dispositivo que crea ondas en superficie, y de varios detectores que pueden ser ubicados en superficie y/o a diferentes profundidades en el pozo. El dispositivo generador de ondas puede ser una carga de dinamita, una unidad vibradora (que emula un terremoto de pequeñas proporciones), o la llamada pistola de aire. Los detectores se los conoce con el nombre genérico de geófonos. Cuando el pozo no ha sido perforado todavía, los geófonos se ubican solo en superficie, y los resultados constituyen la sísmica de superficie.

Las ondas generadas en superficie viajan a través de la tierra, y producen una serie de reflecciones y refracciones a su paso por las diferentes capas. El tiempo que demora en llegar una onda a una capa determinada es el objetivo

principal de la medición. Graficando estos tiempos, se pueden generar mapas sintéticos que nos indican cómo están ubicadas espacialmente las diferentes

capas, logrando cubrimientos de áreas bastante extensas. Por último, los tiempos adquiridos se comparan con las profundidades verdaderas, con lo que es posible también crear mapas expresados en términos de profundidad. Del análisis de estos datos se preocupa la geofisica.

1.2.o Equipos de cementación

Para evaluar la cementación de la tubería, se utiliza el mismo equipo equipo sónico ya descrito para medir porosidad. Sin embargo, en este caso se miden las amplitudes de las ondas captadas por el receptor. Si la tubería está bien cementada, la libertad de movimiento que tiene es mínima, y vibrará muy poco o nada al ser sometida a la exitación creada por el transmisor del equipo sónico. En este caso, la amplitud de la señal en el receptor será pequeña. Si la cementación es pobre, la tubería vibrará bastante ante cualquier señal externa, y se habrá una respuesta grande en el receptor.

1.3 Determinación de las Variables Físicas a medirse

Lo que se quiere medir es el **volumen de hidrocarburos** que se pueden recuperar o producir del subsuelo. A pesar de toda la tecnología actual, los volúmenes y saturaciones de los fluidos no pueden ser medidos con precisión directamente, por lo que se utilizan medidas indirectas como las de **resistividad**

y **porosidad**, para poder determinar la cantidad de hidrocarburos. El medio en el cual se efectúan las medidas es un **pozo** estrecho de varios kilómetros de profundidad en el subsuelo.

La discusión que sigue a continuación nos introducirá un poco en el área de petróleos, apartándonos un poco de los temas estrictamente electrónicos. Sin embargo, esta discusión se considera indispensable para definir más detalladamente qué es lo que debemos medir, y qué problemas nos está creando el medio en que hacemos las mediciones. Estos parámetros son fundamentales para el diseño de los equipos electrónicos.

Las medidas se realizan en un medio totalmente hostil, con altas temperaturas y presiones, ya que el equipo electrónico es introducido en un hueco de gran profundidad (pozo). Un pozo se asemeja a una guía de onda, que se encuentra llena de fluidos. La guía de onda en sí está formada por las paredes del pozo o formación. La formación es roca que no es macisa, sino que tiene un grado mayor o menor de porosidad, lo cual permite que existan fluidos en ella. Si los poros están comunicados entre sí y permiten un fácil movimiento de fluidos, se dice que la permeabilidad de la roca es buena. Los poros de las rocas comunicados entre sí a veces son esquematizados como una serie de tubos capilares, debido a sus pequeñas dimensiones. Los fluidos que llenan los poros pueden ser agua o hidrocarburos (petróleo o gas). Son **los fluidos** con su contenido de sales minerales los que **permiten la circulación de corrientes eléctricas**, porque las rocas en donde se acumulan hidrocarburos están compuestas de minerales generalmente aislantes cuando están secos.

Para comprender mejor el medio en que se van a realizar las medidas eléctricas (fig. # 1), es necesario referirse primeramente al proceso de perforación de un pozo. Un pozo se perfora con una broca que interiormente es hueca y permite el paso de fluidos a través de ella. La broca va enroscada en la parte inferior de una serie de tubos ensamblados entre sí llamados tubería de perforación. El interior de la tubería de perforación y la broca, y la parte externa de las mismas, forman un circuito hidráulico completo por el que se hace circular lodo (lodo de perforación) desde la superficie. En superficie el lodo se mantiene en una especie de estanque llamado piscina de lodo. El componente básico del lodo puede ser agua o aceite, lo que se conoce como lodos de base agua o aceite. Las funciones del lodo son varias, pero las más importantes talvés son :

- *Para controlar las presiones de las formaciones que atraviesan.*
- *Para remover los materiales que resultan del proceso de trituración de la roca mientras se perfora el pozo.*
- *Para lubricar y evitar recalentamiento excesivo de la broca.*
- *Para evitar que las paredes de la formación se derrumben, una vez que ya han sido perforadas.*

El lodo de perforación se filtra en la formación dependiendo de la permeabilidad de la roca. Durante este proceso de invasión de fluidos que dura unas cuantas horas, las partículas sólidas del lodo se van depositando en la pared de la formación, formando una costra (reboque de lodo). Como el reboque tiene baja permeabilidad, la filtración se dificulta cada vez más hasta que se llega

finalmente a un estado de equilibrio en el que cesa toda filtración. El equilibrio se presenta bajo los siguientes aspectos :

- *Equilibrio entre la presión de la formación (debida sobre todo al peso de las capas que están encima) y la presión ejercida por la columna hidrostática del lodo. La diferencia de presión es totalmente absorvida por el reboque. La dirección de la filtración es siempre hacia la formación, ya que la presión de la columna hidrostática se diseña siempre mayor que la presión de la formación. A mayor densidad o peso del lodo, mayor será la presión de la columna hidrostática.*

- *Equilibrio eléctrico, en el que se detiene cualquier intercambio iónico debido al contraste de salinidades entre el lodo y el fluido de la formación. El intercambio iónico permite que se crée el potencial espontáneo (SP).*

- *Equilibrio mecánico, ya que la formación del reboque minimiza las posibilidades de que la formación se derrumbe.*

De lo anterior se deduce que los equipos electrónicos no van a medir únicamente los parámetros de la formación sin alterar (llamada zona virgen), sino que van a tener una contribución de la zona invadida, de la costra de lodo, y del lodo que está en el hueco (fig. # 1). Este esquema puede complicarse aún más de acuerdo al patrón de invasión que puede haberse generado en la formación. Por facilidad, generalmente se asumen zonas bien diferenciadas como la mostrada en la fig. # 1.

Verticalmente, las medidas van a tener la contribución de la zona en cuestión más la de las capas adyacentes (fig. # 1), las cuales pueden tener propiedades totalmente diferentes dependiendo del tipo de roca o fluidos. Además, dependiendo de la permeabilidad vertical de la roca, los fluidos más pesados pueden precipitarse (segregación de fluidos) por efectos de la gravedad, creando un perfil de invasión heterogéneo. Este proceso de segregación se produce después de haber alcanzado el estado de equilibrio ya mencionado. Hasta aquí hemos supuesto que se ha perforado un pozo totalmente cilíndrico.

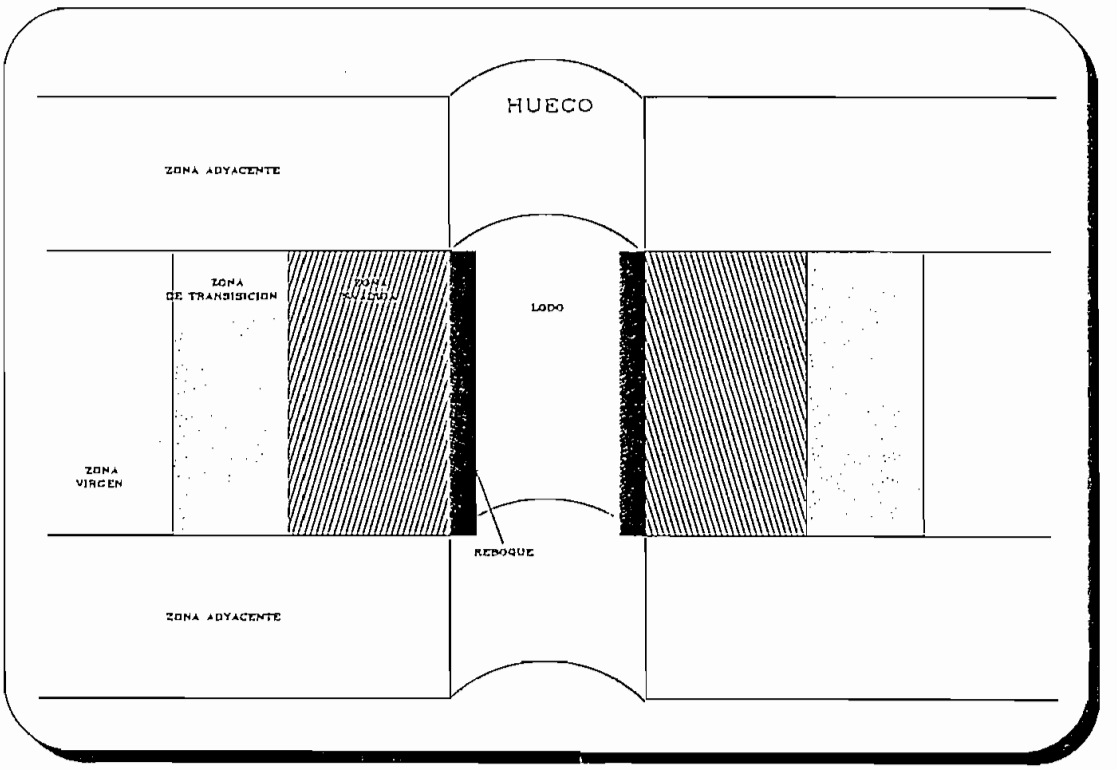


Fig. # 1 ESQUEMA DE UN POZO PETROLERO

Sin embargo, muy raras veces se obtiene este objetivo, y en el pozo se crean ensanchamientos o cavernas, y las paredes de la formación pueden presentar rugosidades. Las cavernas van a estar llenas de lodo, y en muchas ocasiones,

las herramientas en vez de leer los parámetros de la formación, están leyendo los parámetros del lodo.

Por último, la distribución de fluidos en la zona virgen no siempre es homogénea. Cuando un yacimiento tiene dos o más fluidos (agua, petróleo, gas), los fluidos más pesados (agua) van al fondo. Las zonas límites entre fase y fase presentan zonas de transición, donde un fluido va disminuyendo verticalmente su saturación dejando más espacio libre para el otro. Esta es otra fuente de heterogeneidad para las medidas.

Por todos los problemas anteriormente descritos, las herramientas necesitan circuitos que hagan correcciones automáticas en lo posible por efecto de pozo, por la influencia del reboque, peso del lodo, por invasión, por espesor de capa, etc., para poder obtener los valores de la zona virgen, que es la que inicialmente nos interesa. Además, se deben considerar correcciones por factores geométricos, ya que al diseñar las herramientas se supone el medio circundante como un medio homogéneo e isotrópico, y ya se ha visto que las heterogeneidades (anisotropía) pueden ser múltiples. Muchas de las correcciones mencionadas son manejadas por computadores en superficie.

Para lograr correcciones adecuadas, las herramientas se diseñan para que midan en teoría en una zona únicamente, ya sea en la zona invadida, transición o solo en la zona virgen. Por ejemplo, para correctir por efectos de invasión, se necesitan medir tres resistividades obtenidas en dichas zonas. Estas medidas se

combinan y procesan, siguiendo modelos obtenidos en base a mucha experimentación.

Además, el interés en medir cada zona radica en lo siguiente :

- *Las medidas en la zona virgen nos permiten evaluar la saturación de los fluidos que se encontraban originalmente en la formación, antes que tuviera efecto el proceso de invasión. Este parámetro es fundamental para el cálculo de reservas (volumen de hidrocarburos) de un yacimiento en un campo petrolero.*

- *Las medidas en la zona invadida nos dan las saturaciones de los fluidos de invasión, los cuales han desplazado en gran parte a los fluidos originales que se encontraban en esta zona.*

- *Si existe diferencia entre las saturaciones entre la región invadida y virgen, esto significa que los fluidos originales han sido positivamente desplazados por los fluidos de filtración, y si el movimiento de fluidos se pudo efectuar en ese sentido, también quiere decir que se puede efectuar en el otro sentido desde la formación hacia el hueco. En otras palabras, los fluidos pueden ser recuperados o producidos.*

- *No todo el fluido existente originalmente puede ser desplazado, debido a las fuerzas de adherencia y capilaridad que existen entre los fluidos y los granos de la roca. Esta saturación que queda se la conoce como saturación de petróleo residual cuando se trata de petróleo, y como saturación irreducible de agua cuando es agua. Las medidas en la zona invadida nos*

darían una evaluación de la saturación residual de petróleo. Las medidas en la zona virgen nos permitirían en muchas ocasiones evaluar la saturación irreducible de agua. La diferencia entre ambas mediciones nos da la saturación de hidrocarburos movibles que pueden ser producidos. Multiplicando este resultado por porosidad, obtenemos el volumen.

La ecuación básica que relaciona saturaciones con porosidades y resistividades (que es lo que en realidad medimos con las herramientas electrónicas) es conocida como la ecuación de Archie :

$$(Sw)^n = [(1 / \theta^{m}) * (Rw/Rt)]$$

donde :

Sw = saturación de agua

θ = porosidad de la formación

m = factor de cementación

Rw = resistividad del agua de formación

Rt = resistividad de la zona virgen

n = exponente de saturación

El factor de cementación y el exponente de saturación tienen valores cercanos a 2, aunque presentan variaciones que dependen de la litología o tipo de roca. Por tanto, si medimos Rt, Rw y la porosidad. tenemos el problema solucionado. Sabiendo las saturaciones de agua (Sw), es fácil derivar la saturación de petróleo (So), porque la suma de saturaciones debe ser igual a 1 :

$$Sw + So = 1.0$$

Así pues, se observa que los equipos electrónicos ofrecen respuestas específicas a la industria del petróleo, en términos de saturaciones y volúmenes de fluidos, luego de resolver en gran porcentaje innumerables problemas de medición.

1.4 Criterios generales de diseño de los aparatos de medida. Estrategias usadas en Electrónica

En esta sección, se hace un resumen de los objetivos que primordialmente debe cumplir todo implemento de medida, haciendo un enfoque luego a las condiciones particulares de los equipos en la industria del petróleo. Esto facilitará una comprensión mejor de las dificultades técnicas del diseño y construcción de los equipos que nos ocupan. Luego, se hace una breve referencia a las tácticas generalmente usadas en Electrónica, que ayudan a cumplir con los objetivos del diseño.

Todas estas estrategias generalizadas en los equipos de medición se verá que son usadas repetidas veces en el diseño y construcción de los equipos aplicados a la industria petrolera.

1.4.a Criterios básicos en el diseño de cualquier equipo de medida.

La **exactitud** y la **precisión** constituyen la primera meta de diseño en cualquier equipo de medida. Se entiende por exactitud como la característica que nos muestra cuán lejos resulta la medida con respecto al valor verdadero. Precisión tiene que ver con la incertidumbre con la cual el resultado es determinado, sin

importar su proximidad al valor verdadero. La variación standard y el grado de repetibilidad nos darían una medida de la precisión. Factores como la **reproducibilidad** también deben ser tomadas en cuenta, porque las medidas deben ser correctas, sin importar quién o con qué equipo se hizo la medida, siempre y cuando sea utilizado el mismo método. Los sensores que se utilizan para hacer las medidas deben ser **estables**, es decir deben dar las mismas lecturas durante períodos extensos de tiempo. La **confiabilidad** de que se podrá obtener la medida es importante también (a pesar de las fallas de algún componente), y generalmente se mejora construyendo equipos cuyas partes vitales tienen redundancia. La **resolución** de los sensores es otro factor a considerar, entendido como el incremento más pequeño en la medida que el sensor es capaz de diferenciar. La relación señal a **ruido**, y el **rango** de las medidas influencian mucho la estrategia de diseño de los equipos de medida.

1.4.b Criterios de diseño comunes a todos los equipos electrónicos usados para la industria petrolera

A más de los enunciados arriba, el diseño de los equipos electrónicos usados en la industria petrolera obedecen a los siguientes criterios :

1.4.b.1 Criterios mecánicos

- *Deben tener una **forma alargada** con un **diámetro** de 3 a 4 pulgadas típicamente, porque deben ser introducidos en los pozos perforados en la tierra, que tienen un diámetro generalmente de unas 9 a 12 pulgadas, y una*

profundidad de varios miles de pies. Su forma debe ser adecuada para tratar de minimizar el efecto de adherencia de la costra de lodo, el cual puede producir que la herramienta se quede pegada (sin movimiento) en algún momento determinado. Como entre la columna hidrostática del lodo y la formación existe una diferencia de presión absorvida por el reboque de lodo, en algún momento se puede producir sobre la herramienta una pega diferencial, que le imposibilita todo movimiento. Para poder recuperar estas herramientas del fondo de los pozos, es necesario efectuar una operación de pesca, en la que se aplican sobre la herramienta fuerzas enormes para poder moverlas. Las herramientas deben ser diseñadas para resistir este tipo de operaciones.

- *Sus partes electrónicas deben estar protegidas dentro de tubos, que les permiten resistir altas presiones y temperaturas. Un pozo típico como del Oriente Ecuatoriano tiene una profundidad de unos 9000 pies. A esa profundidad, las presiones están en el orden de las 3.000 libras/pulg cuadrada [psi], y las temperaturas son de unos 200° Farenheit. Se han llegado a perforar pozos de más de 20.000 pies en varias partes del mundo, en donde las presiones son aún mucho mayores, con temperaturas de hasta 400° Farenheit. Para lograr un buen funcionamiento y precisión en las medidas a altas temperaturas, los componentes de estos equipos deben ser de precisión, cumplir con estándares militares, y deben ir unidos con soldadura especial de alta temperatura. En la sección 3.6 se hace una recopilación de datos para facilitar el manejo de este problema. Las partes electrónicas -sobre todo detectores-, muchas veces van encapsuladas (en cámaras del tipo Dewar) en medios que les permiten aislación térmica.*

Además, cuentan generalmente con circuitos adicionales de estabilización y de referencia. Una manera efectiva de atacar el problema es la de introducir las herramientas recién construidas en un horno, elevar la temperatura hasta que algún elemento falle. Este elemento es reemplazado por uno de mejor calidad. Se continúa elevando la temperatura hasta que el siguiente elemento más débil falle, se sustituye y se continúa con este procedimiento hasta que se alcanza la temperatura de operación deseada.

- *El material de los electrodos debe ser resistente a la corrosión. El material de los tubos de protección debe ser resistente a la abrasión, debido al rozamiento constante que van a tener con la roca, ya que las medidas se toman mientras la herramienta está en movimiento en el hueco. En ocasiones en los pozos existen gases y compuestos que son altamente tóxicos y destructivos como el H2S. En estos casos, se deben usar aún materiales más especiales.*

- *Las herramientas deben ser resistentes a los efectos de vibración, ya que las paredes de los pozos por las que tienen que atravesar tienen muchas irregularidades. Además, los pozos se encuentran en lugares remotos, y las herramientas deben ser transportadas largas distancias desde las bases (lugares donde se guardan y chequean las herramientas) por caminos en malas condiciones.*

- *Los equipos de patín deben estar provistos de uno o varios brazos que se abren a voluntad, y que logran que los patines (en donde van montados los detectores) se apeguen fuertemente a la pared de la formación, haciendo un buen contacto. Si carecen de brazos, deben poseér algún mecanismo o*

accesorio (excentralizador de resorte) que le permita cumplir las mismas funciones. Los patines son tubos protectores de dimensiones más pequeñas, que van mecánicamente acoplados a la herramienta principal. Se usan cuando los efectos adversos del lodo son importantes, y cuando las señales captadas en el elemento detector son pequeñas, aún a pesar de que la amplitud de las señales del elemento generador sean grandes.

- *Algunas otras herramientas deben ir centralizadas en el hueco, porque su elemento generador de señales es omnidireccional. En su diseño se deben incluir centralizadores de brazos blandos o duros, según sea más conveniente.*

- *Por último, otros equipos deben mantener una distancia fija con respecto a la formación, determinado por el mejor aprovechamiento de señales. Como accesorio indispensable de estos equipos está un dispositivo distanciador, generalmente construido con aletas o dedos de caucho.*

- *Las herramientas deben tener la facilidad para conectar en su fondo una nariz de caucho, que ayuda notablemente a encontrar la trayectoria del pozo. Esta condición no se presenta muy frecuentemente, pero ocurre cuando el hueco presenta estrechamientos o cambios bruscos de dirección (patas de perro) en alguno de sus puntos.*

- *Muchos pozos exploratorios se perforan en sitios remotos, donde no existen carreteras. Por esta razón, las unidades que contienen los computadores así como todas las partes de los equipos deben ofrecer facilidad para ser*

voladas en helicóptero, y el peso de cada parte no debe exceder típicamente de una 4.000 libras. La longitud de las herramientas es de unos 20-30 pies.

1.4.b.2 Criterios eléctricos

- *Como las medidas se realizan en un pozo lleno de un fluido que típicamente es lodo, los equipos deben ser capaces de sobrepasar el efecto de corto circuito que les ofrece este medio. Por esta razón por ejemplo, los equipos de electrodos deben tener* ***corrientes focalizadas*** *(altamente direccionales).*

- *Los equipos deben medir las caracteristicas de resistividad de las rocas (o formaciones por las que atraviesan). Por tanto, su sistema de medida debe ser concebido para que penetre una profundidad adecuada en la roca. Este es otro motivo para la focalización de las corrientes eléctricas. Esta propiedad de los equipos se le conoce como* ***profundidad de investigación.***

- *Los equipos deben definir perfectamente las capas que atraviesan. Este objetivo es difícil de cumplir porque entre capa y capa puede existir un gran contraste de resistividades, entre unos pocos ohm-m hasta varios miles de ohm-m. Si las capas son gruesas, el equipo logrará muy seguramente "leer" los valores verdaderos. Si las capas son delgadas, la máxima deflección en las lecturas mostradas por el equipo serán una aproximación de los valores reales. Esta propiedad de definición de los equipos o herramientas se conoce como* ***resolución vertical.***

- *Para minimizar el tiempo requerido para adquirir información, estos equipos se los* ***conecta en tándem.*** *Por tanto, la medida de uno de ellos va*

a ser tomada a una profundidad diferente a la del otro. Por tanto, las diferentes señales deben ser memorizadas, para que luego puedan ser presentadas a las profundidades verdaderas. Esto se logra en los computadores de superficie.

- *Las mediciones deben ser* ***continuas****, por lo que se genera gran cantidad de información. El muestreo típico es de dos valores por pie por cada tipo de medida. Esto da una apariencia a las medidas de una curva. Si se combinan varias curvas, la apariencia será como la mostrada en la fig. # 2.*

- *La adquisición de las lecturas es en* ***tiempo real****, por lo que los equipos deben responder inmediatamente para la adquisición de datos.*

- *El* ***magnetismo*** *y la presencia de corrientes espurias en los sitios donde se efectúan las lecturas, pueden resultar en efectos adversos. Los equipos deben estar provistos de sistemas que les permitan minimizarlos, o contar con sistemas de compensación que les permita corregirlos.*

- *La* ***histéresis*** *de algunos sensores puede ser particularmente crítica. En estos casos, la mejor opción es optar por establecer procedimientos especiales en la medición, de tal forma que todas las lecturas se tomen ya sea en forma ascendente o descendente de valores.*

- *Por estandarización, los circuitos deben distribuirse en tres partes principales : a)* ***equipo de superficie*** *b)* ***cartucho electrónico*** *c)* ***sonda****. El equipo de superficie sirve para controlar el funcionamiento de las herramientas y para la adquisición de datos, teniendo la asistencia*

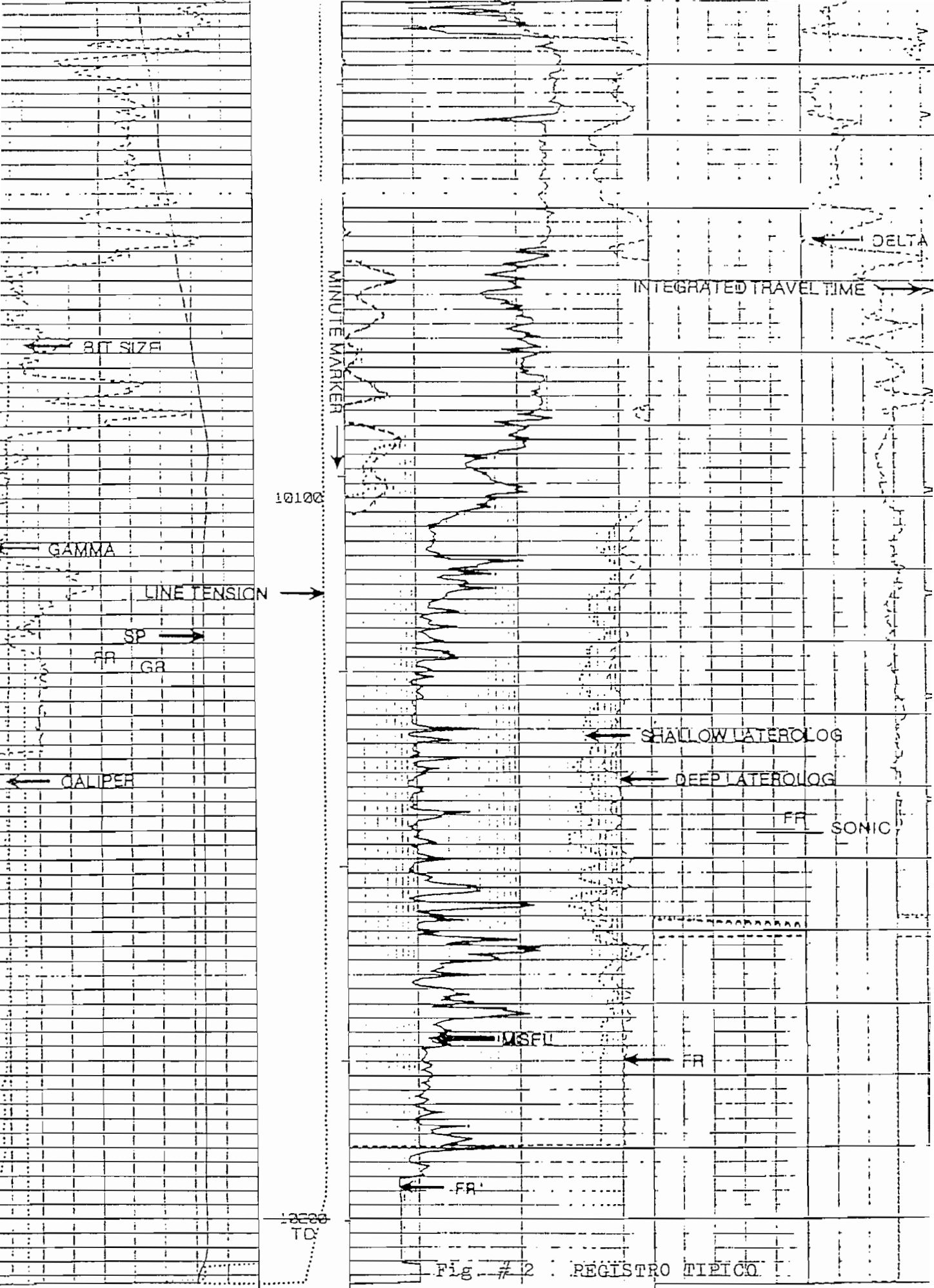


Fig # 2 : REGISTRO TIPICO

constante de un computador. El cartucho electrónico y la sonda son equipos de fondo, que se introducen en el pozo. El cartucho electrónico contiene la gran mayoría de circuitos electrónicos, mientras la sonda contiene los transductores, transmisores, receptores, detectores, etc. en donde se generan y captan las señales de la formación. Cuando las herramientas son de patín y tienen un registro de calibrador (medidor del diámetro del hueco también llamado caliper), en la sonda también se ubican los circuitos hidráulicos y de accionamiento que permiten que los brazos respectivos se abran o cierren a voluntad.

- *La información debe grabarse en un* **medio magnético** *(cintas de carrete), y se presenta en formas continuas especiales de papel y en película (acetato transparente) para facilitar su reproducción.*

- *Las herramientas van suspendidas de un cable trenzado de acero (armadura del cable), que les permite el soporte mecánico. Este cable tiene en su interior varios conductores (7 en total más el retorno que es la armadura del cable), que permite el contacto eléctrico entre los equipos que van al fondo del pozo y los equipos de superficie. Todas las señales (alta frecuencia, baja frecuencia, alto y bajo voltaje) deben transmitirse a través de estos conductores. Exteriormente, el cable debe ser capaz de resistir tensiones de más de 8.000 libras.*

- *La construcción de estos equipos debe contemplar detalles que* **minimizan el acoplamiento** *directo entre transmisores y receptores. Lo que se desea por supuesto es que las señales pasen obligatoriamente a través de la formación, para poder medir sus características físicas.*

- *La información obtenida en estos equipos debe ser procesada lo más rápido posible en la mayoría de ocasiones. Por esta razón, los computadores en superficie deben tener facilidades para conectarse fácilmente a modems u otros modos de comunicación.*

- *El diseño de las herramientas debe contemplar el efecto adverso (en exactitud y precisión), al estar ellas físicamente ubicadas en el campo de acción donde se realizan las medidas. Así, los accesorios, partes o carcaza metálicas de una sonda pueden estar afectando los campos magnéticos con los que se presente medir los parámetros de la formación, y por ende disminuyendo la precisión de las lecturas.*

- *Para minimizar la posible imprecisión en las lecturas debida a condiciones adversas, estos equipos deben estar provistos de accesorios especiales que permitan su* ***calibración*** *manual o automática, no solo en superficie, sino muchas veces cuando la herramienta está en el fondo del pozo.*

De lo expuesto, fácilmente se comprenderá las condiciones especiales de diseño de estos equipos.

1.4.c Factores que afectan la exactitud de las medidas

- *Para facilitar el diseño de las herramientas, en muchas ocasiones se asumen condiciones especiales, ya sean del hueco o sino de las mismas formaciones. Por ejemplo, es común suponer que las herramientas van a medir en un medio isotrópico, de iguales características. Sin embargo, la heterogeneidad es el factor predominante en la mayoría de las formaciones.*

Por esta razón son indispensables correcciones en las medidas tales como las debidas a la influencia de capas adyacentes, o a grosor de los estratos.

- *Así mismo se asumen modelos con formas geométricas determinadas. Estos modelos nunca se reproducen en la realidad, y es necesario generar las llamadas correcciones por factor geométrico para poder aproximarnos más a las medidas reales. Las correcciones nunca son perfectas.*

- *El hueco se asume de forma cilindrica, y con paredes lisas. En la práctica, los huecos no son uniformes, pueden tener ensanchamientos o cavernas, y las paredes son muchas veces rugosas. Esta última condición afecta sobre todo a las medidas de las herramientas que deben ir en contacto con la pared de los pozos, como las herramientas de patín.*

- *Las señales de las herramientas se consideran lo suficientemente fuertes como para atravesar la llamada costra de lodo. En muchos pozos, la costra de lodo es bastante gruesa, lo cual afecta considerablemente la exactitud de las medidas.*

- *Hay herramientas que son muy sensibles a las caracteristicas del lodo que les rodea. Por ejemplo, si el lodo contiene muchas sales, va a ejercer un efecto de cortocircuito para las herramientas que miden conductividades, afectando notablemente los resultados (herramientas de inducción). Por el contrario, hay herramientas que dependen de un buen contacto eléctrico con la formación, y sus lecturas se verán severamente afectadas si los lodos no son conductivos (herramientas de electrodos).*

1.4.d Técnicas típicas de medida usadas en Electrónica

Se pueden resumir en las siguientes :

- *De sustitución, en los cuales se comparan el valor de una cantidad eléctrica desconocida, con un patrón de referencia predeterminado. Un ejemplo puede ser un voltímetro.*

- *Por analogía, en donde se determina una cantidad eléctrica relativamente fácil de determinar, para obtener otra que está relacionada, pero que es de más difícil obtención. Un medidor de Q puede ser un ejemplo de esta técnica.*

- *Procesamiento digital, en donde una medida análoga es transformada en su equivalente digital, para poder sacar provecho de las bondades de cálculo de los computadores.*

- *Circuitos puente, en donde un valor desconocido es determinado de acuerdo al balance de un arreglo conformado por elementos conocidos. Un ejemplo puede ser un puente de Wheatstone.*

- *Circuitos de amplificación y de estabilización son usados en conjunto con los transductores, con el fin de provéer una señal de suficiente amplitud y estable, libre de ruido, que pueda ser manejada fácilmente por otros circuitos. El uso de modulación y demodulación para conseguir este fin podría constituirse en un buen ejemplo.*

CAPITULO SEGUNDO

EQUIPOS PARA MEDIR RESISTIVIDAD

Entre los equipos para medir resistividad están :

- *Los de electrodos. Esios equipos electrónicos léen en el rango medio y alto de resistividades. Trabajan bien cuando el lodo es conductivo.*

- *Los de inducción. Estos equipos léen en el rango medio y bajo de resistividades. Trabajan aún cuando el lodo no sea conductivo.*

Como se observa, ambos equipos son complementarios, y por eso se discutirán los dos.

(A) EQUIPOS A BASE DE ELECTRODOS

2.1.a Principio físico y funcionamiento

Entre los equipos electrónicos de **electrodos** hay de varios tipos, dependiendo de la distancia que existe entre electrodos, del número, y de la disposición de los mismos. Los que presentan una distancia corta entre electrodos (de pocas pulgadas) son los **microresistivos** que aquí no serán tratados por ser menos importantes. Sus electrodos tienen la apariencia de botones metálicos (fig. # 4). Entre los que tienen electrodos más distanciados entre sí (en el orden de los pies) están los llamados **lateroperfiles**, habiendo sido los más empleados los de 3, 7 y 8 electrodos y el doblelateroperfil. Lo que se busca básicamente con varios electrodos es que las corrientes que generan se concentren (focalicen), y que sean capaces de vencer los obstáculos que se presentan a su paso. El equivalente eléctrico de medición de estos equipos es de **resistividades en**

serie. Estos equipos necesitan contacto eléctrico con la formación, por tanto funcionan bien cuando entre la herramienta y la formación existen medios conductivos (lodos base agua).

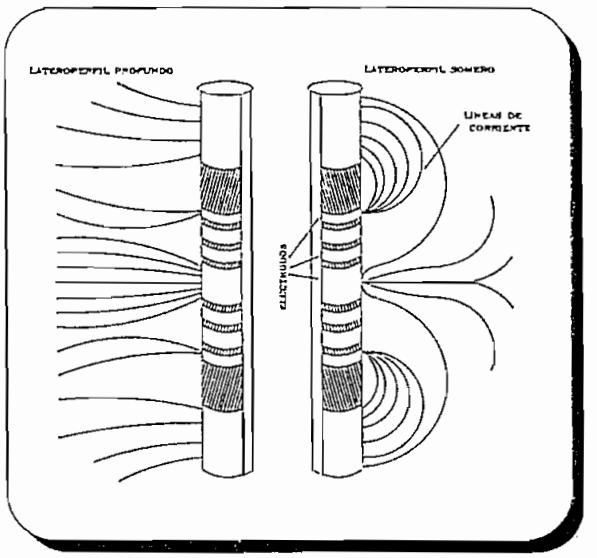


Fig. # 3 HERRAMIENTAS CON ANILLOS DE METAL

Su apariencia externa es la de un tubo largo de fibra de vidrio, con varios electrodos incorporados. Los electrodos son anillos anchos de bronce (fig # 3). Las señales son producidas por unos generadores de corriente sinusoidales de baja frecuencia (en el orden de las decenas de Hertz). Estas señales salen por unos electrodos y regresan por otros. En teoría, se necesitaría únicamente un electrodo de salida y otro de retorno. Sin embargo, los otros electrodos (electrodos de guarda y de control) que generalmente existen, sirven para crear superficies equipotenciales a través del medio que atraviesan. Esto provoca que las señales provenientes del electrodo principal de salida se focalicen, logrando así que las corrientes de medida penetren en las formaciones de interés, con una circulación en un volumen fijo de la roca, con una mínima influencia de

elementos cortocircuitantes como el lodo, y que definan bien las capas aunque exista entre ellas gran contraste de resistividad.

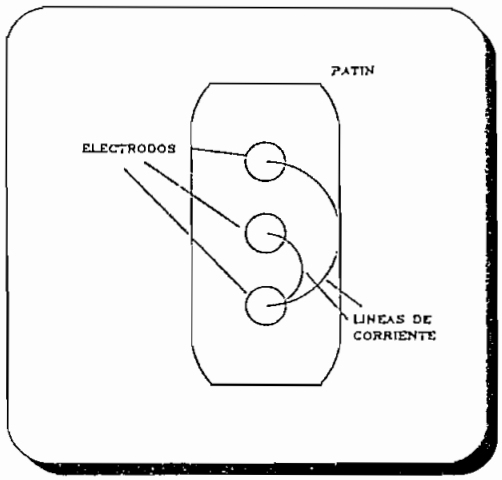


Fig. # 4 HERRAMIENTAS CON BOTONES

El **doblelateroperfil** es el equipo más usado actualmente. Se muestra esquemáticamente en la fig. # 3, y en diagrama de bloques en las fig. # 5 y # 6. El electrodo A_0 es el electrodo principal, por el que sale la corriente i_0 que regresa a la herramienta a través del electrodo de guarda A_2. Todos los demás electrodos están ubicados simétricamente al electrodo principal. Lo que se explicará a continuación en cada electrodo, lo mismo sucede con su electrodo simétrico respectivo. Por A_1 circula una corriente de control ajustable i_b, que retorna también a través del electrodo A_2. Esta corriente se ajusta automáticamente mediante un sistema de realimentación llamado lazo de monitoreo, de tal forma de que entre M_1 y M_2 se mantenga una diferencia de potencial igual a cero. Esto crea una zona equipotencial ancha concéntrica al hueco, por la que no hay circulación de corrientes verticales, sino solo radiales. Esto obliga a la corriente i_0 a circular focalizada hacia la formación. El flujo de

la corriente de control entre A_1 y A_2 fortifica aún más la focalización. Este tipo de medida hasta aquí descrita se llama **lateroperfil somero** (fig. # 5).

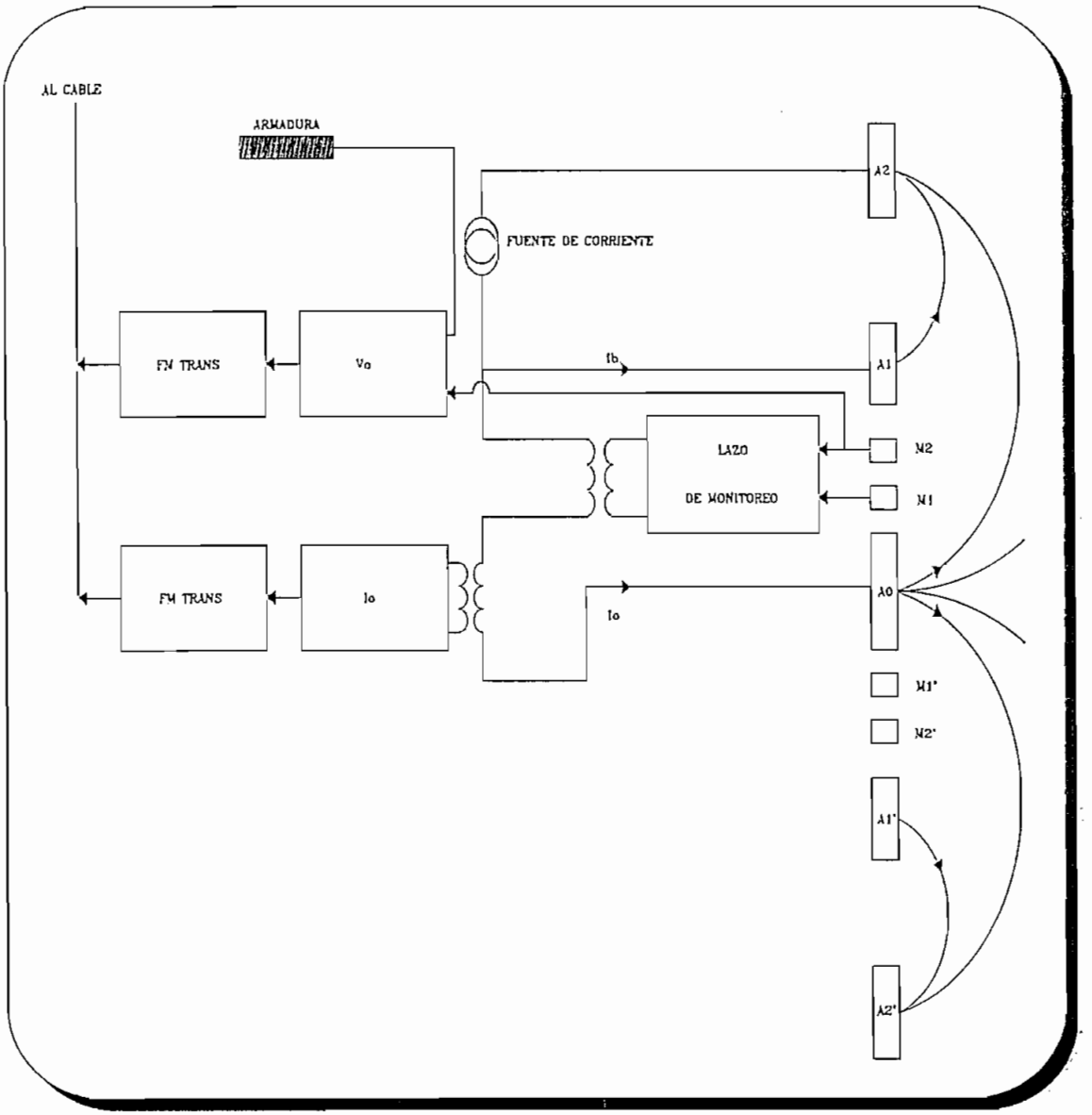


Fig. # 5 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL LATEROPERFIL SOMERO

Si se desea que la profundidad de investigación aumente, se puede utilizar A_2 también como electrodo de envío de corriente, haciendo que la señal regrese por un electrodo ubicado en superficie llamado pescado mostrado en la fig. # 6.

Además, se utiliza un lazo de monitoreo auxiliar, que nos garantiza que entre A_1 y A_2 no exista diferencia de potencial. Esto se logra ajustando las corrientes I_1 e I_2. El monitoreo auxiliar se establece entre los electrodos A_1. y A_2. Lo aquí descrito constituye el llamado **lateroperfil profundo** (fig. # 6).

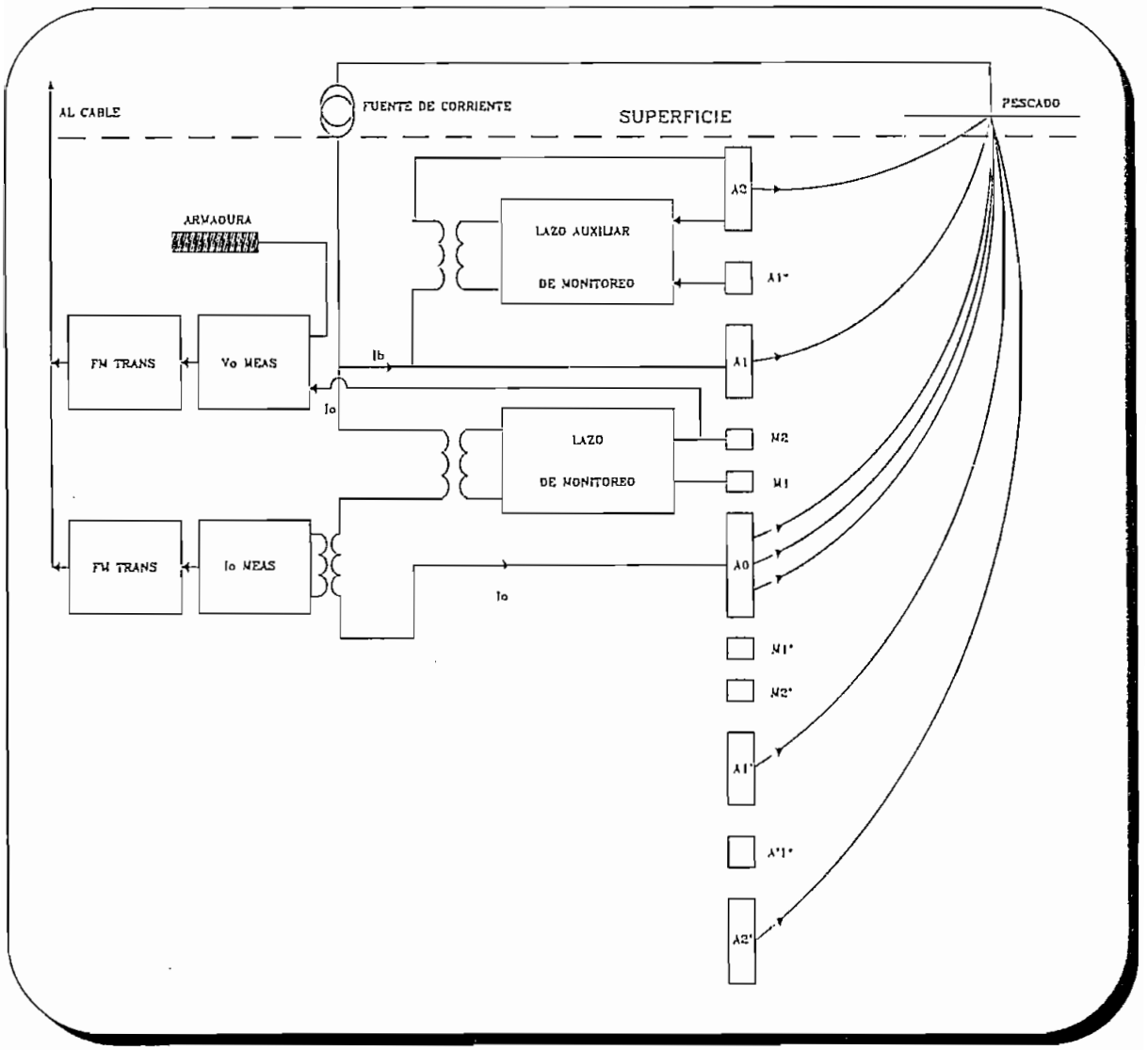


Fig. # 6 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL LATEROPERFIL PROFUNDO

Las lecturas profunda y somera son efectuadas simultáneamente. Se utilizan diferentes frecuencias para cada una, para poder controlar y medir cada sistema independientemente. Se utiliza corriente alterna para evitar la polarización de los electrodos. La frecuencia de la medida profunda es de 35 Hz, y 280 Hz para la somera.

La diferencia de potencial v_0 en ambas configuraciones es medida entre uno de los electrodos de monitoreo (M_1 o M_2) y la armadura del cable (fig. # 6), ubicada en teoría a una distancia infinita. Es necesario por ésto que la armadura no tenga ningún contacto eléctrico con la herramienta y que se encuentre físicamente alejada, lo cual se logra utilizando una cabeza provista de brida. Esta configuración garantiza un alejamiento de más de 80 pies. La corriente de medida es proporcional a la corriente i_0 que circula focalizada por la formación. Los circuitos de medida de corriente y voltaje deben estar sintonizados a ambas frecuencias.

Hay que anotar que el lazo de monitoreo debe estar sintonizado a ambas frecuencias, mientras que el lazo auxiliar solo debe estarlo a 35 Hz. El lazo de monitoreo tiene un preamplificador formado por un amplificador operacional de ganancia alrededor de 25, y un amplificador (A = 40) con dos circuitos en paralelo, sintonizados a 35 Hz y 280 Hz respectivamente,y con una impedancia de salida de aproximadamente 0.2 ohm. El amplificador del lazo auxiliar tiene una ganancia de 30 dB (A = 1.000) a 35 Hz, y su atenuación es de -14 dB a 280 Hz. Su impedancia de salida es de 0.5 ohm.

Para la transmisión de estas señales a superficie, se utiliza modulación en frecuencia, con una frecuencia central 78 Khz para i_o y 120 KHz para v_o. El circuito utilizado es un oscilador controlado por voltaje. Este método de transmisión minimiza la degradación de la señal por la atenuación del cable, ruido, etc. La comunicación a través del cable se hace utilizando diferentes modos de transmisión, lo cual evita la interferencia mutua y cruzamiento de señales. El modo T2 se usa para i_o y T5 para v_o (fig. # 7).

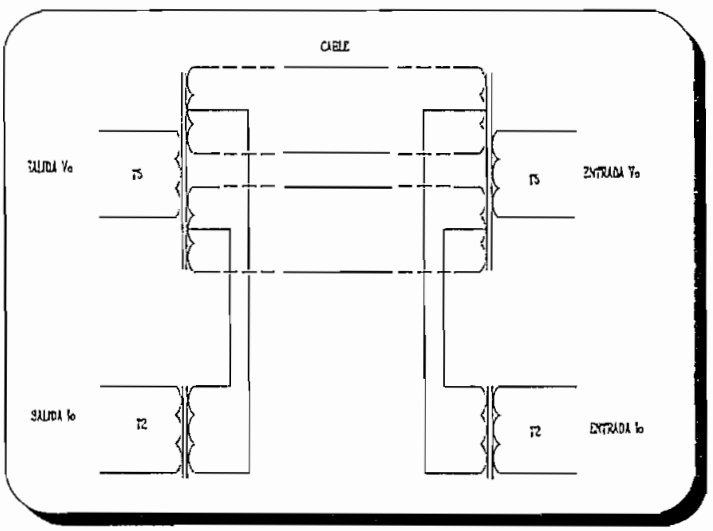


Fig. # 7 MODOS DE TRANSMISION POR EL CABLE

En superficie (fig. # 8), las señales pasan primero a través de unos filtros pasabandas, cuyas frecuencias son de 120 KHz o 78 KHz, respectivamente. Como la atenuación en el cable es considerable, las señales se amplifican, y luego se demodulan en frecuencia y detectan. Sin embargo, ya que las medidas de corriente y voltaje han sido medidas y transmitidas a superficie independientemente, no necesariamente van a llegar a superficie con la misma fase. Por esta razón, no solo se debe medir la amplitud del voltaje y corriente sino también sus fases. Esto se logra midiendo la misma señal dos veces, pero

cada una defasada 90° con respecto a la otra. Esto es equivalente a medir las componentes ortogonales de cada medida. Por tanto, ocho señales diferentes (4 señales profundas de voltaje y corriente a 0° y 90° c/u, y 4 someras con las mismas condiciones) alimentan los detectores de fase, que generan señales que pasan a través de un filtro pasabajos. Los detectores de fase por un lado reciben la señal de la herramienta, por el otro lado son alimentados por sus respectivos osciladores de referencia. Ambas señales deben tener la misma frecuencia. La señal de salida refleja el grado de coincidencia en fase de las dos entradas.

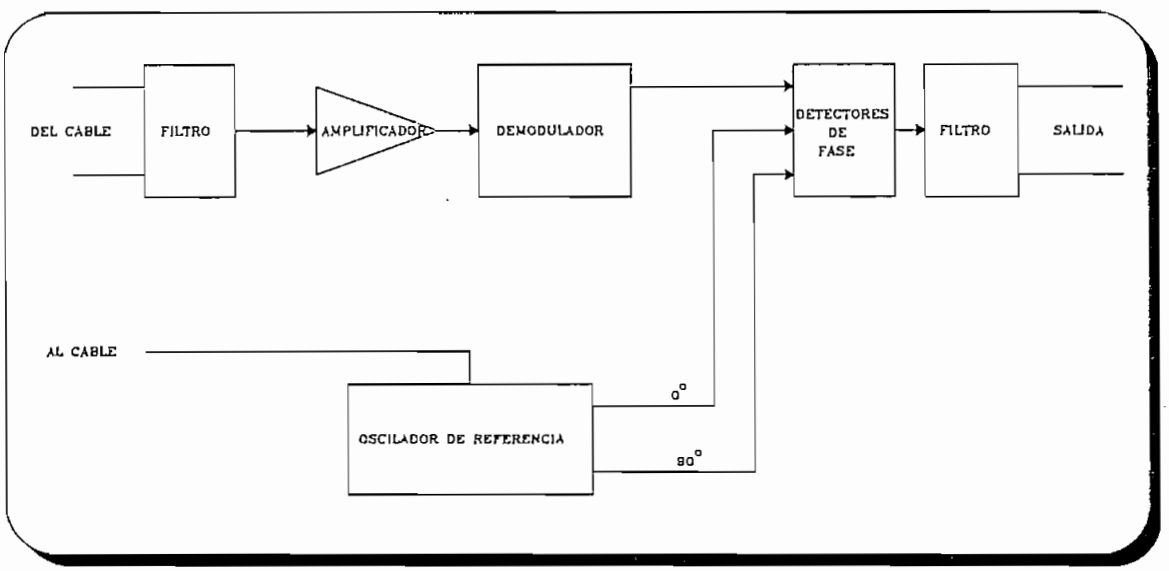


Fig. # 8 EQUIPO DE SUPERFICIE LATEROPERFIL

La salida son señales de DC, y son los valores de voltaje y corriente obtenido en el volumen de formación comprendido entre los electrodos y superficie. La relación Vo / Io es la resistencia de ese volumen de formación. Sin embargo, como estamos interesados en la resistividad de la formación, debemos aplicar la siguiente relación :

resistividad = K (Vo / Io)

donde K es un factor determinado durante el diseño de la herramienta, y verificado a base de varias pruebas. Su determinación se hace creando un modelo ideal de la herramienta y la formación, y verificando la resistencia medida de una roca de resistividad conocida.

2.2.a Factores que afectan la exactitud de las mediciones

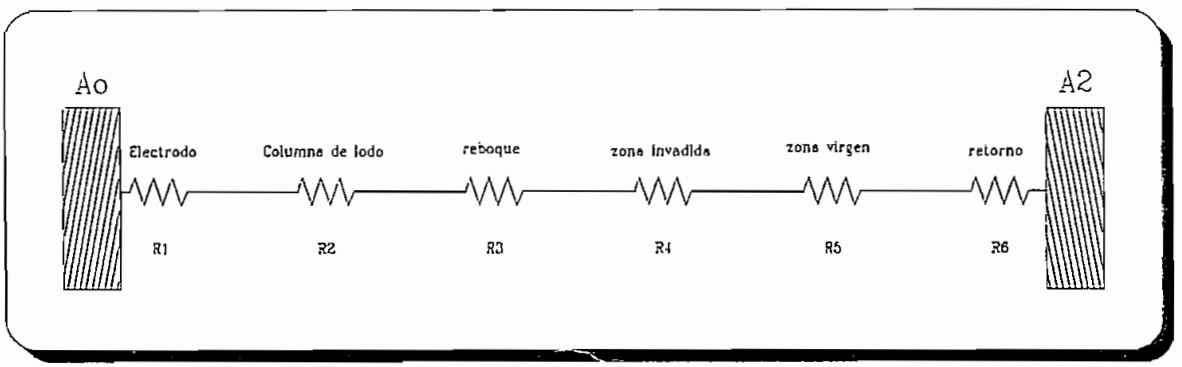


Fig. # 9 EQUIVALENTE ELECTRICO DE LA MEDIDA

La medición del voltaje v_o debe efectuarse entre A_o y la armadura. Esto sería equivalente eléctricamente a la medida en serie de 6 resistencias como las mostradas en la fig # 9. Sin embargo, nuestro interés está únicamente en las medidas de resistividad de la formación representadas por R_4 y R_5. Afortunadamente, R_6 es pequeña en comparación a R_4 y R_5, no así R_1, R_2 y R_3 que representan primordialmente la **influencia negativa del lodo.** Sin embargo, observando la fig. # 10 que representa las líneas equipotenciales (perpendiculares a las líneas de corriente), se puede observar que al hacer la medición de voltaje entre M_1 (o M_2) en vez de A_o directamente, en realidad se

está eliminando gran parte de la caída de potencial debida a R_1, R_2 y R_3 lo cual es lo que se quiere. Esta señal no deseada, en teoría resulta significativa únicamente cuando el hueco es grande.

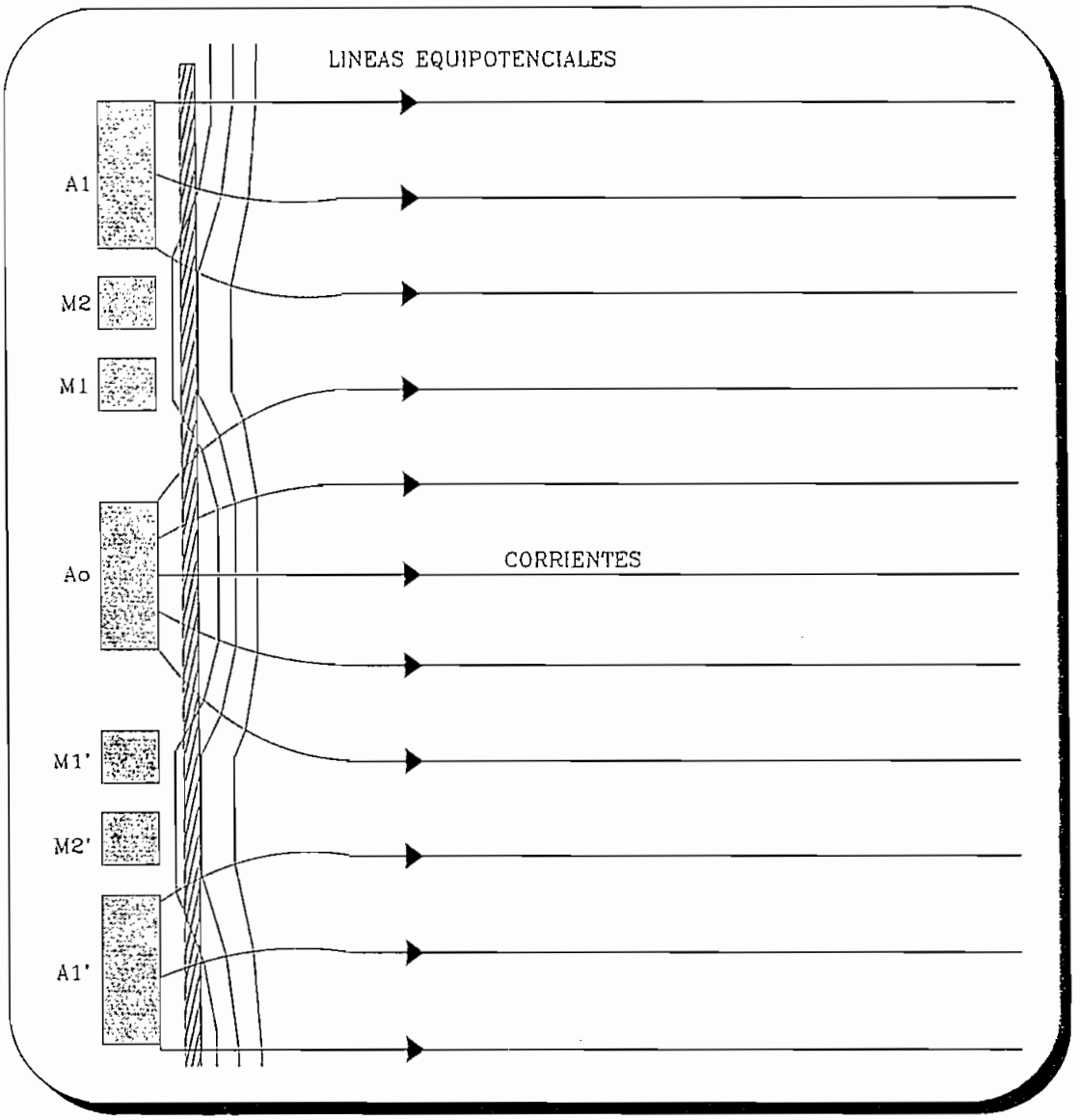


Fig. # 10 LINEAS EQUIPOTENCIALES DEL LATEROPERFIL

A pesar de la compensación electrónica lograda, es usual tener que realizar correcciones adicionales por efecto de lodo con los computadores de superficie, debido a que los huecos no son parejos y las características del lodo varían.

2.3.a Criterios de diseño

La **focalización de las corrientes** es uno de los criterios principales, que aseguran buena resolución vertical de las lecturas y una profundidad de investigación adecuada. Por tanto, el lazo de monitoreo del lateroperfil es uno de los circuitos importantes.

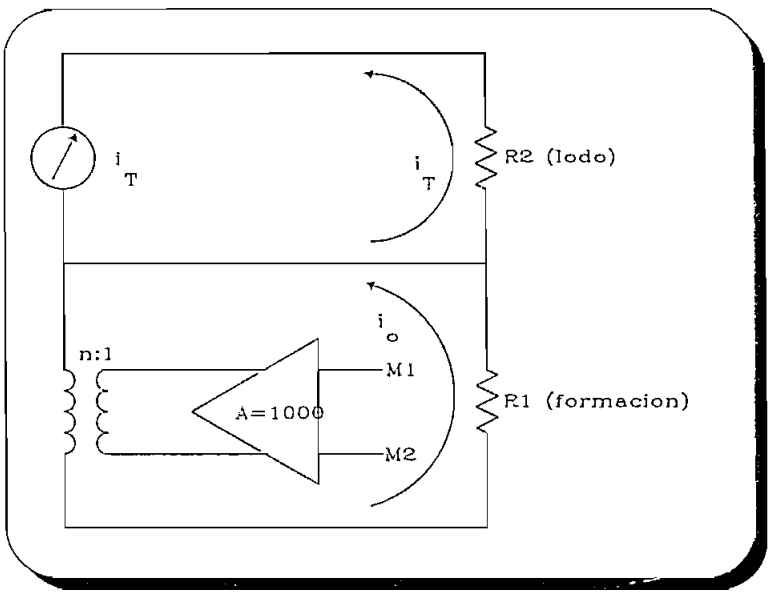


Fig. # 11 LAZO DE MONITOREO, LATEROPERFIL

El circuito equivalente se muestra en la fig. # 11. El amplificador tiene una ganancia de 1.000 (30 dB), según se había anotado anteriormente. Este valor alto le da mucha sensibilidad al sistema. R_1 representa la resistencia de la formación, y R_2 es la medida en la zona hasta donde alcanza i_b (mezcla entre formación y lodo). En este circuito se tienen las siguientes relaciones :

$$i_T = i_b + i_o$$

$$-v_{L1} = i_T R_2 + i_o R_1 = [1.000 (v_{M1-M2}) n]$$

Para lograr $(v_{M1-M2}) = 0$, debe cumplirse lo siguiente :

$$i_o / i_b = - R_2 / [R_1 + R_2]$$

o, reemplazando :

$$i_T = i_b [R_1 / (R_1 + R_2)]$$

Adicionalmente, se quiere que la potencia permanezca constante. Por tanto :

$$cte = i_o v_o = (i_o)^2 R_1 = k$$

reemplazando :

$$i_T = [k/R_2)]$$

Conociendo R1 y R2, se puede controlar la fuente de corriente con el computador de superficie, para que suministre el valor de i_T de acuerdo a la relación de arriba. De esta forma, se logra que se cumpla que $v_{M1-M2} = 0$. "k" es una constante alrededor de 5 microvatios.

El producto I_o por V_o (corriente y voltaje medidos) se mantiene constante, para mejorar la exactitud de las medidas en el rango bajo y alto de resistividades (unos pocos ohmm hasta cerca de 40.000 ohmm).

La **frecuencia de trabajo** es otro punto a considerar. Experimentalmente se ha determinado que las frecuencias bajas (decenas de Hz), son las más adecuadas para este tipo de tecnología a base de electrodos, que depende de una buena propagación de las señales a través de la tierra.

2.4.a Valores típicos que se obtienen

El equipo de lateroperfil mide eficazmente desde las decenas de ohmios-metro hasta más de 10.000 ohmios-metro. Para los valores en el orden de las decenas de ohmios - metro o menores, las correcciones que se necesitan empiezan a ser importantes. El límite mínimo para la validez en sus lecturas está determinado por el contraste que existe entre el valor de la resistividad del filtrado de lodo y el agua de formación. El doble lateroperfil puede ser utilizado con confianza cuando este contraste de resistividades es 2,5 o menor.

(B) EQUIPO DE INDUCCION

2.1.b Principio físico y funcionamiento

Los equipos de **inducción** se caracterizan por tener bobinas transmisoras y receptoras. Su nombre se debe a que inducen corrientes en los medios con los que interactúan. Su clasificación depende de la distancia que existe entre sus bobinas transmisoras y receptoras, típicamente de **40** o **28 pulgadas**. El equivalente eléctrico de medición de estos equipos es de **conductividades en**

paralelo. Estos equipos funcionan bien, aún cuando exista un medio resistivo o aislante entre la herramienta y la formación (lodos base aceite).

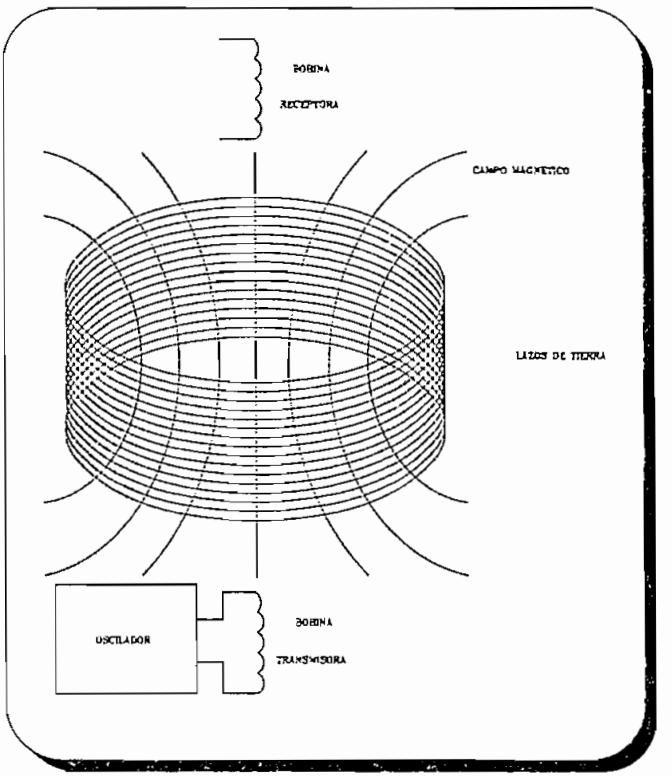


Fig. # 12 PRINCIPIO DE MEDIDA - INDUCCION

Inicialmente, se describirá únicamente un sistema de bobina transmisora y receptora (fig. # 12). La bobina transmisora envía a la formación una señal de alta frecuencia (20 KHz), que consiste en una corriente alterna de intensidad constante. Se crea así un campo magnético que induce corrientes en la formación.

Estas corrientes circulan siguiendo un camino circular en forma de anillos (llamados lazos de tierra), que son concéntricos a la bobina transmisora. Estas corrientes crean un campo magnético que induce corrientes en la bobina

receptora, proporcionales a la conductividad de la roca en la formación. La señal captada en el receptor (llamada **señal R**) está por tanto a 180° de defasamiento de la señal original. La amplitud de la señal R es aproximadamente 22 micro voltio / mmho.

El acoplamiento directo entre la bobina transmisora y la bobina receptora, también genera una señal no deseada de gran amplitud (conocida como la **señal X**) , que está defasada 90° con respecto a la señal original. Esta señal no es proporcional a la conductividad de la formación y debe ser eliminada.

En la explicación anterior, se asume un solo lazo de tierra por simplicidad. Sin embargo, la señal de medida va a ser la sumatoria de una serie de señales debidas a un infinito número de lazos de tierra. La contribución que cada lazo de tierra está dada por la conductividad del respectivo lazo, así como también de la posición del lazo con respecto a la herramienta. Esta segunda característica hace necesaria la introducción del concepto de **factor geométrico**. La sumatoria de todos los factores geométricos de una medida debe ser igual a la unidad. El estudio de los factores geométricos involucra la creación de un modelo de respuesta, con respecto a un medio isotrópico que rodea a la herramienta. En la práctica la herramienta va a estar rodeada por el lodo, la zona invadida, la zona virgen, las zonas adyacentes, etc. Por esto es necesario calcular la contribución a la señal de cada una de estas zonas, utilizando los factores geométricos respectivos. Para facilitar el asunto, se generan curvas de corrección -incorporadas en el computador- que permiten evaluar estos aspectos. La conductividad final puede ser calculada así :

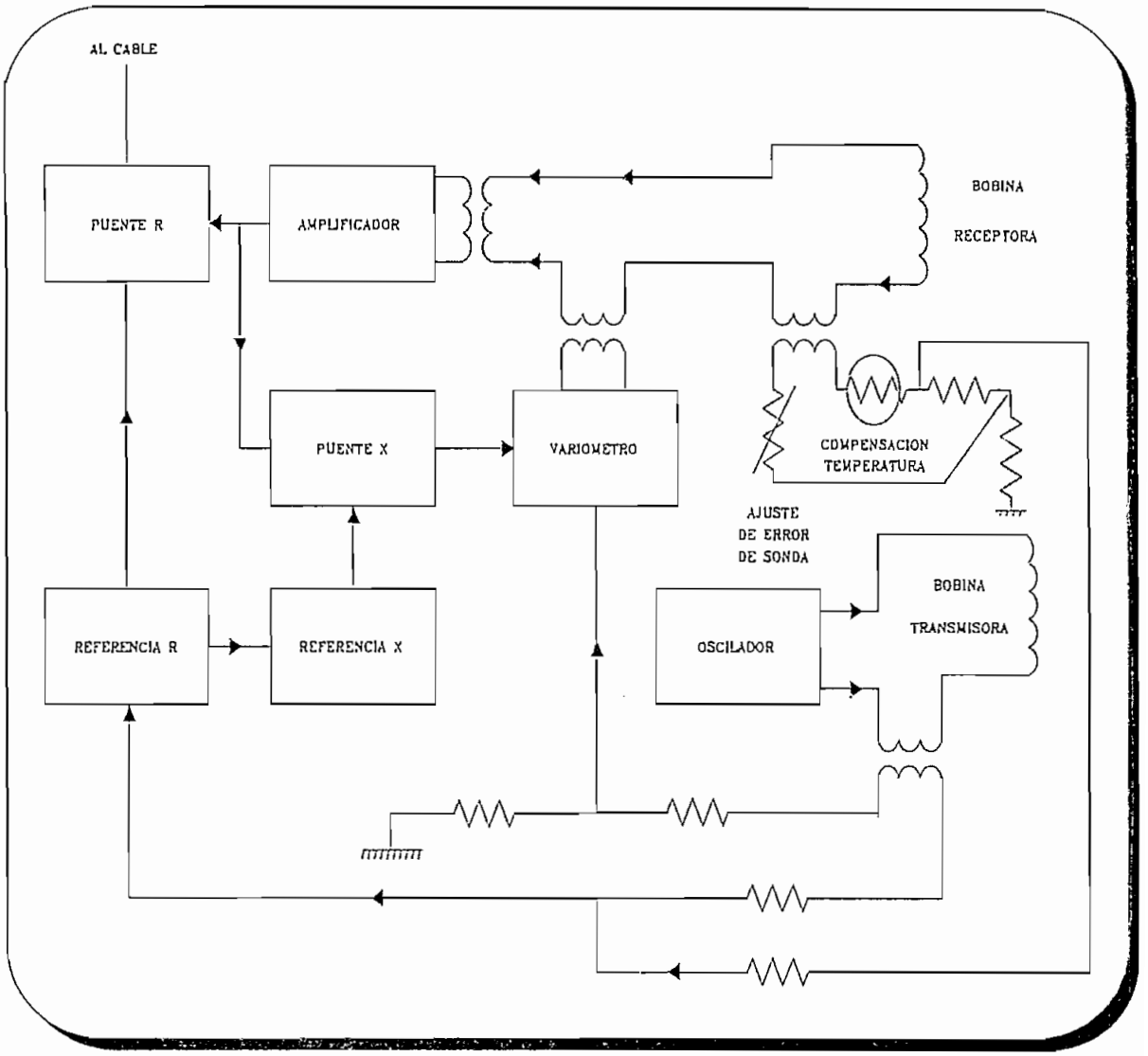


Fig. # 13 DIAGRAMA DE BLOQUES, EQUIPO DE INDUCCION

$$C_a = G_m\, C_m + G_{xo}\, C_{xo} + G_t\, C_t + G_s\, C_s$$

donde :

C_a Conductividad aparente

G Factor geométrico

C Conductividad

m Subíndice correspondiente al lodo

xo	Subíndice correspondiente a la zona invadida
t	Subíndice correspondiente a la zona virgen
s	Subíndice correspondiente a las zonas adyacentes

Los equipos de fondo (sonda y cartucho) mostrados en la fig. # 13, constan de un oscilador de 20 KHz +/-25 Hz, que está dentro de un compartimiento blindado (horno). Su amplitud es controlada automáticamente. A más de proveér corriente a la bobina transmisora, suministra señales de referencia.

La señal de referencia (200 mv) es amplificada y alimenta al detector de fase (puente R). Esta señal llega con un defasaje de 180° con respecto al oscilador, adecuado para detectar la señal R. La señal de referencia alimenta también al detector X, pero luego de ser defasada adecuadamente. Esta nueva señal llega al puente X en fase con la señal X. La salida de voltaje del puente X sirve de alimentación para el variómetro.

El **variómetro** es un amplificador de ganancia variable, cuya ganancia está controlada por un voltaje DC de entrada. En este sentido es muy similar a un circuito de control automático de ganancia (AGC) utilizado en los receptores corrientes. Este voltaje viene del puente X, y es proporcional a la amplitud de la señal X. La otra entrada al variómetro es la señal AC de referencia (20 mv) generada por el oscilador. La salida del variómetro es una señal de AC, cuya amplitud es proporcional a la señal X, pero defasada 180° con respecto a ella. Al combinar esta salida con las señales R y X que vienen de la bobina receptora,

se reduce considerablemente la señal X. Luego, la señal R es amplificada más de 150.000 veces, hasta obtener un nivel de 4 v/mho.

En superficie únicamente se tienen filtros y amplificadores de señal adecuados, que se acoplan con la entrada del computador.

2.2.b Factores que afectan la exactitud de las medidas

Como es generalizado, la **temperatura** a la que se ven afectados estos equipos afecta primordialmente la exactitud de las medidas. Para minimizar este efecto, existe un circuito de **compensación por temperatura** que usa una señal de referencia del oscilador. Es un divisor de tensión con varias resistencias, en donde se ha intercalado un elemento sensible a la temperatura (termistor). La señal de salida del divisor es aplicada al circuito primario del transformador que está en serie con la bobina receptora. La relación de división de voltaje varía de acuerdo al valor que adquiere el termistor según la temperatura.

La inductancia mutua entre los lazos de tierra entre sí también producen una serie de señales que circulan por las paredes de la formación, cuyo defasamiento oscila entre 90° y 180°, lo que crea un reenforzamiento de la señal X. Al mismo tiempo, también causa una reducción significativa de la conductividad medida. Experimentalmente se ha determinado las correcciones para compensar por este efecto (fig. # 14). Este comportamiento se lo conoce como **efecto de piel**. Las correcciones correspondientes las ejecuta el computador de superficie.

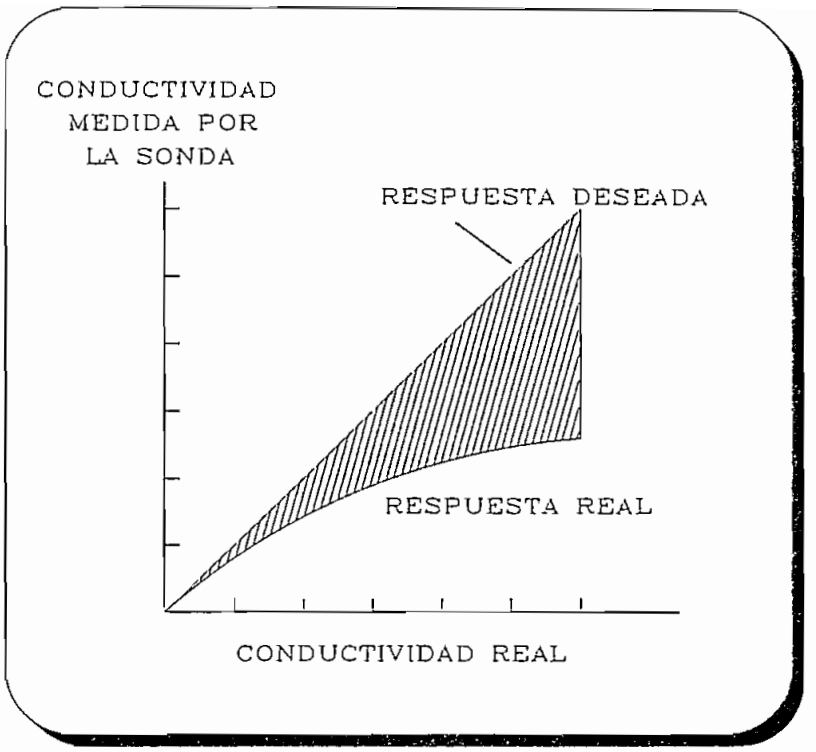


Fig. # 14 COMPENSACION POR EFECTO DE PIEL

Las imperfecciones en la fabricación de los aislamientos de la sonda misma, hacen que se créen corrientes parásitas que se conocen como **error de sonda.** Este error es un valor fijo que puede ser medido. Lo que se hace es colocar la sonda en un lugar donde se sabe que existe cero conductividad. El valor que se lée con el equipo es compensado mediante el ajuste de un puente de resistencias, hasta obtener una lectura efectiva de cero.

2.3.b Criterios de diseño

El objetivo principal de los circuitos electrónicos es **captar la señal R**, y **rechazar la señal X**. La señal R que se capta es muy pequeña (22 uv/mmho),

por lo que tiene que tiene que ser amplificada más de 150.000 veces. Este amplificador está sintonizado a 20 KHz, y sus circuitos presentan un alto Q. La señal X es más grande, y si fuera amplificada en esa magnitud, saturaría el amplificador. Para evitar esto, se utiliza un circuito llamado variómetro que reduce la amplitud de la señal X. Su función es defasar en 180° la señal no deseada, y luego sumarla algébricamente con la señal original captada en la bobina receptora. Para minimizar la creación de la señal X, la herramienta debe diseñarse para evitar el acoplamiento directo entre transmisor y receptor.

Otro de los objetivos de diseño es obtener **resolución vertical** y **profundidad de investigación** adecuadas. En la práctica, esto se consigue con equipos formados por varias bobinas transmisoras y receptoras. El uso de varias bobinas hace que el comportamiento de la herramienta mejore sustancialmente en ambos aspectos. Ellos guardan una íntima relación con la distancia transmisor - receptor. Si las bobinas están distanciadas 40 pulgadas entre sí, se obtiene una medida de **inducción profunda**. La medida de **inducción media** se obtiene con bobinas separadas 28 pulgadas entre sí. Ambas medidas están incorporadas en el equipo llamado de **doble-inducción**.

Junto a cada bobina transmisora se adiciona una bobina más pequeña que está bobinada en sentido contrario, lo cual hace que se genere un campo de polaridad contraria a la de la bobina principal. Este campo auxiliar se opone al campo de la bobina principal, obligando al flujo a focalizarse y penetrar más en la formación. Para mejorar aún más la resolución vertical del equipo, a los valores de conductividad medidas se les somete en el computador de superficie

a un efecto de filtraje conocido como deconvolución, de acuerdo a la siguiente relación :

$$C_a = -W_1 C_1 + W_2 C_2 - W_3 C_3$$

donde :

C_a Conductividad aparente

W Factores de peso

C Conductividades medidas

Si la señal C_2 corresponde a la medida a una profundidad determinada, C_1 es un valor obtenido 78 pulgadas más abajo, y C_3 un valor 78 pulgadas más arriba.

La **frecuencia de operación** (20 KHz) ha sido escogida en base a experimentación. Se ha visto que la banda comprendida entre los 10 y 20 KHz es la mejor para los fines que se persiguen.

2.4.b Valores típicos que se obtienen

El equipo de inducción mide con exactitud desde las unidades de ohmio-metro hasta 500 ohmios-metro. Para los valores mayores a este valor, las correcciones son muy grandes. El límite de validez en las lecturas está controlado por el contraste que existe entre el valor de la resistividad del filtrado de lodo y el agua de formación. El equipo de inducción puede ser utilizado con confianza cuando este contraste de resistividades es 2,5 aproximadamente o mayor.

CAPITULO TERCERO

EQUIPOS PARA MEDIR POROSIDAD

Existen varios equipos que miden indirectamente la porosidad, como son :

- *Equipo de densidad.*
- *Equipo de neutrones*
- *Equipo sónico.*

Como ninguno de estos equipos da una medida directa de este parámetro, todos ellos son complementarios para obtener el valor verdadero. Estos tres equipos en combinación nos resuelven numéricamente el problema, y también nos indican el tipo de roca de la que está constituida la formación (litología). Por estos motivos, los tres equipos serán discutidos en las líneas que vienen a continuación.

(A) EQUIPO DE DENSIDAD

3.1.a Principio físico y funcionamiento

Está formado por una fuente radiactiva que emite rayos gamma, los cuales chocan contra los electrones de la formación. Por esta interacción llamada **efecto Compton**, los electrones son sacados de su órbita, y los rayos gamma pierden parte de su energía y cambian su trayectoria. El número de choques está directamente relacionado con el número de electrones de la formación, por

lo que la herramienta responde básicamente a la densidad electrónica. Esta densidad está relacionada a su vez con la densidad del material de la roca, la densidad de los fluidos que ocupan los poros, y la porosidad de la formación. El efecto Compton prevalece entre 0.1 y 10 Mega electrón voltios.

La densidad de electrones guarda la siguiente relación con la densidad total :

$$\rho e = \rho b[2Z/A]$$

en donde :

ρ_b es la densidad total real
ρ_e es la densidad electrónica
Z es el número atómico
A es el peso atómico

La relación (2Z/A) es aproximadamente igual a 1 para la mayoría de los elementos. Para el agua es igual a 1.1. La relación que en la práctica se usa es:

$$\rho_b = 1.0704\ \rho_e - 0.1883$$

La fuente y el detector van montados en un patín (fig. # 15). La fuente es colimada, es decir su radiación es direccional, lo que favorece la penetración de la señal en la formación. El detector cercano está alejado 8 pulgadas de la fuente, y el lejano 12 pulgadas.

La radiación producida por los choques entre los rayos gamma de la fuente y los electrones de la formación, es absorvida por un cristal de **ioduro de sodio**, impregnado de talio (10^{-3} moles de talio añadidos al ioduro de sodio puro), y se produce un fotón. A pesar de que este es uno de los mejores cristales para producir fotones y su respuesta es lineal en un rango amplio de energía, el número de fotones producidos es bajo (1 por cada 50 eV de energía absorvida).

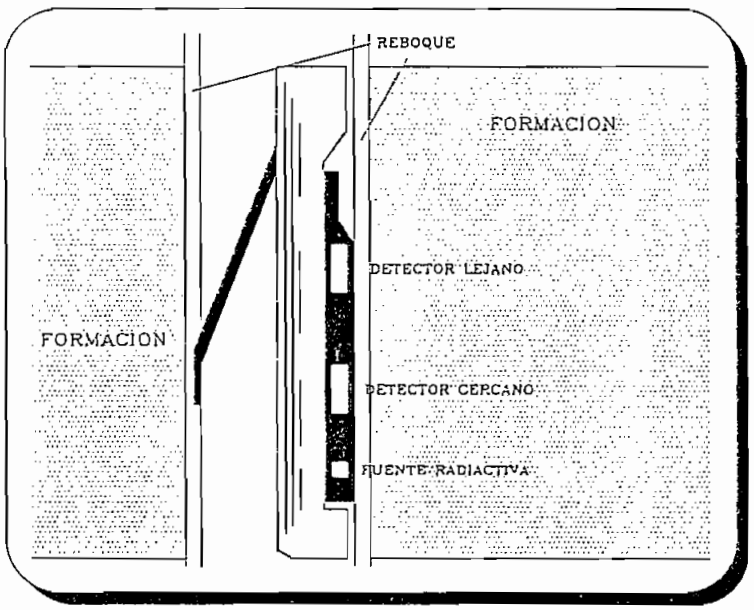


Fig. # 15 PATIN

Para elevar las cuentas de la salida del cristal de INa se usa un **tubo fotomultiplicador** (fig. # 16), que amplifica notablemente la señal. De esta forma, se obtiene un nivel adecuado para un posterior procesamiento. El cristal de ioduro de sodio se lo mantiene herméticamente sellado con una lámina delgada de aluminio o acero, con una ventana de vidrio en uno de los extremos, para evitar que absorba la humedad del ambiente. Entre la ventana y el fotomultiplicador se pone una grasa especial, que tiene un índice de refracción

que minimiza las pérdidas de luz por reflección, y que permite un buen acoplamiento óptico. El detector hasta aquí descrito se conoce como detector de cintilación.

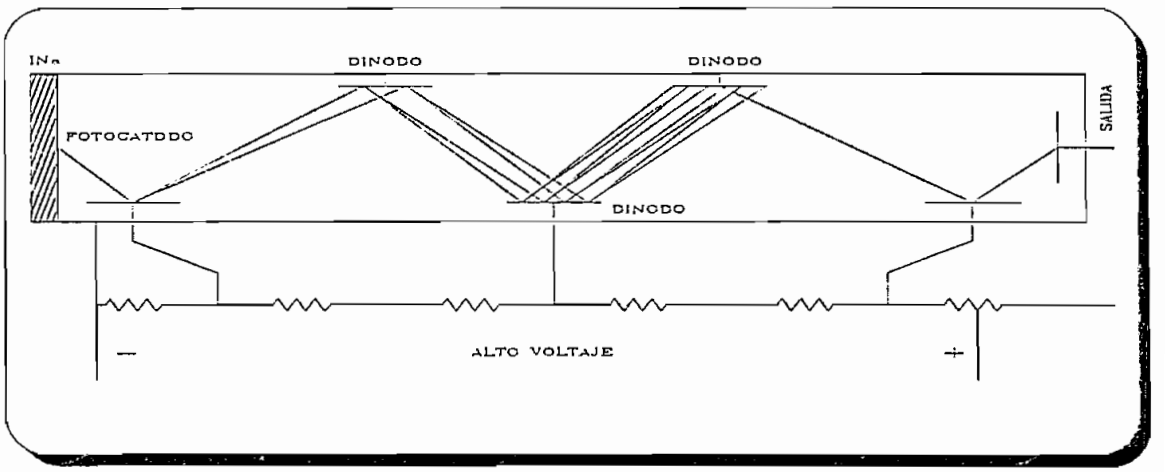


Fig. # 16 DIAGRAMA DEL FOTOMULTIPLICADOR

El fotomultiplicador es un tubo que consta de un fotocátodo, que emitirá uno o varios electrones cuando es excitado por la llegada de un fotón. Los electrones son atraidos por una serie de dínodos (electrodos positivos), cuyos altos voltajes de polarización se van incrementando a medida que se alejan del fotocátodo. Cada dínodo tiene una capa de cesio y antimonio, la cual emite varios electrones con cada electrón que llega con suficiente energía. Los fotomultiplicadores constan de unas 10 etapas de multiplicación correspondientes a 10 dínodos, y cada etapa amplifica 6 veces aproximadamente. Por tanto, la ganancia total es del orden de 6^{10}, lo cual hace que a la salida se obtengan pulsos negativos del orden de los milivoltios. El número de pulsos son proporcionales al número de rayos gamma que son absorvidos por el cristal. El ruido generado por un fotomultiplicador es relativamente pequeño.

Los pulsos son amplificados hasta que se obtienen aproximadamente las siguientes equivalencias :

detector lejano	1 voltio por Kev
detector cercano	0.5 volt por Kev

Los pulsos son organizados de acuerdo a su amplitud utilizando el circuito incluido en la fig. # 17. Para ello se cuenta con una serie de resistencias de precisión a la entrada del circuito, organizadas como divisores de tensión.

Estos voltajes sirven como valores de referencia para el arreglo de los comparadores de voltaje, los cuales alimentan una serie de circuitos R-S, y terminan en circuitos nand. Cuando el voltaje del pulso que llega al comparador 1 es mayor que el voltaje de la referencia, a la salida del comparador habrá un voltaje alto, y al llegar un pulso de lectura al circuito nand 1, a su salida se producirá un voltaje bajo. Cuando el voltaje en el comparador 2 es mayor que la referencia, lo mismo sucede en el comparador 1, y ambas salidas serán altas. Sin embargo, solo el nand 2 presentará un voltaje bajo cuando llegue un pulso de lectura. Esto es debido a que la salida negativa del circuito R-S, está conectada a la entrada del nand 1, lo que impide que su voltaje de salida se ponga bajo. Así queda conformadas varias ventanas de selección de pulsos de acuerdo a su amplitud. El circuito se puede ampliar según el número de niveles de voltaje que se deban discriminar.

Los niveles siguientes niveles se detectan para el detector lejano (fig. # 18) :

43 a 79 Kev

187 a 251 Kev

251 a 536 Kev

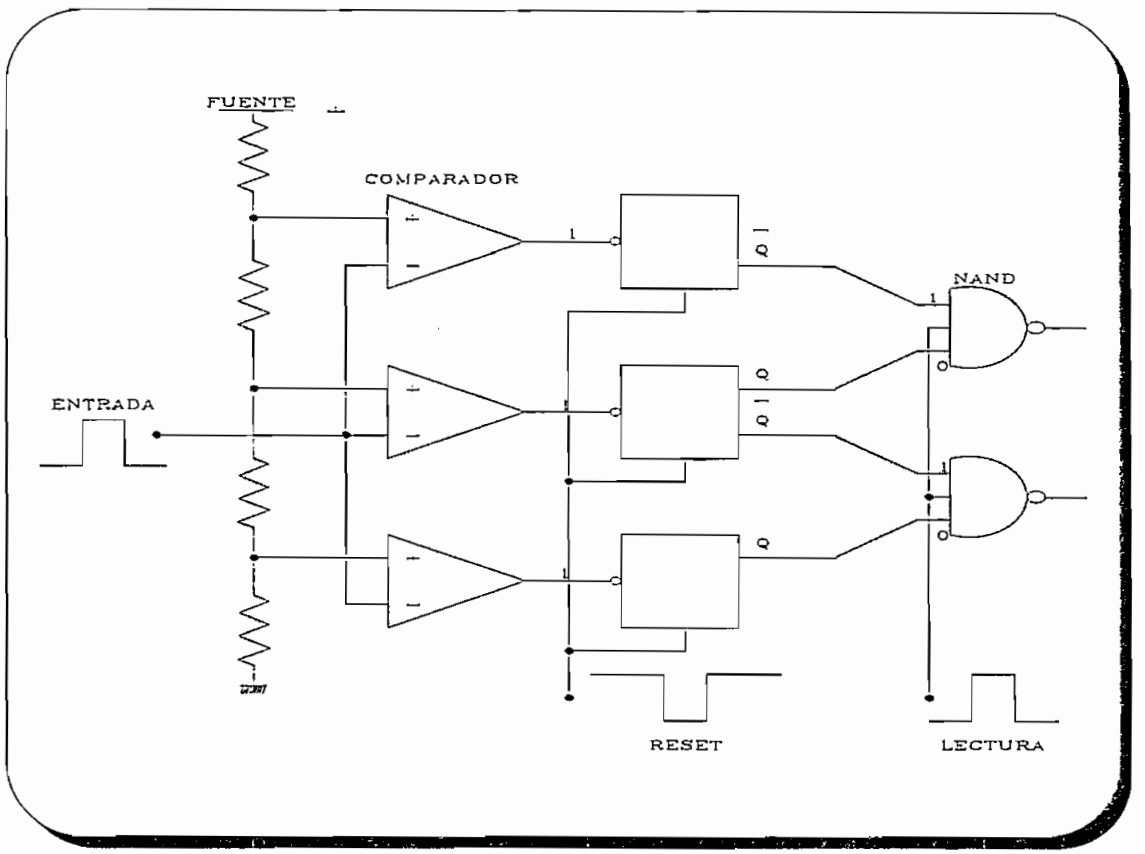


Fig. # 17 CIRCUITO PARA VENTANAS DE ENERGIA

Para el detector cercano se tienen los siguientes niveles (fig. # 18) :

151 a 340 Kev

340 a 463 Kev

Los pulsos de cada nivel de señal se cuentan en circuitos contadores diferentes. Las salidas son multiplexadas y moduladas en FM para ser enviadas a superficie (120 KHz para el detector lejano, y 78 KHz para el cercano). Para el multiplexing, se utiliza una señal de un reloj con una frecuencia de 80 Khz, que sincroniza todo el proceso. Además, se generan una señal de inhibición y otra de reset (fig. # 19), que ayudan en esa misma tarea.

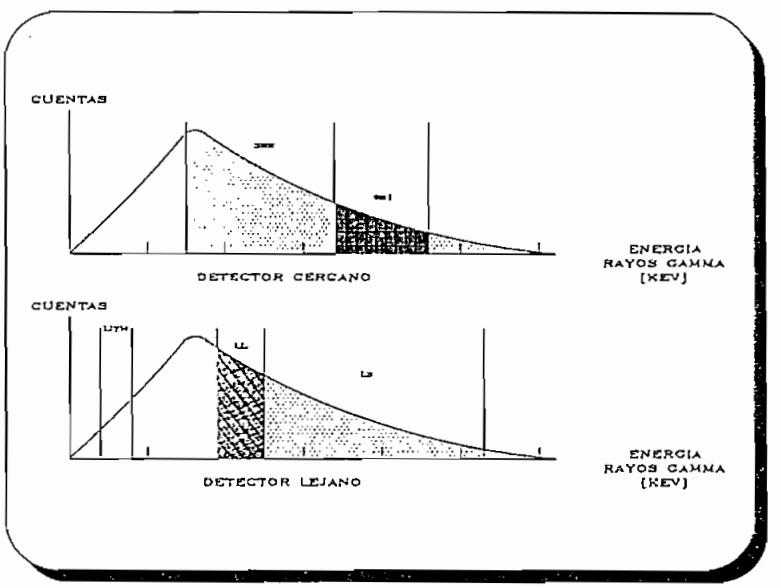


Fig. # 18 CUENTAS VS ENERGIA DE RAYOS GAMMA

La señal de inhibición controla lo siguiente :

- *No permite que se cuenten nuevos pulsos mientras está aplicada.*
- *Permite que la salida de los contadores se almacenen temporalmente en registros de desplazamiento, hasta que estos últimos reciban la orden respectiva para enviar la información a superficie.*

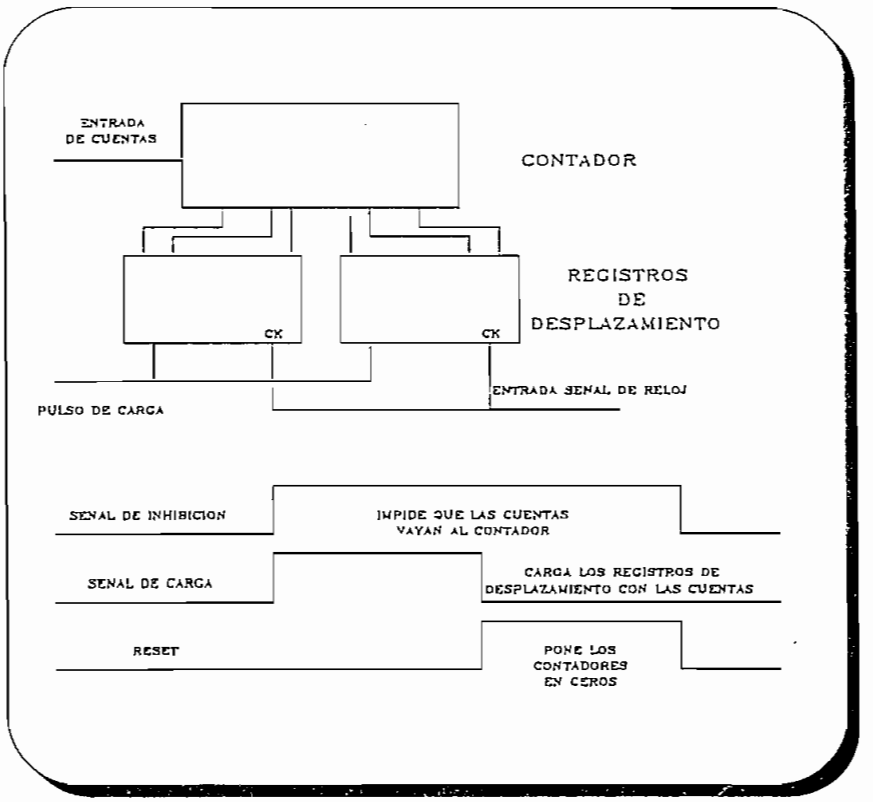


Fig.# 19 SEÑAL DE INHIBICION Y REGISTROS DE DESPLAZAMIENTO

- *Habilita a la señal de reset para que ponga en cero los contadores. De esta forma, los contadores pueden iniciar nuevas cuentas.*

El **control automático del alto voltaje en el fotomultiplicador** se logra mediante un sistema provisto de su respectivo lazo de realimentación. Para la realimentación toma una muestra del número de cuentas que se reciben en cada ventana, la cual es función del alto voltaje aplicado al fotomultiplicador, y esta señal digital es enviada para controlar los circuitos que generan el alto voltaje (fig. # 20).

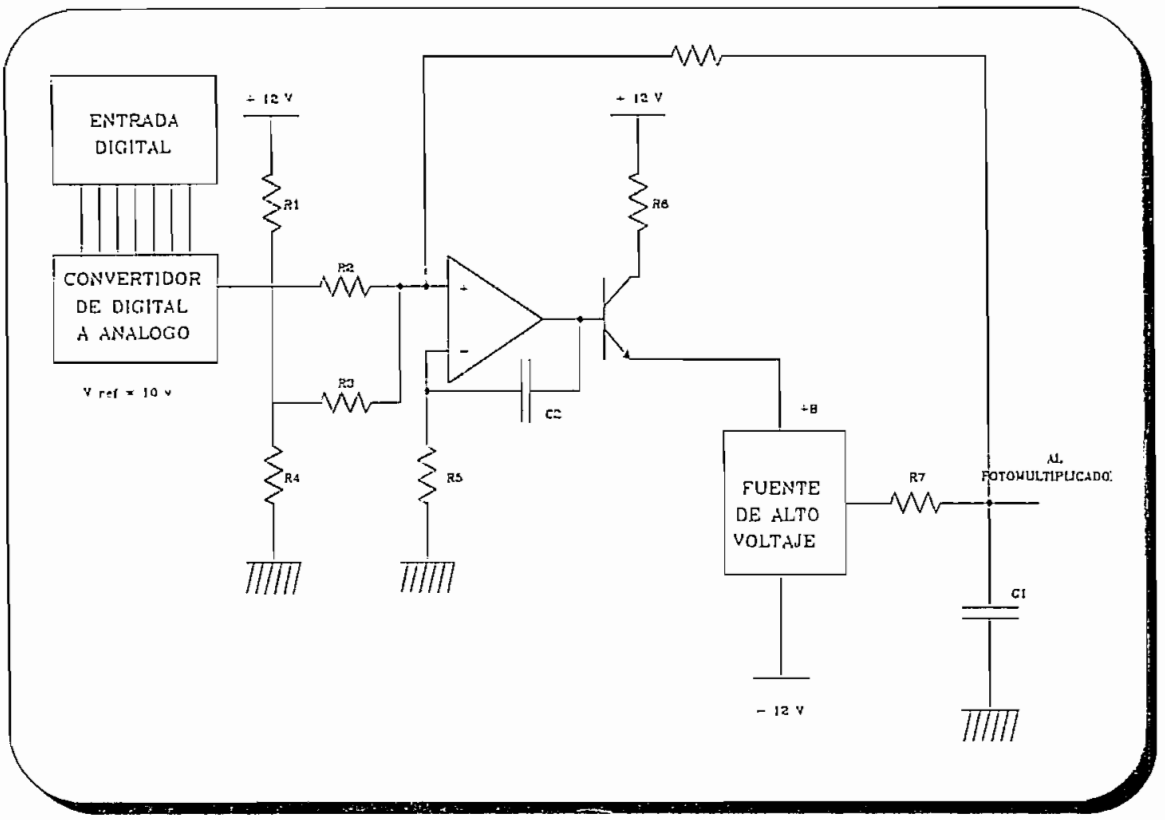


Fig. # 20 CONTROL DEL ALTO VOLTAJE

La muestra es una señal digital, que debe ser convertida en una señal análoga, para poder controlar automáticamente el alto voltaje del fotomultiplicador. La razón de conversión es como sigue : una variación en el alto voltaje entre 0 a 2^{11} (expresado en sistema binario), es igual a un cambio análogo entre 10 y - 10 voltios.

El alto voltaje para el fotomultiplicador se logra utilizando un oscilador de bloqueo y un circuito en escalera (con diodos) para multiplicar el voltaje. Con esta configuración, lo que se espera es que el alto voltaje varíe en la salida

entre -700 a -2700 voltios aproximadamente, cuando la señal que le llega varía entre -10 a + 10 voltios. El voltaje que se obtiene en la escalera está directamente relacionado con el voltaje DC suministrado al oscilador, el cual a su vez viene del muestreo de cuentas realizado en superficie.

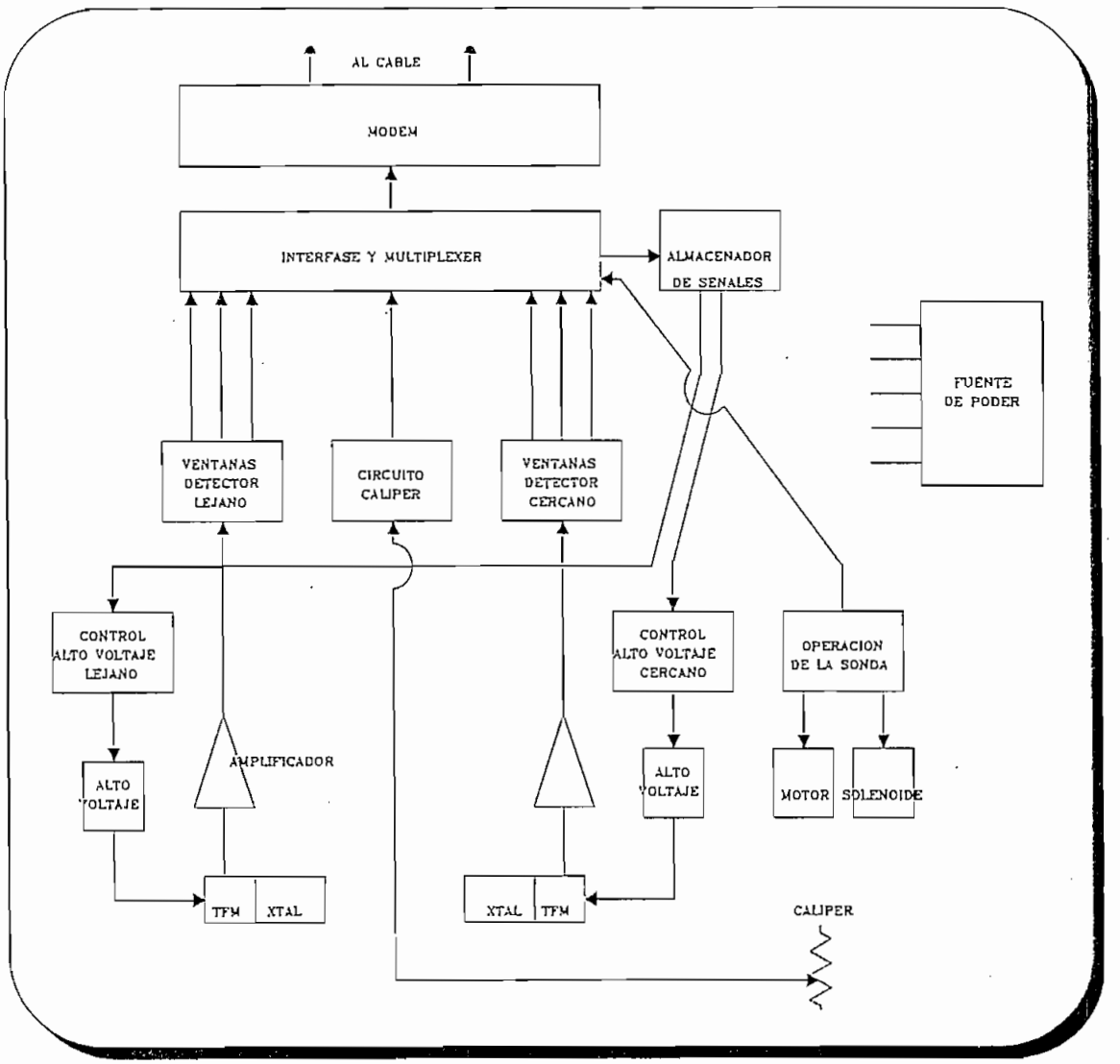


Fig. # 21 DIAGRAMA DE BLOQUES - EQUIPO DE DENSIDAD

El equipo de superficie consiste primeramente en demoduladores de FM, filtros, circuitos amplificadores y regeneradores de pulsos, que mejoran la forma de los

pulsos y aumentan su amplitud. De esta forma se compensa por las pérdidas a través del cable. Para separar la serie de señales que vienen de la herramienta, se utiliza un demultiplexor. Las señales ya separadas alimentan el computador de superficie, en donde se realiza la combinación de las cuentas de las ventanas, y se las transforma en densidad de la formación. La relación entre densidad electrónica y cuentas es :

$$\rho_{lejano} = A_1 - B_1 [\log (n_{lejano})]$$
$$\rho_{cercano} = A_2 - B_2 \{\log (n_{cercano})]$$

donde :

A_1, B_1, A_2, B_2	constantes de la herramientas, obtenidas con experimentación
n_{lejano}	cuentas del detector lejano
$n_{cercano}$	cuentas del detector cercano
ρ_{lejano}	densidad de la formación, medida profunda
$\rho_{cercano}$	densidad de la formación más afectada por el reboque.

La fig. # 21 muestra el diagrama de bloques de la herramienta de densidad.

3.2.a Factores que afectan la exactitud de las medidas

Las temperaturas altas afectan sobre todo al fotomultiplicador. Para lograr disminuir sus efectos adversos, el equipo de fondo usa realimentación. La referencia la proporciona una pequeña fuente de cesio 137 que está permanente montada en el patín, que hace contacto con cada detector porque está en frente del cristal, y que tiene una respuesta característica de 662 Kev. Esta respuesta es monitorada constantemente en dos ventanas de 600-662 y 662-724 Kev

añadidos al sistema de los dos detectores. En cada una de estas ventanas debe existir el mismo número de cuentas, y si esto no ocurre, se modifica el alto voltaje del fotomultiplicador para producir la compensación necesaria.

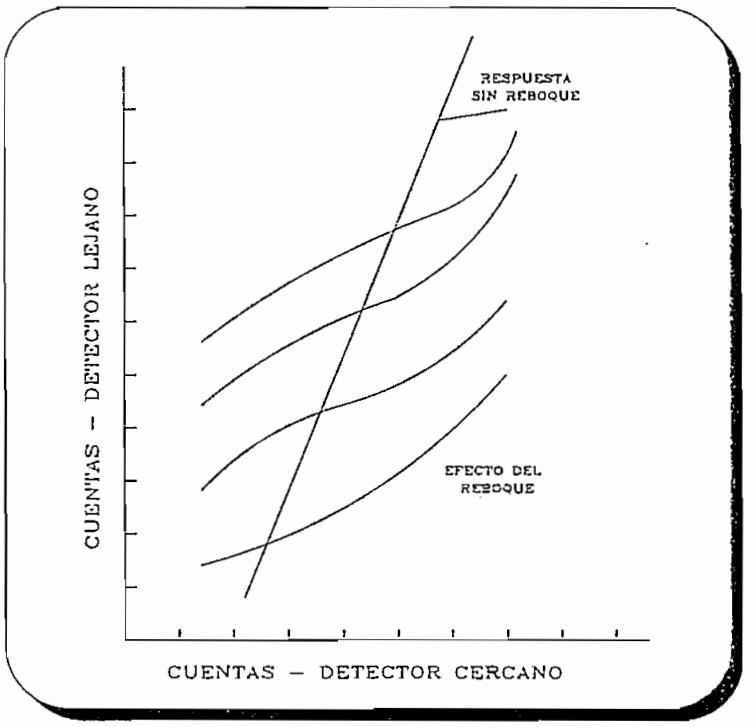


Fig. # 22 ESPINA Y COSTILLAS

A pesar de que tanto la fuente y el detector trabajan aplicados contra la pared del pozo mediante el empleo de un brazo excéntrico, la medida de densidad debe efectuarse a través del reboque de lodo. Esta superficie intermedia que se crea, influye mucho en las medidas reales de la densidad de la formación, sobre todo si el reboque está formado por material denso (o pesado). Por esta razón, es necesario incluir en el diseño de la herramienta un sistema de compensación por efectos de reboque, que depende tanto del espesor como de la densidad del mismo. Este sistema se conoce como sistema de compensación de "espina y costillas", y se logra utilizando dos detectores, en lugar de uno solo. El

detector más cercano investiga en la zona donde todavía tiene influencia el reboque, por lo que "mide" su efecto. El detector lejano investiga más profundo en la formación, como unas 8 pulgadas o más. En la fig. # 22 se ilustra la respuesta a la que debe ajustarse la herramienta, la cual ha sido obtenida experimentalmente.

La simulación, experimentación y construcción de la herramienta de densidad, se hace en base a la **curvatura** de un detector de 8 pulgadas. Por tanto, en pozos de mayor o menor diámetro, la diferencia de curvaturas crea un espacio entre el detector y la formación que es llenado por el lodo, el cual debe ser compensado. Las correcciones en las lecturas se realizan mediante cartas incorporadas en el computador de superficie para tal efecto, utilizando una relación de este tipo :

$$corr = (\rho_{medido} - \rho_{lodo})(calibrador - 8)$$

3.3.a Criterios de diseño

La **elección del detector** es fundamental en este equipo, para lograr una óptima relación señal a ruido. El detector de ioduro de sodio ha probado ser el mejor, pero es bueno echar un vistazo a las posibles alternativas.

Una posibilidad de reemplazo podría ser el de Germanato de bismuto (BGO), debido a su eficiencia de detección más alta. Sin embargo, su eficiencia depende estrechamente de la temperatura. Para un cambio de -58° F a 230° F, la eficiencia disminuye en un factor de 12. La salida de fotones también

disminuye con la exposición a los rayos ultravioleta, rayos gamma o neutrones, y varía de cristal a cristal. Esta característica hace que el diseño con un cristal de este tipo sea más complicado, porque el modelaje de la respuesta es bastante difícil. La fig. # 23 muestra la respuesta de estos dos detectores típicos con variaciones de temperatura.

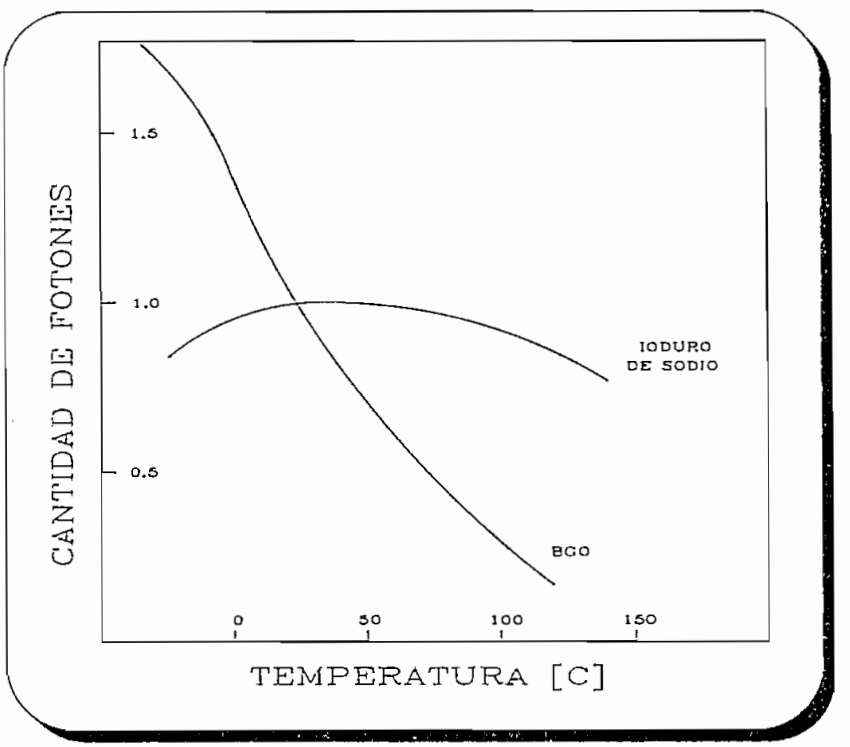


Fig. # 23 RESPUESTA DE LOS DETECTORES CON TEMPERATURA

Otras alternativas no muy buenas son los cristales orgánicos, los cuales ofrecen una respuesta más rápida, pero emiten menos luz. En los años 60 aparecieron los detectores de radiación con tecnología de semiconductores, que utilizan germanio con adición de litio. Sin embargo, tampoco son solución porque, a pesar de tener mejor resolución, ser más compactos, y tener una respuesta más rápida, deben ser encapsulados en tanques de gran volumen al vacío y enfriados

por algún agente externo, para poder operar a altas temperaturas preservando la estabilidad del litio.

La polarización del fotomultiplicador es otro factor primordial a considerar. Los fotomultiplicadores son polarizados con alto voltaje. La respuesta del fotomultiplicador es lineal donde la curva cuentas - alto voltaje es plana (fig. # 24). Polarizando el fotomultiplicador en esta parte, se gana en estabilidad. Además, controlando el alto voltaje en esta región, se pueden obtener pulsos proporcionalmente de mayor amplitud de acuerdo a la intensidad de la radiación de entrada. Esta característica nos permite utilizar la amplitud de los pulsos para hacer un análisis más exhaustivo del nivel de energía de los rayos provenientes de la formación.

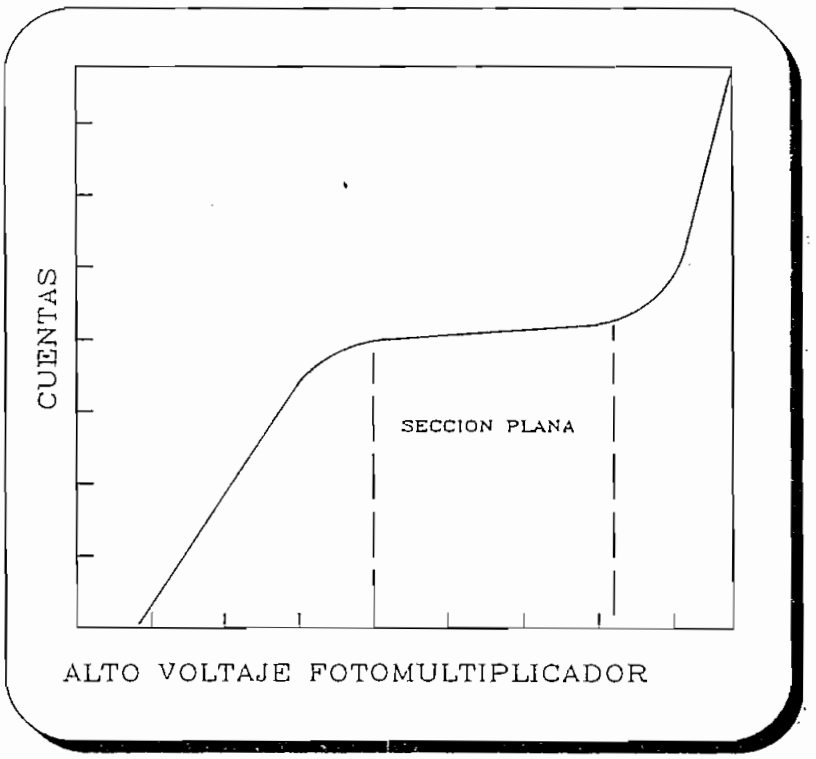


Fig. # 24 POLARIZACION DEL FOTOMULTIPLICADOR

3.4.a Valores típicos que se obtienen

Valores típicos medidos con el equipo de densidad están entre 1 gramo/centímetro cúbico hasta más de 3 g/cc, lo cual cubre perfectamente la mayoría de elementos que se encuentran en la naturaleza. Lo deseable sería que esta herramienta respondiera únicamente a la densidad de la formación. En la práctica, sus valores se ven ligeramente alterados debido a la presencia de fluidos diferentes a agua (hidrocarburos). El efecto es un poco mayor cuando la formación contiene gas. Este efecto se explica si consideramos que la densidad electrónica del gas es menor que la del agua.

(B) EQUIPO DE NEUTRON

3.1.b Principio físico y funcionamiento

Este equipo, cuyo diagrama de bloques se muestra en la fig. # 25, está provisto de dos detectores proporcionales de Helio (He 3). El detector cercano está situado a 15 pulgadas de la fuente únicamente, y capta aproximadamente el 50% de los neutrones termales que le llegan. El detector lejano está ubicado a unas 25 pulgadas de la fuente, fuente y es capaz de detectar el 100 % de los neutrones termales. El helio es sensible a la llegada de los neutrones y responde ionizándose. Cuando un neutrón lento llega al detector, choca con el núcleo de Helio y se produce H3 (tritio), un protón y se libera una energía de 0.765 Mev. La energía producida durante la reacción es compartida por el H3 y

el protón. Por ello, el H3 y el protón chocan nuevamente con otros átomos de helio, creando iones positivos de He3 y electrones libres, hasta que se agota la energía cinética del sistema.

Los electrones libres son acelerados por un campo de alto voltaje hacia el ánodo central, produciendo aún más ionización. La nube de electrones alrededor del ánodo crea un pulso negativo a la salida del detector. La cantidad de He3 que se ocupa en la reacción para producir H3 es tan pequeña, que la disminución en la cantidad de He3 en el contador no se nota. El H3 se transforma nuevamente en helio H3, pero luego de 12 años de vida media.

El alto voltaje para el detector es suministrado por un circuito multiplicador de volataje de escalera. Se debe generar aproximadamente 1500 VDC. Los pulsos de salida del detector son pequeños y disparejos, con una amplitud en el orden de los microvoltios. Por esta razón, se necesita un amplificador que eleve la señal a un nivel manejable, y un circuito que haga uniforme la amplitud de los pulsos. El amplificador tiene una ganancia de 750, aproximadamente. La uniformidad de los pulsos se consigue comparando la señal amplificada con una referencia de 320 mvolts. La salida son pulsos negativos de 5 voltios. A los detectores se los presuriza para mejorar su eficiencia.

El número de cuentas que se obtienen a este nivel son por lo general altas, y alcanzan incluso un número de 10.000 cuentas por segundo. Esta señal puede presentar problemas de transmisión a través del cable. Por esta razón es necesario intercalar un circuito divisor de cuentas por 8 (3 flip flops en

cascada), que disminuye el número de cuentas por este mismo factor. El manejo hasta aquí descrito de las cuentas es igual para ambos detectores.

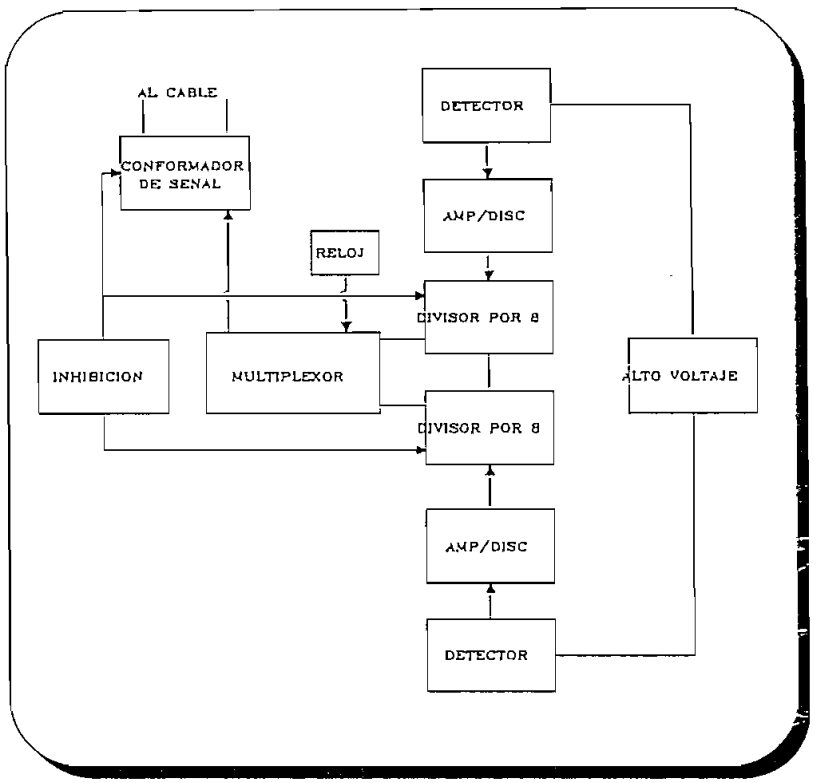


Fig. # 25 DIAGRAMA DE BLOQUES - EQUIPO DE NEUTRON

Al multiplexor llegan varios pulsos : los del detector lejano, los del cercano, y los del equipo de rayos gamma, que usualmente se conecta en tándem. Este circuito se encarga de poner estos pulsos uno a continuación de otro, más un pulso de sincronismo que viene del reloj. El reloj consiste en un amplificador operacional con realimentación RC. Un circuito de compensación mantiene la frecuencia del oscilador estable. La salida del reloj es un pulso de -5 voltios cada 100 micro segundos. El conformador de señal para el cable está formado por un monostable y otro amplificador. El monostable da a los pulsos una

anchura uniforme de 10 microsegundos, y el amplificador mantiene el nivel de los pulsos entre 15 y 0 voltios.

El circuito de inhibición se utiliza cuando el equipo de neutrón es corrido en tándem con un equipo como el sónico. El circuito en mención inhibe la salida de los pulsos de neutrón para que no interfieran con la señal sel sónico. Por esta razón, disminuye la cuenta efectiva de pulsos de neutrón enviados a superficie en un 10 %. Sin embargo, el muestreo es suficiente como para que se garantice la integridad de la información que se recibe en superficie.

En superficie, luego de amplificarlos y darles forma, los pulsos son separados por un demultiplexor. Los pulsos de sincronismo son reconocidos por encontrarse separados 400 microseg. entre sí. Por último, el computador de superficie se encarga de realizar la conversión de los pulsos (o cuentas) en valores de porosidad de la formación, en base a relaciones matemáticas obtenidas experimentalmente.

3.2.b Factores que afectan la exactitud de las mediciones

Este es uno de los equipos que se ve afectado por múltiples factores. En primer lugar, tanto la fuente radiactiva como el detector deben hacer buen **contacto a la formación**. Si esto no sucede, el valor de corrección que se debe emplear es considerable. La corrección se estima con la ayuda de un circuito calibrador (caliper), que mide la distancia existente entre el detector y la formación, y

suministra este dato al computador de superficie para que se efectúe la corrección correspondiente.

La influencia de la **temperatura** y **presión** del pozo en las medidas es importante también. Por lo general, estos parámetros son medidos o deducidos fácilmente, y la corrección correspondiente se efectúa con posterioridad a la adquisición de datos, utilizando cartas generadas en base a experimentación. Lo mismo sucede con la salinidad del agua de formación y del lodo.

Parámetros no menos importantes que afectan las lecturas son el **grosor del reboque** de lodo, y la **densidad del lodo**. El grosor del reboque se mide utilizando un calibrador, y la densidad se obtiene de acuerdo a muestras de lodo obtenidas en superficie.

3.3.b Criterios de diseño

Al igual que en el equipo de densidad, el voltaje de **polarización del detector** se escoge en la parte plana de la curva de respuesta voltaje-cuentas. Este equipo está provisto de un sistema manual -comandado por un selector en superficie- que le permite reajustar este voltaje cuando es muy alto o muy bajo, de tal forma que regrese a la parte plana de la curva. Estos corrimientos del voltaje de polarización pueden ser causados por el incremento de temperatura debido a las condiciones inóspitas del fondo del pozo.

La distancia fuente-detector y la energía de la fuente son muy puntos muy importantes a considerar, ya que se quiere que los neutrones se encuentren a niveles termales cuando se realice su detección. La energía termal promedio es de 0,025 eV. La energía emitida por la fuente está en el orden de los 2 MeV.

3.4.b Valores típicos que se obtienen

Valores típicos medidos con el equipo de neutrón están entre "cero" unidades de porosidad hasta varias decenas, lo cual cubre el rango de valores de las formaciones muy profundas hasta las formaciones cercanas a superficie, respectivamente. Los valores obtenidos con el equipo de neutrón se ven bastante alterados debido a la presencia de fluidos diferentes a agua (hidrocarburos). El efecto es muy pronunciado cuando la formación contiene gas. Esta respuesta característica determina que los registros de densidad y de neutrón usados en combinación sean buenos detectores de gas. La respuesta del equipo neutrón se explica si consideramos que la cantidad de hidrógeno contenido en un gas es menor que en el agua.

(C) EQUIPO SONICO

3.1.c Principio físico y funcionamiento

Esta herramienta está formada por uno o varios transmisores, y varios receptores. Los transmisores trabajan bajo el principio de magnetotricción, y los receptores responden al efecto piezoeléctrico. De esta forma, la energía

eléctrica se convierte en vibraciones o sonido en el transmisor, y la presión producida por las vibraciones se transforma en energía eléctrica en el receptor.

El transmisor produce periódicamente una señal audible, la cual establece el comienzo de la medición. La señal viaja por el lodo y choca contra la pared de la formación. Allí se producen una serie de reflecciones y refracciones siguiendo la ley de Snell y de acuerdo a la transferencia de energía acústica. Esta transferencia depende del contraste de las impedancias acústicas entre el lodo y la formación. Impedancia acústica se define como el producto entre la velocidad la onda y la densidad del medio. Si el contraste de impedancias acústicas es pequeño, se habla de un buen acoplamiento y no existirán ondas reflejadas, como puede ser el caso en formaciones a poca profundidad. Si por el contrario el contraste es grande, las reflecciones serán múltiples. Un ejemplo de este último caso sucede en formaciones que contienen gas.

Parte de la señal viaja a través de la formación (onda refractada), y llega al receptor nuevamente a través del lodo. Otra parte viaja por el lodo (onda reflejada) y llega directamente al receptor.

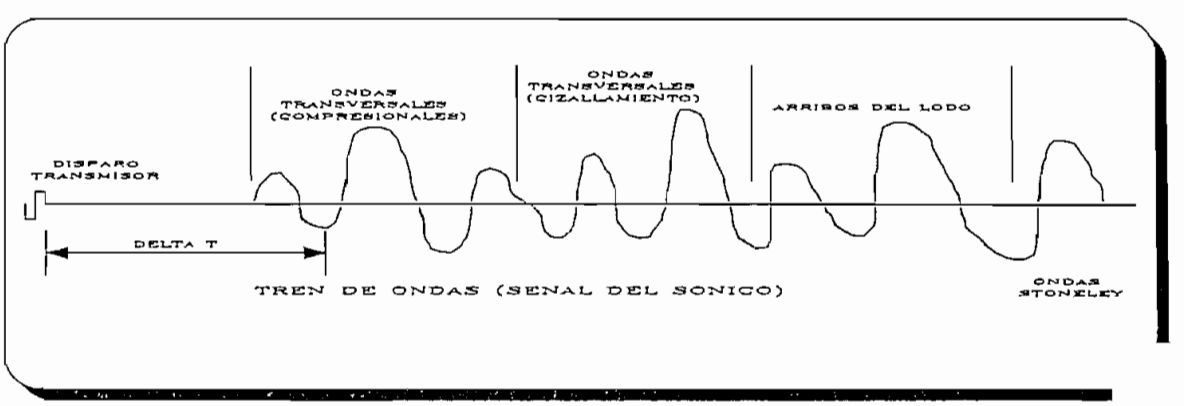


Fig. # 26 TREN DE ONDAS. SEÑAL DEL EQUIPO SONICO

La serie de reflecciones y refracciones de la señal original provoca que en el receptor se reciban una serie de ondas con muchos ciclos (conocida como tren de ondas), que muestra largas variaciones tanto en amplitud como en espectro de frecuencias (fig. # 26). El tiempo que transcurre entre la generación de la señal audible (en el transmisor T_1) y el momento en que es captada la señal en el receptor (R_2) es medido por un contador.

La onda que viaja del transmisor al receptor por el lodo únicamente, lo hace a una velocidad característica de aproximadamente 189 microsegundos, y se la conoce como arribo del lodo. La parte de la onda que va a la formación viaja a una velocidad más rápida, que depende de la porosidad de la formación. Este valor se conoce como **tiempo de tránsito** de la formación, que es el objetivo de nuestras mediciones.

Los transmisores tienen un rendimiento del 50 %, únicamente. Tienen forma de un toroide cilíndrico, en el que se enrolla una capa de conductores gruesos de cobre. A los transmisores se los excita a su frecuencia de resonancia con una señal cercana a los 20 KHz, consistente en un pulso de corriente de considerable magnitud (40 amperios). El pulso es obtenido encendiendo un transistor (de potencia), permitiendo que la carga almacenada en un capacitor grande fluya por el transmisor. Cuando el transistor se apaga, el circuito del transmisor se abre, lo que permite que el capacitor se cargue nuevamente. El transmisor sigue resonando hasta que la energía se desvanece. La descarga que reciben los transmisores es grande y rápida (de unos pocos micro segundos), lo

que provoca la expansión de los cilindros toroidales del trasmisor. Materiales típicamente magnetotrictivos son algunas aleaciones de níquel, cobalto y ferrita.

Los transmisores y los receptores están inmersos en aceite para favorecer el acoplamiento acústico con el medio que los rodea. Los materiales cerámicos que normalmente se utilizan son el BaTiO2 (titaniato de Bario) y cristales de cuarzo, con factores de acoplamiento hasta de 0.7.

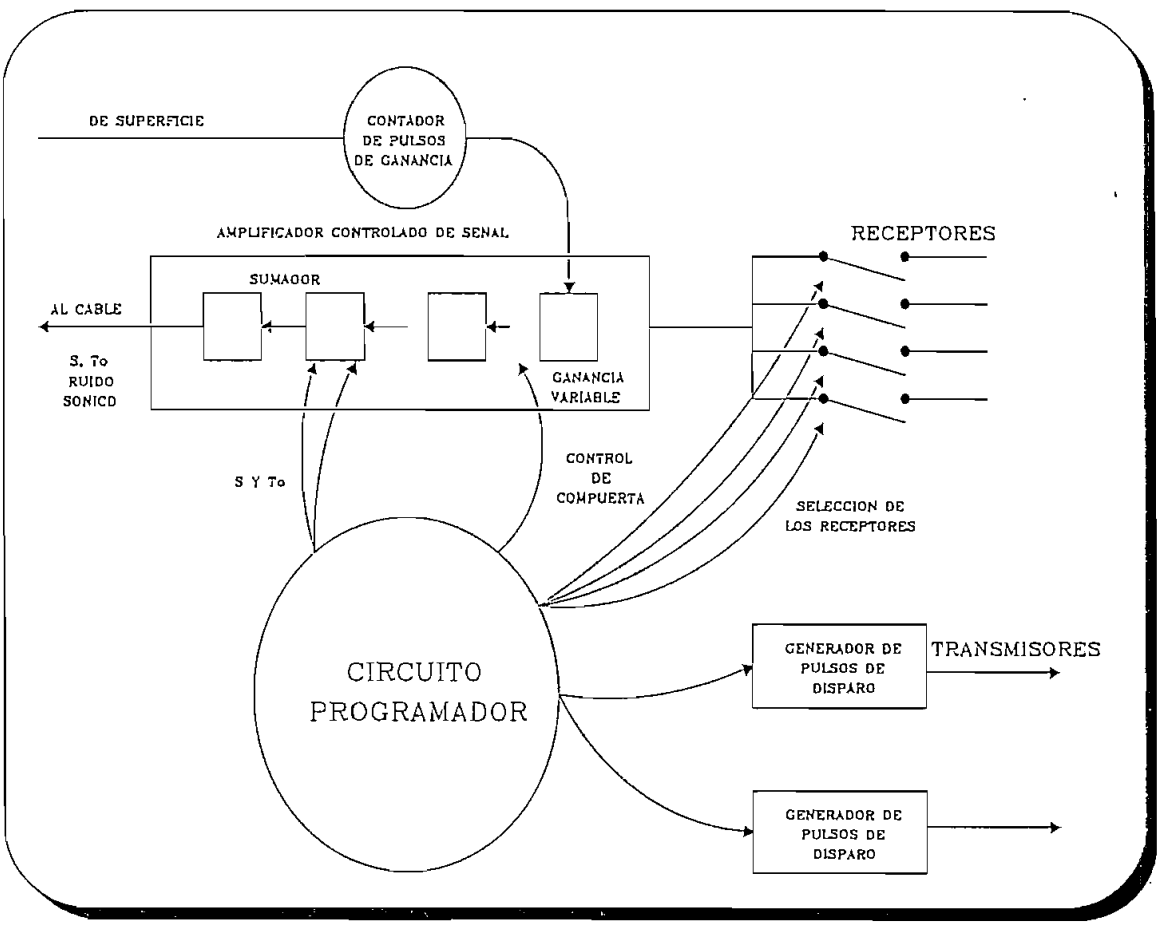


Fig. # 27 FLUJO DE SEÑALES

A continuación se discutirá el funcionamiento de un equipo típico de dos transmisores y cuatro receptores. En esta herramienta, el factor importante es

sincronismo. Su reloj es una onda cuadrada generada con un trigger Schmitt a partir de una onda sinusoidal de corriente alterna de 60 Hz. En la sonda existe un circuito programador que controla las siguientes funciones (fig. # 27) :

- *Controla el disparo de los transmisores.*
- *Selecciona adecuadamente los receptores.*
- *Ayuda a controlar la ganancia de los amplificadores de la sonda.*
- *Combina las señales generadas en la sonda y cartucho.*

Lo que se quiere generar es una suma de cuatro señales, relacionadas con cada uno de los cuatro receptores. Estas señales se las conoce como palabras. Cada palabra está dividida en tres fases. Cada palabra tiene una duración de 50 milisegundos. Cada fase dura 16.66 mseg. Para cada palabra, la siguiente es la correspondiente selección de transmisores y receptores :

Palabra	Transmisor	Receptor
1	1	4
2	1	2
3	2	1
4	2	3

En la herramienta existe un pulso de sincronismo generado solo cada cuatro palabras, y ocurre durante el comienzo de la fase 2 de la primera palabra. Esta

señal permite la comunicación en fase entre el equipo de fondo (sonda y cartucho) y el de superficie. Todas las demás señales son iguales para cada palabra (fig. # 28).

Durante la **primera fase** de todas las palabras, se captan en el cartucho los pulsos de ganancia enviados desde superficie, y se envían las señales que seleccionan el transmisor con el receptor adecuado. El número de pulsos que llegan desde superficie determinará la ganancia de los amplificadores ajustables. El receptor permanece seleccionado por toda la duración de la palabra, para poder recibir las señales de ruido y el tren de ondas.

En la **segunda fase**, luego de un retraso de 10 milisegundos y durante 1.7 milisegundos, se capta la señal máxima de ruido, cuya amplitud a su vez se usa para ajustar la ganancia de los amplificadores en superficie.

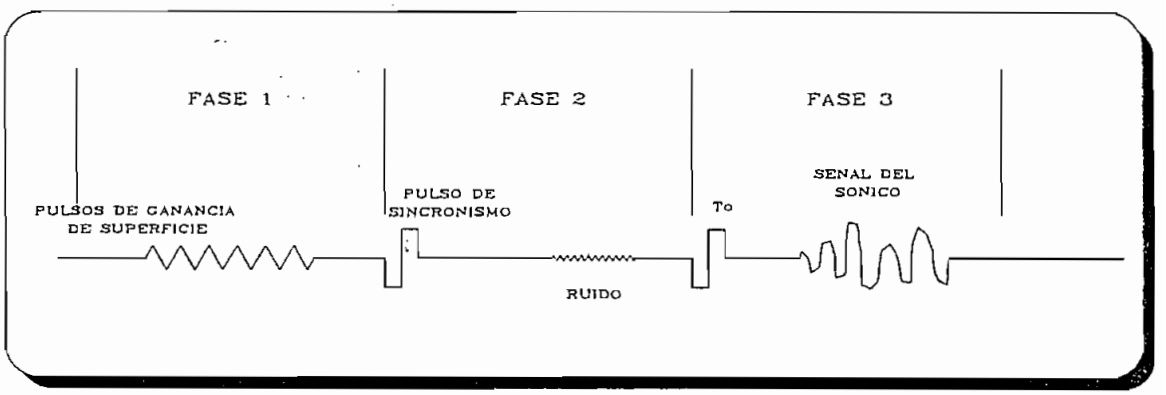


Fig. # 28 SECUENCIA COMPLETA DE SEÑALES. PALABRA # 1.

En la **tercera fase** se genera un pulso positivo y otro negativo de 16 micro segundos de ancho c/u (ondícula), y se obtiene el tren de ondas captado por el sónico. La ondícula sirve de referencia de amplitud y como el comienzo de la

medición del tiempo de tránsito. La ondícula se genera se genera simultáneamente con un pulso de 22 microsegundos que sirve para disparar los transmisores. Después de 0.1 mseg. de haber empezado la fase tres, se genera una compuerta de 4.4 mseg. que habilita a la señal del sónico para ser amplificada en el circuito correspondiente. El retraso de 0.1 mseg. es para evitar que el ruido generadopor el disparo de los transmisores interfiera con la señal. En esta fase también se genera una señal de inhibición de 4.5 mseg., que evitará que cualquier pulso generado por la herramienta de rayos gamma interfiera con la señal del sónico.

El diagrama de bloques del cartucho y sonda (fig. # 29) se puede explicar con la ayuda de la fig. # 30, en donde se muestran algunas de las formas de onda más importantes :

- *La señal del reloj es dividida por 3, lo que quiere decir que se va a obtener un pulso de salida por cada 3 pulsos de entrada. De esta forma se genera la señal A. El valor alto de este pulso representa la fase 1.*

- *Para obtener la señal B (que representa la fase 2) se utiliza un registro de desplazamiento, en donde entran la señal A y los pulsos del reloj.*

- *Las señales C y D se obtienen después de pasar la señal A a través de dos flip flops en cascada. La señal C es la salida del primer flip flop y tiene la mitad de los pulsos de A. D es la salida del segundo flip flop, y su número de pulsos es únicamente la cuarta parte. En el diagrama de bloques ésto se ilustra como un divisor por 4.*

- *La primera palabra se forma usando un circuito NAND que nos da : $\overline{C.D}$. Las siguientes palabras se obtienen intercalando registros de desplazamiento, ubicados en el bloque especificado como desplazamiento. Cada palabra controla la selección de cada uno de los receptores.*

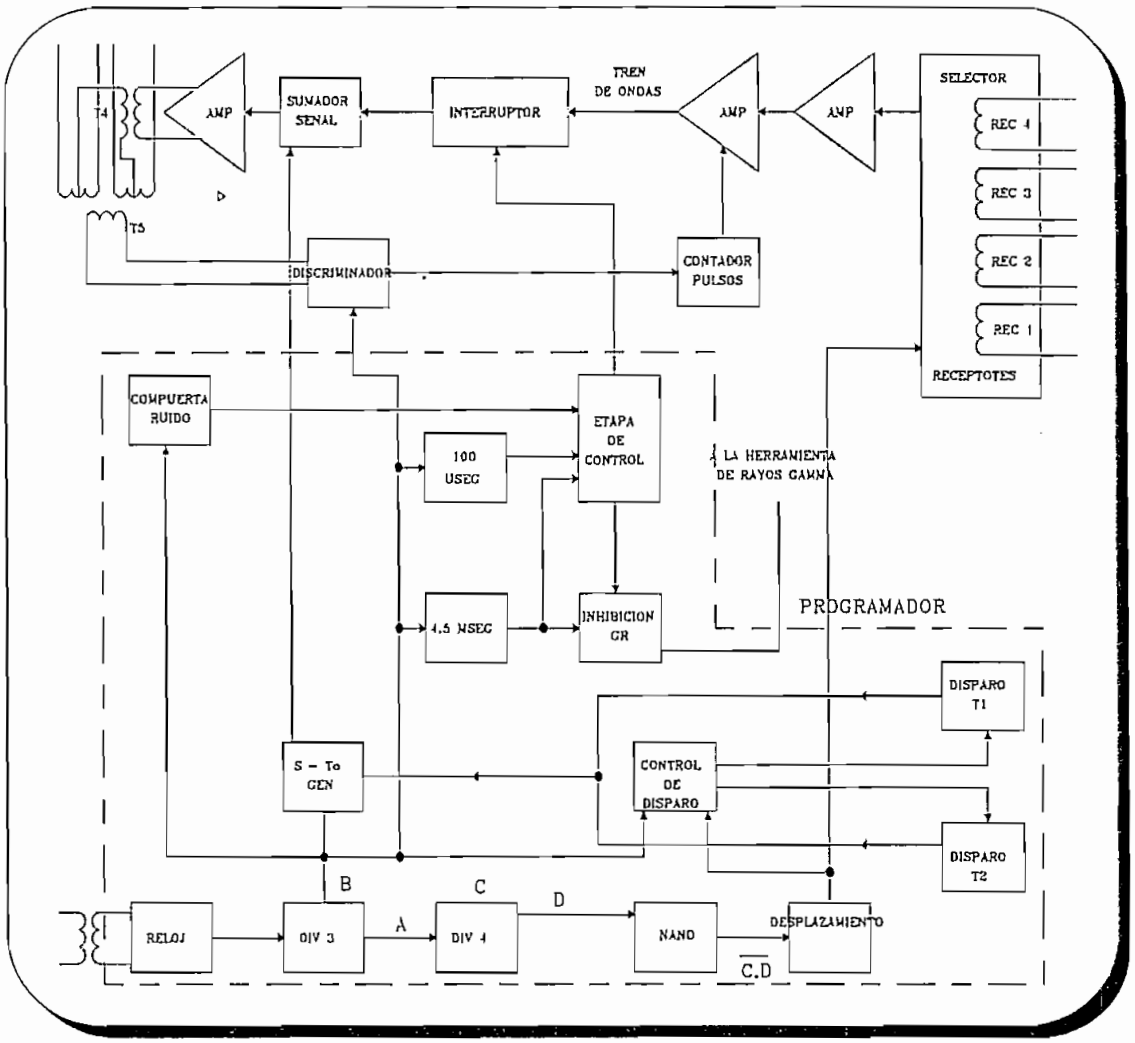


Fig. # 29 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CARTUCHO Y SONDA

- *En los bloques señalados como control de disparo, se efectúan los siguientes pasos : 1) En un circuito OR se combinan las señales correspondientes a la palabras 1, y 2. 2) La bajada de la señal B alimenta*

un circuito monoestable, que genera un pulso de 25 microsegundos. 3) Ambos pulsos se combinan en una compuerta AND. La señal resultante dispara el transmisor 1,

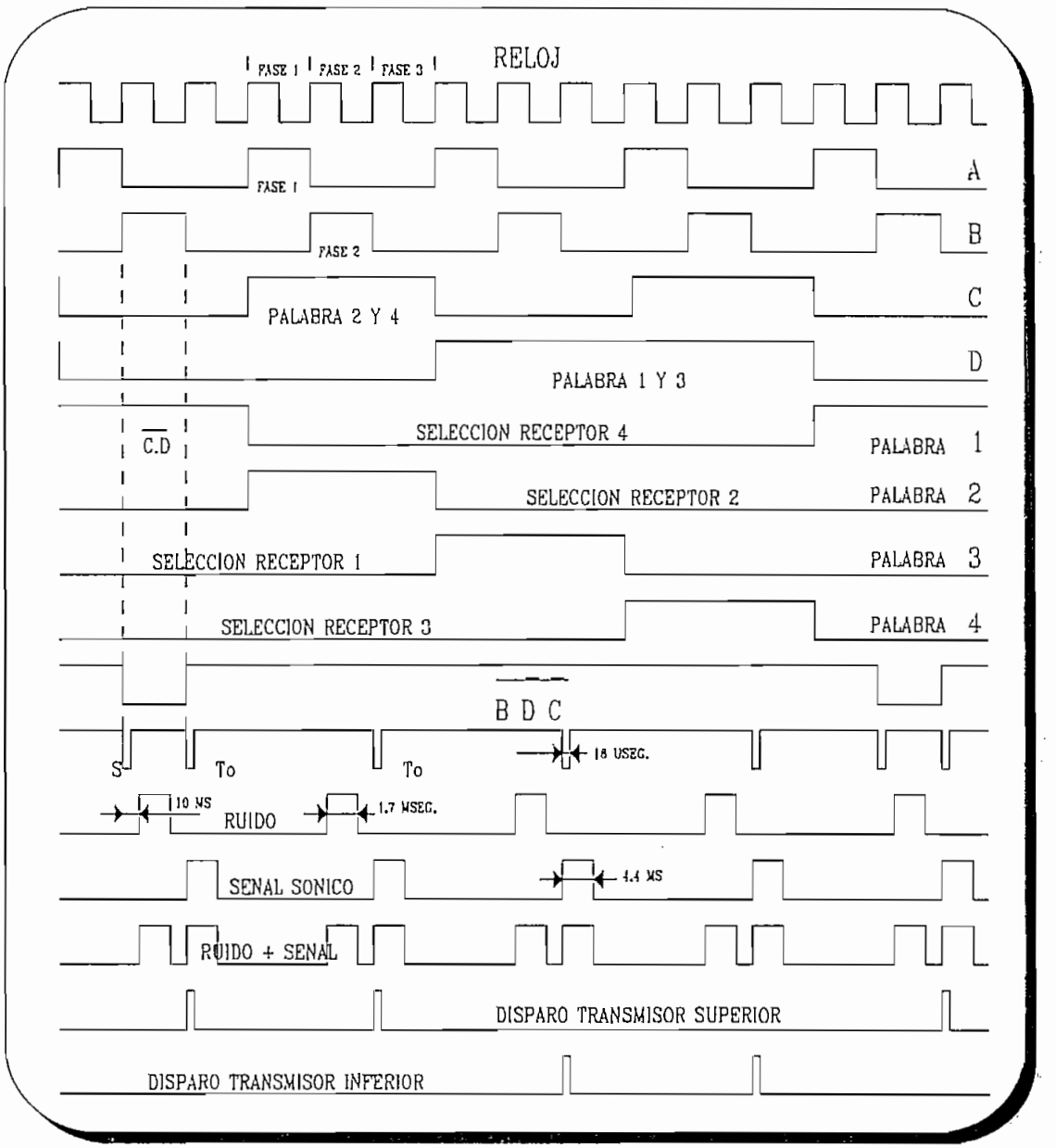


Fig. # 30 SEÑALES DE CONTROL EN CARTUCHO Y SONDA

- *Para generar los pulsos que inician el disparo del transmisor 2 se tiene la misma secuencia, solo que se emplea la combinación de las palabras 3 y 4.*

- *La señal de sincronismo S se genera en dos etapas. 1) Un circuito NAND efectúa la siguiente operación :* $\overline{B(-C)(-D)}$. *2) Cada bajada de esta señal hace que se produzca un pulso de 16 microsegundos en un monoestable que sigue a continuación.*

- *Para producir la ondicula* T_o, *se utiliza la bajada de la señal B como entrada de un monostable que genera un pulso de 25 microsegundos.*

- *S y* T_o *se combinan en una compuerta NOR, ubicado en el bloque S-*T_o *GEN. Esta señal va al sumador de señal para combinarse con las demás señales.*

- *La señal B sirve como referencia de la compuerta que permite el paso del ruido. La bajada de B acciona dos monoestables en cascada. El pulso del primero produce una demora de 10 milisegundos. El segundo monoestable se acciona con la bajada del primero, y produce un pulso de 1.7 milisegundos a su salida .*

- *La bajada de la señal B también sirve para generar lo siguiente : 1) un pulso de 100 microsegundos a través de un monoestable. 2) un pulso de 4.5 milisegundos generado por otro monoestable. Con las dos señales se genera un pulso de 4.4 milisegundos utilizando un OR exclusivo. Este pulso se combina con la señal proveniente de la compuerta de ruido en la etapa de control. La salida de esta etapa controla el bloque denominado interruptor, en donde se deja pasar las señales provenientes de los receptores*

únicamente durante los 1.7 milisegundos de la compuerta de ruido, y los 4.4 milisegundos (diferencia entre la señal de 4.5 milisegundos y la de 100 microsegundos). La señal de 4.5 milisegundos se deriva también al circuito de inhibición de los pulsos de rayos gamma, que impide cualquier interferencia con la señal de los receptores.

- *El tren de ondas captado por los receptores es amplificada en los circuitos respectivos. La ganancia de uno de los amplificadores es controlada por la señal de ruido que viene de superficie. A mayor amplitud de esta señal, mayor será el número de pulsos saliendo del contador. Se debe notar que la señal de ruido únicamente pasa cuando el discriminador está habilitado.*

Las funciones del equipo de superficie son :

- *Determinar el tiempo de tránsito de la señal entre transmisores y receptores.*

- *Medir el nivel de la señal de los primeros arribos positivo y negativo (E_1 y E_2).*

El equipo de superficie debe estar perfectamente sincronizado con el equipo de fondo. El tiempo de tránsito es medido contando pulsos. La cuenta empieza cuando el equipo de superficie detecta el pulso T_o, y para 25 microseg. después de detectar los primeros arribos. Estos 25 microseg. son necesarios para asegurarse que la señal es recibida, y serán descontados luego por el computador de superficie. La amplitud de E_1, E_2 y del ruido son captadas por circuitos detectores de picos.

El pulso T_o es detectado en superficie cuando la parte negativa del pulso alcanza un valor de -0,6 voltios. La detección de E_1 y E_2 es más difícil porque varían constantemente en amplitud y en posición. Para evitar que el equipo detecte ruido únicamente, se tiene un circuito monoestable que impide que E_1 o E_2 sean detectados durante los primeros 135 microseg. después de haber sido detectado T_o, ya que se sabe que ninguna señal de formación puede llegar antes de ese tiempo. Existe también una compuerta controlada por el computador, que toma el valor de la última medida para establecer el tiempo en que puede llegar la siguiente señal. El valor inicial de esta compuerta son 80 microseg. cuando no existe ninguna lectura previa. Un último control que permite captar E_1 o E_2 y evitar el ruido, es un circuito comparador, que establece el nivel mínimo de las señales E_1 o E_2, que por supuesto debe ser mayor que el nivel de ruido. Por ejemplo, para E_2 se tiene que el nivel es igual a 0,5 voltios mayor que el nivel de ruido.

El equipo de superficie permite la elección de E_1 o E_2 según el tipo de medida que se quiera realizar. Típicamente, E_1 sirve más para el propósito de medir amplitud del primer arribo, y E_2 para medir el tiempo. La amplitud sirve para la evaluación de la cementación (pozo revestido), y el tiempo para calcular porosidad (hueco abierto).

3.2.c Factores que afectan la exactitud de las mediciones

Uno de los factores que más podría afectar la lectura de este equipo es el tiempo adicional que se mide en el lodo cuando el hueco presenta cavernas, o

cuando la herramienta se inclina en el pozo. Esta es una herramienta muy sensible a los **efectos de pozo**. El diseño especial (que se explica más adelante) con dos transmisores y cuatro receptores y el empleo de centralizadores durante la adquisición de las medidas, anula prácticamente estos efectos indeseados.

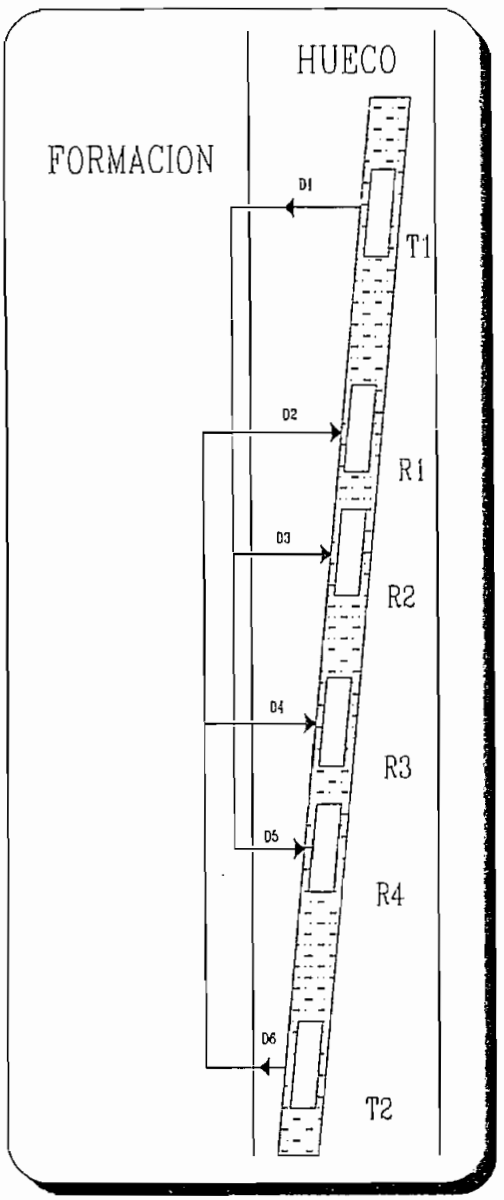
El tiempo de tránsito medido por el equipo sónico refleja el tiempo de viaje de la onda a través del sólido por el que atraviesa. Siendo el sólido el camino más fácil, cuando muchos poros están unidos entre sí formando espacios espacios mucho más grandes o cuando existen fracturas en la roca, el equipo sónico no es capaz de distinguir la diferencia. El efecto es que la porosidad medida por el equipo sónico será menor que el medido por cualquiera de los otros medidores. La diferencia existente se conoce como índice de **porosidad secundaria.**

El **ruido** y la **atenuación** exagerada de la señal, contribuyen a que las medidas sean incorrectas, ya sea por defecto o por exceso, respectivamente. Estos efectos se controlan en gran parte mediante el empleo de compuertas de inhibición y de detección ya mencionadas anteriormente.

3.3.c Criterios de diseño

Como en teoría existe la posibilidad de un acoplamiento entre transmisor y receptor a través de el cuerpo de la herramienta, éste se construye con muchísimas ranuras espaciadas uniformemente, para que el tiempo que se demora la señal utilizando este camino sea mucho mayor que el que se demora a través de la formación (fig. # 31).

Los contadores en superficie incluyen el tiempo que la señal viaja desde el transmisor a la formación a través del lodo (d_1), el tiempo de propagación de la señal en la formación (delta t_{1-2}), y el tiempo entre la formación y el receptor nuevamente a través del lodo (d_3). Como lo que necesitamos es únicamente el tiempo a través de la formación -el cual es proporcional a la porosidad de la misma- es necesario incluir algún sistema que nos mida y reste automáticamente los tiempos de viaje en el lodo.



Cuando la herramienta está en el centro del hueco y éste es cilíndrico, $d_1 = d_2 = d_3 = d_4$. Pero, cuando la herramienta está inclinada en el pozo (como muestra la fig. # 31) o cuando hay ensanchamientos en el pozo, las distancias son diferentes. Para resolver estas dificultades se utilizan dos transmisores y cuatro receptores, que permiten realizar en el computador de superficie las medidas y diferencias necesarias para compensar por el exceso en los tiempos :

Fig. # 31 EQUIPO SONICO

$$[\text{tiempo / ft}] = (T_1R_4 - T_1R_2 + T_2R_1 - T_2R_3) / (2 * \text{espaciamiento})$$

donde :

$$T_1R_4 = d_1 + \text{delta } t_{1\text{-}4} + d_5$$

$$T_1R_2 = d_1 + \text{delta } t_{1\text{-}2} + d_3$$

$$T_2R_1 = d_6 + \text{delta } t_{2\text{-}1} + d_2$$

$$T_2R_3 = d_6 + \text{delta } t_{2\text{-}3} + d_4$$

espaciamiento = distancia entre R_2 a R_4 = distancia entre R_1 a R_3

El transmisor 1 solo trabaja con los receptores 2 y 4, y el transmisor 2 solo con los receptores 1 y el 3.

Otro criterio de diseño constituye la **maximización de la señal captada** por el equipo. Aparte de utilizar los elementos más sensibles disponibles a este efecto, se trata de mejorar la direccionalidad del transmisor. Para lograr una direccionalidad de 30° en la señal del transmisor, se coloca otro elemento transmisor distanciado unas 2 pulgadas del primero, que es disparado 17 microsegundos después. Por el contrario, la condición deseable para los receptores es que sean omnidireccionales, para que sean capaces de captar el máximo de señal.

3.4.c Valores típicos que se obtienen

Las medidas de esta herramienta varían entre 40 microsegundos/pie a más de 200. Esto se traduce en valores de porosidad desde "cero" hasta más de 60, lo

cual cubre el rango que se necesita. Con los valores obtenidos con los equipos de densidad y neutrón se construyen gráficos especializados que permiten determinar la clase de roca en la formación, y por ende el mejor modelo de evaluación de la porosidad. La utilización de las tres herramientas ayudan a localizar zonas de gas, y zonas influenciadas por porosidad secundaria. Por último, el rango de valores que cubre son adecuados para la evaluación de las propiedades mecánicas de las rocas y la impedancia acústica, en combinación con los registros de densidad.

En la tabla siguiente, se han organizado los valores que se léen con las herramientas, para algunos de los minerales / fluidos de más interés para la industria petrolera :

Minerales	Resistividad	Densidad	Tiempo	Porosidad
	[ohm-m]	[g/cc]	[useg/pie]	[unidades]
Cuarzo	10^{4} - 10^{12}	2,65	55,5	-2,00
Calcita	10^{7} - 10^{12}	2,71	46,5	-1,00
Dolomita	---------	2,87	40,0	1,00
Anhidrita	10^{4} - 10^{10}	2,97	60,0	-2,00
Agua dulce	>1,00	1,00	189,0	>60,00
Hidrocarburos	10^{6} - 10^{9}	<<1,10	235,0	>60,00
Agua salada	<1,00	>1,00	185,0	>60,00

3.5 DISEÑO - FUNCIONAMIENTO DE LOS CIRCUITOS DE LOS EQUIPOS DE RESISTIVIDAD Y POROSIDAD

3.5.a Multiplicador de voltaje

Primero se explicará el funcionamiento de un doblador de voltaje, que es el caso más fácil. Luego, el mismo concepto puede ser extendido a los triplicadores, cuadriplicadores, etc.

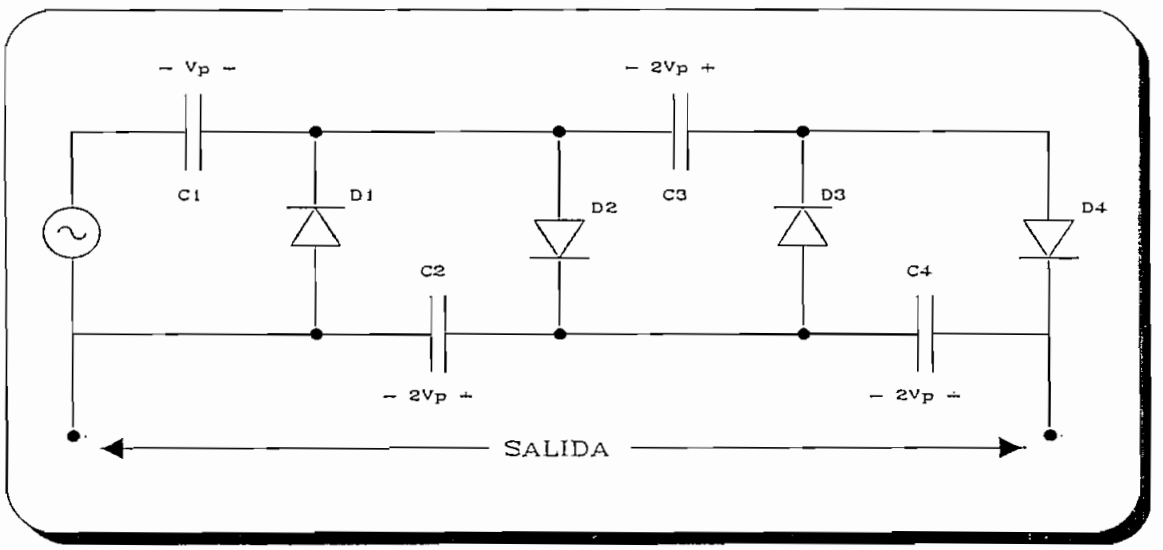


Fig. # 32 MULTIPLICADOR DE VOLTAJE CON DIODOS

Un doblador de voltaje está formado únicamente por D_1, D_2, C_1, C_2 (fig. # 32). Si el circuito está alimentado por una fuente de AC con un voltaje pico V_p, durante el ciclo negativo, D_1 conduce y C_1 se carga a un voltaje igual a V_p, con la polaridad indicada en la fig. # 32. Durante el siguiente ciclo positivo, D_1 permanece abierto, D_2 conduce y C_2 se carga a un voltaje igual a 2 V_p con la polaridad indicada en la fig. # 32. Esto sucede porque la fuente queda en serie

con C_1, y al sumarse los dos voltajes se obtiene 2 V_p. Para un multiplicador con n etapas, el comportamiento es similar al descrito. C_1 se carga a un voltaje V_p, mientras todos los demás condensadores se cargan a un voltaje de 2 V_p. En el circuito de la fig. # 32-que corresponde a un cuadriplicador- la salida es igual a 4 V_p. Esto se cumple aproximadamente, si la impedancia de carga (Z_L) es grande. En teoría se podrían tener muchas etapas de multiplicación, pero en la práctica la limitante es la pobre regulación de voltaje que resulta de este circuito. Tanto los diodos como los condensadores deben ser diseñados para soportar un voltaje 2 V_p o mayor. Solo C_1 y D_1 están expuestos al voltaje V_p, únicamente, y pueden ser menores.

En los equipos de densidad y neutrón, este circuito se utiliza para polarizar el fotomultiplicador y el detector con Helio, respectivamente. Este tipo de tubos son adecuados para este circuito, porque presentan una impedancia de entrada alta. En esta aplicación, se llegan a utilizar hasta 10 etapas, que son alimentadas por osciladores de bloqueo (circuitos descritos más adelante), que reemplaza la fuente sinusoidal mostrada en la fig. # 32. Hay que anotar que la salida del multiplicador depende directamente del número de ciclos de carga que sufren los condensadores. Por tanto, a más cuentas, mayor será el voltaje.

3.5.b Oscilador controlado por voltaje

Una posible configuración de este circuito se ilustra en la fig. # 33, haciendo uso de un amplificador operacional. Con este circuito se obtiene a la salida una onda diente de sierra. Al aplicarse voltaje negativo a la entrada, el condensador

empieza a cargarse hasta llegar a un voltaje máximo como V_b, que es el voltaje de ruptura del diodo. En este momento, el diodo (tiristor) conduce y descarga rápidamente el capacitor. La pendiente m mientras se está cargando el capacitor es igual a :

$$m = V_b / T$$

pero, en este circuito :

(Voltaje de salida / tiempo) = -[voltaje de entrada / (RC)]

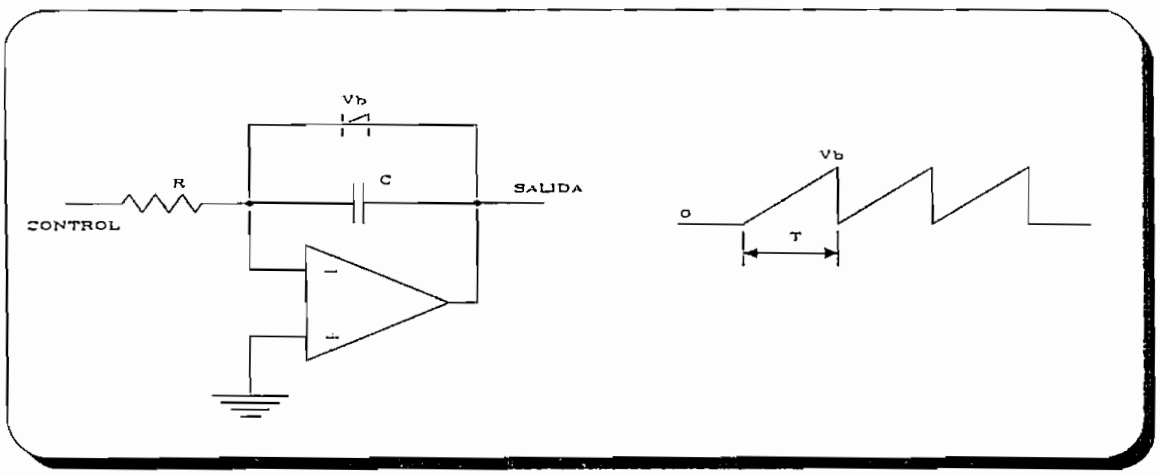


Fig. # 33 OSCILADOR CONTROLADO POR VOLTAJE

por tanto, como el voltaje de entrada es igual al voltaje de control, y reemplazando período por frecuencia (T = 1/ f), se tiene :

$$f = V_{control} / [(RC)\ V_b]$$

De esta forma se observa que la frecuencia de la onda es proporcional al voltaje de control, por tanto se obtiene un convertidor de voltaje a frecuencia.

El diodo mostrado en la fig. # 33 es un diodo de cuatro capas (tiristor) que tiene el comportamiento mostrado en la fig. # 34. El voltaje máximo V_b que puede llegar a tener entre sus terminales es el voltaje de ruptura, luego del cual este dispositivo empieza a conducir y el voltaje se baja rápidamente. A ésto se debe la bajada también rápida mostrada en la forma de onda de la fig. #33. En esta configuración, el estado de prendido o apagado (conducción o no de corriente) del tiristor es controlado completamente por la variación de voltaje entre sus terminales, debido a la carga del condensador.

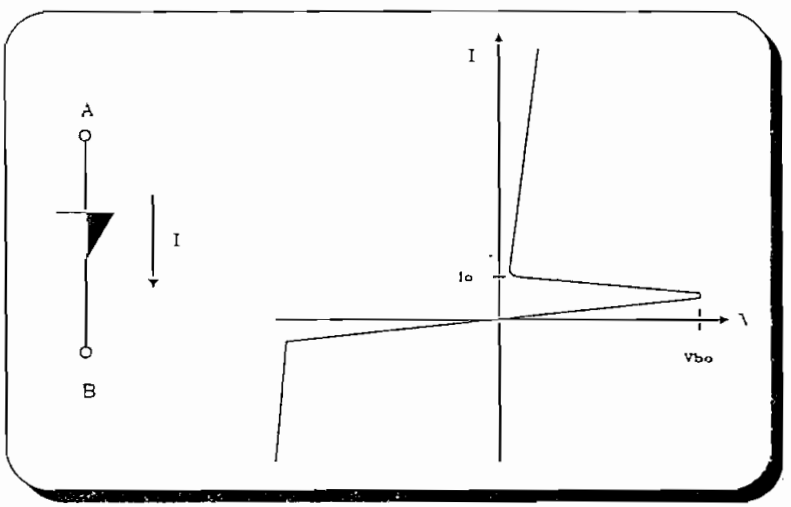


Fig. # 34 RESPUESTA DEL TIRISTOR

Los osciladores controlados por voltaje se utilizan en la herramienta de doble lateroperfil para obtener modulación por frecuencia. Sus frecuencias centrales son de 120 KHz y 78 KHz. Reemplazando por ejemplo 78 KHz (frecuencia de reposo para la medida de corriente) en la relación matemática, y asumiendo $V_{control} = V_b$ para la , se tiene :

$$RC = 1 / 78 \text{ KHz}$$

Por otro lado, la diferencia que existe entre la frecuencia de oscilación en un momento dado y la frecuencia de reposo se llama desviación de frecuencia (f_d). El índice de modulación está dado por la relación entre la máxima desviación de frecuencia, y la frecuencia de la señal de modulación (f_y) :

$$m = (f_{d\,máx}) / f_y$$

La frecuencia de la señal del lateroperfil somero es de 280 Hz. Si se asume un índice de modulación de 5, la máxima desviación de la frecuencia será de 1,4 KHz. Utilizando la relación matemática inicial, ahora se puede calcular la variación que se le debe dar al voltaje de control para obtener esta máxima desviación de frecuencia :

$$V_{control\,máx} = [(1{,}4\ KHz) * V_b] / (78\ KHz)$$

Como V_b para un tiristor está en el orden de las decenas de voltios, el voltaje de control máximo debe estar en el orden de las centenas de milivoltios.

En estas condiciones, el ancho de banda mínimo ($B_{mín}$) aproximado de la señal modulada será :

$$B_{mín} = 2 * [f_{d\,máx} + f_y] = 3.360\ Hz$$

3.5.c Filtro pasabajos

Un filtro activo pasabajos se muestra en la fig. # 35, que utiliza un amplificador operacional. Para bajas frecuencias, el condensador equivale a un circuito abierto, y la relación de ganancia de voltaje del sistema es igual a $-(R_2/R_1)$. Esta es la ganancia máxima del circuito. Al aumentar la frecuencia, la reactancia capacitiva disminuye, con lo que la ganancia del sistema también disminuye. Cuando la frecuencia es muy alta, el condensador se comporta como un cortocircuito y la ganancia del voltaje tiende a cero.

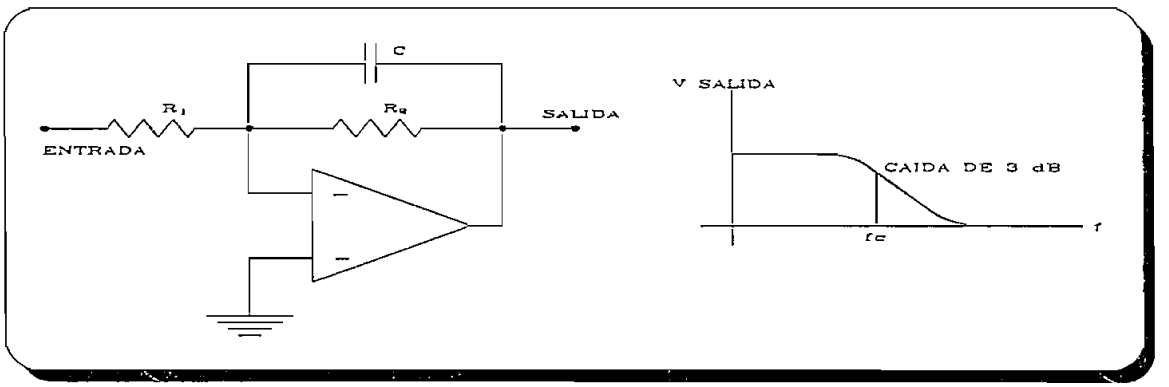


Fig. # 35 FILTRO PASABAJOS ACTIVO (20 DB/DECADA)

La frecuencia de corte de 3 db se produce cuando :

$$fc = 1 / (2\pi R_2 C)$$

Para frecuencias mayores que la de corte, la ganancia del sistema disminuye a razón de 20 dB por década. Si se desea que la disminución del sistema sea de 40 dB, se puede utilizar una configuración como la de la fig. # 36, en donde se utilizan 2 condensadores. La frecuencia de corte en este circuito es igual a :

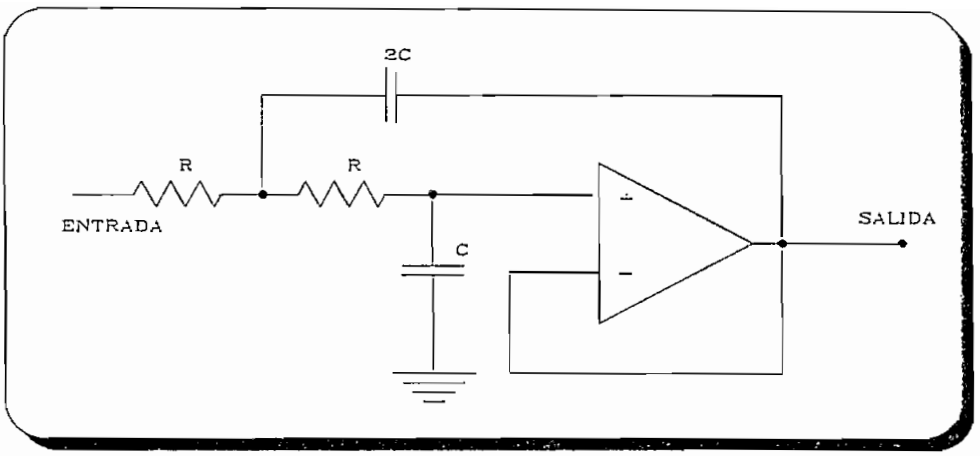


Fig. # 36 FILTRO PASABAJOS ACTIVO (40 DB/DECADA)

$$fc = 1 / (2\pi R_2 C \sqrt{2})$$

En el equipo de superficie del lateroperfil se usa un filtro pasabajos de 7 Hz. Para este circuito, la constante RC debe ser igual a {1 / [(43,98 Hz)]} usando el circuito para 20 dB/década, y de {1 / [(62,20 Hz)]} con el de 40 dB/década.

En el circuito de monitoreo del lateroperfil se tiene un filtro pasabajos a la salida del amplificador, que permite el paso de una señal de 35 Hz con una ganancia de 30 dB, y atenúa una señal de 280 Hz a -14 dB. Esto es equivalente a tener el valor de 3 dB a 52.5 Hz, y una atenuación de 60 dB / década para mayores frecuencias, como se muestra en la fig. # 37.

Una posibilidad es utilizar un circuito pasabajo de 40 db /década en cascada con ótro de 20 dB / década. Para obtener los valores de los componentes, se reemplaza el valor de 52.5 Hz en la frecuencia de corte f_c de cada circuito.

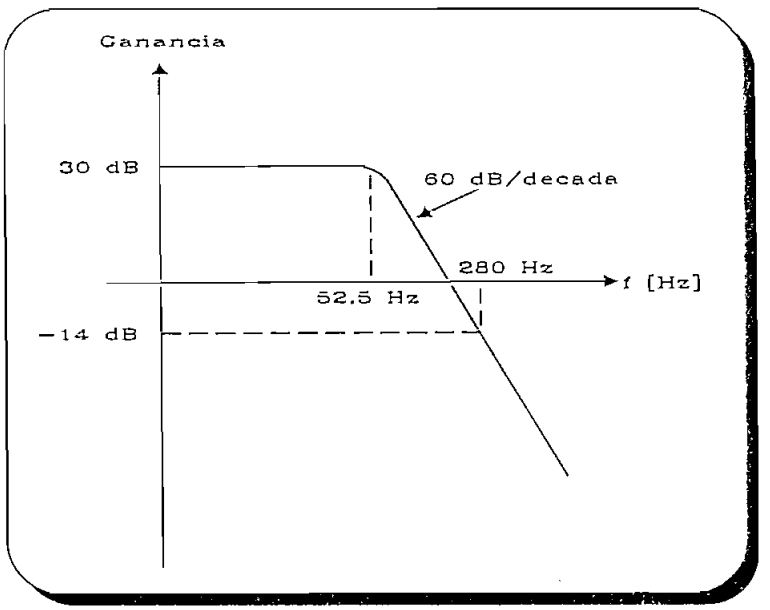


Fig. # 37 RESPUESTA DE FRECUENCIA, LAZO DE MONITOREO

3.5.d Amplificadores de señal pequeña

Algunas ganancias que se necesitan para los amplificadores (de los equipos usados en la industria del petróleo) son pequeñas, y podrían ser obtenidas fácilmente con circuitos convencionales de transistores. Sin embargo, mirando al equivalente de c.a. para estos circuitos, se tiene una resistencia de entrada como r'_e , que depende estrechamente de la temperatura de acuerdo a la siguiente relación :

$$r'_e = [(C + 273)\ (25\ mv)] / [291 * I_e]$$

Como los equipos deben funcionar a temperaturas altas, se observa que r'_e puede llegar a tener valores significativos, que afectarían la ganancia del

amplificador. Esto se hace evidente observando la ganancia de un amplificador en configuración emisor común :

$$A \sim [r_c/(r'_e + r_E)]$$

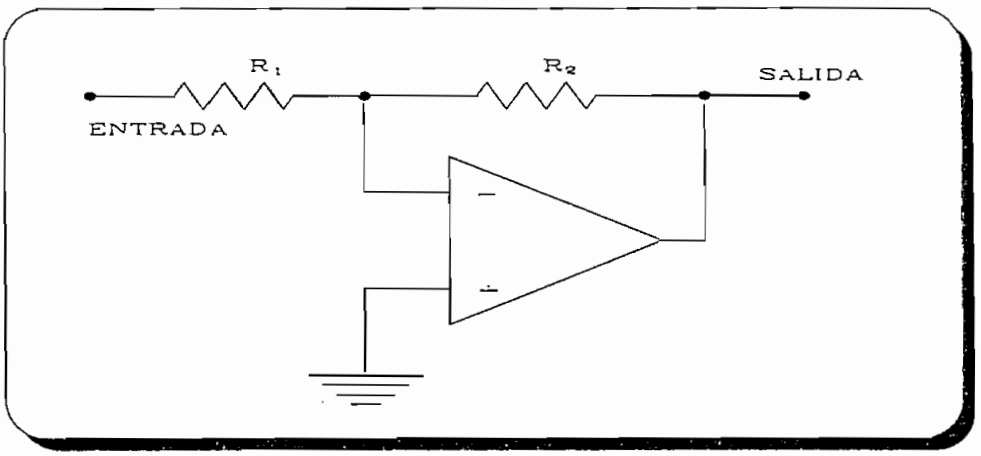


Fig. # 38 AMPLIFICADOR OPERACIONAL

La dependencia de la temperatura es una condición no deseada. Para minimizar este efecto, se podría utilizar una resistencia de emisor r_E más grande, pero sería a expensas de la ganancia. Por eso, se prefieren los circuitos que utilizan amplificadores operacionales con realimentación negativa, como el ilustrado en la fig. # 38. La ganancia del circuito es :

$$R_2 / R_1.$$

Si se utilizan resistencias de precisión, la ganancia obtenida es bastante estable a diferentes niveles de temperatura. Incluso con resistencias convencionales se lograría estabilidad en la amplificación, porque el porcentaje de variación en R2 debido al incremento de temperatura, en teoría va a ser igual al que tendrá R1,

con lo que los efectos quedan compensados. Si se quiere obtener otro tipo más sofisticado de compensación por temperatura, se podría reemplazar una de las resistencias por un termistor, con lo que la ganancia se compensaría por la razón de variación de la resistencia dada por este elemento.

En la herramienta de doble lateroperfil se tienen dos amplificadores, uno de ganancia igual a 25, y otro de ganancia igual a 40 (ganancia total 30 dB). De estos datos se tiene $R_2/R_1 = 25$ y $R_2/R_1 = 40$ respectivamente.

3.5.e Divisores por n

Un divisor por "n" es un circuito que si se le aplica a la entrada una señal con x pulsos, a su salida se obtendrán x / n pulsos. Un circuito de este tipo está formado por una serie de flip-flops (J-K o D), según se muestra en la fig. # 39.

Si los flip flops se conectan en cascada sin ningún tipo de realimentación, "n" variará de acuerdo a la siguiente relación matemática :

$$2^y = n$$

donde :

y es el número de flip flops

De esta forma, fácilmente se logran divisiones por 2, 4, 8 etc. Para hacer otro tipo de divisiones, es necesario realimentar los flipflops entre sí. En la fig. # 39 se muestra un ejemplo de una división para 5.

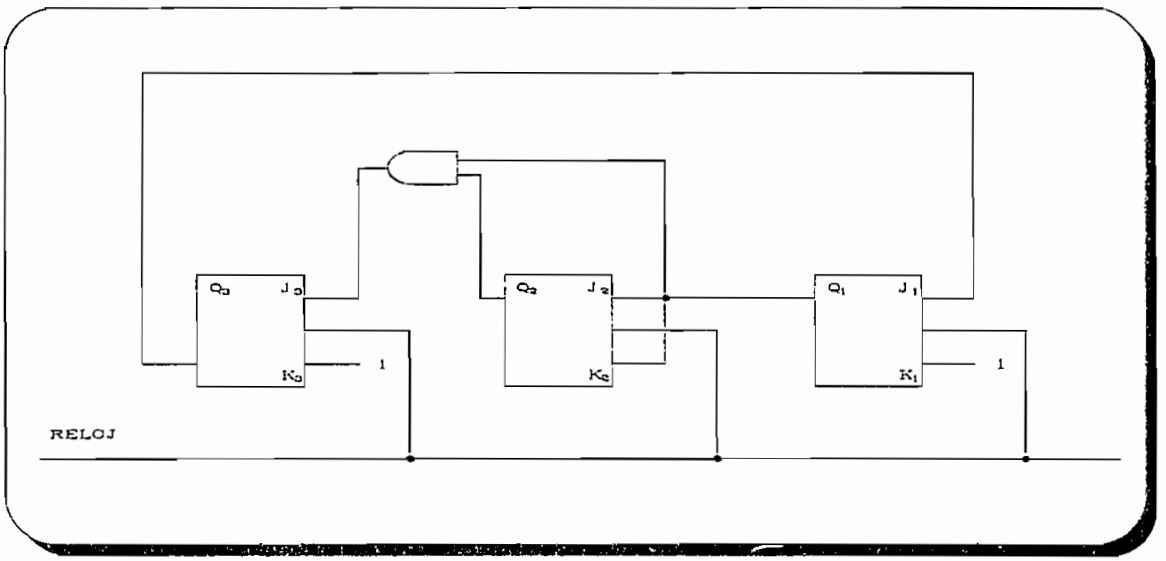


Fig. # 39 DIVISOR POR 5

El diseño del circuito de acuerdo al número que se desea dividir se logra utilizando tablas de verdad y diagramas de Karnaugh. En el equipo de sónico se utiliza un divisor por tres. A continuación se detalla el diseño de este circuito. La tabla de verdad de los flip flops es la siguiente :

Q_n	Q_{n+1}	J	K	Equivalente Decimal
0	0	0	x	0
0	1	1	x	1
1	0	x	1	2
1	1	x	0	3

Q_n representa el estado actual del flip flop, y Q_{n-1} el estado al que se quiere llegar, después de una señal del reloj. Una X significa que no importa el estado en que se encuentre, el cual puede ser 0 (voltaje bajo) o 1 (voltaje alto).

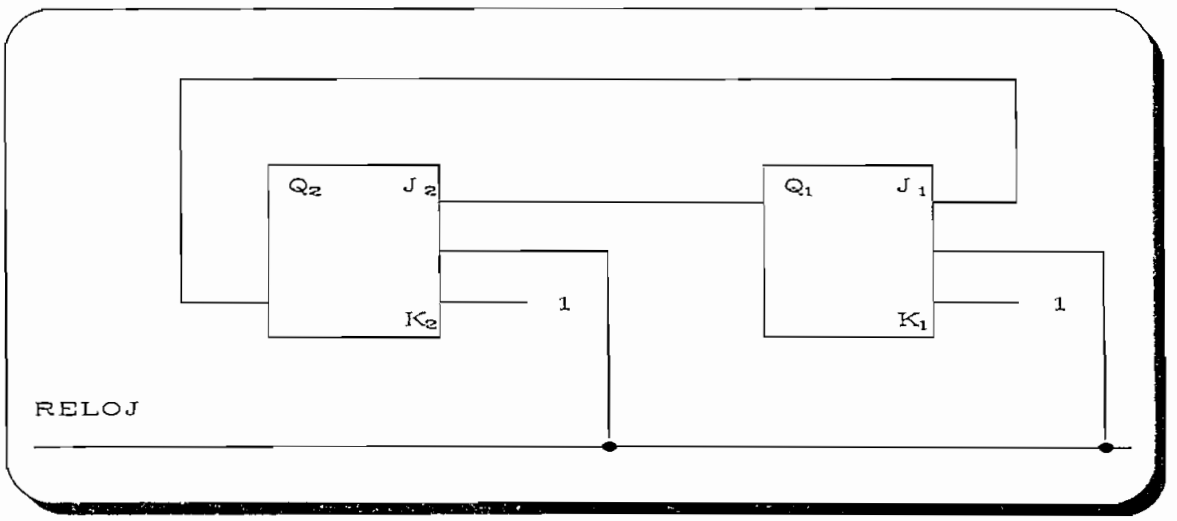


Fig. # 40 DIVISOR POR 3

Para un divisor por 3, solo se necesitan 2 flip flops. Se puede ahora generar una tabla en donde se indican los estados presentes y futuros de las salidas de los flip flops, y los valores que deben existir en la entrada para que esto ocurra, de acuerdo a la tabla de verdad del flip flop :

Estado actual			Siguiente etapa			Entradas J K			
Decimal	Q_2	Q_1	Decimal	Q_2	Q_1	J_2	K_2	J_1	K_1
0	0	0	1	0	1	0	x	1	x
1	0	1	2	1	0	1	x	x	1
2	1	0	0	0	0	x	1	0	x

$$J_2 = Q_1 \qquad K_2 = 1$$

$$J_1 = \overline{Q2} \qquad K_1 = 1$$

Por tanto, se necesitan colocar dos flip flops en cascada, con una realimentación desde la salida negativa del flip flop 2 a la entrada del flip flop, como muestra la fig. # 40.

3.5.f Contadores

Básicamente tienen la misma configuración de los divisores por n, y se rigen por el mismo tipo de expresión matemática. Si se quiere contar hasta "n", se necesitarán "y" flip flops. Se prefieren los contadores sincrónicos, en donde todos los flip flops están alimentados en paralelo por una sola señal de reloj. El control del contador se logra conectando la entrada J de los flip flop, a través de una compuerta AND con las salidas Q de los dos flip flops anteriores (fig. # 41). De esta forma, los estados de los flip flops cambian sincrónicamente con cada subida de la señal del reloj. En los equipos de densidad y neutrón, la señal de reloj de los contadores es reemplazada por la salida de los conformadores de señal que vienen de los detectores. De esta forma, se logran determinar el número total de cuentas captadas por el detector. Para el equipo neutrón, como las cuentas que se van a leer van a ser altas (alrededor de 10.000), se deben tener 14 flip flops o más. Hay que diseñar el contador con más cuentas de las que en realidad recibe, para que el circuito no se ponga por sí solo en ceros. La puesta en cero del contador del contador lo da la señal de reset del equipo.

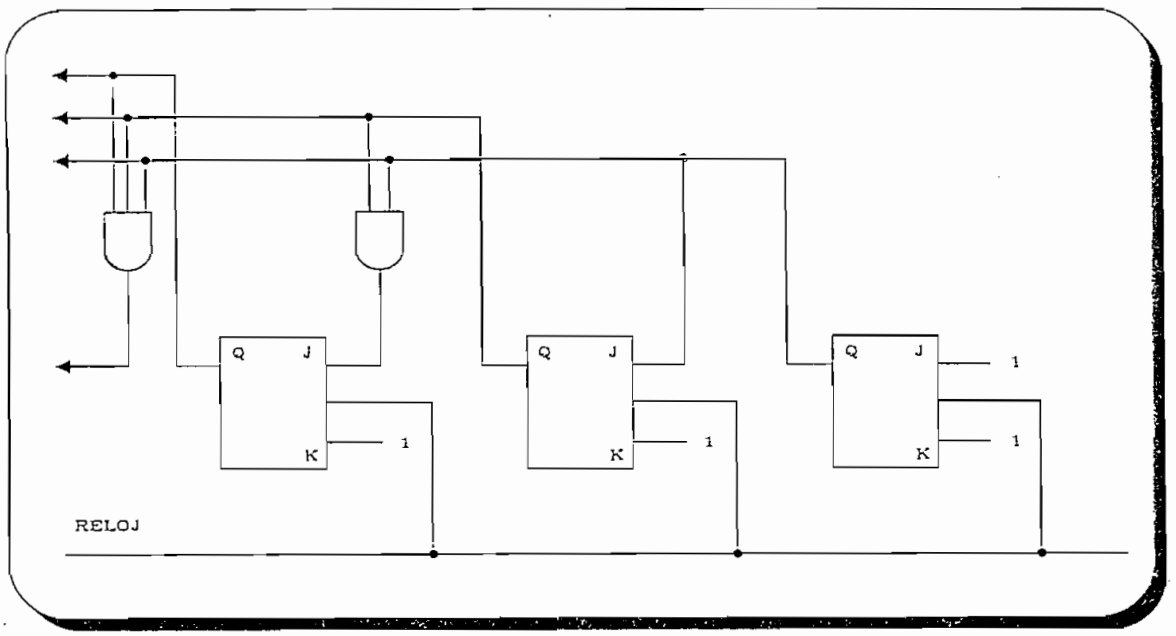


Fig. # 41 CIRCUITO CONTADOR

3.5.g Registros de desplazamiento

Estos circuitos también están constituidos por una cadena de flip flops, los cuales están conectados en tal forma que la información o estado del primero, se transmite al siguiente de acuerdo al control de una señal de reloj. Los flip flops pueden ser D o J K. En la fig. # 42 se muestra un registro de desplazamiento que tiene solo tres flip flops. Para "y" flip flops, simplemente se adicionan los flip flops necesarios, manteniendo la configuración de compuertas adicionales mostrada en la fig. # 42. El circuito de la fig. # 42 tiene la opción de controlar la dirección del desplazamiento de la información, de acuerdo a los valores de las entradas A y B. Las opciones se muestran en la siguiente tabla :

Desplazamiento	A	B
Derecha	0	1
Izquierda	1	0

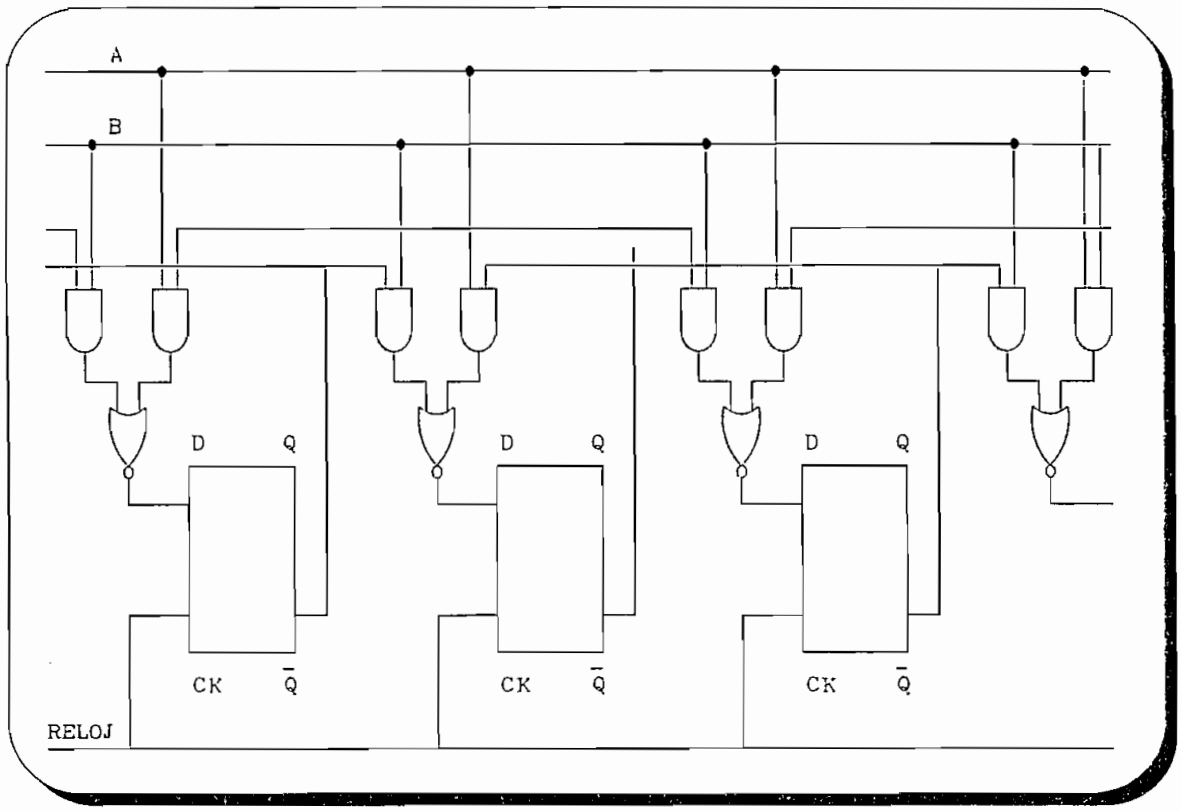


Fig. # 42 REGISTRO DE DESPLAZAMIENTO

En los equipos de densidad, sónico, etc. estos circuitos se usan a continuación de un contador. Por tanto, la información está representada por el número de cuentas. El número de flip flops que se deben usar en el registro de desplazamiento debe ser igual al número de flip flops que se usan en el contador, ya que la función del registro de desplazamiento en estos casos es

almacenar temporalmente el máximo número de cuentas alcanzadas por el contador para transmitirla a superficie, mientras el contador se pone en ceros nuevamente y empieza otra serie de cuentas.

3.5.h Oscilador de bloqueo

Son osciladores construidos con un solo elemento activo. Una de las ventajas que ofrece es que es capaz de suministrar un pulso estrecho, pero de gran potencia. Por esta razón, todavía se lo emplea en conjunto con el circuito de escalera para generar alto voltaje en los detectores y fotomultiplicador. La desventaja que tiene es que este circuito debe ser discreto por la necesidad del transformador de pulsos.

En la parte izquierda de la fig. # 43 (A) se muestra un circuito básico en su configuración de base común. A la derecha se encuentran sus circuitos equivalentes durante la etapa en que el transistor cambia de estado rápidamente y empieza a conducir. También se incluyen las formas de onda en la fig. # 44.

De la fig. # 43 se puede establecer :

$$(1/n)\, I_{c\,máx} = (V_{cc} - nV) / (n^2 h_{ib})$$

y el tiempo de subida es igual a :

$$t_s = 2.2\, L_1 / (n^2 h_{ib})$$

Esta situación podría persistir por mucho tiempo, pero como la inductancia de magnetización no es infinita, una corriente adicional de colector empieza a fluir. La corriente total en el colector es igual a:

$$Ic = \{(1/n)\ [(Vcc/n) - V)]\ (h_{ib})\} + (V_{cc}t_s)/L_m$$

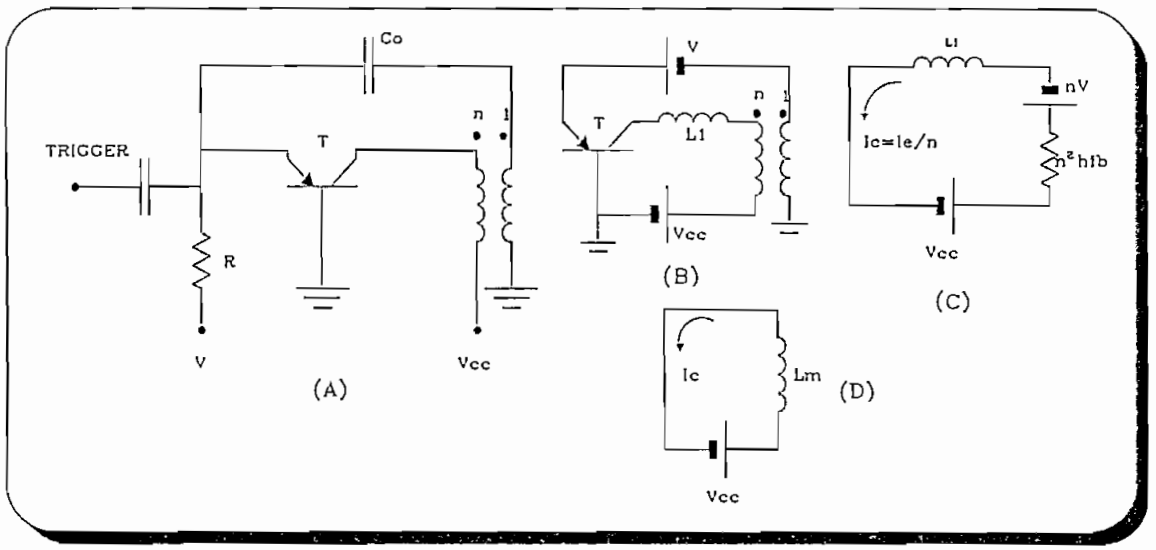


Fig. # 43 OSCILADOR DE BLOQUEO. CIRCUITOS EQUIVALENTES

Esta relación es válida mientras el transistor no se sature. La corriente del colector en algún momento se hace aproximadamente igual a la corriente de emisor, y entra a la región activa. Una nueva regeneración empieza lo que provoca que el transistor se apague rápidamente, con lo que cesa la circulación de corientes y el voltaje de colector se hace igual al de la fuente.

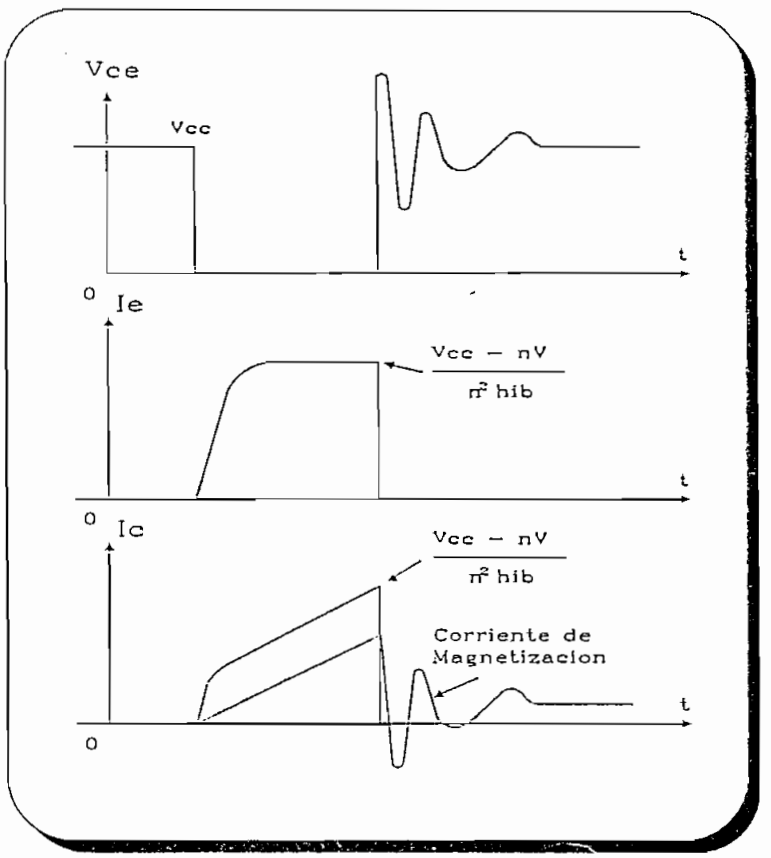


Fig. # 44 FORMAS DE ONDA

3.5.i Schmitt trigger

Este circuito puede estar formado por elementos discretos, o puede ser un circuito integrado. La fig. # 45 muestra un circuito integrado en donde se utilizan dos comparadores de voltaje, a cuya entrada está conectado un divisor de tensión formado por tres resistencias iguales. La salida de los comparadores controlan un flip flop. Cuando el voltaje de entrada es menor que $V_{cc}/3$, el flip flop se enciende. Cuando el voltaje de entrada es mayor que 2Vcc/3, el flip flop se apaga. Por lo tanto, su voltaje de histéresis es igual a $V_{cc}/3$.

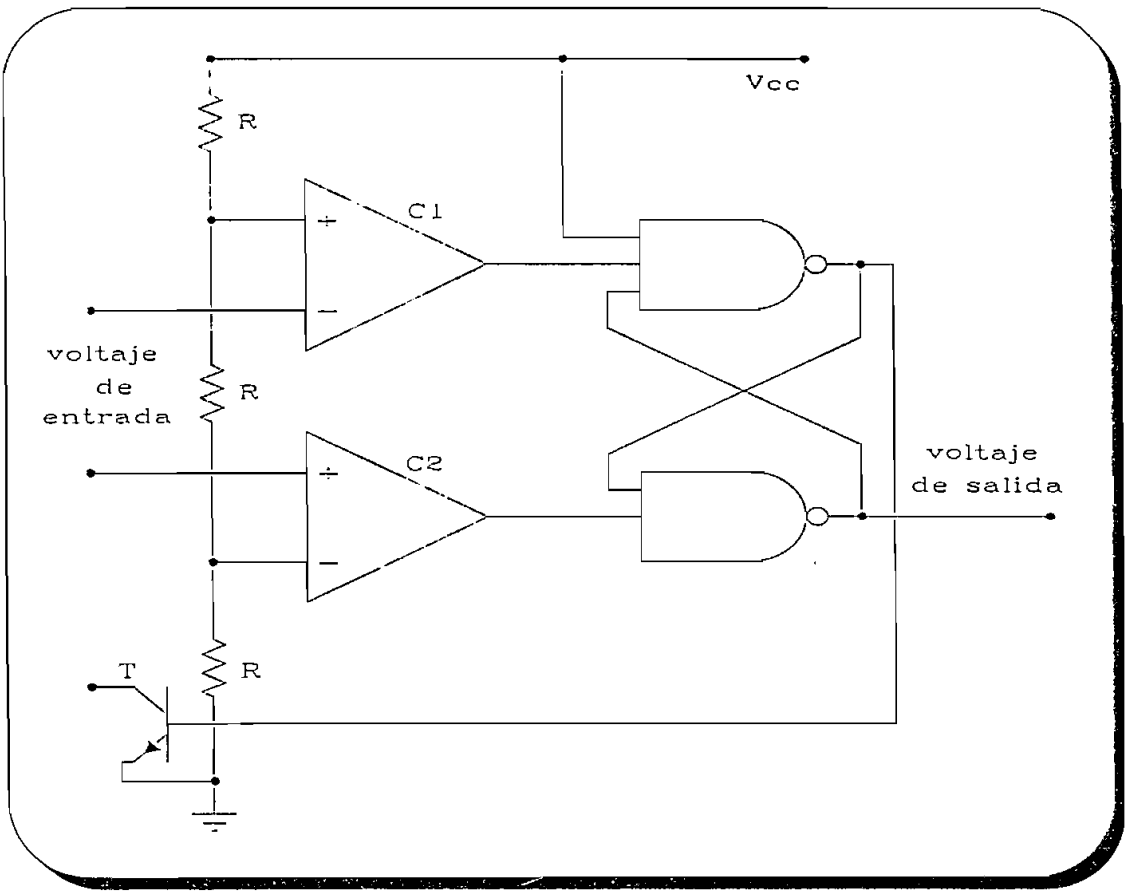


Fig. # 45 CIRCUITO SCHMITT TRIGGER

3.5.j Circuito monoestable

Un circuito monoestable se puede construir utilizando el mismo circuito del Schmitt trigger, en donde se adiciona un circuito RC a la entrada del comparador C_1, a la cual se conecta también el colector del transistor T, según se muestra en la fig. # 46. Durante la condición estable, el flip flop está encendido, y el transistor se encuentra saturado. Esta condición permanece mientras el voltaje de entrada se encuentre comprendido entre $V_{cc}/3$ y $2V_{cc}/3$. Cuendo el voltaje de entrada baja de un valor igual a $V_{cc}/3$ aunque sea por un

pequeño lapso, el flip flop se apaga y el transistor se abre. El condensador C empieza a cargarse a través de R_1, y continúa haciéndolo hasta que alcanza el voltaje $2V_{cc}/3$. En este momento, el flip flop cambia a su condición estable, y el transistor T permite la descarga del condensador C. Esta condición permanece hasta que llegue nuevamente otro pulso a la entrada del comparador C_2. El ancho de pulso de salida depende de la constante de tiempo dada por los valores de la resistencia R_1 y del condensador C.

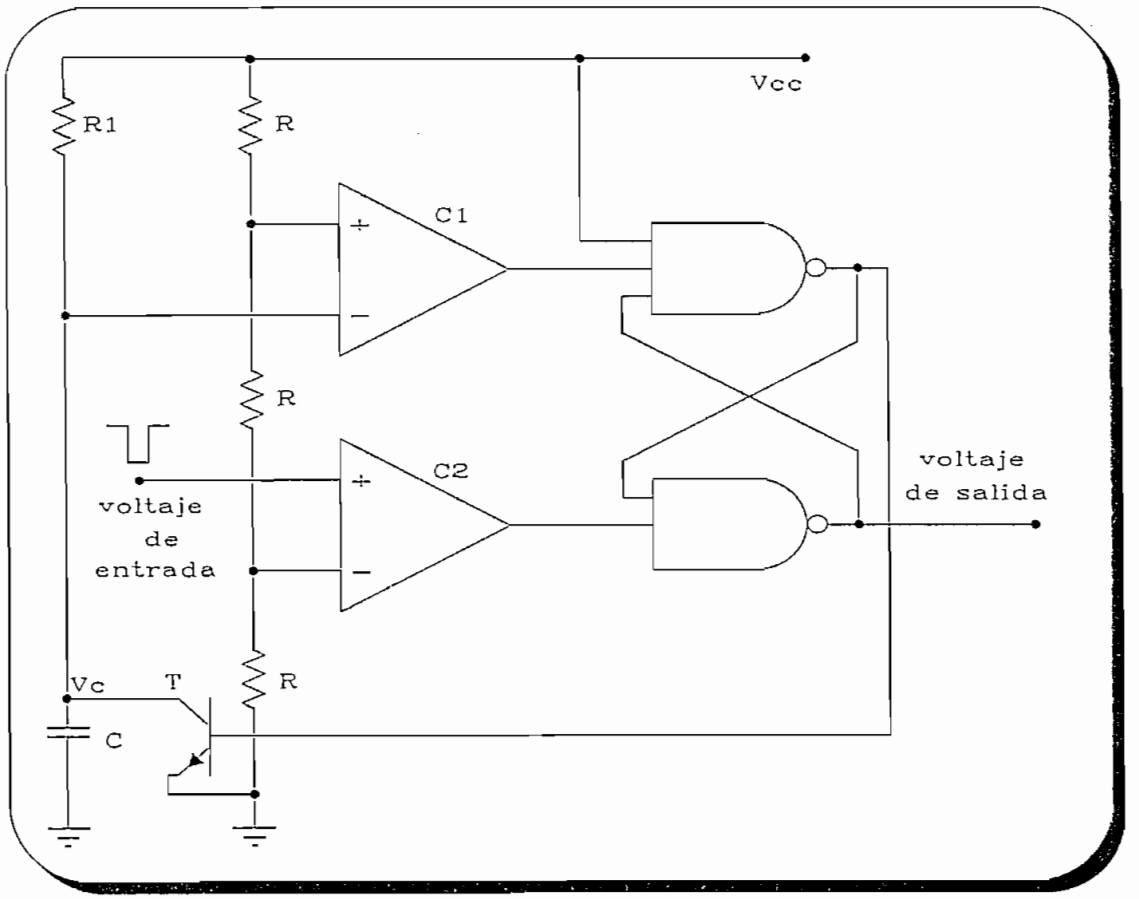


Fig. # 46 CIRCUITO MONOESTABLE

En el equipo sónico se utiliza un monoestable, con un ancho de pulso de 17 microsegundos. Por tanto, se tiene lo siguiente :

$$RC = 17 \text{ micro-seg.}$$

3.5.k Osciladores (Aestable)

El circuito aestable de la fig. # 47 está formado por la misma configuración básica del trigger Schmitt. El condensador C se descarga continuamente a través de la resistencia R_2 cuando el transistor T en serie está saturado, y se carga a través de las resistencias R_1 y R_2. El voltaje del condensador está variando automáticamente entre dos valores $V_{cc}/3$ y $2V_{cc}/3$, debido a los efectos de carga y descarga. La frecuencia de oscilación es igual a :

$$f_o = 1{,}44 / [(R_1 + 2R_2) * C]$$

En el equipo de superficie del lateroperfil se tiene un oscilador, cuya frecuencia es de 1.120 Hz. Esta frecuencia se divide para 4 para obtener la señal de referencia de 280 Hz, y para 8 para generar la señal de 35 Hz. Cuando es requerido, las ondas cuadradas se filtran para obtener las señales sinusoidales respectivas. Se prefiere en este caso esta configuración sobre un oscilador convencional, por las mejores características de estabilidad vs temperatura, por la facilidad que presenta para dividir la frecuencia original, y también por ser frecuencias bajas. Como referencia, las frecuencias disponibles de los cristales de cuarzo son desde los cientos de Hz hasta el orden de los MHz.

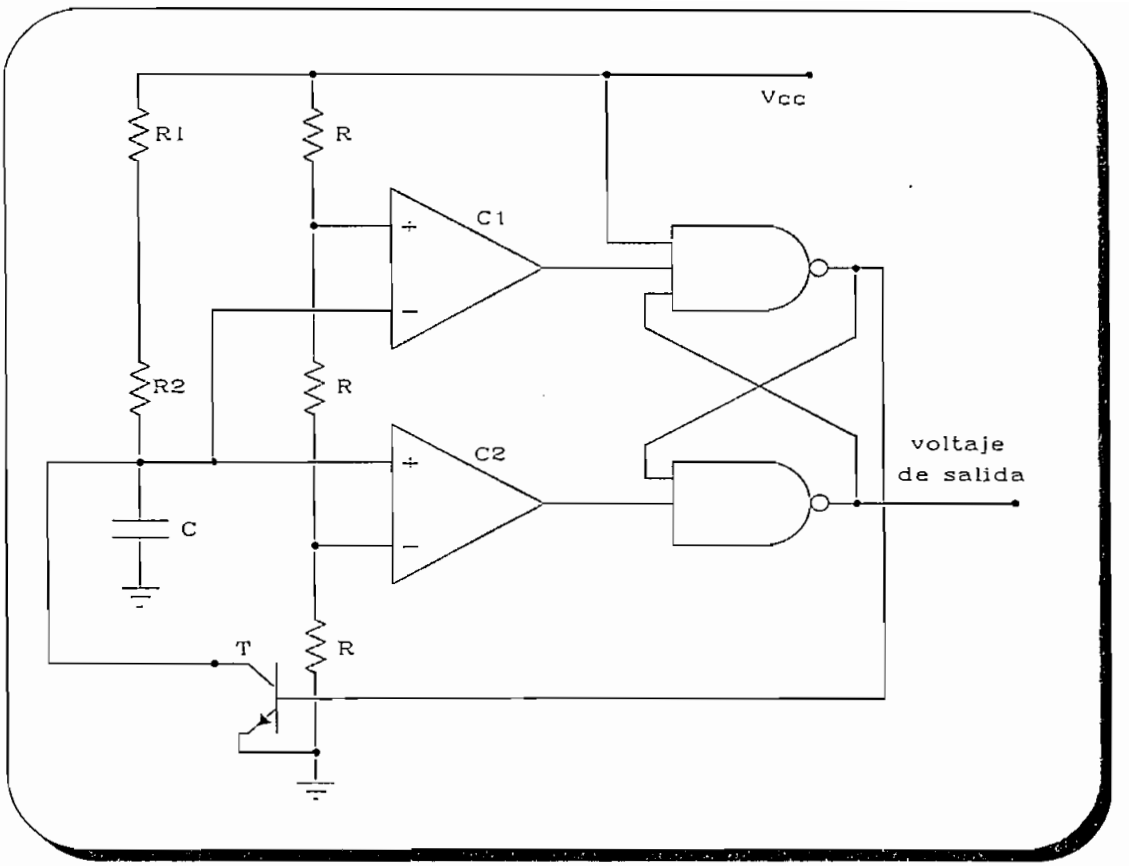


Fig. # 47 CIRCUITO AESTABLE

3.5.1 Osciladores convencionales

Las posibles configuraciones de los osciladores sinusoidales convencionales se han resumido en la fig. # 48. En todos ellos debe cumplirse que la realimentación debe ser positiva para producir oscilación. Una posibilidad para el oscilador de 20 KHz del equipo de inducción, es utilizar un oscilador de cristal de cuarzo en su configuración Colpitts, en donde se coloca el cristal en reemplazo de la bobina (modo paralelo). El sistema debe introducirse en una especie de "horno" pequeño, donde se tiene un control completo del ambiente.

Esto es necesario hacerlo para minimizar los efectos de histéresis en frecuencia, que tienen los cristales cuando cambia su temperatura.

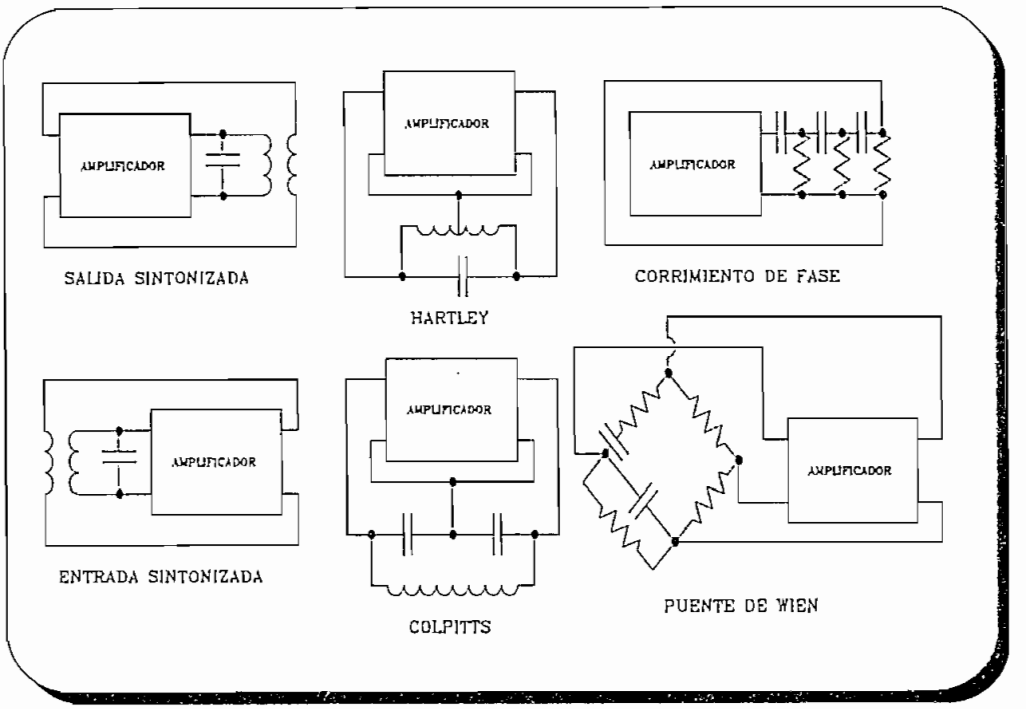


Fig. # 48 TIPOS DE OSCILADORES

Una mejor alternativa de oscilador es utilizar un cristal (fig. # 49) con un amplificador operacional. La salida de este oscilador es sinusoidal cuando se cumple :

$$\frac{V_d R_1}{R_1 + R}\left(1 + \frac{R_3}{R_2}\right) < V_{\text{lim}}$$

donde V_d es la caida límite de voltaje en el diodo, $V_{lím}$ es el nivel límite de salida del amplificador.

La condición para oscilación es la siguiente :

$$\left(\frac{R_1}{R_1+R_4+R}\right)\left(1+\frac{R_3}{R_2}\right) \geq$$

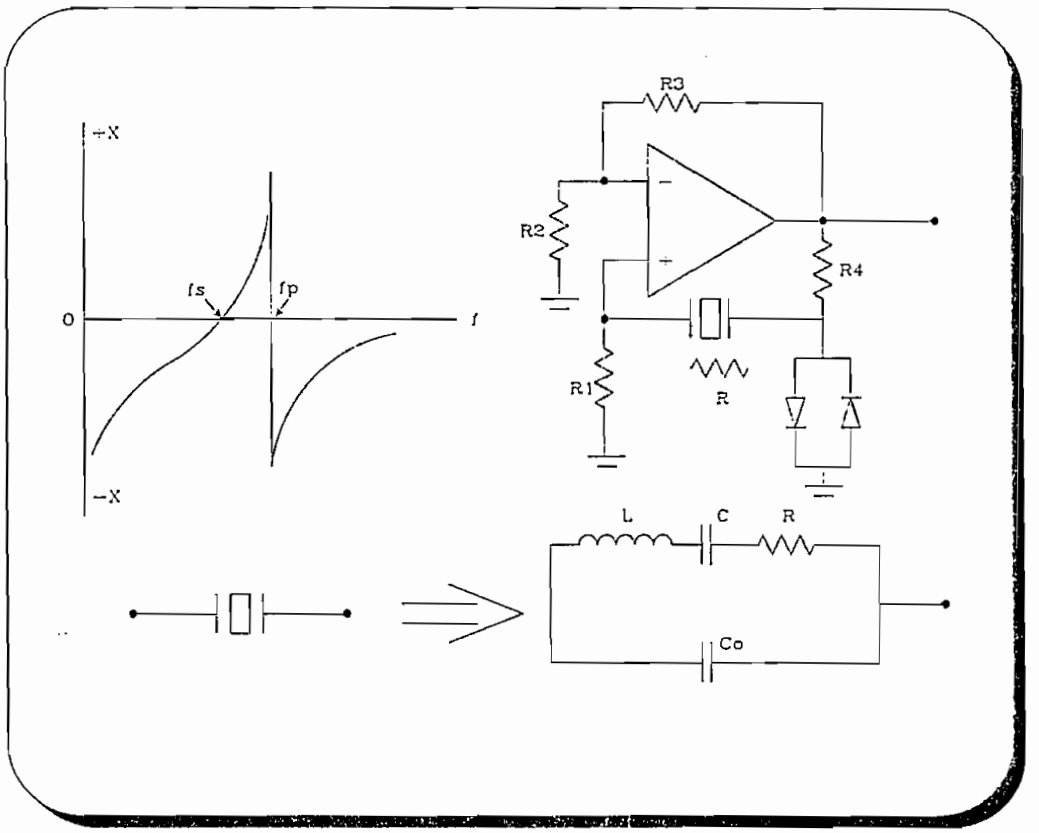


Fig. # 49 OSCILADOR / CRISTAL Y AMPLIFICADOR OPERACIONAL

Como el cristal se utiliza en su frecuencia serie, la impedancia del cristal es puramente resistiva. Si se usara en su modo paralelo, la frecuencia de operación estaría entre f_s y f_p y la impedancia sería inductiva.

Las frecuencias serie y paralelo (fig. # 49) de un cristal se calculan aproximadamente con las siguientes relaciones :

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad f_p = \frac{1}{2\pi\left(\frac{LC}{1-C/Co}\right)}$$

3.5.m Anunciadores piezo eléctricos, sonar y transmisores del sónico

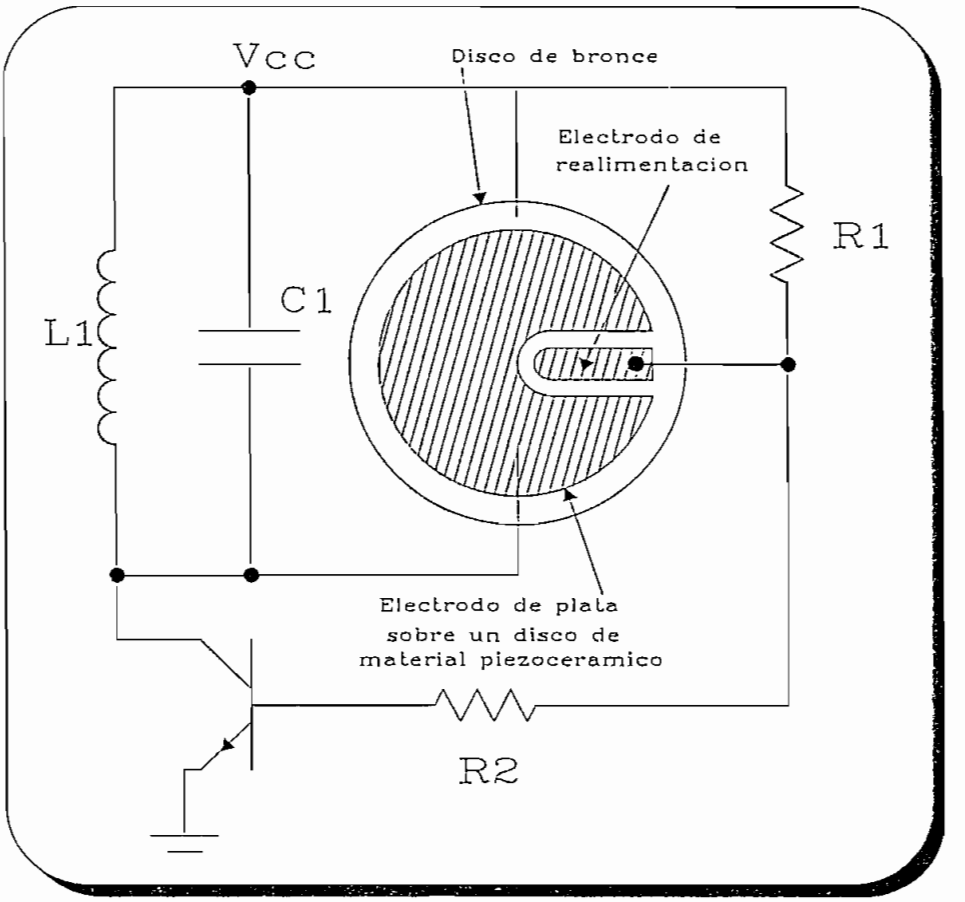


Fig. # 50 ANUNCIADOR PIEZO ELECTRICO

Una analogía con los transmisores del sónico son los llamados anunciadores piezoeléctricos (fig. # 50), que son osciladores de audio que emplean su elemento piezoeléctrico para controlar su frecuencia, y también para generar un tono audible. Este tipo de circuitos se utilizan en detectores de humo, alarmas, etc. El nivel de sonido que producen es de más de 85 dB a una distancia de 10 pies. Su circuito equivalente se muestra en la fig. # 51. Valores típicos para un elemento de este tipo es como sigue : C_o = 0,02 uF, C = 0,0015 uF, L = 2H, R =500 ohmios, Q = 75, f_s = 2,9 KHz, y f_p = 3,0 KHz. Los niveles de señal serán

más eficientes cuando son excitados cerca de su frecuencia de resonancia en serie.

Un circuito típico se muestra en la fig. # 50. El inductor L_1 ofrece un camino de dc para el transistor, y forma parte del circuito tanque de oscilación del sistema. C_1 es un condensador opcional que ayuda a optimizar el funcionamiento. R_1 sirve para polarizar el transistor, y a su vez está conectado a un tercer terminal del elemento, de donde se deriva la realimentación que mantiene las oscilaciones. A este circuito se lo compara también con un oscilador de bloqueo, en donde el transistor prende y apaga, y el voltaje de su colector puede subir más que el voltaje de la fuente, por efecto de la inductancia L_1. El circuito también puede funcionar si en vez de la inductancia y el condensador se usa una resistencia; sin embargo, en este caso la salida de audio disminuye.

El SONAR es otro equipo que tiene mucha similitud con el sistema de transmisión del equipo sónico, sobre todo porque sus transductores son del mismo tipo y funcionan rodeados de fluido (bajo el agua). El SONAR tiene aplicaciones en navegación marítima, y ha permitido que se realicen una serie de estudios en el agua del mar. En base a estos estudios, se pueden establecer las siguientes relaciones aproximadas : .

$$\alpha = \frac{0.11f^2}{1+f^2} + 0,010f^2 \qquad \text{[dB/km] para frecuencias} \leq 20 \text{ kHz}$$

$$\alpha = 50 + 0,0004f^2 \qquad \text{[dB/km] para frecuencias} \geq 200 \text{ kHz}$$

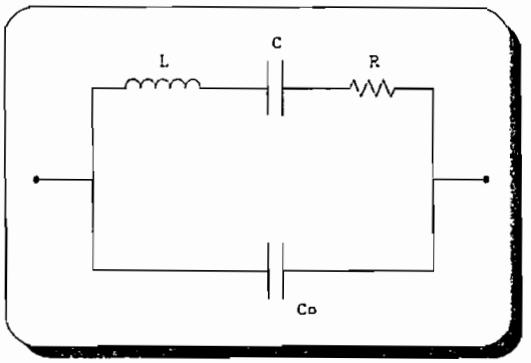


Fig. # 51 EQUIVALENTE DE UN CRISTAL PIEZO ELECTRICO

Aunque para el equipo sónico el medio donde realiza sus medidas es lodo, las relaciones anteriores nos dan la pauta de que la atenuación es menor a menores frecuencias. Por tanto, la frecuencia de 20 KHz usada en el equipo sónico es adecuada, sobre todo tomando en cuenta la frecuencia óptima de funcionamiento del transmisor (frecuencia de resonancia).

3.5.n Corrimientos de fase

En los equipos de resistividad se habla de la necesidad de utilizar corrimiento de fase. Por ejemplo, los detectores de fase del equipo de superficie del lateroperfil necesitan dos señales de referencia, una de las cuales debe tener 90° de defasamiento con respecto a la otra. En el equipo de inducción, para minimizar la señal X, se necesitan dos señales defasadas entre sí 180°. Estos defasamientos se logran con circuitos LC como los mostrados en la fig. # 52, en donde además se consigue acoplamiento de impedancias. Las relaciones matemáticas para el diseño del circuito (A), se incluyen a continuación :

$L_1 = \frac{aR}{2\pi}$ $C_1 = \frac{b}{2\pi aR}$ $L_2 = R^2 C_1$ $C_2 = L_1/R$ $\tan \frac{\beta}{2} = \frac{af}{1 - bf^2}$

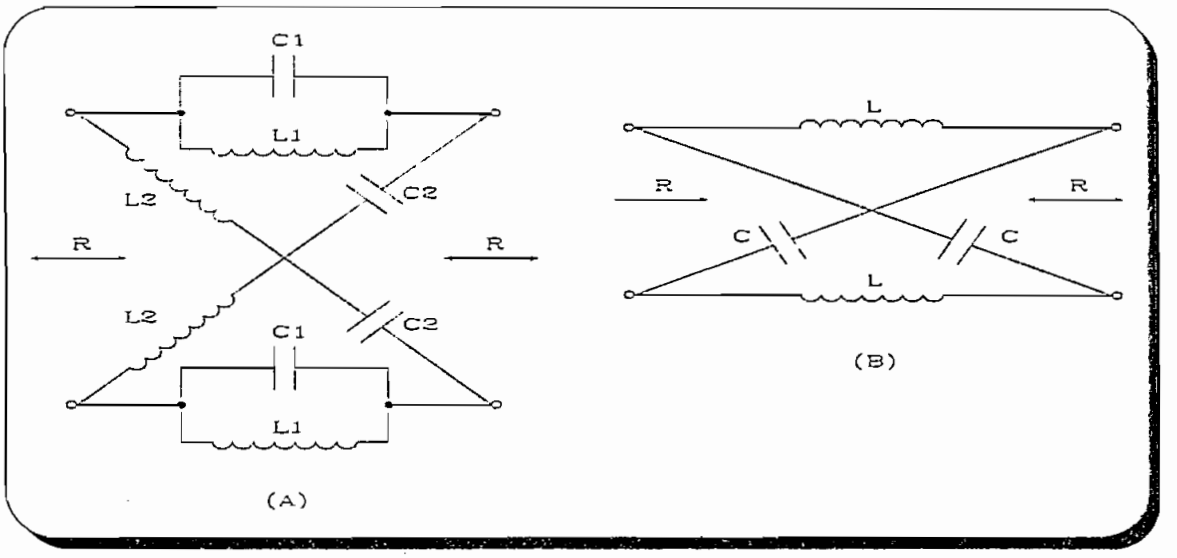


Fig. # 52 CIRCUITOS PARA CORRIMIENTO DE FASE

Para un defasamiento de 180°, se debe cumplir que b = $1/f_o^2$, f = f_o y $af_o = 6$, donde f_o es la frecuencia a la cual se obtiene los 180° deseados. Para el circuito del variómetro, la frecuencia son 20 KHz. Asumiendo un valor de R = 1.000 ohmios, se tiene :

$L_1 = \frac{6 \times (1.000)}{2\pi \times (20.000)} = 48 \text{mH}$ $C_1 = \frac{20000}{2\pi \times (20.000)^2 \times 1000} = 800 \text{pF}$

$L_2 = (1000)^2 \times (800 \times 10^{-12}) = 0,8 mH$ $C_2 = (48 \times 10^{-3})/(1.000)^2 = 48 \text{ nF}$

Para 90°, se puede utilizar el circuito (B), en donde f_o es la frecuencia a la cual se logran los 90° de defasamiento. Para este circuito, las fórmulas matemáticas de diseño son las siguientes :

$L = \frac{aR}{2\pi}$ $C = \frac{1}{R}$ $\tan \frac{\beta}{2} = af$ $a = 1/f_o$ $f = f_o$

La frecuencia de uno de los circuitos de referencia de los detectores de fase del lateroperfil es de 280 Hz. Para esta frecuencia, se calculan los siguientes valores :

$$L = \frac{1000}{2\pi \times (280)} = 0,57H \qquad C = \frac{0,57}{(1.000)^2} = 0,57\mu F$$

3.5.o Detectores de frecuencia modulada

Los detectores clásicos de FM son los de Foster-Seeley y el de relación. La fig. # 53 muestra el primero, con su diagrama de fasores.

El **detector de Foster Seeley** es un detector balanceado precedido por un limitador, formado por un transformador cuyo primario y secundario están sintonizados a la misma frecuencia. El voltaje en el primario y el voltaje inducido en el secundario están en fase, y durante la resonancia el voltaje en C_2 está retrasado en 90° con respecto al voltaje en el secundario L_2. Por tanto, el voltaje V_2 está retrasado en 90°, y el voltaje V_2' está adelantado a V_1 en 90°.

La relación general de voltajes primario y secundario están mostrados en la fig. # 53. Los condensadores sirven de camino a tierra a la frecuencia de la señal, y por ello el voltaje aplicado al diodo D_1 es V_a, y al diodo D_2 es V_b. La corriente rectificada de D_1 fluye a través de R_2 y del choque, el cual sirve como camino de retorno para la corriente. En igual forma, la corriente de D_2 va por R_3 y el choque. Debido a que las corrientes fluyen en direcciones opuestas, el voltaje

neto a través de R_2 y R_3 es cero cuando V_a y V_b son iguales, asumiendo que R_2 y R_3 son iguales. Cuando el voltaje V_a es mayor que V_b, el voltaje de salida es positivo. De este comportamiento, se logra el resultado mostrado en la curva de V_o de la fig. # 53. Un buen compromiso de diseño entre sensitividad y baja distorsión se obtiene cuando :

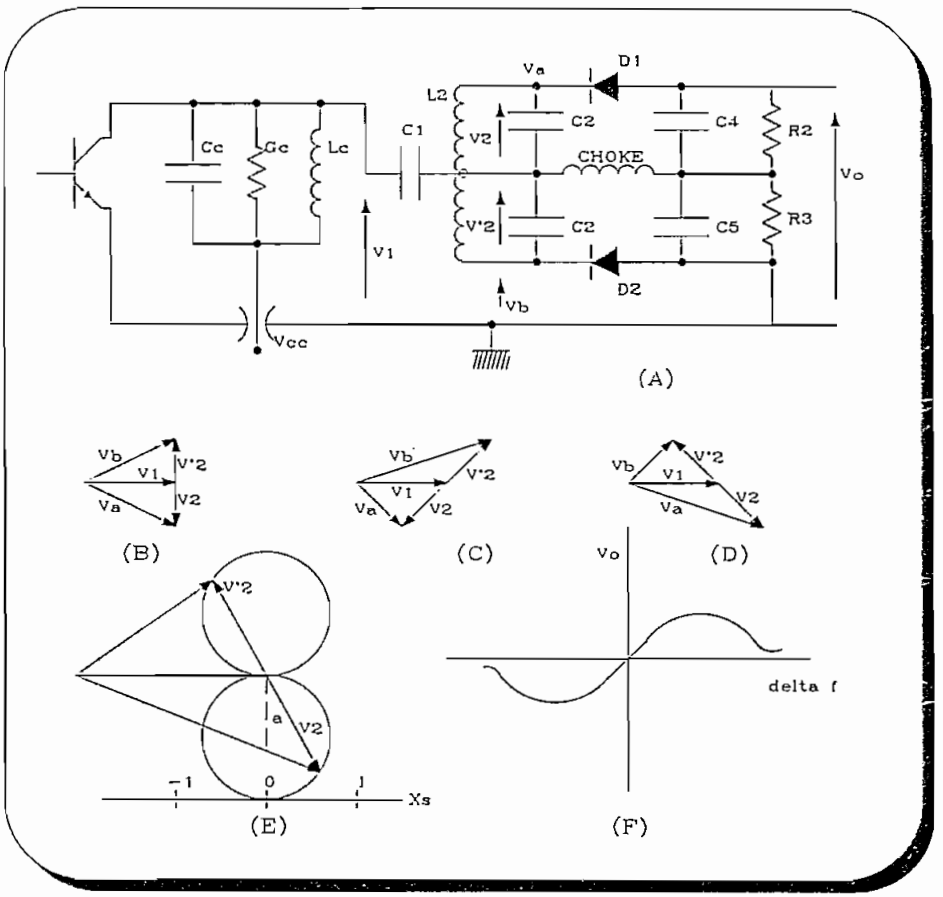


Fig. # 53 DETECTOR DE FM (FOSTER-SEELEY)

$$\left(\frac{V_2}{V_1}\right)_0 = \left(\frac{V'_2}{V_1}\right)_0 = 1 \qquad kQ_s = 1,5 \qquad \frac{L_2}{L_c} = 1,77$$

donde :

Q_s = valor de Q cargado del circuito secundario (incluidos diodos).

k = factor de acoplamiento.

La relación V_2/V_1 depende de la desintonía relativa X_s del circuito secundario a la frecuencia instantánea de la señal :

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{n_s}{1+jX_s}$$

El voltaje instantáneo de salida con respecto al voltaje de entrada es :

$$\frac{v_o}{I_i Z_i(0)} = \frac{[2(X_s)_{ins}]n_d n_s}{\left(1+n_s^2\right)^{1/2}}$$

donde :

n_s = relación V_1/V_2 a resonancia

n_d = eficiencia del detector

I_i = valor rms de la corriente de entrada

$Z_i(0)$ = $Z_p/(1+k^2 Q^2)$

$(X_s)_{ins}$ = valor instantáneo de 2 delta f/fbs

f_{bs} = f_o/Q_s = ancho de banda de -3 dB del circuito secundario

3.5.p Detector de fase y lazo de amarre de fase

Cuando se mezclan dos señales senoidales con amplitud suficiente para producir amplificación no lineal, a la salida del mezclador se obtiene lo siguiente :

$$v_{sal} = A_1 v_x + B v^2_x + A_1 v_y + B v^2_y + 2B v_x v_y$$

donde :

v_x = primera señal senoidal de entrada

v_y = segunda señal senoidal de entrada

A_1 = amplificación en el mezclador

B = término de proporcionalidad para segunda armónica

Al mezclador podemos alimentarlo con las siguientes señales :

$$v_x = V_x \text{ sen } (\omega t) \qquad v_y = V_y \text{ sen } (\omega t + \phi)$$

donde v_x es generada por un oscilador local de referencia, y v_y es la señal que llega. En este caso, reemplazando :

$$2Bv_xv_y = BV_xV_y \cos \phi - BV_xV_y \cos (2\omega t + \phi)$$

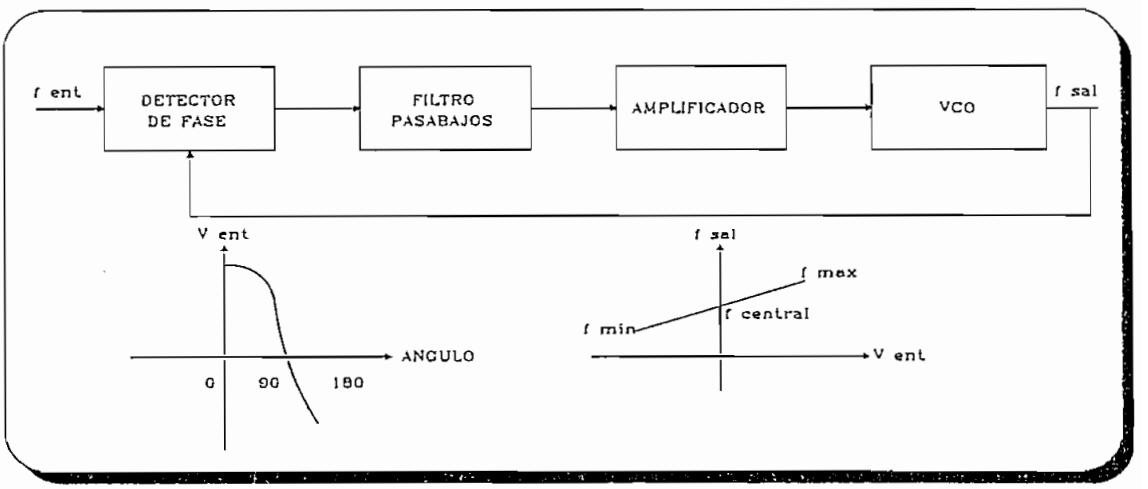


Fig. # 54 LAZO DE AMARRE DE FASE (PLL)

Con un filtro pasabajos después del mezclador, se bloquea el segundo término que corresponde a la segunda armónica, y solo se deja pasar el primer miembro de la relación. Por tanto, a la salida del filtro se tiene :

$$v_{\text{sal filtro}} = BV_xV_y \cos \phi$$

De esta forma se logra que la salida del circuito dependa de la diferencia de fase entre la entrada y un oscilador local.

El lazo de amarre de fase (fig. # 54) consta de un detector de fase (mezclador), un filtro pasabajos, un amplificador, y un oscilador controlado por voltaje (VCO). La salida del VCO es realimentada al detector de fase. La frecuencia de la señal realimentada se compara con la frecuencia de entrada, y le permite al VCO sincronizarse con la frecuencia de entrada.

A la salida del amplificador (voltaje de entrada al VCO) tenemos una señal como :

$$V_{\text{ent VCO}} = [ABV_xV_y] \cos(\phi) = \text{constante} \cos(\phi)$$

Cuando ϕ es igual a cero, el voltaje es un valor máximo positivo, y es máximo negativo cuando ϕ es igual a 180°. El voltaje es cero cuando ϕ es igual a 90°. Por tanto, la salida del VCO puede variar por arriba y por debajo de su frecuencia central, como se muestra en la fig. # 54. Lo interesante del circuito es que el sincronismo con la señal de entrada se logra aún si la señal de entrada es débil, obteniéndose a la salida una señal fuerte y de la misma frecuencia. Por tanto, la relación de señal a ruido se mejora notablemente. Este circuito puede reemplazar un detector de FM, si la salida del circuito se toma del amplificador.

3.5.q Convertidor de digital a análogo

Un convertidor de "n" bits da como resultado una señal análoga, equivalente a una señal digital de entrada que varía entre 0 y 2^{n-1}. Un convertidos de este tipo (fig. # 55) utiliza "n" fuentes de corriente, que son seleccionadas por "n" circuitos de interrupción. La corriente de salida es convertida a voltaje generalmente a través de un amplificador operacional, configurado para que tenga ganancia 1.

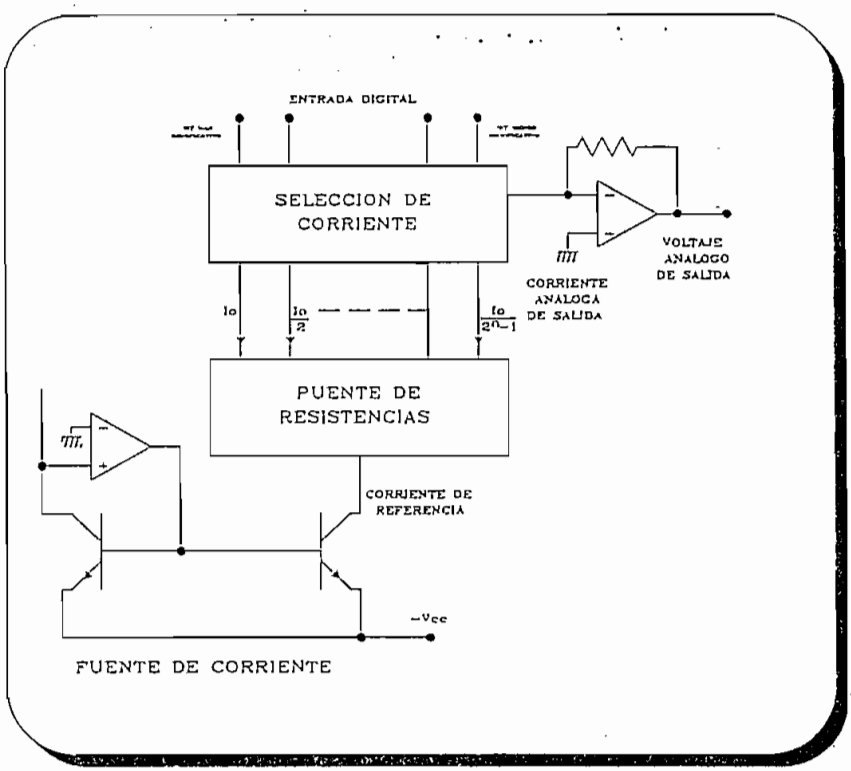


Fig. # 55 CONVERTIDOR DIGITAL ANALOGO

Las "n" fuentes de corriente son obtenidas con una sola fuente de corriente de referencia, y un sistema de resistencias como el mostrado en la fig. # 56 parte

superior. Se necesitan 5 + 3(n - 2) resistencias. El sistema de selección de las fuentes (o resistencias en este caso) puede lograrse utilizando una serie de comparadores diferenciales como el mostrado en la fig. # 56 parte inferior. La información digital alimenta una de las entradas cada uno de los comparadores.

Este tipo de circuitos son utilizados en los circuitos de superficie de equipos como el sónico, densidad y neutrón.

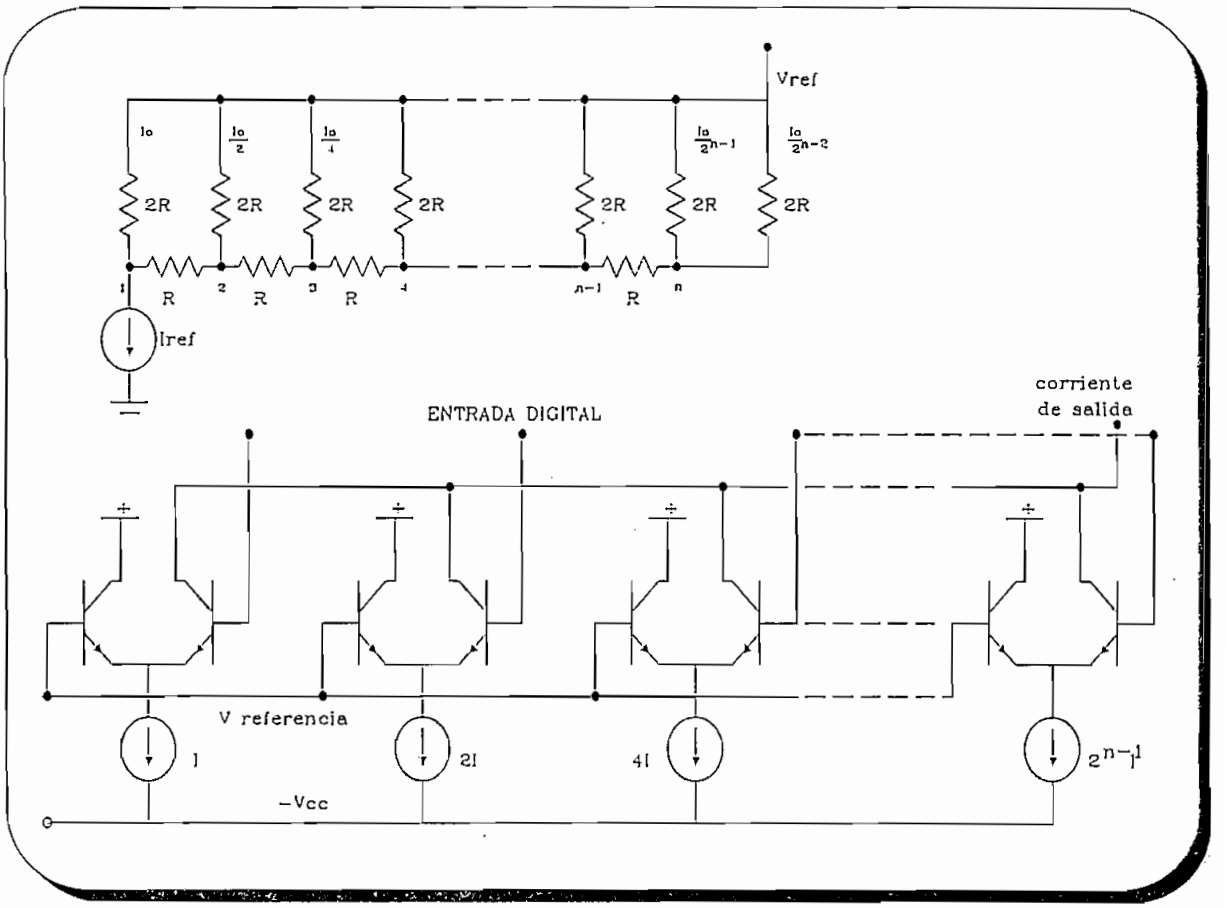


Fig. # 56 PUENTE DE RESISTENCIAS, SELECCION DE FUENTES

3.5.r Convertidor de análogo a digital

Un circuito de este tipo utiliza una fuente de voltaje, que se divide en varias referencias al pasar a través de un arreglo de varias resistencias. Estos voltajes sirven como valores de referencia para un juego de comparadores que se organizan a continuación. Para un convertidos de "n" bits, se necesitan 2^n-1 resistencias y comparadores. La velocidad de conversión de este tipo de circuito es rápida.

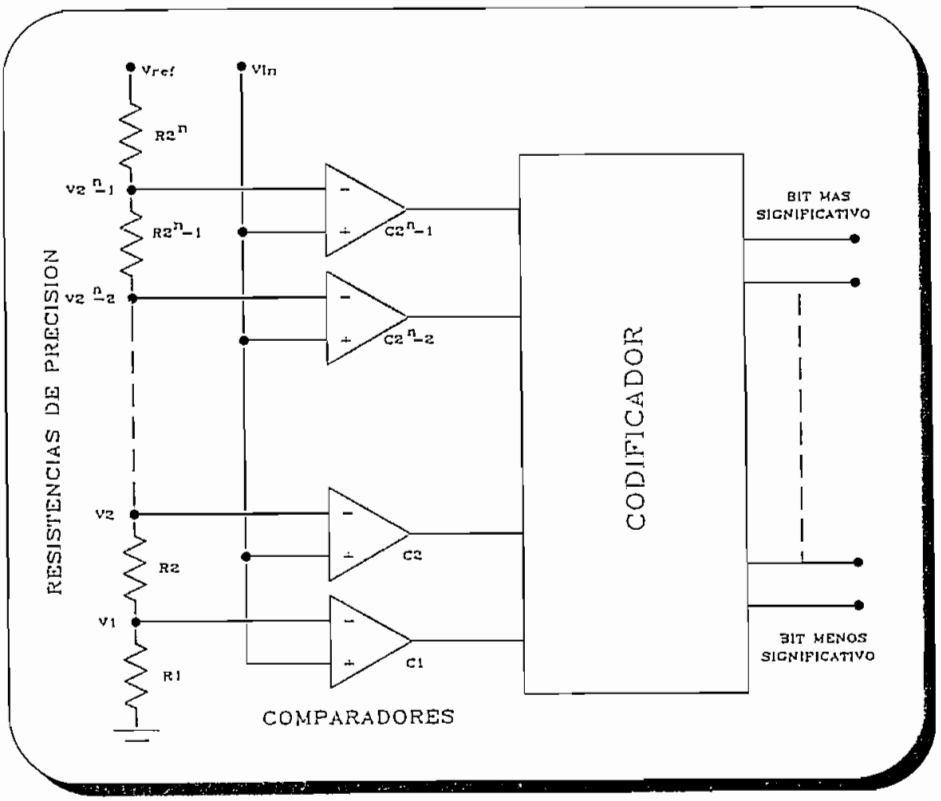


Fig. # 57 CONVERTIDOR DE ANALOGO A DIGITAL

Un convertidor de "n" bits significa que se tendrá una resolución de 2^n niveles posibles de salida. Por tanto, el número de niveles que se usen a la salida dependerá primordialmente del grado de precisión con que se quiera hacer la conversión.

El proceso de conversión se encuentra esquematizado en la fig. # 57. Este tipo de circuito es muy utilizado en los circuitos de cartucho de los equipos densidad, neutrón y sónico.

3.5.s Control automático de ganancia (variómetro)

Un circuito de este tipo controla la ganancia de un amplificador, variando el valor de r'_e. De las relaciones matemáticas especificadas en la sección 3.5.d, se puede ver que r'_e aumenta cuando la corriente de emisor disminuye, lo que causa a su vez una disminución de la amplificación.

Una de las maneras de lograr este efecto es utilizando un circuito seguidor de emisor, con un voltaje de cc alimentando su base (fig. # 58). Cuanto mayor sea el voltaje de cc, menor será la ganancia del amplificador.

Un circuito similar al de control automático de ganancia (usado comúnmente en todos los receptores) se utiliza en el variómetro del equipo de inducción.

El voltaje de DC lo suministra la salida del puente X (detector de fase). El voltaje AC viene del oscilador. El filtro de AGC que se muestra en la fig. # , corresponde al filtro pasabajos del puente X. El factor de variación "m" de la amplificación de Q1 está relacionado al factor de variación "n" de la corriente de emisor de acuerdo a la siguiente relación (sin considerar efectos de temperatura) :

$$m = n\,(25 + R_E I_e) / (25 + n\,R_E I_e)$$

Para un mayor efecto de n sobre m, $R_E I_e < 1$ (I_e en mili amperios).

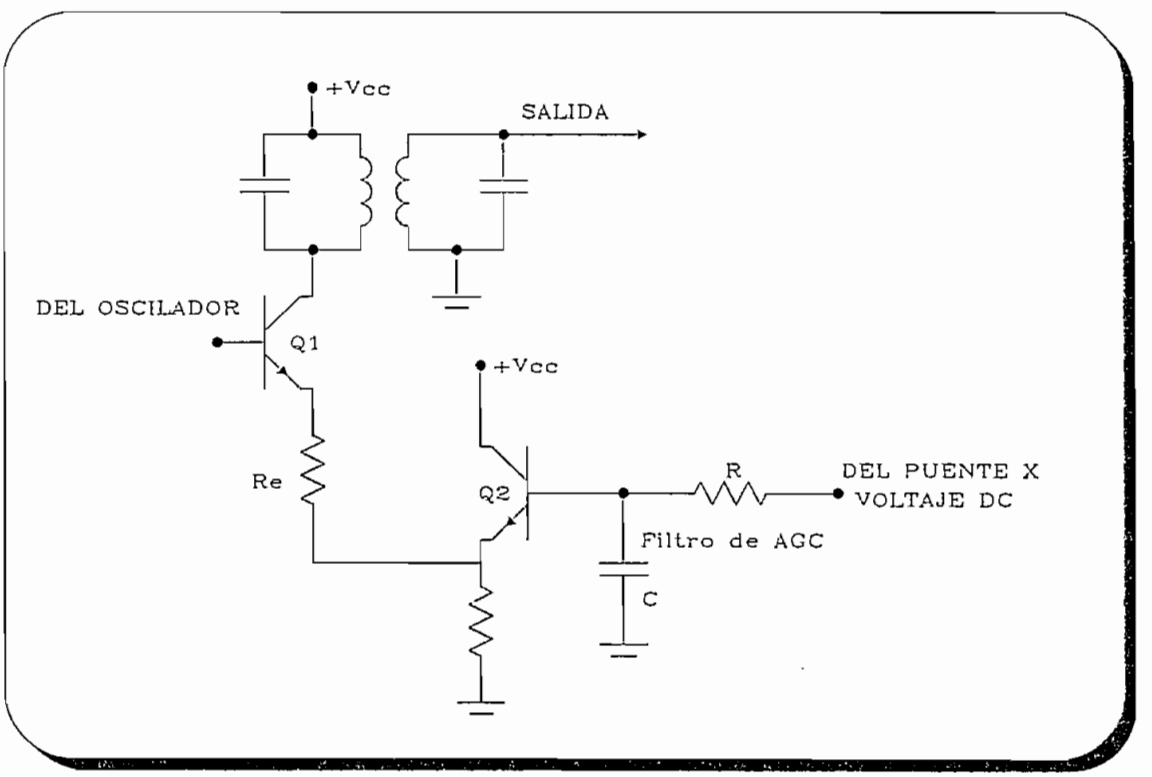


Fig. # 58 VARIOMETRO (CONTROL AUTOMATICO DE GANANCIA)

3.6 LIMITACIONES DE LOS ELEMENTOS ELECTRONICOS

Al comienzo de este capítulo se mencionaron algunos criterios de diseño, indispensables para el buen funcionamiento de los equipos empleados en la industria petrolera. En esta sección, se han compilado algunos datos necesarios (los que están disponibles en la literatura), criterios y conceptos para poder evaluar cuantitativamente estos efectos. Con esta información se espera tener elementos de juicio suficientes que permitan elegir los elementos más adecuados para cada equipo, o sino que permitan hacer las modificaciones respectivas en los circuitos convencionales.

3.6.1 Infuencia de la temperatura

Uno de los factores que hace especiales a los equipos de registros eléctricos es la alta temperatura a la que deben funcionar. Aunque los tubos o carcazas donde están confinados les ofrecen mucha protección, los circuitos siempre sufren los efectos de la temperatura. Por esto, es indispensable revisar la influencia de estos cambios, al menos sobre algunos de los elementos más comunes cuyos datos se tienen disponibles.

3.6.1.a Resistencias fijas

Las resistencias, de acuerdo a su uso, se pueden clasificar en cuatro tipos principales :

- *De precisión.*

- *Semiprecisión*

- *Propósito general*

- *De potencia*

La tabla adjunta muestra algunos datos (organizados de acuerdo a la clasificación especificada más arriba), referentes a la variación del valor nominal de la resistencia por efectos del incremento en temperatura. Se anota que los valores especificados no tienen una variación necesariamente lineal, y la incertidumbre puede incrementarse con el aumento de temperatura. Por el otro lado, la disipación de potencia de la tabla es la que corresponde al valor de T, incluido también en la tabla.

Tipo	Construcción	Disipación	Temperatura T	Operación desde -55 °C a	Cambio
		[watt]	[°C]	[°C]	ppm/°C
Precisión	alambre	1/8-3/4	125	145	+/- 10
	película	1/20-1/2	125	125	+/- 25
Semi	óxido metal	1/4-2	70	150	+/- 200
	carbón	1/8-1	70	165	+200,-500
General		1/8-2	70	130	+/- 1500
Potencia	alambre	1-210	25	275	+/- 260
	película	7-1000	25	225	+/- 500

La tabla significa por ejemplo que, si usamos una resistencia de tipo general y le sometemos a un cambio de temperatura de 50°C, el cambio en el valor nominal de la resistencia será de : (1500 * 50) / 1'000.000 = +/- 7,5 %. En una resistencia de precisión el cambio sería de +/- 0,05 %. En una resistencia de 1.000 ohms, el cambio sería de +/- 75 ohmios y +/- 0,5 ohmios respectivamente.

3.6.1.b Semiconductores

Anteriormente ya se mencionó el efecto nocivo sobre la amplificación que puede ejercer la temperatura (sección 3.5.d). La consideración importante ahora es la máxima temperatura de juntura que un semiconductor puede soportar durante su operación. Para todos los transistores y diodos de silicio se puede hablar de un valor de 110°C y 140°C, respectivamente.

La temperatura de la juntura no es lo mismo que la temperatura ambiente. Para calcular la temperatura de la juntura se tiene :

$$T_j = T_a + \theta_{j\text{-}a} P_d$$

donde:

T_j = Temperatura de la juntura

T_a = Temperatura ambiente

$\theta_{j\text{-}a}$ = Resistencia térmica de la juntura al aire

P_d = Disipación de potencia

En la tabla, se incluyen algunos valores típicos de la resistencia térmica de acuerdo al tipo de empaque de los transistores :

Empaque	$\theta j - a$
	[°C/watt]
TO-3	30-50
TO-5	100-300
TO-18	400-500
TO-66	30-50
TO-99,TO-100	197
plano	187
plástico	150
cerámico	115

3.6.1.c Ruido térmico en las resistencias

Los circuitos de los equipos están formados por muchos elementos como resistencias, condensadores, ec. Las resistencias producen **ruido térmico** cuando son sometidas a altas temperaturas. La magnitud de ese ruido viene dada por la siguiente expresión matemática :

$$v_r = \sqrt{4kTBR}$$

donde :

vr = voltaje rms de ruido

k = constante de Blotzmann ($1.37 * 10^{-23}$)

T = temperatura absoluta, 273° + la temperatura Celcius

B = ancho de banda de ruido, Hz

R = resistencia, Ω.

El ancho de banda de ruido es aproximadamente igual a la ganancia de 3 dB del amplificador, mezclador o cualquier circuito del que formen parte. De la relación matemática, en teoría se establece que el incremento de ruido en una resistencia en un mismo circuito es de aproximadamente 11%, cuando su temperatura cambia de 25° C a 100° C.

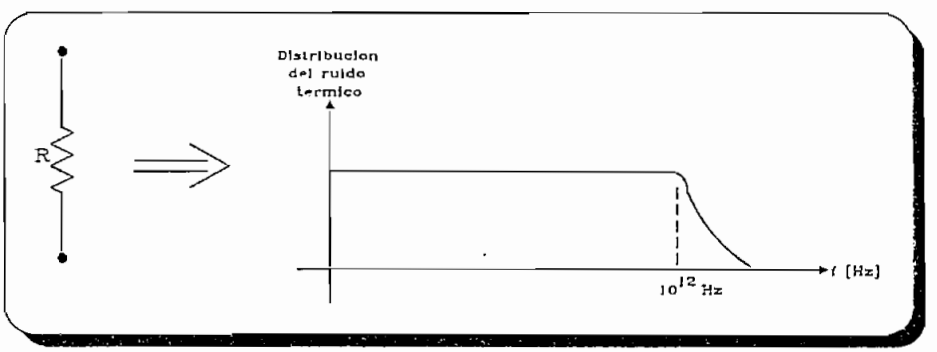


Fig. # 59 DISTRIBUCION DEL RUIDO TERMICO

El ruido térmico tiene componentes de muchísimas frecuencias. El ruido se distribuye uniformemente en todo el rango de frecuencias. Se puede hablar de una frecuencia de ruptura de aproximadamente 10^{12} Hz, según se muestra en la fig. # 59.

3.6.1.d Sueldas

Las sueldas son materiales que tienen una temperatura baja de liquefacción (o fusión), que sirven para unir dos conductores al mojar sus superficies, para luego solidificarse y convertirse en un material mecánicamente fuerte. Las sueldas deben ser resistentes a la corrosión y buenos conductores de la electricidad. La tabla muestra la composición química y los puntos de licuefacción de algunos tipos de suelda :

Composición de la suelda	Temperatura de licuefacción
Elementos químicos	[°C]
58 Bi - 42 Sn	138
62 Sn - 36 Pb - 2 Ag	179
10 Sn - 90 Pb	179
60 Sn - 40 Pb	188
50 In - 50 Pb	216
80 Pb - 20 In	275
80 Au - 20 Sn	280
10 Sn - 90 Pb	300
88 Au - 12 Ge	356
72 Ag - 28 Cu	780

De acuerdo a su uso, las sueldas de plomo son las más usadas en electrónica a temperaturas normales. Pequeñas adiciones de antimonio mejoran la solidez de las sueldas de plomo. Las de antimonio son sueldas para el rango medio de temperaturas, pero que no sirven para ser usadas con bronce. Las sueldas de

plomo-plata son para alta temperatura, pero su resistencia a la corrosión es pobre. Una combinación de plomo y 5 % de Indio tiene buenos efectos a alta temperatura. Por supuesto, la idea es usar una suelda con una temperatura de licuefacción más alto que la temperatura máxima a la que van a ser sometidas las partes electrónicas de los equipos.

3.6.1.e Condensadores

Las variaciones de temperatura influyen negativamente en los condensadores en dos aspectos importantes : 1) El valor de la capacitancia. 2) La vida del condensador.

Los **cambios de capacitancia** están íntimamente relacionados con el cambio de constante dieléctrica de los materiales, de acuerdo a los cambios de temperatura. La fig. # 60 muestra la influencia de la temperatura sobre los valores de capacitancia, de acuerdo al tipo de material. No todos los materiales están incluidos. Los condensadores electrostáticos más comunes son de mica, vidrio, papel, cerámicos, película plástica, aire y vacío. Los electrolíticos incluyen los de aluminio y tantalio. Los condensadores de poliestireno son los que presentan menos variación. Para una variación de unos 100°C, el porcentaje de cambio es de 1%.

La **vida de un capacitor** disminuye mucho con las subidas de temperatura. Una regla práctica es que su vida disminuye por un factor de 2, por cada 10°C de incremento en la temperatura.

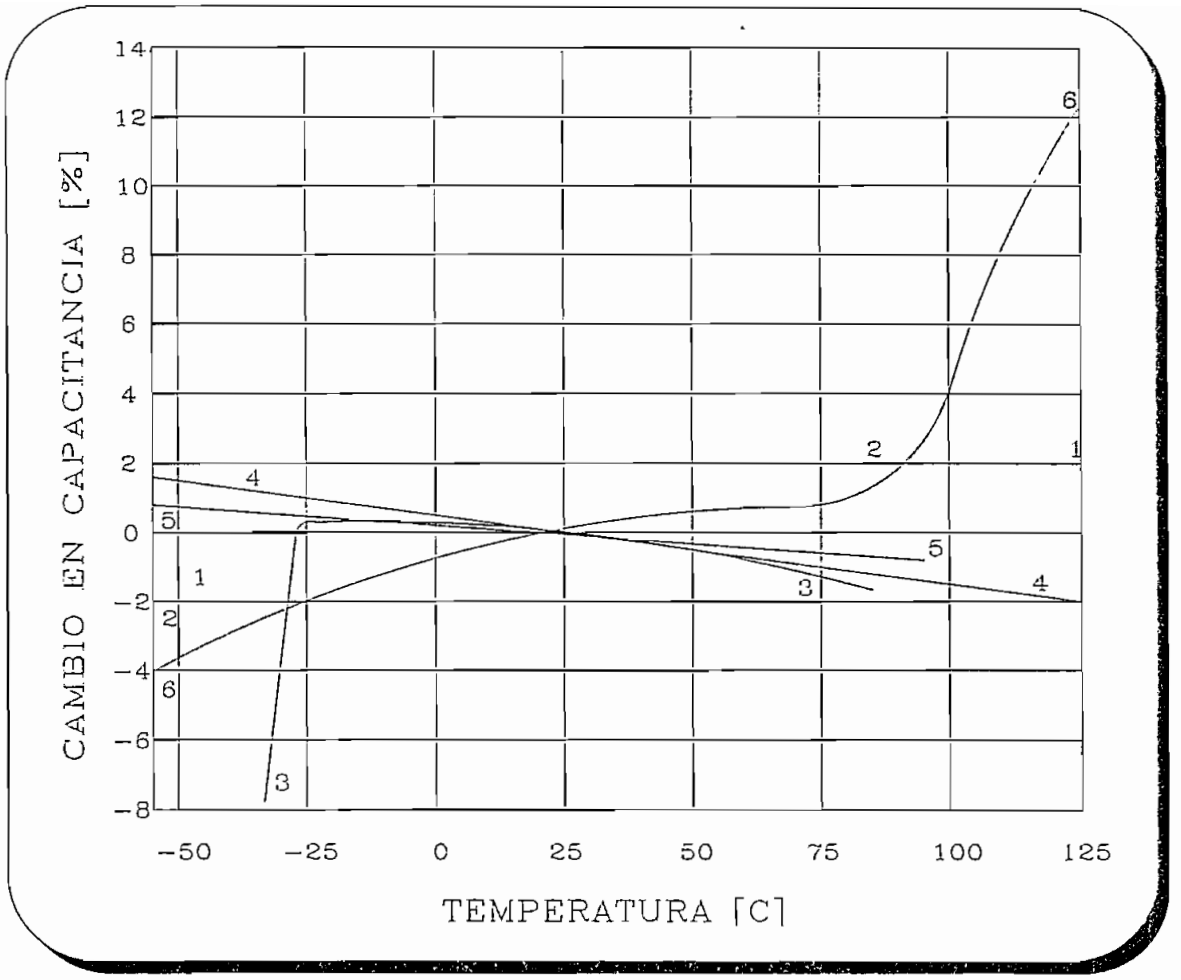


Fig. # 60 CAMBIO DE LA CAPACITANCIA CON LA TEMPERATURA

1. Papel y polisobutileno
2. Papel y aceite mineral
3. Papel y difenil
4. Teflón
5. Poliestireno
6. Mylar

3.6.1.f Cristales de cuarzo

La temperatura causa pequeñas variaciones en las dimensiones de los cristales de cuarzo, en su elasticidad, en su densidad, lo cual redunda en pequeñas variaciones de la frecuencia de resonancia. El coeficiente de temperatura de un cristal se define como la variación en frecuencia que sufre por los cambios de temperatura dividida para la frecuencia central. La respuesta de los cristales a la temperatura depende del corte del cristal, según se ilustra en la fig. # 61.

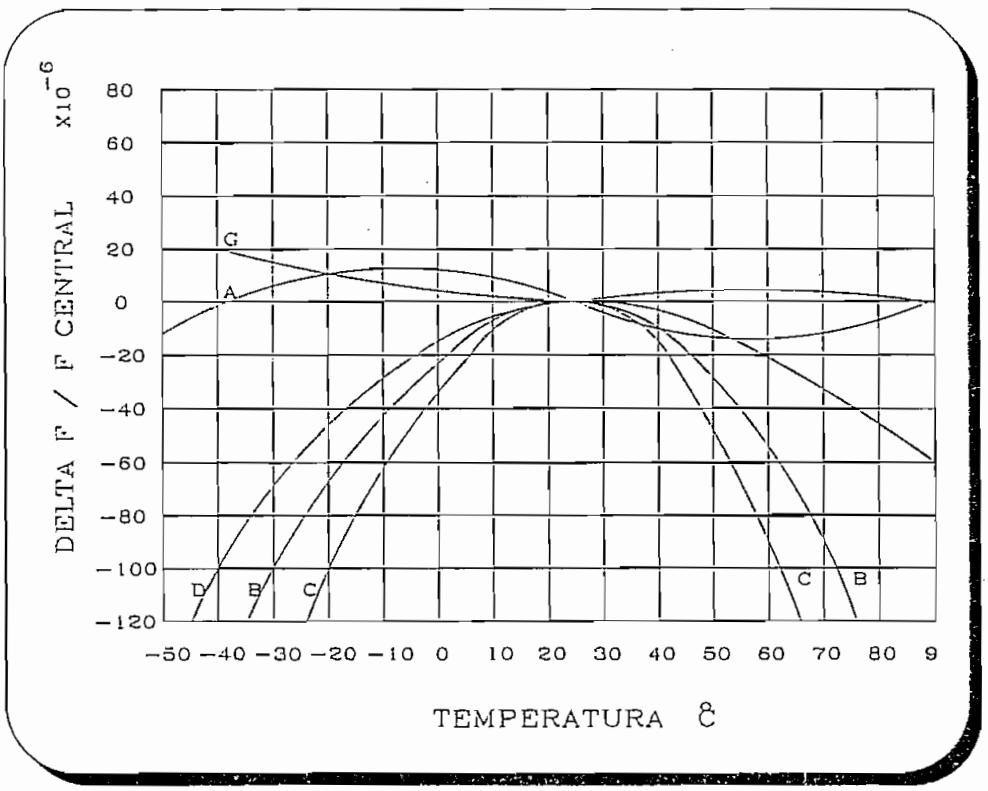


Fig. # 61 CAMBIO DE LA FRECUENCIA EN UN CRISTAL

Según los tipos de corte, se favorecen diferentes modos de movimiento mecánico como los mostrados en la fig. # 62. En la tabla se sumariza la relación entre cortes, modos de excitación, nombre y frecuencia de resonancia.

Tipo de corte	Modo	Nombre	Frecuencia [MHz]
AT	grosor-transversal	elemento A	1,66 (1/g)
BT	grosor-transversal	elemento B	2,56 (1/g)
CT	cara-transversal	elemento C	3,07 (1/l) (l=a)
DT	cara-transversal	elemento D	2,07 (1/l) (l=a)
+5°X	extensional	elemento E	2,70 (1/l) para a/l=0,5
-18°X	extensional	elemento F	2,54 (1/l) 0,3 < a/l < 0,7
GT	extensional	elemento G	3,37 ((1/l) para a/l=0,86
+5°X	flexión	elemento H	4,8 (a/l x 1/l) para a/l=0,19
Duplex	flexión	elemento J	5,4 (g/l x 1/l) para g/l=0,04
MT	extensional	elemento M	no disponible
NT	flexión	elemento N	5,3 (a/l x 1/l) para a/l=0,19

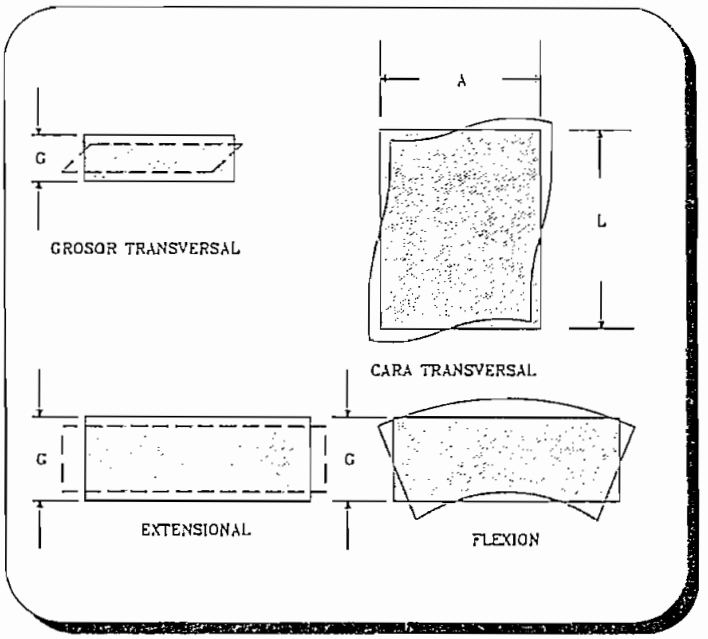


Fig. # 62 MODOS DE MOVIMIENTO EN LOS CRISTALES

En la tabla, el largo (l), ancho (à) y grosor (g) se encuentran expresados en milímetros. Esta nomenclatura es también aplicable a la fig. # 62.

Los efectos por temperatura se pueden minimizar utilizando control termostático, utilizando compensación por temperatura, o escogiendo cuidadosamente el tipo de cristal.

Para control termostático, se utilizan hornos provistos de control proporcional, que garantizan una variación de +/- 0,001°C cuando la temperatura ambiente cambia de 0° a 70°. Los hornos dobles (un horno dentro de ótro), son capaces de mantener una variación de +/- 0,0001°C para la misma variación de temperatura ambiente. Para compensación por temperatura, se debe cumplir que los coeficientes de temperatura sean iguales para el cristal y para la reactancia de compensación que se coloca en serie con el cristal, de tal forma que se cancelen sus efectos. Por último, la fig. # 61 y las tablas adjuntas ayudan a escoger el cristal que muestre menos variación por temperatura a la frecuencia deseada.

3.6.2 Atenuación en el cable

El cable constituye un problema para la transmisión. Su longitud normalmente es de unos 20.000 pies o más. Tiene internamente 7 conductores, y por ésto se puede hacer una analogía con los cables telefónicos de varios pares.

Hay dos efectos que dominan eléctricamente el comportamiento del cable, como son la **atenuación** y la **interferencia entre señales** que se transmiten a través de él. Mientras en los cables telefónicos existen bobinas de compensación instaladas cada 6.000 pies típicamente -que reducen las pérdidas y mejoran la respuesta de frecuencia- en los cables para registros eléctricos no existe ninguna compensación de este tipo. Por esto, los parámetros distribuidos del cable atenúan y deforman notablemente la señal, como se muestra en la fig. # 63. Para minimizar el efecto adverso, lo que se hace es amplificar adecuadamente las señales antes de ser transmitidas desde el equipo de fondo, se convierten las señales análogas a digitales, y se utiliza por lo general modulación en frecuencia

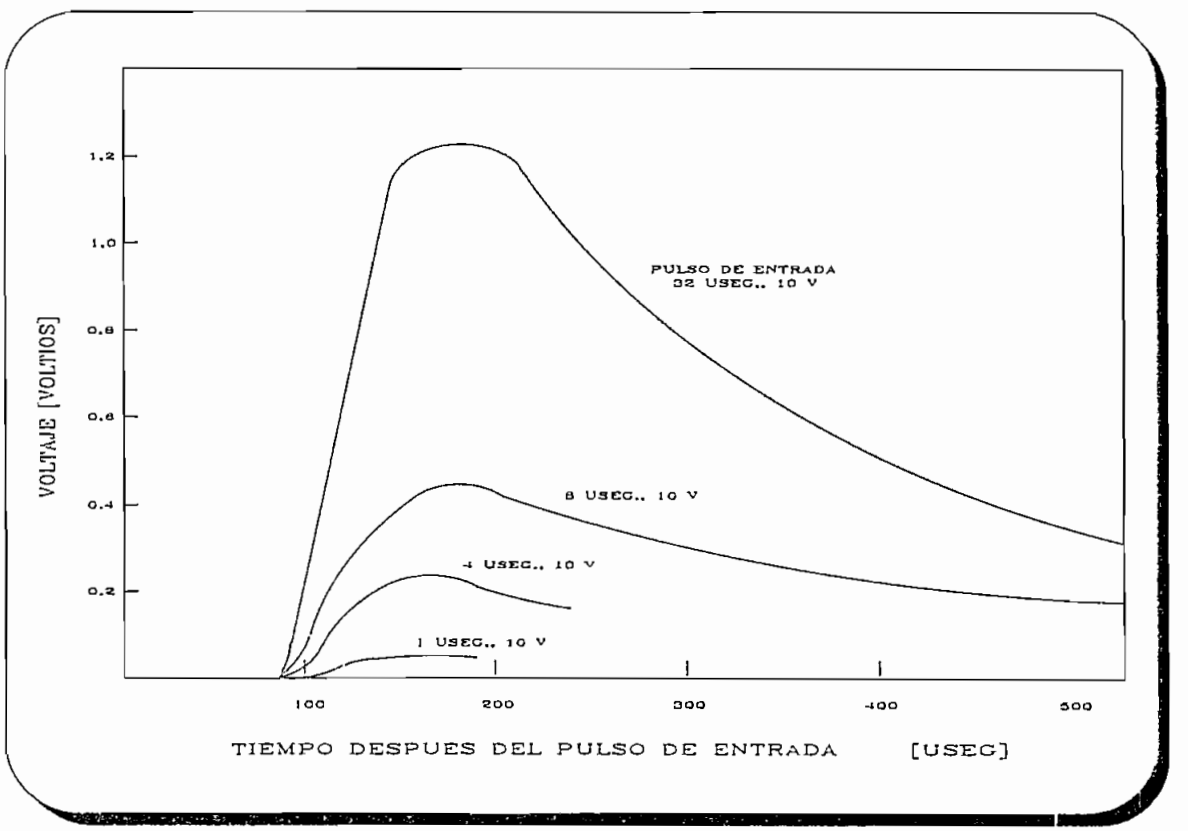


Fig. # 63 TRANSMISION DE UN PULSO A TRAVES DEL CABLE

Para minimizar el efecto de intreferencia entre señales, se crean pulsos de inhibición, que impiden que ciertas señales fuertes sean transmitidas al mismo tiempo que otras débiles, y las señales se combinan en un multiplexor. Tanto los efectos de atenuación como de interferencia se acentúan con el aumento de frecuencia de las señales.

Como referencia, la máxima potencia que se puede transmitir por el cable es alrededor de 1 kilowatt. Esta potencia debe ser compartida por todos los transductores, sensores, circuitos de control, motores, etc. que tienen las herramientas.

3.6.3 Ruidos en los equipos

En la sección 3.6.1 se discutió sobre el ruido térmico en las resistencias. Sin embargo, existen otros tipos de ruido, que potencialmente podrían afectar el buen funcionamiento de los equipos. Aquí se mencionan posiblemente los más importantes.

El **microfonismo** podría llegar a ser importante en los equipos petroleros, ya que estos están expuestos a muchas fuentes de vibración. Cuando se registran las señales en los pozos, las herramientas están en movimiento en un hueco que no es uniforme, y si las herramientas no están rígidamente construidas pueden moverse las placas de los capacitores, los alambrados de los inductores, etc., lo cual produce el ruido conocido como microfonismo. Una de las medidas que

deben tomarse es la construcción robusta de los equipos, cuidando de que no existan partes móviles o flojas.

Los equipos están expuesto a una serie de ruidos producidos por motores eléctricos, alto voltaje, etc. que crean campos eléctricos y magnéticos. La interferencia entre varias señales de un mismo equipo y el rizado de las fuentes de poder se constituyen en una fuentes de señales no deseadas o ruido. Como las herramientas efectúan sus medidas mientras se están moviendo en los pozos, existe la posibilidad de que se genere el llamado ruido de camino. Para minimizar estos efectos, se blindan muchos circuitos así como también sus cables de conección. Los circuitos a su vez, deben tener buen desacoplamiento de las fuentes de poder, y un buen sistema de tierra común.

CAPITULO CUARTO

AVANCES TECNOLOGICOS

Para poder tratar específicamente sobre los nuevos avances tecnológicos, es indispensable primeramente mirar cuál es la tendencia en el diseño de las nuevas herramientas.

Tendencia en el diseño de las nuevas herramientas

- *El tiempo total para correr los registros eléctricos (adquisición de datos del pozo) está siendo minimizado. Esto es debido a que el alquiler de los equipos de perforación es muy costoso. Lastimosamente, estos equipos deben permanecer en el pozo durante todo el proceso de adquisición de datos a través de los registros.*

- *Una tendencia importante es la adquisición de muchos datos con un cubrimiento de hasta 360° y con un muestreo cada vez mayor, que permitan generar imágenes sintéticas de las paredes de los pozos. Estas imágenes pueden ser comparadas con pedazos de roca (llamados núcleos), que han sido recuperados de las formaciones de interés del pozo. Debido a esta creciente tendencia, la cantidad de datos transmitidos a superficie tiende a incrementar notablemente, según se muestra en la tabla a continuación :*

Herramienta	Muestreo	velocidad de transmisión
	[pulgadas]	[kbits/seg.]
Inducción	6	0.05
Densidad	6	0.48
Buzamiento	0.2	1.2
Imágenes	0.1	62

- *Relacionado con una mayor cantidad de datos, se puede mencionar el constante interés de efectuar medidas con diferentes profundidades de investigación, para poder hacer análisis más concienzudos de la invasión del lodo en la formación. Esto nos permitiría dejar de hacer suposiciones en ocasiones poco reales, y empezar a realizar correcciones más apropiadas a todas las lecturas, con la ganancia en la exactitud de las medidas. Incluso, ahora es posible crear gráficas sintéticas que nos permiten visualizar el perfil de invasión del pozo.*

- *La resolución vertical de muchas herramientas viene siendo mejorada, de tal forma que se puedan distiguir y evaluar capas de poco espesor que podrían contener hidrocarburos. Esto ayudaría también a una mejor respuesta en las herramientas en zonas con laminaciones, en donde las secuencias delgadas arena arcilla (u otras rocas) se repiten una y otra vez. En general, la técnica actual hace que estas zonas se evalúen de una manera pesimista, debido a que las medidas no alcanzan su deflección total, sino un promedio entre el valor de la zona en cuestión, y sus zonas adyacentes. La meta sobre todo es mejorar las herramientas de resistividad*

- *y porosidad, para estar en capacidad de hacer una evaluación completa. La tabla muestra las resoluciones verticales de algunos equipos :*

Herramienta	Resolución vertical
	[pulgadas]
Inducción	84 a 96
Densidad	15
Buzamiento	0.5
Imágenes	0.2

- *El diseño de las herramientas hace unos años todavía se hacía construyendo modelos a escala y patrones de calibración. La tendencia ahora es hacer los diseños usando modelos matemáticos complejos, utilizando mucho la asistencia de los computadores.*

- *Existe una inquietud creciente para tratar de obtener muestras más representativas de las formaciones, mediante la recuperación de fluidos libres de la contaminación del lodo. De esta forma, se podría saber sin muchas ambiguedades el tipo de fluido que contienen las formaciones de interés. Así mismo, se pretende cada vez más hacer mediciones más reales de la permeabilidad de las formaciones.*

- *En condiciones muy difíciles de los pozos, en ocasiones los registros eléctricos no pueden ser corridos. Para evitar estas circunstancias en que se pierden totalmente los datos, se están fabricando equipos que permiten*

hacer las medidas mientras el pozo está siendo perforado. De esta forma, los equipos electrónicos están protegidos de los efectos nocivos del pozo por la propia tubería de perforación. Esta técnica sobre todo es empleada en pozos que se perforan horizontalmente o con un ángulo de desviación bastante pronunciado.

- *Tratar de medir con mayor exactitud bajo condiciones extremas, es otra pauta en la evolución tecnológica. Por ejemplo, se trata de ampliar el rango de exactitud en pozos con un diámetro nominal grande (más de 12 pulgadas), se quiere extender el rango de validez de las medidas aún cuando se utilicen lodos muy pesados o el reboque de lodo sea grueso, mejorar las lecturas de densidad en formaciones con radiactividad natural alta, etc.*

- *La detección de fracturas naturales en los yacimientos es otro punto a destacar. Cada vez se profundiza más en los métodos de evaluación de los registros convencionales para tratar de determinar fracturas, así como se piensa en herramientas diseñadas exclusivamente para este fin. Las fracturas pueden ser muy importantes en algunas circunstancias, porque constituyen caminos fáciles para que los fluidos atrapados en la roca puedan ser producidos.*

- *El monitoreo constante de los yacimientos durante su etapa de producción es muy importante para los ingenieros de petróleos. Se tienen en mente algunos registros que sean capaces de medir saturaciones, aún a través de la tubería.*

- *Los registros de buzamiento han sido concebidos en base a una serie de electrodos que dependen de la buena conductividad del lodo. Sin embargo, ahora se procura diseñar varios equipos que puedan trabajar aún en lodos poco o nada conductivos, como en lodos base aceite. Para esto se reemplazarían los electrodos por mini-bobinas que trabajan bajo el principio de inducción, o transductores basados en el mismo principio del equipo sónico.*

- *Debido a la facilidad de cálculo que ofrecen los computadores, cada vez resulta más fáctible analizar cantidades enormes de información, como la contenida en los trenes de onda obtenidas con la herramienta de sónico. De esta forma también, ahora se pueden identificar y hacer cálculos con una serie de ondas contenidas en ese tren, como las ondas compresionales, de cizallamiento (transversales) y de Stoneley.*

- *Con la asistencia de computadores cada vez más poderosos, en el sitio mismo de los pozos se evalúan de una vez los resultados, en términos de saturaciones y volúmenes, utilizando modelos cada vez más sofisticados. La cantidad de información que ahora se obtiene está en el orden de los gigabytes, los cuales se almacenan tanto en discos duros como en cassetes o cartuchos pequeños llamados cintas "dat".*

- *La tendencia futura es transmitir toda la información a través de satélite a las oficinas principales de las compañías petroleras, de tal forma que se tenga acceso a la información en muy poco tiempo. La idea es que esas transmisiones se puedan realizar en tiempo real, mientras se está*

adquiriendo la información en los pozos. Para esto se utilizan modems muy veloces, que superan los 19.200 baudios.

- *El tiempo en que se sacaban muestras de la formación utilizando balas o métodos de percusión están quedando definitivamente en el pasado. La tendencia actual y futura es utilizar equipos mecánicos de sacamuestras, que mediante sistemas de rotación rápida y cortando perfectamente la pared de la formación. pueden recuperar muestras clilíndricas de alta calidad. Además, sistemas automáticos permiten identificar y separar cada muestra. Ser pueden tomar hasta 50 muestras en una sola bajada al pozo.*

4.1 Alternativas en marcha

Como resultados de estas nuevas tendencias han nacido herramientas como el **micro-barredor de formaciones**, que con 192 electrodos crea imágenes sintéticas de las paredes del pozo en base a múltiples medidas de micro-resistividad, con un cubrimiento de un 80 % de la circunferencia del pozo. Así mismo, el equipo de **buzamiento de 6 brazos**, que tiene brazos totalmente escualizables y que garantizan un buen contacto a la formación aún en condiciones muy extremas. En teoría ofrece cinco veces más redundancia que un equipo convensional de buzamiento de cuatro brazos, con lo que se asegura la adquisición de señales de gran calidad. Siguiendo la tendencia de fácil visualización de las señales, está la herramienta de **imágenes resistivas** que permite mostrar imágenes de invasión en el pozo, mediante 28 mediciones de inducción con una resolución vertical de un pie, y con profundidades de investigación entre las 10 y 90 pulgadas.

Entre las herramientas sónicas está una que favorece la creación de ondas transversales (conocidas como de cizallamiento), utilizando transmisores direccionales (dipolos) a más de los convencionales que son omnidireccionales (monopolos). Esta nueva tecnología llamada **herramienta sónica de dipolo** ayuda a que no se créen señales indeseadas en el lodo, sino que la respuesta esté dada directamente por la formación. De esta forma se logran medir tiempos de propagación muy lentos, que antes estaban enmascarados por los arribos de las señales del lodo. El procesamiento de estas señales está íntimamente relacionado con las propiedades mecánicas de la roca. La herramienta posée un transmisor monopolar programable, dos transmisores dipolares, y 32 elementos de recepción.

Como equipo para evaluar la cementación en los pozos se tiene un **sistema de imágenes ultrasónicas**, que consiste en la creación de pulsos ultrasónicos de alta frecuencia, que entran en resonancia con la tubería. Esta herramienta mide directamente la llamada impedancia acústica del medio detrás de la tubería. Este parámetro es utilizado para la creación de imágenes, con las que se puede en teoría observar directamente la calidad y distribución del cemento. Como su transductor es giratorio, se logra un cubrimiento de 360° de la circunferencia del pozo. Este equipo también es útil en la evaluación de corrosión de la tubería.

Existe ahora un nuevo equipo **multiprobador modular de formaciones**, que mide con precisión las presiones de la formación, estima mejor las

permeabilidades de la roca, permite obtener muestras de fluido de la formación prácticamente sin la contaminación del filtrado de lodo.

4.2 Alternativas futuras

La industria petrolera está siempre ávida de encontrar respuestas a sus problemas. Por ésto se constituye en un motor que empuja constantemente a la Electrónica en sus continuados avances. Por ejemplo, con la introducción de los computadores en los campos petroleros, en estos últimos quince años se han logrado cambios fundamentales, difíciles de anticipar. Por eso, es complicado conocer las alternativas disponibles en los próximos años.

En el futuro seguramente se continuará tratando de mejorar el funcionamiento de todas las herramientas ya existentes.

La integración de todas las disciplinas relacionadas con el petróleo entre sí y con otras ciencias, es una tendencia muy marcada, que exigirá computadores más poderosos, mayor capacidad de memoria, sistema de intercambio de datos más rápidos y confiables, y redes de comunicación mejores con protocolos más sencillos y eficientes.

Se crée que podría estar cercano el día en que la determinación precisa de los parámetros de los yacimientos -incluyendo la permeabilidad- sea factible. Es posible también que se llegue de alguna manera con estos equipos, a obtener

suficientes datos como para generar curvas de permeabilidad relativa a los diferentes fluidos que se encuentran en las formaciones.

El monitoreo de los yacimientos una vez que entran en producción es una inquietud permanente. El desarrollo de herramientas está encaminado al monitoreo de las saturaciones, lo cual evitaría que en ocasiones se dejen zonas remanentes de petróleo sin producir.

Una buena alternativa futura sería la fabricación de herramientas económicas, que permitan la mejor evaluación de yacimientos antiguos, en donde puede existir todavía mucho petróleo.

CAPITULO QUINTO

CONCLUSIONES

5.1 Recomendaciones

Con algunas de las ideas aquí expuestas, se podría pensar en otro proyecto de tesis en el que se analicen en detalle los demás equipos enumerados en el capítulo # 1 (se mencionan quince, anotando que la lista no es axhaustiva).

- *Se debería incentivar la aplicación de la tecnología electrónica y la investigación, en áreas tan sensitivas para nuestra economía como es el petróleo.*

- *Sería bueno incluir en el curriculum de Ingeniería Electrónica, materias interdisciplinarias que expliquen por ejemplo, la aplicación de estos equipos.*

5.2 Conclusiones

- *En el presente trabajo, queda demostrado el papel importante que juega la Electrónica en todo el proceso de prospección petrolera.*

- *Los equipos aquí descritos son una muestra de excelente aplicación multidisciplinaria de la Electrónica. En ellos se conjuga una mezcla de principios Físicos, con Ingeniería Electrónica, Ingeniería de Petróleos y Geología.*

- *Muchos de los circuitos utilizados en los equipos aquí tratados, son similares a los que se utilizan en cualquier otro equipo, pero adecuados para las condiciones adversas en que deben trabajar.*

- *La innovación en técnicas electrónicas debe ser permanente, porque al momento solo somos capaces de realizar medidas indirectas para obtener los parámetros necesarios para la evaluación de los yacimientos. Esto es un reto permanente para el Ingeniero Electrónico.*

- *La limitación tecnológica produce que en ocasiones las zonas que contienen hidrocarburos no sean reconocidas, perdiéndose así recursos energéticos recuperables.*

- *El constante mejoramiento de los materiales permite ahora construir equipos que antes se consideraban prácticamente imposibles.*

- *Existe la tendencia a mejorar muchas medidas con la utilización más eficiente de los computadores, utilizando modelos matemáticos, métodos numéricos y sofisticados procesamientos de señales.*

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- *Log Data Acquisition And Quality Control, Phillippe P. Theys, 1991.*
- *Geophysical Well Logging, Jay Tittman, 1986*
- *Electronics Engineer Handbook. Donald Fink y Donald Christiansen, 1989.*
- *Electronics Designers Handbook. Landee Davis Albretch, 1983.*
- *Principios de Electrónica. Malvino, 1983.*
- *Herramienta de Lateroperfil. Schlumberger Servicios de Educación.*
- *Herramienta de Inducción. Schlumberger Servicios de Educación, 1986.*
- *Herramienta de Litodensidad. Schlumberger Servicios de Educación, 1986.*
- *Herramienta de Neutrón. Schlumberger Servicios de Educación, 1986.*
- *Equipo Sónico. Schlumberger Servicios de Educación, 1986.*
- *Principios / Aplicaciones de la Interpretación de Registros, 1989.*
- *Tablas de Interpretación de Registros Eléctricos, 1989.*
- *Log Analyst, Publicaciones de la Sociedad Profesional de Petrofísica, 1993.*

APENDICE

APENDICE

APLICACIONES DE LOS EQUIPOS ELECTRONICOS

Simplemente como informativo y complementario, se discuten brevemente algunas de las aplicaciones importantes de los equipos electrónicos en las áreas geológicas y de petróleos.

Aplicaciones en el campo Geológico

- *Permiten definir el tipo de estructura en el que se encuentra la acumulación de hidrocarburos. Mediante la comparación entre los registros de varios pozos (correlación), es posible definir la geometría espacial de los yacimientos, la continuidad y comunicación de capas.*

- *El mapeo de los parámetros determinados en base a las medidas electrónicas (ej. : porosidad), permite tener una visualización areal en donde se encuentran las mayores acumulaciones de hidrocarburos.*

- *Registros como los de buzamiento permiten extrapolar con mayor confianza los datos ya conocidos a zonas donde se carece de datos. Además, este tipo de registros prestan una ayuda invaluable para la ubicación de los siguientes pozos en un campo que está en desarrollo.*

- *Los registros de buzamiento adquiridos con gran resolución vertical, permiten el análisis estratigráfico de las formaciones. De esta forma se*

pueden determinar mejor el tipo de formaciones, la calidad de la roca, la edad geológica de las capas, su posible extensión horizontal, etc.

En Ingeniería de petróleos

- *Los registros de resistividad y porosidad ayudan en el completamiento de los pozos. Usando una evalación adecuada de los mismos, se pueden identificar las zonas productoras de hidrocarburos. Además, con una serie de cálculos se pueden realizar el cálculo de reservas de hidrocarburo (cantidad de petróleo acumulado). Permite detectar los límites de los yacimientos tales como fallas, contactos entre fluidos (por ejemplo: contacto agua petróleo), etc. Permite establecer las unidades hidráulicas en el yacimiento, su posible comunicación vertical y areal.*

- *Los registros de producción permiten el monitoreo de los yacimientos. Sus datos se pueden utilizar para elaborar mapas del avance de los fluidos, que permiten identificar las zonas en donde no se están drenando adecuadamente los hidrocarburos.*

- *Registros un poco más sofisticados permiten calcular la solidez mecánica de las rocas, su facilidad o dificultad de fracturamiento, etc.*

- *El estado mecánico de la tubería de revestimiento se puede saber utilizando registros de corrosión. En base a los resultados, se pueden tomar acciones remediales que limiten el grado de corrosión en el futuro.*

Indice

A

Alternativas en marcha, Pág. # 153

Alternativas futuras, Pág. # 155

Amplificadores de señal pequeña, Pág. # 103

Anunciadores piezo eléctricos, Pág. # 120

APENDICE, Pág. # 160

APLICACIONES DE LOS EQUIPOS ELECTRONICOS

- en el campo geológico, Pág. # 160
- en Ingeniería de petróleos, Pág. # 160

Atenuación en el cable, Pág. # 144

B

BIBLIOGRAFIA, Pág. # 159

C

Circuito monoestable, Pág. # 114

Conclusiones, Pág. # 157

Contadores, Pág. # 108

Control automático de ganancia (variómetro), Pág. # 132

Convertidor de análogo a digital, Pág. # 131

Convertidor de digital a análogo, Pág. # 129

Corrimientos de fase, Pág. # 122

Criterios básicos en el diseño de cualquier equipo de medida

- confiabilidad, Pág. # 28
- estabilidad, Pág. # 28
- exactitud, Pág. # 28
- precisión, Pág. # 28
- rango, Pág. # 28
- relación señal a ruido, Pág. # 28
- reproducibilidad, Pág. # 28
- resolución, Pág. # 28

Criterios de diseño comunes a todos los equipos electrónicos usados para la industria petrolera, Pág. # 29

Criterios eléctricos, Pág. # 33

Criterios generales de diseño de los aparatos de medida, Pág. # 28

Criterios mecánicos, Pág. # 29

D

Detector de fase y lazo de amarre de fase, Pág. # 126

Detectores de frecuencia modulada, Pág. # 124

Determinación de las Variables Físicas a medirse, Pág. # 20

DISEÑO - FUNCIONAMIENTO DE LOS CIRCUITOS DE LOS EQUIPOS DE RESISTIVIDAD Y POROSIDAD, Pág. # 96

Divisores por n, Pág. # 105

E

EQUIPO DE DENSIDAD

- Criterios de diseño, Pág. # 60
- Factores que afectan la exactitud de las medidas, Pág. # 60
- Principio físico y funcionamiento, Pág. # 60
- Valores típicos que se obtienen, Pág. # 60

EQUIPO DE INDUCCION

- Criterios de diseño, Pág. # 51
- Factores que afectan la exactitud de las medidas, Pág. # 51
- Principio físico y funcionamiento, Pág. # 51
- Valores típicos que se obtienen, Pág. # 51

EQUIPO DE NEUTRON

- Criterios de diseño, Pág. # 75
- Factores que afectan la exactitud de las medidas, Pág. # 75
- Principio físico y funcionamiento, Pág. # 75
- Valores típicos que se obtienen, Pág. # 75

EQUIPO SONICO

- Criterios de diseño, Pág. # 80
- Factores que afectan la exactitud de las mediciones, Pág. # 80
- Principio físico y funcionamiento, Pág. # 80
- Valores típicos que se obtienen, Pág. # 80

Equipos

- de buzamiento, Pág. # 14

Indice

de carbón oxígeno o de espectroscopía de rayos gamma, Pág. # 10
de cementación, Pág. # 20
de corrosión, Pág. # 15
de microresistividad, Pág. # 19
de porosidad, Pág. # 8
de potencial espontáneo (SP), Pág. # 12
de producción, Pág. # 13
de resistividad, Pág. # 7
dieléctricos, Pág. # 11
geoquímicos, Pág. # 18
Multiprobador de formaciones, Pág. # 17
para obtener la geometría del pozo, Pág. # 18
para sísmica y geófonos, Pág. # 19
que detectan la radiactividad natural de las rocas, Pág. # 9

EQUIPOS A BASE DE ELECTRODOS
Crieterios de diseño, Pág. # 39
Factores que afectan la exactitud de las mediciones, Pág. # 39
Principio físico y funcionamiento, Pág. # 39
Valores típicos que se obtienen, Pág. # 39

Estrategias usadas en Electrónica, Pág. # 28

Evolución de la Tecnología en las medidas, Pág. # 3

F

Factores que afectan la exactitud de las medidas, Pág. # 36

Filtro pasabajos, Pág. # 101

I

Importancia de las medidas electrónicas en la industria del petróleo, Pág. # 1

Infuencia de la temperatura
Condensadores, Pág. # 134
Cristales de cuarzo, Pág. # 134
Resistencias fijas, Pág. # 134
Ruido térmico en las resistencias, Pág. # 134
Semiconductores, Pág. # 134
Sueldas, Pág. # 134

L

LIMITACIONES DE LOS ELEMENTOS ELECTRONICOS, Pág. # 134

M

Multiplicador de voltaje, Pág. # 96

O

Oscilador controlado por voltaje, Pág. # 97

Oscilador de bloqueo, Pág. # 111

Osciladores (Aestable), Pág. # 116

Osciladores convencionales, Pág. # 117

R

Recomendaciones, Pág. # 157

Registros de desplazamiento, Pág. # 109

registros eléctricos,

Ruidos en los equipos, Pág. # 146

S

Schmitt trigger, Pág. # 113

Sonar, Pág. # 120

T

Técnicas típicas de medida usadas en Electrónica, Pág. # 38

Tendencia en el diseño de las nuevas herramientas, Pág. # 148

Transmisores del sónico, Pág. # 120