



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

DISEÑO DE UN EQUIPO PARA INSPECCION
DE ANOMALIAS FISICAS EN DUCTOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

HUGO HERNANDEZ ALVARADO

ASESOR: ING. JAIME RODRIGUEZ MARTINEZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEXICO

2000



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

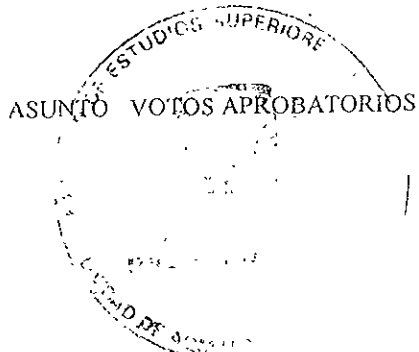
DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
 UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
 DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES



DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
 DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
 P R E S E N T E

AT'N. Q. Ma. del Carmen García Mijares
 Jefe del Departamento de Exámenes
 Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS

"Diseño de un Equipo para Inspección de Anomalías Físicas en Ductos"

que presenta el pasante Hernández Alvarado Hugo
 con número de cuenta: 8920400-5 para obtener el TITULO de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicha tesis reúne los requisitos necesarios para ser discutida en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO

A T E N T A M E N T E
 "POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo de Méx, a 15 de abril de 199 9

- PRESIDENTE Ing. Jaime Rodríguez Martínez
- VOCAL Ing. Ramón Osorio Galicia
- SECRETARIO Ing. José Castillo Sánchez
- PRIMER SUPLENTE Ing. Nicolas Rodolfo Balderas Reyes
- SEGUNDO SUPLENTE Ing. Jorge Adolfo Peláez Salinas

AGRADECIMIENTOS

A MI PADRE EL SR. TOMAS HERNANDEZ MORALES, POR APOYARME SIEMPRE EN MI VIDA PERSONAL Y ESCOLAR, BRINDÁNDOME SU AYUDA Y PROTECCION.

A MI MADRE LA SRA. CATALINA ALVARADO HERNANDEZ, POR CONFIAR SIEMPRE EN MI Y BRINDARME TODO SU APOYO Y CARIÑO EN EL TRANSCURSO DE MI VIDA, AUN EN LOS MOMENTOS MÁS DIFICILES.

A MIS HERMANOS EDITH ESTHER, HORACIO Y ALBERTO POR DEMOSTRAME SIEMPRE SU CONFIANZA Y SU AYUDA MORAL.

A DIOS POR HABERME DADO OTRA OPORTUNIDA DE VIVIR Y ASI PODER REALIZAR UNO DE MIS GRANDES SUEÑOS:

SER INGENIERO.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO CAMPUS CUAUTITLAN POR HABERME BRINDADO LA OPORTUNIDAD DE CURSAR MIS ESTUDIOS DE EDUCACION SUPERIOR.

AL INSTITUTO MEXICANO DEL PETROLEO POR HABERME BRINDADO LA OPORTUNIDAD DE REALIZAR MI TESIS PROFECIONAL DENTRO DE SUS INSTALACIONES

A TODOS Y CADA UNO DE LOS PROFESORES DE LA CARRERA DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA POR TRANSMITIR TODOS SUS CONOCIMIENTOS PARA FORMAR A LOS MEJORES PROFECIONISTAS DE MEXICO.

A TODOS MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS TANTO DE LA CARRERA COMO DE LA GENERACION 92 DE IME.

A TODA LAS PERSONAS QUE INTERVINIERON DE ALGUNA MANERA EN LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO DE TESIS PROFECIONAL.

A TODOS SIMPLEMENTE GRACIAS.

-INDICE-

pág.

INTRODUCCION 1

CAPITULO I.- ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO

I.1.-CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO 5

CAPITULO II ELECTROMAGNETISMO

II.1.-GENERALIDADES 14

II.1.1.-LEY DE GAUSS 16

II.1.2.-LEY DE LA AUSENCIA DE MONOPOLOS MAGNÉTICOS 19

II.1.3.-LEY DE INDUCCIÓN DE FARADAY 21

II.1.4.-LEY DE AMPERE-MAXWELL 25

CAPITULO III.- OTRAS APLICACIONES DEL ELECTROMAGNETISMO

III.1.-GENERALIDADES 27

III.1.1.-ALEACIONES Y COMPUESTOS CRISTALINOS 29

III.1.2.-FERROFLUIDOS 31

III.2.1.-EFECTOS DE CAMPOS MAGNÉTICOS EN METALES LÍQUIDOS 35

III.2.2.-RESONANCIA MAGNETICA NUCLEAR 35

III.3.1.-TECNOLOGÍA DE INFORMACIÓN MAGNETICA 38

III.3.2.-GRABACION MAGNETICA 38

III.3.3.-GRABACION OPTOMAGNETICA 40

III.3.4.-TECNOLOGIA DE BURBUJAS MAGNETICAS 41

CAPITULO IV.- TRANSDUCTORES Y ACTUADORES

IV.1.-GENERALIDADES	43
IV.1.1.-PRINCIPIOS DE TRANSDUCCIÓN	44
IV.1.2.-EL EFECTO HALL	56

CAPITULO V.- TIPOS DE INSPECCIONES EN TUBERIAS

V.1.1.-GENERALIDADES	60
V.2.1.-LOS SISTEMAS DE INSPECCIÓN (DIABLOS) EN LA ACTUALIDAD	65
V.2.1.1.-DIABLOS MECÁNICOS	66
V.2.1.2.-DIABLOS INTELIGENTES O HERRAMIENTAS DE INSPECCIÓN EN LINEA	72

CAPITULO VI.- DISEÑO DEL SISTEMA DE INSPECCION DE TUBERIAS

VI.1.1.-DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PRINCIPIO DE MAGNETIZACION DEL SISTEMA	80
VI.2.1.-SISTEMA DE MAGNETIZACIÓN	81
VI.2.2.-BOBINA ELECTROMAGNETICA	82
VI.2.3.-ETAPAS DE FILTRAJE Y AMPLIFICACION	87
VI.3.1.-SISTEMA SENSOR	94
VI.3.2.-SENSOR DE EFECTO HALL 103SR17 MARCA MICRO SWITCH HONEYWELL DIVISION	96
VI.4.1.-DIRECCION DE BUSQUEDA DEL SENSOR	98
VI.4.2.-ALGORITMOS DE CONTROL	101
VI.4.3.-COMPARACION CON LOS DISPOSITIVOS EXTRANJEROS	106
VI.5.-DIAGRAMA ELECTRICO GENERAL DEL EQUIPO	108

-CONCLUSIONES- 110

APENDICE I

APENDICE II

GLOSARIO.

BIBLIOGRAFÍA.

-INTRODUCCIÓN-

El transporte de productos petrolíferos, petróleo bruto, productos refinados, gas natural y una gran cantidad de productos químicos, se efectúan desde hace muchos años y en una amplia medida, por importantes redes de canalizaciones como son las tuberías enterradas, aunque protegidas exteriormente con revestimientos aislantes y una protección catódica, estas canalizaciones son víctimas de numerosas agresiones debidas a la acidez de ciertos suelos atravesados, a las corrientes eléctricas que circulan en el suelo, a agentes mecánicos diversos tales como rocas, aparatos de explanación, anclas de barcos, etc. algunos de los productos transportados provocan también, a veces, una corrosión interna del acero de los tubos, sucede, por lo tanto, y cada vez más frecuente, que cuando las canalizaciones envejecen aparecen escapes que pueden causar la ruptura de la canalización. Estos escapes o rupturas son, para el explotante, extremadamente dañinas y peligrosas ya que originan, en todos los casos, el paro de la explotación y una pérdida de producto que puede ser considerable. Además, se producen siempre de manera inesperada y en zonas imprevistas, lo que aumenta el costo de la indispensable y rápida reparación.

A pesar del mantenimiento regular, la corrosión en tuberías no puede evitarse totalmente. Las líneas que han sido operadas durante muchos años son especialmente susceptibles a desarrollar defectos.

- La corrosión externa es resultado de un revestimiento defectuoso, condiciones de suelo extremas u otras influencias externas
- La corrosión interna puede ser resultado de la separación de una fase de agua o de transporte de material corrosivo.

- La laminación es causada durante el proceso de manufactura o producida por inducción de hidrógeno (atomización).

El electromagnetismo es uno de los pilares más importantes de la ciencia y la tecnología modernas. No es posible separar el magnetismo de su relación con la electricidad, y el cúmulo de conocimientos en ambas áreas es enorme. Así, varios principios magnéticos y electromagnéticos son usados para inspeccionar tuberías, estos incluyen desde el uso de magnetos permanentes hasta transmisores electromagnéticos los cuales recogen información para la evaluación crítica de las tuberías agrietadas por fuerzas de corrosión. Como experiencia en la industria se selecciona como blanco de detección para grietas por esfuerzos el 35 % del espesor de la pared de la tubería. Este es un aumento interesante y consiente en la industria, dentro de la parte potencial de falla en tuberías debido a grietas por fuerzas de corrosión. Esto para lograr la determinación exacta de la naturaleza, grado y posición de estos defectos, los cuales pueden causar problemas operacionales graves, que además son prerequisites para un programa de mantenimiento efectivo, ya que tales fallas, sin embargo muy raras, pueden causar daños significativos y hasta pérdidas de vida. Aunque las estadísticas indican que estas fallas representan solo un pequeño componente del total de accidentes ocurridos en tuberías.

-IMPORTANCIA ECONÓMICA DE LA CORROSIÓN-

Para formarse una idea de la importancia económica y al no disponer de datos específicos sobre los costos originados por la corrosión en la industria, se tomara como base los cálculos aproximados de acuerdo con criterios expuestos por algunos investigadores que consideran que el costo de la corrosión representa entre el 5 y 10 % del valor de los productos elaborados, también se afirma que el costo de la corrosión equivale al 30 % del acero empleado, lo cual lleva una cifra de la misma magnitud. Pero aún aceptando que las cifras anteriores puedan ser más elevadas de lo que corresponden a su valor real, es indiscutible que se paga un tributo muy elevado a la corrosión,

Los conceptos más importantes por los cuales se hace sentir la corrosión, son los siguientes.

- a) Costo de reparación de plantas y equipos.
- b) Pérdida de producto y tiempo ocasionado por paradas de plantas.
- c) Costo de mantenimiento.
- d) Costos de protección anticorrosiva.
- e) Pérdida de productos.
- f) Contaminación de productos.
- g) Daños y demandas ocasionados por rupturas.
- h) Costos adicionales de energía para mantener la producción.
- i) Costos de investigación sobre corrosión.

En algunos casos los daños ocasionados por la corrosión pueden incluir la pérdida de vidas humanas, las cuales no pueden ser valorizadas, aparte de las erogaciones por gastos de indemnización.

-NATURALEZAS Y CAUSAS DE LA CORROSIÓN-

La corrosión se puede definir como la destrucción de un metal por una acción electrofítica entre el metal y el medio que lo rodea.

En la mayoría de los casos la corrosión se presenta en la superficie metálica, pudiendo avanzar a lo largo de los límites intergranulares o de otras líneas de ataque debido a su diferencia de resistencia por la acción electrofítica. Los productos de la corrosión consisten en la mayoría de las condiciones de exposición a óxidos hidratados, carbonatos y sulfuros, según la naturaleza del metal y el medio corrosivo y se puede decir que el fenómeno es casi el mismo en todos los metales.

La presencia del oxígeno es esencial para la corrosión por medio del agua a temperatura ambiente. Las soluciones acuosas disuelve rápidamente el oxígeno siendo la fuente requerida en los procesos corrosivos.

Durante la oxidación atmosférica con el oxígeno del aire, el producto de la reacción se seca, formando el óxido café rojizo.

Las medidas correctivas consisten en reparar los tramos de la tubería que se encuentra dañada por corrosión exterior, dependiendo del grado de corrosión se realizara una reparación definitiva, ya sea con el cambio de un tramo completo de tubería, o para reparaciones definitivas para fugas pequeñas mediante parches.

-CAPITULO I-

-ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO-

LI -CONCEPTOS FUNDAMENTALES DE ELECTRICIDAD Y MAGNETISMO.

Electricidad y magnetismo son aspectos diferentes de un mismo fenómeno. Cuando el científico medita sobre las propiedades y el movimiento de las cargas eléctricas, ambos fenómenos aparecen en forma conjunta. Sin embargo la íntima relación entre electricidad y magnetismo solo comenzó a estudiarse en forma sistemática a partir del siglo pasado, y aún ahora el lego en la materia piensa que estos fenómenos no tienen nada que ver entre sí, a pesar de que vive rodeado de aparatos que muestran esta interrelación. Esto explica el desarrollo del magnetismo como ciencia, ya que en la antigüedad y hasta el siglo XVIII se estudiaba el magnetismo de manera independiente, es decir, sin tomar en cuenta a la electricidad.

Fueron probablemente los griegos quienes primero reflexionaron sobre las maravillosas propiedades de la magnetita, un mineral de hierro que incluso en su estado natural posee una profunda atracción por el hierro. De hecho, Tales de Mileto alrededor de 600 a C. ya habla del imán en forma detallada.

Esto no excluye que esté ya se conociese en el resto del mundo. Siendo los griegos un pueblo que se interesaba por la naturaleza, no es de extrañar que surgieran teorías para explicar las maravillas del magnetismo. Sin embargo no debe pensarse que el verbo explicar tenía el mismo sentido para ellos que para nosotros. Para los griegos explicar significaba encuadrar los fenómenos naturales dentro de un esquema filosófico preconcebido y no investigarlos para crear una teoría con poder predictivo.

También el uso de la “piedra magnética” como brújula se adscribe a los chinos. Se dice que los chinos utilizaban una especie de brújula en el siglo XII a.C., pero hasta el final del siglo XII d.C., no se tiene una clara referencia a un compás marítimo. Para ese entonces los europeos habían ya desarrollado una brújula, pues ya en el año 1200 d.C., Neckam of St Albans muestra agujas pivotadas que marcaban la ruta marítima a seguir a los barcos de ese tiempo, en su libro, *De Utensilibus*. El primer tratado europeo importante sobre el magnetismo se debe a Pedro Peregrino de Maricourt, quien el “8 de agosto del año del señor 1269” escribió su celebrada epístola a *Sygerius de Foucaucort, Soldado*. Este es el primer informe científico (en el sentido moderno de la palabra) del que se poseen noticias. La carta es notable, ya que el relato de los experimentos es lúcido y sucinto. Peregrino distingue claramente los polos de un imán permanente; observa que el polo norte y el polo sur se atraen y que polos iguales, norte- norte por ejemplo, se repelen. (fig.I.1)

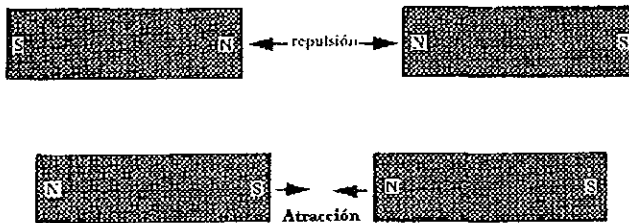


Fig.I.1 *Polos opuestos se atraen y polos iguales se repelen.*

Describe cómo, si se fragmenta un imán, se crean otros polos, y discute sobre la aguja pivotada. Asevera además que es de los polos magnéticos de la tierra de donde los polos del imán reciben sus virtudes.

Así, lo que podríamos llamar la etapa precientífica del magnetismo termina y culmina con la aparición de la imponente figura de Willian Gilbert de Colchester (1544-1603), quien fue el verdadero fundador de la ciencia del magnetismo. Su *Magnete Magnetisque Corporibus et de Magno Magnete Tellure Physiologia Nova*, usualmente y por fortuna conocido como *De Magnete*, fue publicado en el año 1600 y puede considerarse como uno de los trabajos claves de la revolución científica que se llevo a cabo por esas épocas. Gilbert fue de los primeros “filósofos naturales” que hizo hincapié en el método experimental y que lo utilizo para ahondar en el conocimiento del magnetismo. Gilbert describe múltiples fenómenos, entre los cuales destaca el cómo la atracción entre el hierro y la magnetita imantada puede ser aumentada “armando” la magnetita, esto es, poniendo casquetes de hierro en las juntas de la piedra. (fig.1.2)

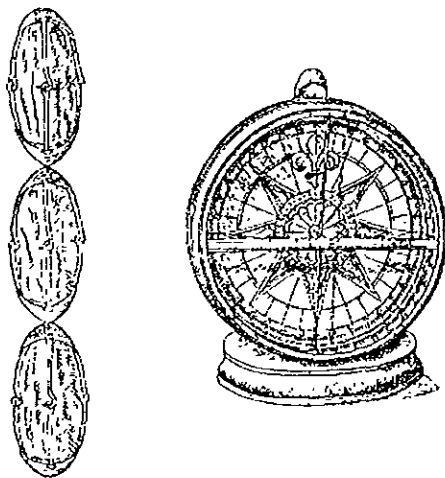


Fig.1.2 *Imanes permanentes y círculo inclinado como se presenta en De Magnete de Gilbert*

Esto hace que el peso que puede ser levantado aumente en un factor de cinco. Observó además que la atracción se concentra en los extremos de la magnetita. Así, Gilbert detalla cómo se pueden hacer imanes por medio de tres métodos: tocando objetos imantados; por deformación plástica; y fabricando barras de hierro, calentándolas y dejándolas enfriar. De hecho, estos métodos fueron los que se usaron hasta 1820. Observo también que el calor destruye el magnetismo.

Como puede colegirse de la anterior exposición, Gilbert era un gran experimentalista poco afecto a la especulación. Sin embargo en el último libro de su *De Magnete* Presenta sus teorías y trata de encuadrar el magnetismo en el sistema de Copérnico. Uno de sus éxitos fue el de deducir las propiedades de atracción de polos opuestos y otro el de que la tierra se comporta como si tuviera un imán enterrado en ella. (fig.1.3)

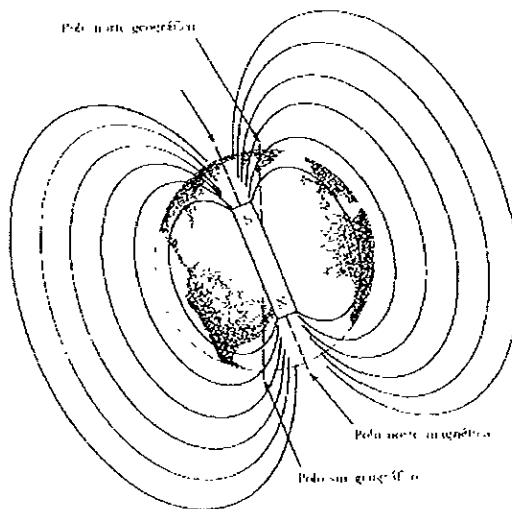


Fig.1.3 La tierra se comporta como si tuviera un gran imán enterrado

También, en el otro extremo se encuentra el gran filósofo y matemático francés René Descartes (1596-1659), quien no toma muy en cuenta los experimentos pero introduce de lleno el racionalismo en la ciencia. La primera teoría del magnetismo se presenta en la cuarta parte de su libro *Principia* y considera que el ferromagnetismo, esto es la existencia de imanes permanentes, deriva del magnetismo terrestre. Su teoría de Vórtices, que no es más que una nueva versión de los efluvios del mundo clásico no resiste una comparación con los experimentos de Gilbert, pero ejerció una influencia considerable en su época.

Este nuevo punto de vista estimula a que los científicos cuantifiquen sus observaciones. En magnetismo, el monje Marsenne, un amigo de Descartes, cuantificó las observaciones de Gilbert. Hacia 1750 John Michell inventó la balanza de torsión y pudo constatar que "la atracción o repulsión de los imanes decrece cuando los cuadrados de la distancia entre los respectivos polos aumenta". Estas conclusiones, que no concordaban con la teoría de Vórtices, dieron origen a nuevas teorías del magnetismo, algunas basadas en el tema de fluidos. La teoría de un fluido propuesta por Gray y Franklin para explicar el flujo de carga eléctrica de un cuerpo a otro fue aplicada al magnetismo por Franz María Aepinus en 1759. Su libro *Tentamen Theoria Electricitates et Magnetismi* publicado en San Petersburgo dio el golpe de gracia a las teorías basadas en el concepto de efluio. El descubrimiento por Du Fay en 1733 de que había dos tipos de electricidad hizo que también se propusiera una teoría de dos fluidos para el magnetismo en 1778 por el sueco Wilche y el holandés Brugmans.

El máximo representante de la teoría en esa época fue Charles Coulomb (1736-1806), quien realizó experimentos cruciales con la balanza de torsión para probar la ley de interacción entre cargas y modificó la teoría de dos fluidos. Coulomb hizo la clara distinción entre cargas eléctricas y cargas magnéticas, pues estas últimas, como ya se

mencionó, nunca aparecían desligadas, sino en pares de polos magnéticos. Simon Denis Poisson (1781-1840), un brillante matemático, introdujo el concepto de potencial y desarrollo la teoría de la magnetostática. Tanto Poisson como Coulomb rechazaron cualquier intento de especulación acerca de la naturaleza de los fluidos eléctrico y magnético.

En resumen, al final del siglo XVIII las características de los fenómenos magnetostáticos habían sido descubiertas y se interpretaban con base a la teoría de dos fluidos, combinados con el concepto de acción a distancia implícito en la ley del cuadrado de la distancia. Es claro que la fuerza eléctrica como la magnética y la gravitatoria se distinguen de las llamadas fuerzas de contacto, como lo son la fricción o un simple empujón, en el hecho de que actúan aun cuando los cuerpos no se toquen. De esta manera se empezó hablando de la mencionada acción a distancia, pero en el lenguaje moderno se frasea en términos de los llamados “campos”, concepto en el que se profundizara más adelante. Matemáticamente se había avanzado considerablemente con las investigaciones de Poisson, quien, entre otras cosas, discutió la inducción magnética. Así, la construcción de imanes permanentes había alcanzado un alto grado de refinamiento en Inglaterra. (Fig.1.4).

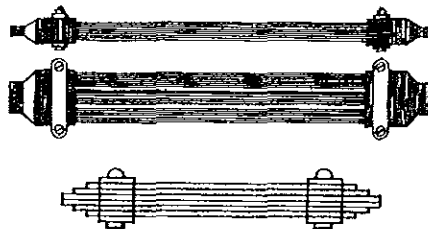


Fig.1.4 Diferentes tipos de imanes permanentes

Sin embargo, fue solamente a principios del siglo XIX cuando se empezó a investigar la influencia que tenía la electricidad sobre una aguja magnética. Estos experimentos fueron estimulados por la invención de la pila voltaica alrededor de 1800 y, ya desde 1801, el físico danés Hans Christian Oersted (1777–1851) estaba buscando la interrelación entre una corriente eléctrica y una aguja magnética. No fue sino hasta 1819, y por accidente, cuando notó que la aguja magnética se movía cuando pasaba corriente por un alambre paralelo a la misma. Esto era algo sorprendente, pues nunca se había esperado una fuerza transversal. Oersted publicó una memoria sobre sus experimentos que causó una gran sensación. Dichos experimentos fueron reproducidos por Arago (el 8 de septiembre de 1820), Andre Marie Ampere (1755–1836) sugirió que el ferromagnetismo era originado por corrientes eléctricas internas y que estas fluían perpendicularmente al eje del imán.

En 1813 Michel Faraday (1791–1867), contando entonces con 23 años y siendo aprendiz de encuadernador, fue contratado por Sir Humphry Davy, que reportaba resultados similares a los de Arago, como su ayudante en la Royal Institution. Faraday, sin lugar a dudas uno de los grandes genios de la física tenía un tremendo poder de visualización, el cual, al combinarse con su gran paciencia y habilidad observacional, lo llevó a una vida de descubrimientos casi sin paralelo en la historia de la ciencia. Así, en 1831 descubrió la inducción electromagnética. Indudablemente fue su capacidad de ver las líneas de fuerza que salían del imán lo que permitió observar este fenómeno en 10 días de febril investigación. En sus propias palabras: "... se describieron y definieron ciertas líneas alrededor de una barra imán (aquellas que se visualizan esparciendo limadura de hierro en la vecindad de este, como se muestra en la fig.1.5), y se reconocieron como descripción precisa de la naturaleza, condición, dirección e intensidad de la fuerza en cualquier región dada, dentro y fuera de la barra. Esta vez las líneas se consideraron en abstracto. Sin

apartarse en nada de lo dicho, ahora emprendemos la investigación de la posible y probable existencia física de tales líneas...”

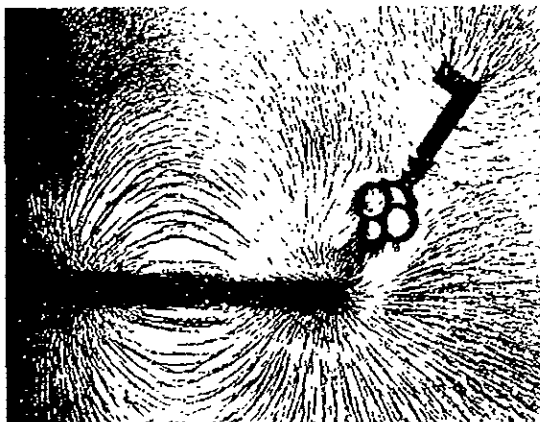


Fig.1.5 Limadura de hierro espolvoreado sobre un papel, el cual se encuentra sobre un imán

Y concluye diciendo: “la cantidad de electricidad que se vuelve corriente es proporcional al número de líneas de fuerza interceptadas”.

Faraday estableció claramente que las sustancias magnéticas interactúan unas con otras mediante líneas de fuerza, hoy llamadas líneas de campo, y no mediante una “acción a distancia”. Sin embargo, suponía que el espacio libre era un medio que soportaba las fuerzas y deformaciones que permitían la interacción magnética y eléctrica

El genio culminante de la física del siglo XIX, James Clerk Maxwell (1831–1879), tradujo estas ideas a un lenguaje matemático preciso, y en su monumental tratado aparecido en 1873 publicó las ideas de Faraday, sus propias ecuaciones y todo lo hasta entonces conocido en la materia. Maxwell derivó cuatro ecuaciones que resumen todas las

investigaciones hechas por sus predecesores y que han servido como base a todo el desarrollo tecnológico en este campo.

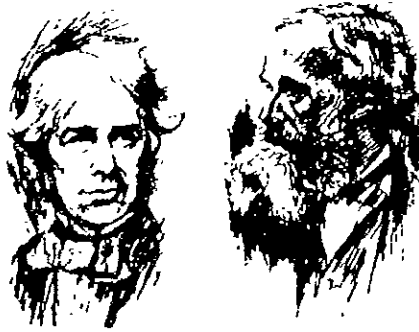


Fig.1.6 *M Faraday y J.C. Maxwell.*

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{1}{\epsilon_0} \rho_0 \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \end{aligned}$$

Fig.1 7 *Ecuaciones de Maxwell en el vacío.*

Las soluciones de las ecuaciones de Maxwell mostraron que una onda electromagnética se propaga a la velocidad de la luz. Heinrich Hertz, en 1888, mostró que la luz es de naturaleza electromagnética, lo que significó un paso gigantesco al mundo moderno.

-CAPITULO II-

-ELECTROMAGNETISMO-

II.1-GENERALIDADES-

Las ecuaciones de Maxwell unifican la teoría electromagnética en forma elegante y compacta. En la fig. I 7 se presenta su forma diferencial, que aparece en notación vectorial. Como se ve, en ellas aparecen dos cantidades físicas, E y B , que son el campo eléctrico y el magnético respectivamente. Esto nos indica que las ecuaciones de Maxwell se ocupan de cómo los campos están relacionados entre sí y nos lleva a caer en la cuenta de que el concepto de campo es esencial para interpretar y describir cualquier fenómeno electromagnético.

De la misma manera en que se define el campo eléctrico como la fuerza que se ejerce sobre una carga unitaria en reposo, se puede definir otro campo, el magnético, como la parte de la fuerza que involucra la velocidad de la carga y actúa sobre una carga en movimiento. Por lo tanto, la fuerza que actúa sobre una carga tiene una parte estática que sirve para definir el campo eléctrico y una parte dinámica que lo hace para el campo magnético. Esta es la conocida fuerza de Lorentz, llamada así en honor del gran físico holandés Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928).

De esta forma, debido a su importancia fundamental, se debe incluir la ecuación de la fuerza de Lorentz, escrita en su forma puntual, como la fuerza por unidad de volumen.

$$\mathbf{F} = \rho (\mathbf{E} + \mathbf{U} \times \mathbf{B})$$

Las leyes de Maxwell resumen y encuadran dentro de una teoría poderosísima los conocimientos que sobre el comportamiento de los campos, cargas y corrientes en el vacío y en la materia se habían venido acumulando durante muchos años de investigación.

A continuación se describirán las leyes fundamentales del electromagnetismo y su relación con los fenómenos fundamentales en la materia

- 1) Ley de Gauss, que se ocupa del campo y de las cargas eléctricas y es equivalente a la famosa Ley de Coulomb.
- 2) Ley sobre la ausencia de cargas magnéticas libres.
- 3) Ley de Faraday, sobre la inducción electromagnética.
- 4) Ley de Ampere–Maxwell sobre la dependencia del campo magnético de la corriente eléctrica y la variación del campo eléctrico

Hay que enfatizar que estas leyes fueron descubiertas experimentalmente, con excepción de una parte de la ley de Ampere–Maxwell (la parte de Maxwell). Se puede afirmar que fue Faraday quien, al descubrir la ley que lleva su nombre, indujo el campo magnético en 1845. Junto con estas leyes existen las llamadas relaciones constitutivas, que relacionan los campos con la magnetización y polarización de la materia. Estas relaciones y la fuerza de Lorentz, descrita anteriormente, completan el gran edificio del electromagnetismo clásico. Así, pasaremos a recorrerlo en detalle para adquirir un conocimiento más completo de su estructura.

II. 1.1 -LEY DE GAUSS-

La ley de Gauss es equivalente a la ley de Coulomb, la cual asevera que la fuerza entre dos cargas es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Dicha fuerza puede ser repulsiva o atractiva, según que las cargas sean de signo igual o contrario respectivamente. Esta ley ha sido comprobada empíricamente en innumerables ocasiones. Así se tiene, que el campo eléctrico está relacionado con la fuerza entre una carga de prueba y otra carga, ya que si dividimos esta fuerza entre la carga de prueba obtenemos el campo eléctrico producido por la otra carga. Es notable que la fuerza con la cual interactúan dos cargas no cambia por la presencia de una tercera.

Así pues, el campo eléctrico es producido siempre por una fuente, la cual puede ser una carga o un sistema de cargas. La relación entre el campo eléctrico y sus fuentes puede ser expresada en forma sencilla definiendo el concepto de flujo. En la fig.II.1 se representa una superficie cerrada de forma arbitraria.

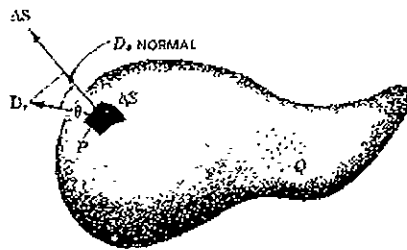


Fig.II.1 Una superficie cerrada sobre un campo se divide en pequeños elementos de área.

Cada elemento se representa por un vector.

El campo representado por las líneas atraviesa esta superficie. Si la dividimos en pequeñas secciones de tal forma que cada pedazo de superficie sea plano y el campo eléctrico no cambie apreciablemente de una sección a la contigua, podemos definir el flujo como el producto del campo eléctrico por el área de la sección que atraviesa. O sea que el flujo nos da una idea de qué tanto campo atraviesa una superficie si usamos todas las secciones que componen esta superficie.

Hasta ahora se ha considerado que la superficie no encierra ninguna carga. Pero ¿Qué ocurre si lo hace? Es la ley de Gauss la que nos da la respuesta:

“El flujo de campo eléctrico a través de cualquier superficie cerrada es proporcional a la carga total encerrada por esa superficie”.

Esta es una ley que tiene el mismo contenido físico que la ley de Coulomb, pero expresado en términos del campo y no de la fuerza. Asimismo permite la obtención de expresiones para el campo electrostático dado cualquier arreglo de cargas en reposo. De hecho, el campo eléctrico decrece de la misma forma que el cuadrado de la distancia al alejarse de una carga puntual.

Muchas veces, sin embargo, la cantidad que se utiliza para obtener información acerca del campo eléctrico es la diferencia de potencial que aparecerá también al examinar la ley de inducción. El potencial eléctrico es una cantidad escalar, pues sólo se describe con una magnitud, y sirve para medir la cantidad de trabajo por unidad de carga que se realiza para mover una carga positiva de un punto a a un punto b en el campo eléctrico. (Fig.II.2).

La tensión eléctrica se refiere tanto a la diferencia de potencial eléctrico como a la fuerza electromotriz (fem.); la unidad es el voltio (V), definido como la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos de un conductor por el que circula una corriente

constante de un amperio, cuando la potencia disipada entre estos puntos es igual a un vatio ($V=W/A$).

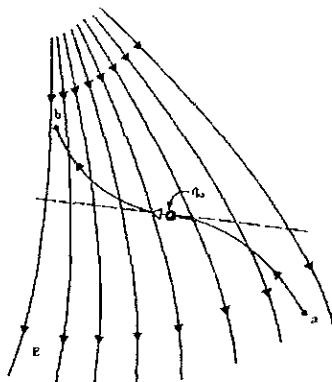


Fig.11.2 Una carga de prueba Q_0 se mueve de a a b en un campo eléctrico por medio de la acción de una fuerza externa.

La diferencia de potencial entre los dos puntos es independiente de la trayectoria que se tome para ir de a a b y su variación nos proporciona el campo eléctrico. Para hacer contacto con las manifestaciones cotidianas de la electricidad, se dice que la diferencia de potencial no es otra cosa que el voltaje, al cual nos referimos continuamente. El que haya poco voltaje significa que hay poca diferencia de potencial y que por lo tanto las cargas eléctricas, en este caso electrones, fluyen en forma más errática y que en consecuencia tenemos menos corriente.

Se tiene entonces que la aportación, en 1813, de Karl Friedrich Gauss uno de los más grandes matemáticos del mundo, consistió, de hecho, no en enunciar la ley como se

menciona arriba, sino en proporcionar una forma matemática para este enunciado, así la ley de Gauss puede escribirse en términos de la distribución de carga como:

$$\mathbf{I}_E = \iint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \iiint_V \rho_V dv$$

O en su forma puntual:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_V$$

Estas ecuaciones afirman esencialmente que la densidad de carga es una fuente (o acumulador) de líneas de flujo eléctrico.

II.1.2 -LEY DE LA AUSENCIA DE MONOPOLOS MAGNÉTICOS-

Se ha extendido en la discusión de la ley de Gauss porque los conceptos de flujo y carga son importantes en el estudio de la ley que ahora nos ocupa. En la fig.1.5 se muestran las líneas de campo magnético y tal pareciera que hay un exceso de carga magnética positiva en un extremo del imán y exceso de carga magnética negativa en el otro. Así podría pensarse que existe una ley análoga a la de Gauss para el caso magnético. Si tomáramos una superficie que incluya una región del espacio donde haya cargas o polos magnéticos aislados, tendríamos un flujo neto y por lo tanto una ley de Gauss magnética, con lo que se obtendría un campo magnético que decae de la misma forma que el inverso del cuadrado de la distancia a distancias grandes. Es un hecho, sin embargo, que la materia está compuesta de cargas eléctricas libres y no de cargas magnéticas. Dicho de otra forma, los polos magnéticos aislados parecen no existir y por lo tanto la ley para el flujo de campo

magnético es diferente a la de Gauss y reza como sigue:

“El flujo neto de campo magnético a través de cualquier superficie cerrada es cero”.

Esto es cierto para todo el espacio, pues no existen polos magnéticos aislados. Su ecuación en forma diferencial es:

$$\oiint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$$

Su ecuación en forma puntual se representa como:

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

Así, en esta ecuación se reconoce nuevamente el hecho de que se ignora la existencia de “cargas magnéticas” o polos. El flujo magnético siempre se encuentra en espiras cerradas y nunca diverge de una fuente puntual.

Sin embargo, en principio no existe impedimento físico para pensar que en algún lugar del espacio (o en el pasado) existieron monopolos magnéticos. A lo largo de este siglo ha habido numerosos intentos para localizar un monopolo magnético. Algunas modernas teorías cosmológicas predicen que pares de polos magnéticos fueron creados al principio del Universo para separarse posteriormente. Estos monopolos serían “pocos” comparados con el número de electrones, por ejemplo, y difíciles de detectar. Esta fascinante búsqueda tal vez tendrá éxito en el futuro.

¿Qué incidencia tendría esto en la ley que ahora tratamos? Aparte de aseverar que el flujo magnético neto en algunos puntos del Universo no es cero, las conclusiones generales de la electrodinámica no se verían afectadas pues como ya se dijo, la materia está compuesta de cargas eléctricas y las fuentes del campo magnético son las corrientes

eléctricas, además de que las interacciones cuánticas son microscópicas. Para completar diremos que esta ley implica la existencia de una cantidad llamada potencial vectorial magnético, que es de suma importancia en la electrodinámica.

II.1.3 -LEY DE INDUCCIÓN DE FARADAY-

Entre los físicos que empezaron a investigar la relación entre electricidad y magnetismo, Faraday fue el que realizó las contribuciones más importantes, junto con Amperé. Después de que Oersted demostró, en 1820, que una corriente eléctrica afectaba a la aguja de una brújula, Faraday sustentó la idea de que si una corriente podía producir un campo magnético, entonces un campo magnético también debía ser capaz de producir una corriente. En esa época aún no se desarrollaba el concepto de “campo” por lo que la meta de Faraday fue demostrar que se podía producir una corriente por medio del “magnetismo”.

Trabajo sobre este problema en forma intermitente, hasta que finalmente tuvo éxito en 1831. Enrolló por separado, dos devanados sobre un toroide de fierro y colocó un galvanómetro en uno de los circuitos y una batería en el otro. Al cerrar el circuito de la batería, observó una deflexión momentánea del galvanómetro; ocurrió una deflexión similar en la dirección opuesta, cuando se desconectó la batería. Este, por supuesto, fue el primer experimento que había realizado haciendo intervenir una corriente *cambiante*, y lo siguió con una demostración de que un campo magnético en *movimiento*, o bien, una bobina en movimiento también podría producir una deflexión en el galvanómetro.

En términos de campos, ahora se dice que un campo magnético que varía con el tiempo produce una *fuerza electromotriz* que puede establecer una corriente en un circuito cerrado adecuado. Una fuerza electromotriz es simplemente un voltaje que surge de los

conductores en movimiento, en un campo magnético, o de campos magnéticos cambiantes.

Se acostumbra enunciar la ley de Faraday como:

$$\text{fem.} = - N \frac{d\phi_B}{dt}$$

El flujo magnético es el flujo que pasa a través de todas y cada una de las superficies cuyo perímetro es la trayectoria cerrada, y $d\phi_B/dt$ es la rapidez de cambio respecto al tiempo de este flujo. El signo negativo indica que la fem. tiene tal dirección como para producir una corriente cuyo flujo, si se sumara al flujo original, reduciría la magnitud de la fem. Esta afirmación de que el voltaje inducido actúa para producir un flujo en oposición se conoce como la *ley de Lenz*. Se expresa la ley de inducción de Faraday en su forma diferencial como:

$$\int \mathbf{E} \cdot d\mathbf{L} = - \iint_S \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}.$$

Lo que muestra que un campo magnético que cambia con el tiempo produce un campo eléctrico. Así, se ha usado la ley experimental de Faraday para obtener una de las ecuaciones de Maxwell, en su forma puntual:

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$$

En resumen Faraday, encontró que una aguja se magnetiza por el pulso de corriente inducida y que puede ser magnetizada en sentido opuesto cuando el circuito primario es desconectado. Esto es consecuencia de la fuerza que un campo magnético ejerce sobre una carga en movimiento. Si imaginamos un circuito moviéndose en un campo magnético producido por una corriente uniforme y suponemos que una carga se mueve en el circuito,

podemos definir a la fuerza electromotriz como la cantidad proporcional al trabajo que se hace para mover la carga en cuestión a lo largo del circuito. Si la resistencia del circuito es R , la fuerza electromotriz E hará circular una corriente I en el circuito de acuerdo con la ley de Ohm $I = E/R$. Esto indica que la fuerza electromotriz esta íntimamente relacionada con la diferencia de potencial definida en párrafos anteriores. Así, la fuerza electromotriz es proporcional a la variación temporal del flujo de campo magnético que ocurre al desplazarse el circuito. (Fig.II.3).

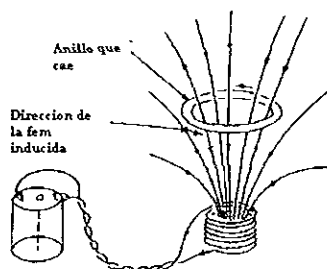


Fig.II.3 A medida que el anillo cae, el flujo a través del anillo crece Según la ley de Lenz.

La fuerza electromotriz inducida seguirá la dirección de las flechas

Puede ocurrir que el circuito se agrande, cambie de forma, etc., dando lugar a que cambie el flujo y por lo tanto se origine una fuerza electromotriz ¿Qué dirección sigue la corriente en el circuito? Lenz aplicó el principio, basado en la ley de la conservación de la energía, de que un sistema físico tiende a oponerse a cambiar del estado en que se encuentra. De esta manera, si sucede que el flujo que pasa por un circuito aumenta con el tiempo, aparecerá un nuevo flujo en dirección opuesta producido por una corriente en el

circuito. Como la dirección de la corriente y el campo magnético están relacionadas, se puede obtener la dirección de la corriente conociendo la dirección del flujo.

Así, se tiene que, al mover un circuito en un campo magnético, la fuerza electromotriz inducida genera una nueva corriente eléctrica en el circuito, que es proporcional al flujo del campo magnético. Faraday demostró que lo mismo ocurre cuando se varía la corriente y el circuito se mantiene en reposo, en lugar de mantener constante la corriente que genera el campo magnético en donde se mueve el circuito. Estas dos situaciones son equivalentes y a partir de ellas podemos enunciar la ley de inducción, en forma general, como sigue:

“La fuerza electromotriz inducida en un circuito es proporcional a la variación temporal del flujo del campo magnético que rodea al circuito”.

Como la fuerza electromotriz se relaciona con el campo eléctrico, la ley establece una relación entre el campo eléctrico en una trayectoria cerrada y la razón de cambio temporal del campo magnético (fig.11.3). Esta ley es una razón fundamental que nos muestra cómo se induce un campo eléctrico al variar el campo magnético. Como no existen monopolos magnéticos, no habrá corrientes magnéticas que induzcan un campo eléctrico.

11.1.4 -LEY DE AMPERE – MAXWELL-

El hecho experimental con el que se relaciona esta ley es la producción de campos magnéticos cuando circula una corriente; este descubrimiento debido a Oersted, conmocionó al mundo científico. Ampere descubrió más tarde que si una corriente eléctrica estacionaria circula por un alambre y trazamos una trayectoria cerrada alrededor del

alambre, entonces el producto del campo magnético originado por la corriente, por la longitud de esta trayectoria, es proporcional a la corriente. El resultado llevó a Ampere a proponer que el magnetismo en la materia es causado por corrientes de electrones en sus orbitas. Primero se debe examinar la forma puntual de la ley del circuito de Ampere, como se aplica a los campos magnéticos estables:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

Por cierto tiempo se creyó que sólo la corriente eléctrica generaba un campo magnético. Sin embargo, faltaba un elemento que el genio de Maxwell aportó. Su razonamiento fue el siguiente. Como la carga eléctrica esta compuesta de cargas en movimiento y la carga no se crea ni se destruye, la llamada ecuación de continuidad establece que si la carga varía con el tiempo en un punto del espacio, existe una fuente o sumidero de corriente en ese punto. Recordemos que la ley de Ampere es válida para corrientes estacionarias que no varían con el tiempo. Supongamos ahora que tenemos una distribución de cargas que varían con el tiempo. Se debe entonces agregar un término a la ley de Ampere. Este término proviene del hecho de que al variar un campo eléctrico se origina un campo magnético. En ausencia de corriente eléctrica éste debería ser el único efecto que generara un campo magnético

En su forma diferencial:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{L} = \mathbf{I} + \iint_S \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s}$$

Por lo tanto, la ley del circuito de Ampere en la forma puntual, queda:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$$

La ecuación anterior no se ha deducido. Simplemente es una forma, que se ha obtenido, que no está en desacuerdo con la ecuación de continuidad. Ahora se tiene la última de las ecuaciones de Maxwell, el término adicional $\partial \mathbf{D} / \partial t$ tiene las dimensiones de densidad de corriente, amperes por metro cuadrado. Ya que resulta a partir de una densidad de flujo eléctrico que varía con el tiempo (o densidad de desplazamiento). Maxwell la llamó densidad de la corriente de desplazamiento.

Notemos que el caso es análogo a lo que sucede en la ley de Faraday y que al agregar este término Maxwell hizo simétricas las ecuaciones (fig.1.7). ¿Por qué Faraday no notó este efecto en sus experimentos? Esto se debe a que en cualquier aparato en el cual varía el campo eléctrico, éste lo hace en forma muy lenta. Para hallar el efecto se necesita que el campo cambie rápidamente, tan rápidamente como el tiempo que la luz tarda en cruzar el aparato, o sea tiempos pequeñísimos. Usando microondas, Hertz comprobó la existencia de este efecto predicho por Maxwell

Por lo tanto, se puede enunciar la ley como sigue:

“La razón de variación temporal del campo eléctrico más la corriente estacionaria producida por cargas en movimiento es proporcional al campo magnético a lo largo de una trayectoria cerrada”.

Así, se han presentado las cuatro leyes fundamentales del electromagnetismo.

-CAPITULO III-

-EL ELECTROMAGÉTISMO Y SUS APLICACIONES-

III.1-GENERALIDADES-

Podemos decir que la revolución que está sufriendo el mundo en el campo tecnológico y que afectará sin duda toda la vida cultural, política y social de lo que resta del siglo y del subsiguiente, es producto en gran medida del avance de la física. Esto se ve de manera particular en el desarrollo de la microelectrónica y de otras áreas de alta tecnología que utilizan los principios del electromagnetismo en el diseño de aparatos y sistemas de información, medición, etc. Asimismo, la creación de nuevos materiales y su aplicación se basa en gran medida en el conocimiento logrado en el electromagnetismo y la mecánica cuántica.

Por supuesto que el magnetismo halló aplicación desde el siglo pasado. El teléfono y el telégrafo alrededor de 1880 eran aparatos activados por baterías y, basados en el descubrimiento de Oersted, las grandes aplicaciones a la ingeniería de la inducción electromagnética son el motor eléctrico y el dínamo. El mismo Henry, codescubridor de la inducción electromagnética, había construido un motor en 1831 y diseñado juguetes primitivos. Edison inventó un generador bipolar en 1878, un año antes de inventar el filamento de luz eléctrico. El hecho de que hubiera un generador de potencia hizo que el uso de la luz eléctrica se difundiera rápidamente. Con el experimento de Hertz se sentaron las bases para la transmisión inalámbrica de ondas de radio. De la misma forma, aparatos

como la radio y la televisión utilizan muchos de los conocimientos que sobre electromagnetismo se generaron en las primeras decenas del siglo XX.

Las aplicaciones que se realizan en la actualidad son variadísimas y la ciencia del magnetismo se ha vuelto central en nuestra tecnología como medio ideal de almacenamiento de datos en cintas magnéticas, discos magnéticos y burbujas magnéticas. Además, se empieza a aplicar en la medicina. Como ya se menciona, el desarrollo de nuevos materiales y su aplicación a modernas tecnologías es uno de los dinamos que mueven a la sociedad industrial representada por los países desarrollados, ya que poseen un gran acervo de conocimientos para obtener un considerable avance en el campo. En cuanto a los países subdesarrollados el gran desafío consiste en utilizar en forma óptima los escasos recursos (sobre todo humanos) que se tienen para no quedar a la zaga de esta explosión científica y tecnológica.

A continuación se presenta en forma selectiva algunos de los usos del magnetismo en diversas áreas. Esta descripción no pretende cubrir todos los temas de aplicación del magnetismo, ni mucho menos asegurar que los temas que se tratan están desarrollados exhaustivamente. Sólo se presentara un panorama de las inmensas posibilidades que en este campo existen cuando la ciencia y la tecnología se conjugan en forma imaginativa. Para esto examinaremos el área de nuevos materiales magnéticos sólidos, los ferrofluidos, la tecnología en informática basada en el magnetismo la resonancia magnética nuclear en la medicina y el efecto de campos magnéticos en tecnología nuclear.

III.1.1 -ALEACIONES Y COMPUESTOS CRISTALINOS-

Una de las ramas importantes del magnetismo se ocupa de los efectos que influyen en la estructura y formación de dominios magnéticos tanto en *bulto* como en *películas delgadas*. En forma específica, del comportamiento de materiales magnéticos granulares que no contengan dominios, sino que sean dominios únicos. Esto es muy importante, ya que sus propiedades son más fáciles de entender. Cuando se dice que un material es magnéticamente duro significa que las partículas que lo componen son *muy anisotrópicas* y, por lo tanto, que su rotación se dificulta. De esta manera, una gran cantidad de materiales como rocas, magnetita, etc., han sido investigados y utilizados sobre todo en medios de grabación magnética.

Existe un gran interés por estudiar aleaciones compuestas por materiales magnetoelásticos especiales que tengan aplicaciones en sellos metalo-vidriosos, tubos de guía de onda, etc. La cancelación que ocurre entre la expansión térmica positiva de la mayoría de los materiales y la contribución magnética negativa origina que en aleaciones llamadas invar (como fierro-níquel) la expansión térmica sea casi nula. Otras aleaciones como níquel-platino, que es cristalina, y fierro-boro, que es amorfo, muestran una gran potencialidad para aplicaciones como las arriba mencionadas.

Otra aplicación de aleaciones magnéticas amorfas proviene de que se necesitan de materiales magnéticos a los que se les pueda cambiar su dirección de magnetización con poco gasto de energía. Estos materiales encuentran su uso en transformadores y se necesitan para minimizar pérdidas por calor. En aleaciones magnéticas producidas por templado rápido y de composición fierro-níquel-metaloide (como silicio, bario, etc.) se

minimiza la formación de anisotropías de los dominios magnéticos y el material es magnéticamente más suave.

El llamado mérito de un imán permanente está en relación con la intensidad de su magnetización permanente. El obtener aleaciones permanentes de, por ejemplo, hierro-neodimio-boro, ya sea por templado rápido o por técnicas menos sofisticadas, ha permitido nuevas aplicaciones. La extrema dureza de estos materiales tiene su origen en la estructura cristalina tetragonal, la cual aumenta la anisotropía magnética. La aplicación de estos materiales aún no ha sido evaluada completamente.

Transductores que transformen movimientos mecánicos en señales eléctricas son fundamentales para la industria moderna. Los transductores basados en el magnetismo utilizan el hecho de que al aplicar un esfuerzo las propiedades magnéticas del material utilizado como transductor varían en forma proporcional. A esto se le conoce como magnetostricción.

De lo anteriormente expuesto es claro que la búsqueda de materiales magnéticos con propiedades específicas para cientos de aplicaciones está en pleno auge (prueba de ello es la frenética actividad en el campo de materiales superconductores de alta temperatura crítica). Sin lugar a duda la computadora ayudará al diseño y estudio de materiales sólidos con un comportamiento extremo.

III.1.2 -FERROFLUIDOS-

La idea de crear un fluido coloidal con propiedades ferromagnéticas surgió en los años sesenta. Estos fluidos consisten en partículas finamente divididas de magnetita o cobalto suspendidos en un medio aceitoso, como el kerosene (fig.III 1).



Fig.III.1 *Partículas de cobalto para ferrofluidos.*

Para evitar que estas partículas se unan y el coloide se coagule, se adiciona un tensoactivo o agente dispersante como el ácido oleico. Las partículas deben ser pequeñas, del orden de 100 Angstroms. Estas partículas rodeadas de tensoactivo interactúan entre sí como si fueran esferas duras que llevaran un dipolo magnético. De esta forma el coloide tiene propiedades muy interesantes cuando se le coloca en un campo magnético (fig.III 2).

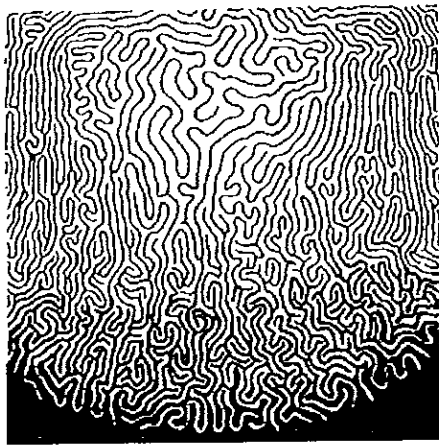


Fig III.2. Se forman patrones muy complejos cuando a un líquido magnético (oscuro) y uno no magnético (blanco) se les aplica un campo magnético horizontal.

Este coloide, además de poseer las formas de energía inherentes a todo flujo: energía de presión, energía cinética y energía gravitacional, tiene una energía ferromagnética al interactuar con un campo magnético. La suma de estas energías es constante, según lo demostró Bernoulli en 1738. El juego de todas estas energías permite una serie de útiles aplicaciones (fig.III.3). Por ejemplo, la interacción entre magnetismo y presión puede ser utilizada para diseñar un tapón magnético en un tubo que une los recipientes con gas a distintas presiones. Un tapón hecho con fluido normal se movería hasta que las presiones quedaran equilibradas. Un ferrofluido se mantiene en su posición enfocando un campo magnético, ya que si el tapón se mueve un poco hacia la región de baja energía, la fuerza magnética lo detendrá. Al ser la energía cinética y gravitacional constantes, el decremento de la energía debido a la presión deben ser compensado por un aumento de energía magnética y viceversa. Estos sellos se utilizan cuando un eje rotante debe pasar por un compartimento herméticamente cerrado. Ésta fue la primera aplicación de los ferrofluidos y

posteriormente ha sido aplicada a láseres de gas. También se han diseñado sellos en etapas múltiples, que pueden resistir presiones 60 veces mayores a la atmosférica.

Una variante del sello ferrofluido de presión se ha empleado en el diseño de bocinas. En la mayoría de éstas el elemento más importante es una bobina cilíndrica, ajustada a un magneto permanente con un hueco que le permite moverse. El calor producido en el alambre puede ser disipado mejor si se coloca un líquido en el hueco en lugar de aire. Un fluido ferromagnético no se caerá, pues el campo magnético lo sostendrá.

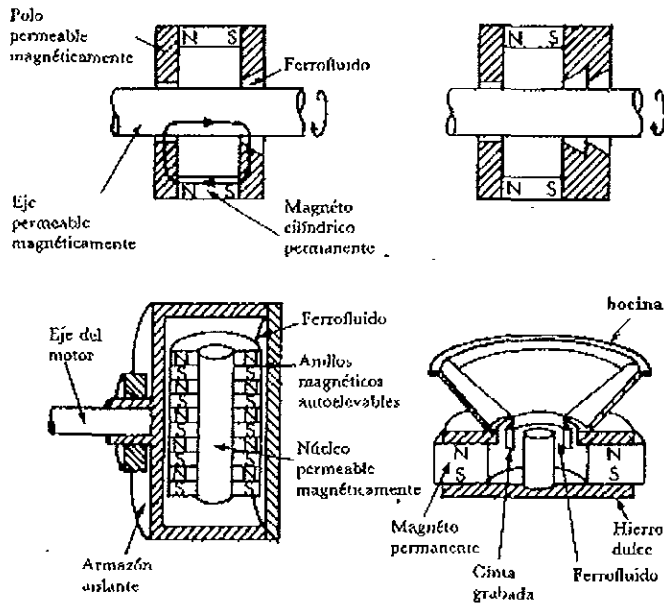


Fig.III.3 Aplicaciones de ferrofluidos.

Otra de las aplicaciones importantes de los ferrofluidos es su utilización en procesos de separación de materiales que difieren en su densidad. Los métodos ordinarios de

separación utilizan líquidos pesados, pero son tóxicos y no pueden flotar sustancias de alta densidad. La levitación magnética puede hacerlo y de hecho se usa para levitar partes no ferrosas de autos, en la incineración de desperdicios sólidos, etc. Si uno coloca una esfera no magnética dentro de un ferrofluido menos denso, ésta se irá al fondo. Sin embargo, al colocar los polos iguales de dos imanes arriba y abajo del ferrofluido respectivamente, la esfera sube hacia el centro del recipiente que contiene el ferrofluido y allí se queda. Esto se debe a que la suma de la energía magnética y de presión es constante. Una variante del sistema es la levitación de un objeto magnético. Aquí el campo es proporcionado por el objeto mismo. Recientes aplicaciones de esto incluyen la separación de diamantes de la arena y la guía de taladros de perforación petrolera con un acelerador subterráneo en el cual la masa sensible es levitada en un ferrofluido.

Los ferrofluidos también han hallado aplicación en impresión de tinta por chorro, control de carátulas alfanuméricas, etc. El desarrollo potencial de una máquina magnetocalórica que utilice como fluido de trabajo un ferrofluido es una fascinante posibilidad.

III.2.1 -EFECTO DE CAMPOS MAGNETICOS EN METALES LÍQUIDOS-

En la tecnología nuclear, los reactores de cría juegan un papel muy importante para la producción de energía, sobre todo en países como Francia y Alemania. Estos reactores se llaman así por que al operar producen más combustible nuclear del que usan y lógicamente esto es una gran ventaja de su operación. Para enfriar estos reactores se utilizan metales líquidos. Esto incidirá en el diseño del reactor pues, dados los campos magnéticos presentes en el mismo, el flujo del metal puede seguir patrones sorprendentes. De esta manera se estudian el flujo y el comportamiento de metales líquidos en tuberías de distintas secciones transversales, sean cilíndricas o rectangulares, rodeadas de campos magnéticos de intensidad variable. Los patrones de flujo afectan la razón de transferencia de calor, presión, etc.

III.2.2 -RESONANCIA MAGNÉTICA NUCLEAR-

Si un núcleo atómico que posee espín es colocado en un campo magnético fuerte, su momento magnético precesa alrededor de la dirección del campo. La componente del momento en el eje definido por el campo está cuantizada, o sea, toma solamente valores discretos. De esta manera, sólo ciertas energías son permitidas. Al pasar de un estado de energía a otro el núcleo radía a ciertas frecuencias. En 1946, Purcell y Bloch desarrollaron la Resonancia Magnética Nuclear (RMN) aprovechando este hecho. Esos investigadores utilizaron un transmisor de radiofrecuencia para producir un campo electromagnético oscilante que induce transiciones entre los diversos niveles de energía de los núcleos de una muestra. Esto ocurre cuando, por un efecto de resonancia, la frecuencia del campo oscilante

igual a la frecuencia de transición entre estos niveles (frecuencia de Larmor), la cual depende tanto del momento magnético de núcleo como del campo magnético en el núcleo.

Al incidir el campo oscilante, la muestra absorbe energía del mismo y un gran número de núcleos se encuentran en niveles de energía más alta que en su estado de equilibrio. El sistema tiende a regresar a estados de energía más baja, no sólo emitiendo radiación, sino por medios de procesos de relajamiento no radioactivos.

Esto significa en términos semiclásicos que la precisión tiende a decaer. Cuando esto sucede, la fuerza electromotriz inducida produce una señal que es amplificada y detectada. Para obtener información de la posición espacial de las partes de la muestra, el campo aplicado debe poseer un gradiente que dé origen a una modulación de la frecuencia de respuesta. Al variar el gradiente se genera la respuesta como función del vector de onda de la señal RMN en dos o tres dimensiones. Al transformar esta señal al espacio real se obtienen imágenes. Un esquema de un aparato para RMN se muestra en la fig.III.4.

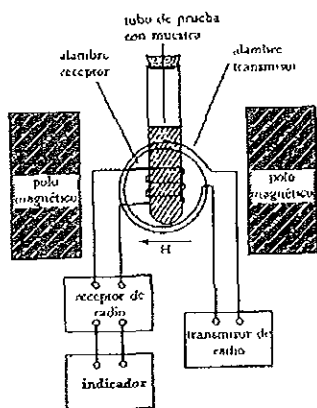


Fig.III.4 *Aparato simplificado para el experimento básico de resonancia magnética nuclear.*

Ahora bien, los tejidos tienen la misma densidad de hidrógeno, que es el núcleo al cual se aplica la RMN. Por lo tanto, no se obtendría mucha información si los tiempos de relajamiento de la señal no dependieran de otros factores. Se ha encontrado, sin embargo, que estos tiempos dependen de factores químicos y físicos que varían de tejido a tejido. Existen de hecho dos tiempos de relajamiento. El primero llamado T_1 , está relacionado con el restablecimiento del equilibrio térmico de los espines excitados con el resto del cuerpo. El segundo, T_2 , que es más pequeño, se relaciona con procesos que contribuyen a la pérdida de coherencia de fase entre los diversos espines del sistema. Seleccionando secuencias de pulso de excitación y escogiendo tiempos de relajamiento adecuados, se puede modular la intensidad de la señal RMN que depende de estos factores físicos y químicos y así obtener información invaluable. Parece factible que se puedan observar cambios en el medio químico del tejido, con lo que se puede obtener información acerca de procesos metabólicos. De esta forma la señal RMN permite estudiar tejidos desde diversos puntos de vista. Esto complementa otras técnicas radiográficas, la tomografía computarizada es muy sensible a detalles de morfología, aunque no hace distinciones entre un sujeto vivo o un cadáver. La RMN será vital en el futuro para estudiar la fisiología y las propiedades funcionales del cuerpo humano. Otra de sus incipientes aplicaciones es el estudio del flujo de fluidos en rocas porosas, conocimiento vital en la recuperación terciaria de petróleo. Es previsible que el costo de los aparatos de RMN disminuya con el advenimiento de materiales superconductores de alta temperatura crítica.

III.3.1 -TECNOLOGÍA DE INFORMACIÓN MAGNÉTICA-

Indudablemente ésta es la aplicación donde el magnetismo ha permitido un desarrollo mayor y más impresionante, ya que ha creado una industria millonaria, la cual crece a un ritmo del 20 % anual. Su potencial es tan grande que desafía la imaginación, y lo hecho hasta ahora parece ser sólo el principio. La tecnología de información magnética incluye tres campos: grabación magnética, grabación optomagnética y burbujas magnéticas.

III.3.2 -GRABACIÓN MAGNÉTICA-

El almacenamiento de información vía grabación magnética se realiza en cintas magnéticas, discos flexibles (*floppy disks*) y discos duros. Una cabeza de grabación convencional consiste en un material magnético de alta permeabilidad alrededor del cual pasa una corriente por un alambre. El campo magnético en la brecha magnetiza el medio magnético en dirección del campo. Cambiando la dirección de la corriente se pueden magnetizar diferentes regiones del medio en direcciones opuestas y por lo tanto se tiene un código de información binario. Para leer esta información se mueven la cabeza y el medio en relación una al otro y al interceptar la cabeza al campo magnético del medio se generan pulsos eléctricos por la *ley de Lenz*. En todos los medios de grabación todos los parámetros importantes son la densidad de información, la razón de transferencia de datos y, por supuesto, el costo. Entre los factores que limitan estos parámetros, especialmente el primero, está la interacción entre la cabeza y el medio. Esto se debe a que el campo magnético no puede ser enfocado y, por lo tanto, para aumentar la densidad de grabación se necesita acercar la cabeza al medio, causando problemas graves. Para subsanar estos

problemas se han usado partículas alargadas de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$. Para mejorar todavía más la grabación se incluyen partículas de óxido de cromo o cobalto. (Fig.III.5) Como la grabación longitudinal ordinaria produce también magnetización no uniforme con componentes perpendiculares al medio, ya sea cinta o disco, los japoneses han tratado de diseñar medios que puedan ser grabados perpendicularmente. Se han usado partículas de cobalto-cromo fabricadas por chisporroteo, lo cual produce cristales hexagonales ricos en cobalto, perpendiculares a la película. No se sabe si estos materiales son dominios o partículas. (fig.III.6)

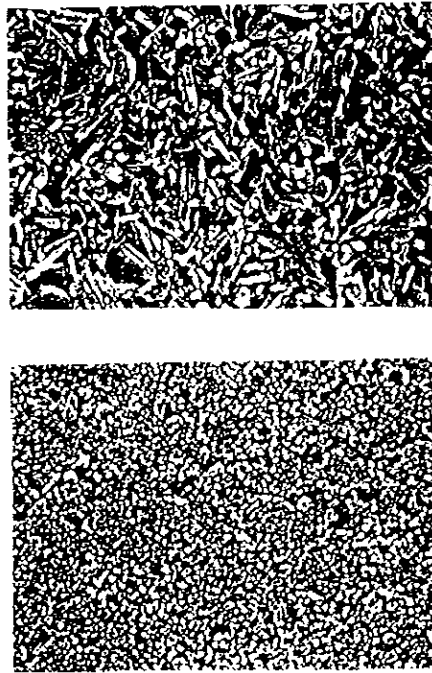


Fig.III.5 Partículas en una cinta magnética. En la foto superior son partículas de $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ en forma de aguja en un disco flexible. En la inferior son partículas magnéticas isotrópicas en una cinta.

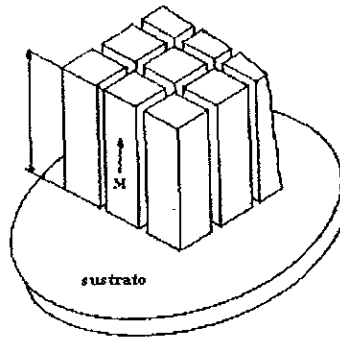


Fig.III.6 Un modelo de columnas para películas de Co-Cr.

III.3.3 -GRABACIÓN OPTOMAGNÉTICA-

En este sistema la lectura y grabación se hacen con un rayo láser. El sistema es mecánicamente simple y la densidad de información está limitada por la longitud de onda del láser. Para grabar, un rayo de luz láser incide sobre una delgada película magnética. El láser calienta una región y alinea su momento magnético con un campo magnético aplicado. Para leer la información se usa luz de menor intensidad que la utilizada para escribir. Cuando la luz pasa por el material, su plano de polarización gira debido al efecto Faraday. La dirección de rotación depende de la dirección de magnetización del material y de esta forma, usando un polarizador, uno puede transformar rotaciones en direcciones distintas en diferencias de intensidad. Como materiales magnetoópticos se utilizan aleaciones amorfas de tierras raras y metales. Como ya se mencionó, estos materiales son nuevos y se requiere de mucha investigación para entenderlos.

III.3.4 -TECNOLOGÍA DE BURBUJAS MAGNÉTICAS-

Las memorias de burbujas magnéticas pueden representarse como pequeños dominios móviles cuya polaridad es contraria a la de sus alrededores.

La presencia o ausencia de una burbuja puede ser interpretada como un código binario. Estas memorias son ventajosas con respecto a otros sistemas de grabación en tiempos de acceso, costo y confiabilidad. Las memorias de burbujas son microestructuras, de cerca de una micra, de una aleación níquel-hierro producidas litográficamente en películas de gránate. Fig.III.7.

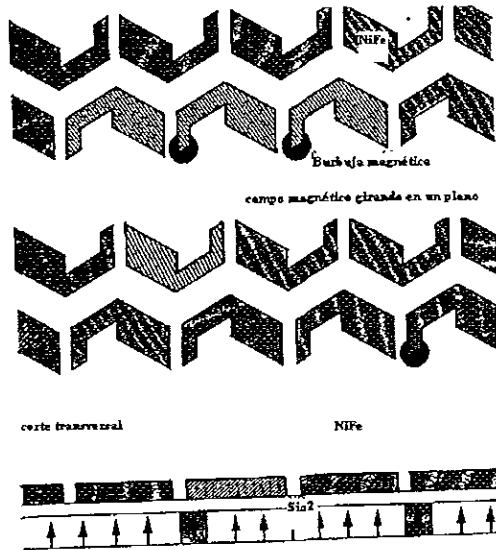


Fig. III.7 En presencia de un campo magnético rotante, estas estructuras prefabricadas de una aleación níquel-hierro hacen que se muevan las burbujas magnéticas en películas de gránate.

Un campo magnético rotante aplicado en el plano de la película induce polos magnéticos en galones asimétricos de la aleación y de esta manera el dominio de la burbuja se propaga. Tal vez en el futuro la implantación de iones pueda sustituir a la aleación. Hay que subrayar que esta tecnología ha sido acaparada prácticamente por los japoneses. Aparte de usar un campo magnético para propagar las burbujas, se pueden usar corrientes en planos conductores para producir el campo. El desarrollo de materiales de densidades grandísimas ha generado la investigación de las llamadas líneas de Bloch, que son recodos en las paredes de los dominios de las burbujas. Se cree que se podrían almacenar densidades de información de 10^9 bits/cm², siendo el bit la unidad de información. Se piensa también que materiales amorfos pueden soportar burbujas de centésimas de micra y no se sabe hasta donde se puede llegar. El tiempo de acceso se aproximará a 400 megabits/seg.

Este somero examen muestra el efecto brutal que las nuevas tecnologías basadas en el uso del electromagnetismo tienen y tendrán en el mundo moderno. Entre otras cosas, el control de la fusión nuclear se basa en gran medida en un conocimiento profundo del campo magnético. Sin duda presenciaremos una revolución que tendrá un efecto mayor que la Revolución Industrial y cuyas consecuencias nadie puede prever. El humilde comienzo del magnetismo como ciencia ha desembocado hoy en un torrente de conocimiento que la humanidad debe saber controlar.

-CAPITULO IV-

-TRANSDUCTORES Y ACTUADORES (SENSORES)-

IV.1-GENERALIDADES-

Muchos dispositivos sensores y diversos elementos de los dispositivos de análisis, son realmente transductores. Un transductor es, simplemente, un dispositivo que proporciona una salida utilizable en respuesta a una magnitud física, propiedad o condición específica que se desea medir, pero los transductores han sido, son y probablemente siempre serán denominados por diferentes nombres en diferentes disciplinas técnicas. En los procesos industriales son denominados usualmente transmisores (por ejemplo transmisores de presión, transmisor de temperatura, etc.). En algunos casos se denominan sensores (sensores de presión, sensores de fuerza, sensores de temperatura, etc.). En algunos campos, sobre todo en el área de los dispositivos electroópticos se denominan detectores. En algún momento la palabra "célula" se hizo popular para ciertos transductores; el termino "célula de carga", que significa transductor de fuerza, es aun muy popular. Muchos de nosotros pensamos en una "galga" como un indicador de tipo de disco graduado; sin embargo, muchos transductores son denominados "galgas". Algunos transductores, particularmente cuando son de tamaño pequeño, ocasionalmente todavía son denominados "captadores" (por ejemplo, captadores de vibración). Los transductores que tienen configuraciones capaces de ser inmersas en un fluido son denominados frecuentemente "sondas" (por ejemplo, un transductor de temperatura del tipo sonda se denomina frecuentemente "sonda de temperatura").

Aún se utilizan muchas indicaciones de transductores utilizando la terminación "metro": por ejemplo, "acelerómetro" por transductor de aceleración, "caudalímetro" por transductor de caudal, "tacómetro" por transductor de velocidad angular, etc.

IV.1.2 -PRINCIPIOS DE TRANSDUCCIÓN-

El diseño y operatividad, incluyendo los principios de transducción de los transductores típicos, es organizado por magnitudes. Los principios de transducción más comúnmente utilizados se describen a continuación.

Algunos elementos de transducción básicos, son tales que no requieren una excitación externa (transducción electromagnética, piezoeléctrica, fotovoltaica y termoelectrica). Estos elementos de transducción se conocen como *autogeneradores o activos*.

- Los elementos de transducción *capacitiva* convierten un cambio de la magnitud a medir en un cambio de capacidad (fig.IV.1). Dado que un condensador consiste básicamente en dos electrodos separados por un dieléctrico, el cambio de capacidad puede ocasionarse por el movimiento de uno de los electrodos, acercándose o alejándose del otro electrodo o mediante cambios en el dieléctrico situado entre los dos electrodos fijos

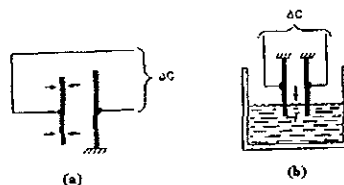


Fig. IV.1 Transducción capacitiva. a) Armaduras móviles, dieléctrico constante; b) Armaduras fijas, dieléctrico variable.

- Los elementos de transducción *inductiva* convierten un cambio de la magnitud en un cambio de la autoinductancia de un devanado único (fig.IV.2). Los cambios de inductancia pueden efectuarse mediante el movimiento de un núcleo ferromagnético interior al devanado o mediante cambios de flujo introducidos externamente en un devanado con un núcleo fijo.

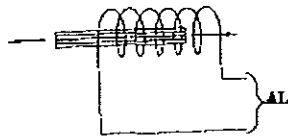


Fig.IV.2 Transducción Inductiva.

- Los elementos de transducción *reluctiva* (fig. IV.3) convierten un cambio de la magnitud en un cambio de tensión c.a. debido al cambio en la reluctancia del camino magnético entre dos o más devanados (o porciones separadas de uno o más devanados), con una excitación c.a. aplicada al sistema de devanados. Esta categoría incluye los elementos de "reluctancia variable", "transformador diferencial" y "puente de inductancias". El cambio en la reluctancia del camino magnético se realiza, usualmente, mediante el movimiento de un núcleo magnético interior al sistema de devanado.
- Los elementos de transducción *electromagnética* convierten un cambio de la magnitud a medir en una fuerza electromotriz (tensión de salida) inducida en un conductor debido a un cambio en el flujo magnético en ausencia de excitación (fig.IV.4). El cambio en el flujo magnético se realiza usualmente en un movimiento relativo entre un electromagneto y un imán o una porción de material magnético.

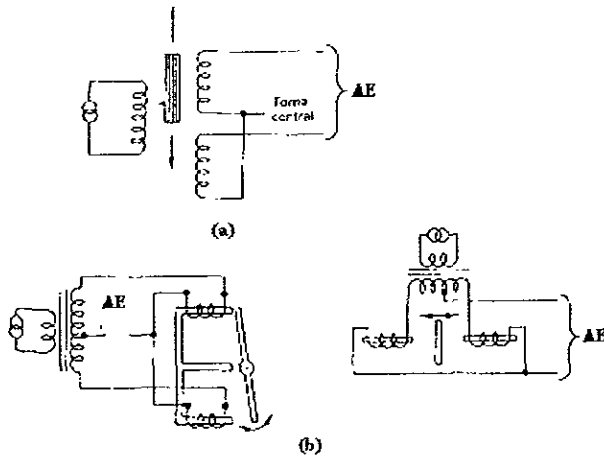


Fig.IV.3 Transducción reluctiva: a) transformador diferencial; b) Puentes de inductancias (reluctancia variable).

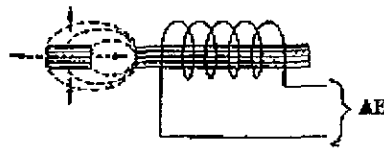


Fig.IV.4 Transducción Electromagnética.

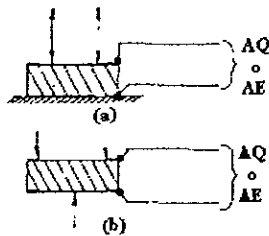


Fig.IV.5 Transducción Piezoeléctrica a) compresión, tensión; b) curvatura.

- Los elementos de transducción *piezoeléctrica* (fig.IV.5) convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la carga electrostática (Q) o tensión (E) generada por ciertos materiales cuando se encuentran sometidos a un esfuerzo mecánico. El esfuerzo se desarrolla mecánicamente, mediante fuerzas de tensión o compresión, o por fuerzas de cortadura ejercidas directamente sobre el material (el cristal) por un elemento sensor o por un elemento de enlace mecánico ligado al elemento sensor.
- Los elementos de transducción *resistiva* convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la resistencia (fig.IV.6). Los cambios de resistencia pueden realizarse en los conductores así como en los semiconductores por diversos medios, como calentamiento o enfriamiento, aplicación de esfuerzos mecánicos (para utilizar el efecto *piezoresistivo*), por humidificación o deshumidificación de ciertas sales electrolíticas o por movimientos en el brazo de la escobilla de un reóstato.

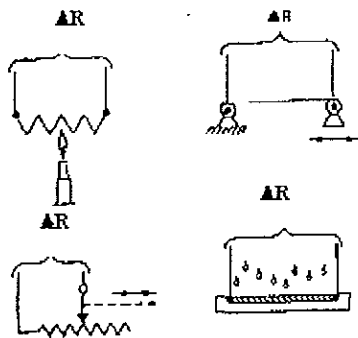


Fig.IV.6 Transducción Resistiva.

- Los elementos de transducción *potenciométrica* convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la relación de tensiones, mediante un cambio en la posición de un contacto móvil (escobilla) sobre un elemento resistivo en cuyos bordes se ha aplicado una excitación (fig.IV.7). La relación dada por la posición de la escobilla es básicamente una relación de resistencias

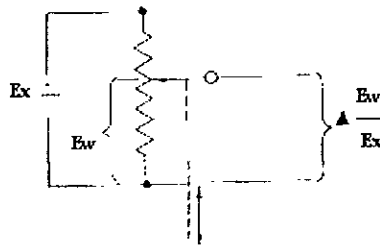


Fig.IV.7 Transducción Potenciométrica.

- Los elementos de transducción por *galgas extensométricas* convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio de resistencia debido a una deformación, en dos o cuatro brazos de un puente de Wheatstone. Este principio de transducción es una versión especial de transducción resistiva; sin embargo, se compone de dos o cuatro transductores de esfuerzo resistivo (galgas extensométricas) conectados a un circuito en puente de Wheatstone al que se le aplica una extensión de excitación, de manera que la salida es un cambio de tensión (fig.IV.8). Las flechas dirigidas hacia arriba en la ilustración indican aumentos de resistencia y las flechas dirigidas hacia abajo indican disminución de resistencia en los brazos del puente cuando se está afectando simultáneamente (en un puente de cuatro elementos activos) a las sondas en un cambio de la magnitud a medir debido a la colocación y conexión de los elementos resistivos

individuales; en el ejemplo ilustrado las direcciones indicadas de variación de resistencias ocurren cuando el enlace sensor se mueve hacia la izquierda.

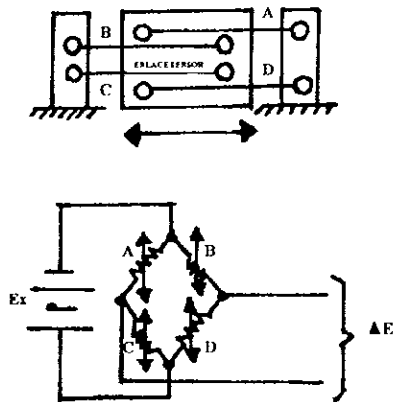


Fig.IV.8 Transducción por Galga Extensométrica.

- Los elementos de transducción *fotoductora* convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio de la resistencia (o conductancia) de un material semiconductor debido a un cambio en la cantidad de iluminación incidente sobre el material (fig. IV.9).

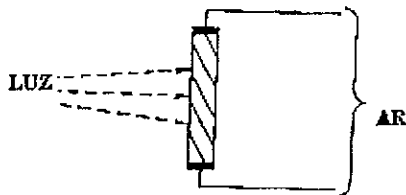


Fig.IV.9 Transducción Fotoconductora

- Los elementos de transducción *fotovoltaica* convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la tensión generada cuando la iluminación incidente sobre una unión entre ciertos materiales distintos cambia (fig.IV 10).
- Los elementos de transducción *termoeléctrica* convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la fuerza electromotriz (fem) generada por la diferencia de temperaturas existente entre las uniones de dos materiales distintos seleccionados (debido al efecto Seebeck). El elemento termoeléctrico básico mostrado en la fig.IV.11 puede ir a las terminales de salida (en la que permanece una temperatura T_2) de un voltímetro.

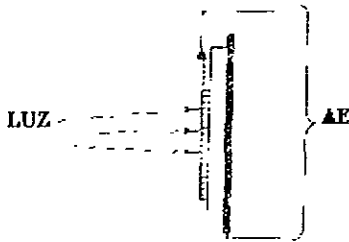


Fig IV.10 Transducción Fotovoltaica

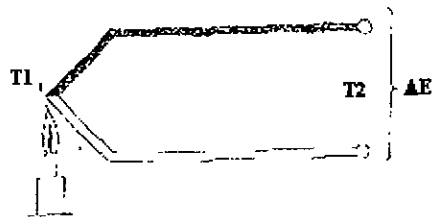


Fig.IV.11 Transducción Termoeléctrica.

- Los elementos de transducción por *ionización* convierten un cambio en la magnitud a medir en un cambio en la corriente de ionización, ejercida sobre un gas entre dos electrodos (fig.IV.12).

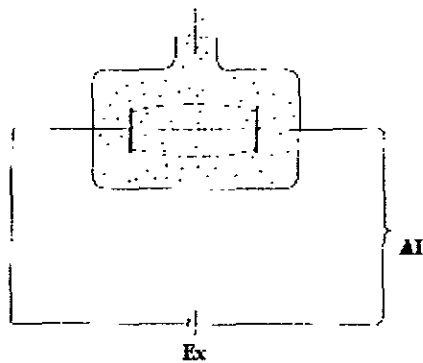


Fig.IV.12 *Transducción por Ionización*

La tabla IV.1 presenta un resumen de las características de los transductores, principios de operación e información detallada

TIPO DE TRANSDUCTOR Y PRINCIPIO DE OPERACIÓN	TIPO DE ENTRADA	ESCALA O NIVEL DE LA ENTRADA	CARACTERÍSTICAS DE IMPEDANCIA DE ENTRADA	SENSIBILIDAD DE LA ENTRADA	CARACTERÍSTICAS DE ERROR Y RUIDO
RESISTENCIA VARIABLE Movimiento de contacto en alambre deslizante también llamados potenciómetros de resistencia	Desplazamiento lineal o desplazamiento angular	No el mínimo desde 0.1% de la resistencia total	Varia mucho, dependiendo de las características de resistencia total y tamaño físico	Los potenciómetros comerciales pueden tener sensibilidades menores de 0.002 mV o 2° en medición angular	Desviación de no-linealidad del orden de 0.5% de la resistencia total. Por lo común el ruido es despreciable del orden de 10µV en el contacto. El ruido aumenta con la vibración del contacto.
TRANSFORMADOR DIFERENCIAL El transformador lineal diferencial variable, es el más usado, ya que convierte desplazamiento en voltaje.	Desplazamiento lineal	Escala total desde ± 0.005 a ± 3 in.	Depende del tamaño, por lo común se requieren fuerzas de 0.1 a 0.3 lb	0.5% de escala total de entrada	Desviación de la linealidad varía de 0.5%, por lo general exactitud de $\pm 1\%$
TRANSDUCTOR CAPACITIVO La distancia variable entre placas se registra como cambio de capacitancia	Desplazamiento o cambio en la constante dieléctrica entre placas, también cambio en el área de las placas	Muy amplio, desde 10 ⁻⁸ cm hasta varios metros	Las necesidades de fuerza de entrada son muy pequeñas del orden de unas pocas dinas	Altamente variable, pueden obtenerse sensibilidades del orden de 1 pF/0.0001 in. Para mediciones de espacio de desplazamiento	Pueden resultar errores por construcción mecánica despreciables, variaciones de humedad, ruido y capacitancia dispersa en conexiones de cables.
EFEECTO PIEZOELECTRICO Fuerza aplicada a cristales con distribuciones asimétricas de carga que producen una diferencia de potencial en la superficie del cristal	Fuerza o esfuerzo	Varia ampliamente con el material del cristal	Las necesidades de fuerza de entrada son relativamente grandes en comparación con otros transductores	Varia con el material: cuarzo 0.05 V m/N, sal de Rochelle 0.15 V m/N, titanato de bario 0.007 V m/N	Sujeto a efectos de histéresis y temperatura
EFEECTO FOTOELECTRICO La luz que incide en el cátodo metálico causa emisión de electrones que son atraídos por el ánodo para producir corriente eléctrica	Luz	La gama de longitudes de onda depende del material del tubo de vidrio, los materiales fotoemisivos responden entre 0.2 y 0.8 µm	No es aplicable	Tubos al vacío 0.002 - 0.1 µA/µW Tubos con gas 0.01 - 15 µA/µW	Depende del voltaje de placa pero es del orden de 10 ⁻⁸ A la temperatura ambiente

<p>TRANSDUCTOR FOTOCONDUCTIVO La luz que incide en un material semiconductor como el selenio, sulfuro, metales o germanio, produce una disminución de la resistencia del material</p>	<p>Luz</p>	<p>Muy amplia, desde radiación termica hasta rayos X</p>	<p>No es aplicable</p>	<p>Cerca de $10^3 \mu A/W$ a la sensibilidad maxima del dispositivo</p>	<p>Ruido muy bajo por lo general menor al del entorno asociado</p>
<p>CELDA FOTOVOLTAICA: La luz que incide en material semiconductor en contacto con una placa metálica produce un potencial</p>	<p>Luz</p>	<p>Depende del material selenio 0.2 - 0.7 μm CuO 0.5 - 1.4 μm germanio 1.0 - 1.7 μm</p>	<p>No es aplicable</p>	<p>1 mA/mm² o $10^{-7} W/cm^2$ - 1m</p>	<p>Ruido bajo</p>
<p>TRANSDUCTOR DE IONIZACIÓN: Desplazamiento convertido en voltaje por medio de un cambio en la capacitancia</p>	<p>Desplazamiento, 0.1 - 10 MHz frecuencia de excitación</p>	<p>Metros de 1 mm a varias in</p>	<p>Se requiere poca fuerza</p>	<p>1 - 10 V/mm</p>	<p>Puede ser evaeto hasta micropulgadas</p>
<p>MAGNETÓMETRO DE BOBINA EXPLORADORA El cambian campo magnético aplicado a la bobina genera una fem proporcional a la rapidez de cambio del campo en el tiempo</p>	<p>Campo magnético cambianete</p>	<p>10^{-3} Oersted a los valores optimbles mas altos</p>	<p>No es aplicable</p>	<p>Depende de las dimensiones de la bobina pero pueden ser del orden de 10^{-5} Oersted</p>	<p>Se han obtenido exactitudes de 0.05 %</p>
<p>TRANSDUCTOR DE EFECTO HALL. El campo magnético aplicado a una placa que lleva corriente eléctrica genera una diferencia de potencial en dirección perpendicular a la corriente y al campo magnético</p>	<p>Campo magnético</p>	<p>1 - 20000 gauss</p>	<p>No es aplicable</p>	<p>Depende del espesor de la placa y la corriente es del orden de $-1 \times 10^{-8} V/cm/A$ G para el bismuto</p>	<p>Puede calibrarse dentro del 1 %</p>

Continuación de la tabla IV.1:

RESPUESTA A LA FRECUENCIA	EFECTOS DE TEMPERATURA	TIPO DE SALIDA	ESCALA O NIVEL DE SALIDA	CARACTERÍSTICAS DE IMPEDANCIA DE SALIDA	APLICACIONES	OBSERVACIONES
Por lo general no más de 3Hz para los potenciómetros comerciales	0.002 - 0.15 % C ⁻¹ debido a cambio en resistencia también algunos efectos termoelectrónicos que dependen de los tipos de contactos usados	El voltaje o la corriente dependen del circuito de conexión	Amplio	Variable	Usado para mediciones de desplazamiento	Sencillo, barato, fácil de usar y disponible en muchos tipos
La frecuencia del voltaje aplicado debe ser 10 veces la de la respuesta deseada, también tiene limitaciones mecánicas	La pequeña influencia de la temperatura puede reducirse mediante un circuito a termistores	El voltaje es proporcional al desplazamiento de entrada	0.4 - 4.0 mV / 0.001 in/Vn de entrada, dependiendo de la frecuencia, menor frecuencia produce salida más baja	Principalmente resistivo, impedancia de baja a media, de 20Ω, depende del tamaño	Usado para medir desplazamientos	Sencillo, resistente, barato v de salida, alta requiere equipo accesorio simple. Debe tenerse cuidado de eliminar los campos magnéticos dispersos
Depende principalmente de la construcción mecánica, pero puede llegar hasta 50000 Hz	No son intensos si el diseño permite los efectos	Capacitancia	Por lo común entre 10 ⁻³ y 10 ⁻⁷ pF de cambio en la capacitancia sobre la escala de la salida	Por lo común, 10 ⁻³ - 10 ⁷ Ω	Desplazamiento, área nivel de líquido, presión, mediciones del nivel de sonido y otras. Particularmente útil donde solo hay fuerzas pequeñas para excitar al transductor.	La alta impedancia de salida puede requerir cuidadosa construcción de circuitos de salida
Depende de circuitos externos y del montaje mecánico con facilidad se obtienen 20 - 20 KHz, no hay respuesta a fuerzas en estado estacionario	Amplia variación de las propiedades los cristales con la temperatura	Voltaje proporcional a la fuerza de entrada	Amplio, depende del tamaño y del material del cristal, puede tener una salida de varios volts	Alta, del orden de 10 ³ MΩ	Medición de fuerza presión, nivel de sonido (uso en microfono)	Sencillo, barato y resistente
Lineal de 0 - 500 Hz, respuesta a corriente cae 15% a 10000 Hz	Por lo general no es operable arriba de 75 - 100 °C	Corriente	Del orden de 2 μA	Alta, del orden de 10 MΩ	Muy útil para conteos	Barato y de salida alta

El tiempo de elevación varía ampliamente con el material y la radiación incidente de 50 μ s a min	La respuesta a mas largas longitudes de onda aumenta con la reduccion de temperatura	ζ ocurre consumida en el circuito externo	Depende de la intensidad incidente	Alta, varia de $1 - 10^4$ M Ω en dispositivos comerciales	Ampliamente usado para mediciones de radiacion a todas las longitudes de onda	Precisamente exige circuitos precisos para utilizar todo su potencial
El tiempo de elevación es del orden de 1 μ s, respuesta en la gama de megatercios	Variaciones del 10^{-6} a max de $40^\circ \zeta$, la escala depende de la resistencia de la carga externa	Voltaje	100 - 250 mV en luz normal de cuarto, celdas de selenio hasta 500 V con alta iluminacion	3000 - 10000 Ω , capacitancia del orden de 0.65 μ F/cm 2 en celdas de selenio	Ampliamente usados para exposimetros, celdas de selenio responden, responden a los rayos X	Buena, comportamiento no lineal algunos efectos de envejecimiento
0 - 3000 Hz	Pequeños	Voltaje	Depende del circuito de excitacion	Alta, del orden de 1 M Ω	Puede usarse donde es necesaria la medicion exacta del desplazamiento	Relativamente insensible a la frecuencia de excitacion de circuitos
Desde 0 hasta radio frecuencia	Pequeños	Voltaje	Depende del tamaño de la bobina	Depende del tamaño de la bobina	Medicion del campo magnetico	Senallias pero evadas, las dimensiones de la bobina deben mantenerse para alta exactitud
Alta	Grandes pero pueden calibrarse	Voltaje	Milivolts y microvolts	Baja, del orden de 100 Ω para el detector de bismuto	Medicion del campo magnetico	Por lo general cada transductor debe calibrarse, debido a que no hay uniformidad en los semiconductores empleados en la construcción

IV. 1.3. -EL EFECTO HALL-

A continuación se explica más detalladamente el efecto Hall, el cual es el principio de transducción utilizado por los sensores de este diseño. El efecto Hall descubierto por E. H Hall en 1879, consiste en la aparición de una diferencia de potencial transversal en un conductor o semiconductor, por el que circula una corriente, cuando hay un campo magnético aplicado en dirección perpendicular a esta. La acción del efecto Hall en un medio semiconductor, es explicado más adecuadamente por la física cuántica. A pesar de esto, aquí se dará una breve explicación del efecto clásico.

Una partícula con carga Q , velocidad U y movimiento dentro de un campo magnético B , debido a la fuerza de Lorentz [$F = Q (U \times B)$]. Se tiene que la dirección de la fuerza es mutuamente perpendicular a la dirección de la velocidad de la partícula y el campo magnético. Ahora, si un largo conductor de corriente es localizado cerca de un campo magnético, el movimiento de cargas debido a la fuerza de Lorentz es mutuamente perpendicular a la dirección del flujo de corriente (eje longitudinal del conductor) y al campo magnético. Bajo la influencia de esta fuerza los electrones son "amontonados" sobre una orilla del conductor y cargas positivas son acumuladas en la otra orilla. Una desigual distribución de carga lateral da resultados elevados para un campo eléctrico E en el cual ejerce una fuerza, $F = QE$, en dirección opuesta a la fuerza de Lorentz. En equilibrio, el resultado es fuerzas balanceadas como se muestra en la fig. IV.13. Este campo sobre puesto en el campo E en la dirección del flujo de corriente, da como resultado líneas equipotenciales torcidas, notadas primeramente por el efecto Hall (fig. IV.14).

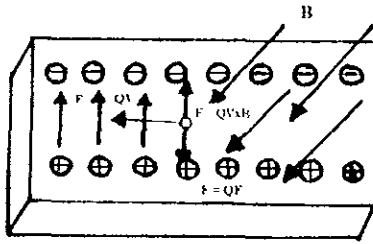


Fig.IV.13 Explicación del Efecto Hall.

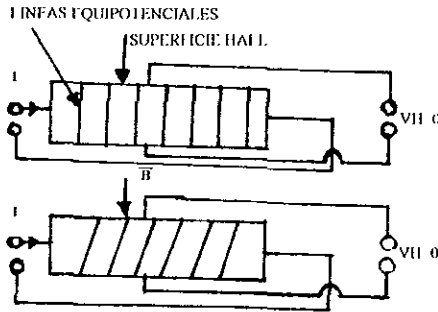


Fig.IV.14. Efecto Hall, se observa un voltaje V_H , sobre un conductor de corriente, en un campo magnético.

La relación entre el voltaje, corriente y campo magnético puede ser generalizada como sigue:

$$V_H = \gamma IB$$

Donde:

V_H = Voltaje Hall

γ = Constante de sensibilidad producida

I = Corriente Hall

B = Campo magnético Perpendicular a la superficie plana Hall

Debido al reciente desarrollo en la tecnología de los semiconductores, el efecto Hall encuentra un gran campo de aplicaciones.

Un sensor de flujo magnético tal como los dispositivos de efecto Hall son ampliamente usados en la medición de corriente. Estos ofrecen alta respuesta de frecuencia y mediciones exactas. El dispositivo de efecto Hall, convierte directamente el nivel de campo magnético en una salida de voltaje. La salida de voltaje de un elemento Hall es directamente proporcional a la densidad de flujo magnético, también la salida solo puede ser medida por una escala constante, para obtener la densidad de flujo magnético. Así, los elementos Hall requieren de energía para operar, la ventaja de una medición directa de la densidad del flujo magnético es contrarrestada por la desventaja de un requerimiento de energía activa. En la fig.IV.15. Se muestra una placa semiconductor de espesor t conectada como se indica, de modo que pase una corriente externa I a través del material. Cuando se aplica un campo magnético en la placa en dirección perpendicular a la superficie de la placa, se genera un potencial E_H como se ilustra. Este potencial se llama voltaje Hall y lo da:

$$E_H = K_H \frac{IB}{t}$$

Donde I está en amperes, B en gauss y t en centímetros. La constante de proporcionalidad se denomina *coeficiente de Hall* y tiene unidades de volts-centímetro por ampere-gauss

Los valores típicos de K_H para varios materiales aparecen en la tabla IV.2.

TABLA IV.2.

COEFICIENTES HALL PARA DIFERENTES MATERIALES

MATERIAL	FUERZA DEL CAMPO (Gauss)	TEMPERATURA °C	$\frac{A_H}{V \text{ cm}^2/\text{A G}}$
As	4,000 - 8,000	20	4.52×10^{-11}
C	4,000 - 11,000	Cuarto	-1.73×10^{-10}
Bi	1,130	20	-3×10^{-8}
Cu	8,000 - 22,000	20	-5.2×10^{-13}
Fe	17,000	22	1.1×10^{-11}
Ge	100 - 8,000	25	-8.0×10^{-5}
Si	20,000	23	4.1×10^{-8}
Sn	4,000	Cuarto	-2.0×10^{-14}
Te	3,000 - 9,000	20	5.3×10^{-7}

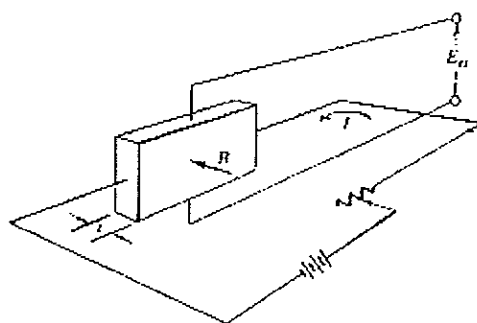


Fig.IV.15 Efecto Hall.

-CAPITULO V-

-TIPOS DE INSPECCIONES EN TUBERIAS-

V.1.1 –GENERALIDADES-

La infraestructura de ductos en el mundo ha alcanzado un nivel de madurez que se acerca al límite del período de vida útil de los sistemas. Y aunque un gran número de ductos ha llegado al final de su tiempo de vida útil para el cual fueron diseñados, no existe razón alguna por la cual no puedan seguir en servicio, una vez que su integridad haya sido debidamente comprobada y además de que estos sean regularmente monitoreados.

Para poder realizar una rehabilitación, reparación o valoración de riesgo en estos ductos, hay un requerimiento fundamental: Establecer con exactitud el estado actual de la tubería. Hasta que no se conozcan las condiciones en las cuales se encuentra un ducto que ha alcanzado su período de vida útil no se pueden hacer planes para un trabajo de rehabilitación.

El mantener un ducto en condiciones seguras de operación implica conocer su estado físico, esto permite al personal encargado de mantenimiento detectar indicios de anomalías que pueden ser reparadas a tiempo. Entre los defectos típicos en los ductos de transporte se encuentran: La pérdida de metal debido a la corrosión y procedimientos de limpieza, laminación, depósitos de producto, acumulamiento de químicos, fugas, grietas y defectos en la geometría.

En lo que refiere a las fallas geométricas en tuberías, estas producen una operación insegura debido a que restringen el flujo del producto transportado e inducen la formación

de zonas de sedimentación, turbulencia erosión y corrosión. La vida útil de una línea se va acortando debido a los diferentes factores externos que van produciendo excesivos esfuerzos mecánicos localizados.

Se ha probado a través de innumerables pruebas en todo el mundo que no existe ducto sin abolladuras. La tendencia a la formación de estas se ha incrementado conforme ha aumentado el uso de aceros de alta resistencia y de pared más delgada, los cuales son susceptibles de originar fallas de este tipo. Las fallas geométricas más comunes en un ducto son: abolladuras, arrugas, pliegues y ovalaciones. Estas fallas geométricas en tuberías son debidas a muchas causas y factores externos que pueden ocurrir durante alguna de las tres etapas del período de vida de un ducto:

a) **Transportación y almacenaje**

Durante este período los tramos de tubo que se utilizaran para la construcción de un nuevo ducto pueden sufrir daños debido a un manejo inadecuado o debido a que son almacenados en superficies y pisos irregulares.

b) **Tendido de la línea**

En este período el ducto puede verse afectado si se realiza el tendido sobre o contra proyecciones rocosas. Si el llenado de la zanja sobre la cual irá el ducto es hecho de manera desigual, o debido al manejo descuidado de maquinaria pesada.

c) **Operación**

Una vez que el ducto ha sido construido y este entra en operación, existen muchos factores que pueden afectar su estructura, entre los más comunes están las construcciones o asentamientos humanos hechos sobre derechos de vía del ducto y movimientos naturales de la tierra

La presión de las regulaciones hechas por las autoridades en lo que se refiere a las industrias relacionadas con los ductos se ha incrementado en todo el mundo. En varios grados, los gobiernos y autoridades están requiriendo que las industrias relacionadas con la operación de ductos, prueben que los sistemas de ductos se encuentren en condiciones de operación seguras.

Por ejemplo, existe en Estados Unidos una iniciativa en el congreso que probablemente imponga una ley para que las industrias relacionadas con la operación de ductos inspeccionen sus sistemas cada cinco años. Esto requeriría que se inspeccionara el 20 % de la red cada año. Esto ocasiona grandes problemas, no solo son las herramientas de inspección y su costo, sino también la habilidad para acceder e inspeccionar los ductos, por ejemplo, existen muchos ductos en actividad que no fueron diseñados para ser inspeccionados.

Por ejemplo, los ductos de transporte de hidrocarburos usualmente solo son accesibles en los extremos. La mayoría de ellos se encuentran enterrados y varios de ellos corren por debajo de las carreteras, ríos y construcciones. Aún aquellos ductos que no son subterráneos cuentan con un revestimiento de concreto a lo largo de su trayecto el cual dificulta su inspección.

Si se tiene que el ducto es o no es subterráneo, el único método para poder llevar a cabo una inspección completa desde el interior de la tubería misma es utilizando instrumentos de inspección interna, generalmente conocidos como "Diablos".

Se desconoce cuando comenzó con exactitud el uso de estos tipos de instrumentos de inspección para el mantenimiento de ductos, pero se sabe que se utilizaron en la industria, para las tuberías de agua a finales del siglo pasado, pero cuando se transporto en forma rutinaria petróleo y gas por tuberías, estos instrumentos iniciaron su gran labor en la

industria. Estos ductos, en sus inicios, fueron generalmente de diámetros pequeños y operaban a bajas presiones por lo que la alta eficiencia no era requerida y su cuidado era relativamente simple.

El primer método conocido para dar mantenimiento a un ducto petrolero por medio de un diablo, fue usando una paca de paja envuelta y provista de púas de alambre clavadas en su rededor, este se colocaba dentro de la tubería para que el flujo lo llevara. Posteriormente se colocaron discos de cuero unidos a un cuerpo metálico y con muelles de acero los cuales tenían colocadas navajas para raspar y espuelas para desprender los depósitos duros de material que se encontraban adheridos a la tubería.

Durante la segunda guerra mundial, en los Estados Unidos se incremento la demanda de energía lo que hizo indispensable modificar su red de ductos la cual transportaba hidrocarburos.

En poco más de una década ocurrió una rápida transición de los sistemas de diámetro pequeño, distancias cortas y baja presión, a sistemas de tuberías de mayor diámetro, distancias largas y alta presión.

Durante la construcción de estas redes se tuvieron grandes problemas y errores pues no se tenía contemplado el mantenimiento posterior con respecto al uso de sistemas de inspección, ya que se presentaban diferencias en los diámetros de las tuberías y válvulas; hoy en día se llega a presentar este tipo de problema.

La necesidad de fabricar diablos mecánicos de mantenimiento fue evidente y surgieron nuevos diseños. Los discos de piel fueron remplazados por copas de hule o goma, y las navajas adaptadas a los muelles cambiaron a cepillos de alambre de acero, lo que resulto que los diablos fueran muy robustos. Pero no tardo mucho para que algunas de las partes que conformaban los diablos sufrieran cambios, por ejemplo los cepillos que cubrían

el cuerpo se cambiaron por cepillos con resortes independientes; cuando el material por desprender dentro de la tubería era muy duro, se cambiaban los cepillos por otros de más dureza. También se hicieron esferas de hule en forma de dodecaedro, lo cual se considero un diseño adelantado a su época.

Con el tiempo se han hecho una gran cantidad de diseños y ensayos para dar el mantenimiento adecuado a los ductos, mediante el empleo de diablos, todos ellos tuvieron aciertos y fallas, algunos rayaron o dañaron el interior de la tubería y otros la obstruyeron totalmente.

La evolución en la forma de construir los sistemas de ductos y de los sistemas de mantenimiento e inspección a nivel mundial se han visto modificados, las tuberías son más grandes y con mayor resistencia. Política y económicamente son más importantes, por lo que el diseño de los diablos debe ser también adecuado a las necesidades actuales.

V.2.1 -LOS SISTEMAS DE INSPECCIÓN (DIABLOS) EN LA ACTUALIDAD-

Para mantener en condiciones adecuadas de operación a los ductos, se debe de utilizar algún tipo de diablo, el cual puede ser descrito como un pistón de movimiento libre y que es insertado dentro de la tubería, es decir es colocado al principio del ducto o en alguna sección del mismo mediante las llamadas “trampas de envío”, y este se desplaza a través del ducto por el mismo fluido que transporta hasta llegar a la “trampa de recibo” en donde es sacado o recuperado. A este procedimiento se le denomina “corrida de diablo”.

Para una “corrida” puede ser necesario que las condiciones normales de operación del ducto sea modificada (reducción o aumento de la presión o de la velocidad).

Un eficiente programa de mantenimiento de los ductos, mediante el uso de diablos es esencial para el óptimo funcionamiento del sistema. Las corridas de diablos son necesarias durante y después de la construcción del ducto, con subsecuentes corridas durante su vida útil. Esto se debe a que durante la vida útil del ducto, este puede sufrir daños o bloqueos, por lo que un programa regular de inspección y mantenimiento alarga la vida del sistema y reduce los riesgos de una falla en la tubería. Este mantenimiento requiere del empleo de diversos tipos de diablos, dependiendo del tipo de mantenimiento que se necesite realizar y del estado de la línea, estos mismos factores influyen en la frecuencia en que se deben de realizar las inspecciones.

En la actualidad a los diablos se les clasifica en dos tipos:

- Diablos Mecánicos
- Diablos Inteligentes o Herramientas de Inspección en Línea

V.2.1.1 -DIABLOS MECÁNICOS-

Los diablos mecánicos esencialmente realizan limpieza dentro de la tubería para obtener mayor eficiencia hidráulica. Debido a esto existen compañías que desarrollan este tipo de sistemas. A continuación se describen algunos diablos especializados que ya han sido desarrollados.

1. DIABLO DE ELIMINACIÓN DE ESCOMBROS.

Durante la construcción del ducto es muy posible que tierra y parte del material utilizado en la construcción se asiente en el interior del ducto. Estos escombros pueden causar estragos una vez iniciada la operación del ducto; bloqueando filtros, dañando los impulsores de las bombas, atascando las válvulas, etc. En algunos casos el operador del ducto puede considerar que una pequeña cantidad de residuos puede ser tolerada, pero en la mayoría de los casos el equipo de construcción debe cerciorarse de que los escombros sean removidos del interior del ducto. La única forma de hacerlo eficientemente es corriendo un diablo de limpieza a lo largo del ducto.

Típicamente una vez que una sección del ducto ha sido completada, un diablo impulsado por aire es enviado a través del ducto para "barrer" todos los escombros fuera del ducto. Normalmente se intenta que estas secciones sean cortas para que el tamaño del compresor y el volumen de aire comprimido que impulsa al diablo pueda ser minimizado.

Generalmente este tipo de diablo está compuesto por un cierto número de fuertes discos de poliuretano, los cuales tienen un diámetro exterior significativamente menor que el diámetro interior del ducto. En el límite de la circunferencia de cada disco hay alfileres

de acero con puntas endurecidas las cuales son usadas para desprender las impurezas de las paredes internas del ducto. Entre cualquiera de los pares de alfileres opuestos, el diámetro de un lado a otro es mayor que el diámetro interno del ducto, por esto cuando el diablo esta viajando a través de la línea los alfileres son doblados hacia atrás con un ángulo insignificante. Esto ayuda a la acción de limpieza y compensa algún desgaste. El número de discos esta determinado por la talla del ducto, además de que estos son intercambiables y la dureza de los discos puede ser cambiada según las circunstancias del ducto.

2. DIABLO LIMPIADOR MAGNÉTICO

La presencia de escombros ferrosos, tales como varillas de soldadura, polvo metálico y escorias de acero, ocasionan problemas en la operación del ducto cuando su presencia es considerable, por esta razón es esencial que tales escombros sean removidos del ducto. Para tales casos se utilizan diablos de limpieza magnéticos, los cuales remueven casi la totalidad de los escombros, pero si algún ducto en particular tiene un alto volumen de escombros ferrosos. son necesarios múltiples corridas de la herramienta para dejar limpia totalmente la vía de transporte.

Los diablos de limpieza magnéticos son el resultado de un largo programa de investigación y desarrollo, con lo cual se determino no sólo el mejor tipo de imán, sino también la forma más conveniente de sujetarlos a la herramienta, así como su orientación óptima para obtener la máxima eficiencia y ejecución. Es también común que este tipo de diablos este constituido por dos o tres módulos si es necesario, esto con el fin de realizar una mejor limpieza

3. DIABLO DE CALIBRACIÓN.

Regularmente la operación de eliminación de escombros es combinada con la de calibración, para detectar abolladuras y torceduras. La operación de calibración debe probar que el ducto tiene una forma circular desde el inicio hasta el final. Por lo general se coloca un disco de aluminio, de un diámetro del 90 % del diámetro nominal del ducto, en la parte frontal del diablo, y este es inspeccionado al final de la corrida para ver si se encuentra alguna marca, el diablo también esta equipado con un emisor de señales auditivas, para en caso de que se atore en alguna abolladura o torcedura, pueda ser fácilmente localizado y así reparar la sección del ducto.

4. DIABLO DE LIMPIEZA

Después de la construcción, el interior del ducto usualmente contiene sarro, sobrantes de electrodos utilizados para el soldado, escorias y en algunas ocasiones herramientas que se dejan olvidadas dentro de la tubería; por estas razones es necesario que el ducto sea despojado de lo antes mencionado. La razón más obvia para efectuar la limpieza es para impedir la contaminación del producto que será transportado por el ducto. Otra razón para realizar la limpieza del ducto después de su construcción es para permitir la acción efectiva de los inhibidores de corrosión durante su aplicación. Si el flujo del producto contiene componentes corrosivos tales como sulfuro de hidrógeno o dióxido de carbono, o si es necesario mantener el ducto lleno de agua, durante algún tiempo, antes de iniciar su operación; un método de protección contra el ataque corrosivo es la introducción de inhibidores en el ducto, sin embargo, estos son menos efectivos en las regiones de la

superficie interna del ducto que se encuentran ya corridas, cubiertas por sarro o impurezas ferrosas debido a que en estas zonas los inhibidores no entran en contacto directo con la superficie que se intenta proteger. Finalmente la eficiencia del flujo se mejora manteniendo el ducto limpio. Esto se aplica particularmente a ductos de gran longitud donde el efecto es más notable.

Típicamente una operación de limpieza al finalizar la construcción, consiste en enviar a través del ducto una serie de diablos de limpieza impulsados por agua. Estos diablos tienen cepillos con cerdas de alambre, permitiendo el paso del flujo de agua para que así el sarro desprendido de las paredes por los cepillos sea arrastrado por el flujo de agua.

5. DIABLO DE DESVÍO DE PRESIÓN.

El frente del diablo de desvío de presión tiene acoplada una válvula de escape de presión, la gran acumulación de escombros delante de este origina que la diferencia de presión a través del diablo se vaya incrementando durante el recorrido.

Una vez que es alcanzada cierta presión diferencial, la válvula de desvío se abre, originando que los escombros empiecen a ser expulsados lejos del frente del diablo. Esto causa que la presión diferencial requerida para hacer correr el diablo sea liberada, lo que provoca que la válvula de desvío sea otra vez cerrada. En ductos especialmente sucios, esta secuencia puede repetirse cientos de veces durante una corrida antes de que el diablo llegue al receptor.

6. DIABLO DE SEPARACIÓN.

Una vez terminada la construcción del ducto, es necesario demostrar que este está en perfectas condiciones para entrar en operación. Para demostrar la integridad de un ducto recién construido es necesario realizarle pruebas hidrostáticas, estas consisten en llenar con agua el ducto y bombear el agua a través de él. Esta prueba permite verificar que el ducto resiste la presión aplicada y cerciorarse de que no existen fugas a lo largo de su trayectoria. Para poder realizar una prueba hidrostática es necesario extraer primero todo el aire del interior del ducto, para que así este pueda ser presurizado eficientemente, ya que si existen pequeños baches de aire, estos serán comprimidos y absorberán energía, lo que causara que tome más tiempo el llevar al ducto a la presión deseada, además de que sería más peligroso en el caso de una ruptura del ducto durante la prueba, por lo tanto es necesario asegurarse de que la tubería sea llenada adecuadamente y de que todo el aire sea desplazado de su interior. Para poder lograr esto se utiliza un diablo de separación a la cabeza del flujo de agua, que se encarga de ir desplazando todo el aire, evitando que en regiones donde el ducto se encuentra inclinado, el agua se desplace por debajo del aire provocando los baches del mismo.

Este tipo de diablo utiliza una serie de discos a lo largo de su cuerpo, los cuales permiten sellar el ducto, gracias a esto el agua que es utilizada para impulsar el diablo no se mezcla con el aire que es desplazado en la parte frontal del mismo.

Después de la prueba hidrostática el agua es desplazada generalmente por aire, aunque algunas veces también se utiliza nitrógeno. Al igual que en el llenado del ducto en la prueba hidrostática, se utiliza un diablo de separación como interface entre el aire y el agua, de esta manera el agua es desplazada hacia el exterior del ducto.

En algunos casos es necesario que el ducto se encuentre completamente seco, esto es particularmente necesario para ductos que transportan gas, donde algunos rastros de agua pueden combinarse con el gas formando hidratos. Después de desplazar el agua con la ayuda de un diablo, las paredes del ducto estarán húmedas, y pequeñas porciones de agua pueden quedar atrapadas en algunas secciones del ducto. Una forma para secar el ducto es eliminar el agua utilizando metanol o glicol. Estos últimos actúan como inhibidores, evitando así que los restos de agua localizados en el ducto formen hidratos. El llenar todo el ducto con metanol sería excesivamente costoso, en lugar de eso se envía un bache de flujo de metanol a través del ducto en medio de dos diablos de separación

En ocasiones es necesario que el ducto transporte cierto número de productos diferentes al mismo tiempo. Esta situación se da básicamente por aspectos económicos y de flexibilidad, ya que es preferible utilizar el mismo ducto para enviar en serie baches de flujo de diferentes productos, a utilizar líneas exclusivas y separadas para cada producto. Para lograr lo anterior se utiliza un diablo de separación que proporciona una eficiente interface entre los productos, minimizando la contaminación entre ellos. Para asegurarse de que no existirá la mezcla de productos se puede lanzar un tren de dos o tres diablos entre cada producto.

V.2.1.2 -DIABLOS INTELIGENTES O HERRAMIENTAS DE INSPECCIÓN EN LÍNEA-

La inspección en línea realmente comienza en los años 60's con la introducción de una herramienta para la medición de corrosión basada en tecnología de pérdida de flujo magnético. A este pronto le siguió un diablo electromagnético para medición de anomalías geométricas. En la actualidad hay más de treinta herramientas diferentes en uso y más de una docena de compañías proveen servicios de inspección en línea. Muchos años de investigación y muchos millones de dólares han sido gastados en el desarrollo de este tipo de herramientas.

Aunque los dos factores más comunes de inspección tales como las mediciones de geometría (diámetro) y pérdida de metal (corrosión), existen otros factores que son medidos a través de este tipo de herramientas. Cada diablo de inspección es diseñado exclusivamente para medir un único factor.

Los diablos de inspección que existen en la actualidad se clasifican en los siguientes tipo:

- Diablo Para Detección de Pérdidas de Metal
- Diablo Para Detección de Fugas
- Diablo Fotográfico
- Diablo Para Eliminación de Cera
- Diablo Para Mapeo
- Diablo Para Detección de Curvas
- Diablo Para Detección de Perfil Topográfico

- Diablos Para Detección de Anomalías Geométricas

7. DIABLO PARA DETECCIÓN DE PÉRDIDA DE METAL.

La pérdida de metal debido a corrosión, erosión o cualquier otra causa, es potencialmente el efecto más serio en un ducto de transporte, pero esto no es sorpresa, por lo tanto, se tiene más apoyo económico en investigaciones y desarrollos que se ocupan en diseñar herramientas que detecten pérdida de metal en comparación con otro tipo de investigaciones y desarrollos que se ocupan de herramientas combinadas. Se han dado investigaciones de alto nivel con el fin de determinar el mejor método de medición de pérdidas de metal mientras un ducto permanece en operación.

Dos principios básicos han surgido: fuga de flujo magnético y ultrasónico. Las técnicas básicas son muy simples, pero los problemas que surgen al poner esto en práctica lo hacen extraordinariamente difícil.

Cada técnica tiene diferentes ventajas y desventajas. La técnica por fuga de flujo magnético puede ser usada tanto en líquidos como en gases y se puede medir pérdida de metal aún en tuberías con paredes relativamente delgadas, lo que puede ser difícil con herramientas ultrasónicas. Sobre la otra técnica, los diablos ultrasónicos generalmente solo pueden ser usados en líquidos homogéneos, pero estos son capaces de medir en tuberías de pared más gruesas que lo que es posible con algunos de los diablos de flujo magnético.

Un flujo magnético es inducido dentro de la pared de la tubería por dos imanes. De tal forma que cualquier pérdida de metal que ocurra en las paredes, ocasiona que las líneas sean distorsionadas. Esta distorsión es percibida por un detector el cual genera entonces una señal eléctrica indicando pérdida de metal. Esta señal es pasada a través de circuitos

complejos basados en microprocesadores y el resultado o dato es almacenado para un posterior análisis detallado computarizado y para la elaboración de un reporte acerca de la corrida.

El diablo de inspección ultrasónica fue desarrollado y comercializado en los años 80's. Este cuenta con transductores ultrasónicos los cuales transmiten señales perpendiculares a la superficie del ducto. En estos se reciben las señales de eco ocasionadas por ambas superficies del ducto (externa e interna), convirtiendo estas en señales digitales para detectar alguna anomalía. Esta se basa en la medición directa del grueso restante de la pared.

Como ya se ha dicho, el diablo ultrasónico usa el principio de ondas viajeras ultrasónicas en un medio líquido. Por esta razón, para poder inspeccionar ductos que transportan gas, es necesario que la herramienta sea introducida en un líquido viscoso con sellos enfrente y detrás de la herramienta, para que todo el recorrido de la herramienta se realice dentro de un medio homogéneo ya que este es esencialmente un sistema de no contacto, los diablos ultrasónicos prestan más facilidad para un uso bidireccional.

La mayoría de los diablos de pérdida de metal pueden detectar defectos tales como corrosión interna y externa, corrosión diseminada, defectos mecánicos, laminaciones, abolladuras y otras deformaciones, tal es el caso del diablo HIG (Hidrógeno-Inducción-Grieta)

8. DIABLO PARA DETECCIÓN DE FUGAS.

Existen diversas técnicas usadas para detectar y localizar fugas en el ducto. Un sistema de detección de fugas trabaja bajo el principio de que un líquido emite una frecuencia ultrasónica cuando el fluido es forzado a salir a través de un agujero pequeño

en el ducto. Este tipo de diablo no tiene contacto cercano con la pared del ducto para asegurar que este no genere algunos sonidos los cuales puedan ser tomados como si existiera una fuga. El instrumento marca en una cinta los detalles del tiempo en el cual es escuchada la fuga. Usando una base de tiempo y un sistema de marcas magnéticas (lugares conocidos fuera del ducto), la fuga puede ser fácilmente rastreada.

Varios sistemas o técnicas se basan en el decaimiento de la presión. Esto simplemente significa que si una sección del ducto es aislada usando un diablo o una esfera entonces, si hay una fuga en esta sección, la presión caerá.

Otro sistema localiza fugas utilizando un diablo, el cual lleva un medidor de flujo. La línea es presurizada y el diablo literalmente mide el flujo del fluido por medio del medidor de flujo alojado en el cuerpo de la herramienta. El medidor de flujo entonces transmite tanto el volumen y la dirección del flujo que pasa a través del ducto al operador, con lo cual es posible determinar la localización de la fuga.

Y finalmente existe otro sistema que se basa en la radioactividad. El desarrollo de sensores altamente sensibles, permitió la utilización de fuentes radioactivas con niveles muy bajos y con tiempos de vida media cortos, lo que hace que este sistema sea extremadamente seguro. De tal forma que cuando una fuga es detectada por el sensor, se registra el tiempo en el cual fue detectada y por medio de marcas radioactivas dispuestas en puntos conocidos del ducto, la fuga puede ser localizada.

9. DIABLO FOTOGRAFICO

Las regiones visuales también proporcionan un buen método para cuantificar algunos problemas. El uso de este tipo de diablos se restringe a líneas con buena

visibilidad interna. Los diablos fotográficos han sido desarrollados para cargar una cámara de video o una cámara fotográfica así como fuentes de luz para iluminar el área monitoreada. Este tipo de herramienta puede monitorear las condiciones internas del ducto, tales como corrosión, abolladuras, ovalaciones, curvaturas u otros defectos internos visibles, pero no pueden medir la profundidad o volumen de estos.

Cuando se utiliza una cámara fotográfica, la herramienta toma fotografías en intervalos de tiempo programados para mantener el monitoreo del ducto.

La herramienta cuenta con adecuadas fuentes de iluminación, sin embargo, estas deben ser mejores para los casos en los que se monitorean ductos que transportan gas, que en aquellos que transportan líquido, estos deben ser vaciados y secados antes de la corrida del diablo.

10. DIABLO PARA ELIMINACIÓN DE CERA.

En ocasiones algunos ductos que transportan aceites crudos tienen el problema de que dichos aceites forman cera en cuanto se enfrían. Esta cera se cristaliza en las paredes del ducto reduciendo su diámetro y haciendo que su superficie interna sea irregular. Ambos efectos reducen la eficiencia del flujo en el ducto debido a que se necesita mayor energía de bombeo para transportar el mismo volumen de aceite. Existen actualmente una gran variedad de dispositivos internos de limpieza y remoción de cera. La mayoría cuenta con una serie de cepillos o raspadores a su alrededor, y cuando estos son introducidos van raspando y eliminando la cera de las paredes del ducto, la acción del instrumento también pule la cera que aún queda en la pared del ducto disminuyendo las irregularidades y ocasionando así una menor resistencia hidráulica.

11. DIABLO PARA MAPEO.

La estabilidad de los ductos en lugares con heladas permanentes y áreas submarinas han sido siempre de gran inquietud, ya que es importante saber cuando hay algún movimiento del ducto. Varios métodos han sido desarrollados, pero solo pocos han sido afortunados.

Uno de los más avanzados usa una unidad de medición inercial. Esta unidad contiene acelerómetros y giróscopos los cuales proporcionan el grado de curvatura del ducto, la orientación de la curva y posición. Si el grado de inclinación del diablo no coincide con el declive y azimut del ducto, entonces el sistema es capaz de proporcionar una lectura que es útil en la determinación de la posición del diablo con respecto al ducto para corregir las lecturas de los acelerómetros y giróscopos.

Otro sistema más compacto, utiliza un sistema de navegación inercial para examinar la ruta del ducto, creando y/o verificando la localización del ducto y examinando algún movimiento del terreno.

12. DIABLO PARA DETECCIÓN DE CURVAS

Uno de los sistemas, el cual ha estado en operación por algún tiempo, emplea un simple e ingenioso sistema. Este contempla dos diablos "geométricos" conectados uno tras otro con una junta universal diseñada especialmente y un cable de ensamble entre estos. Para interpretar el grado de curvatura se registra la magnitud de la flexión o desvío que sufre el cable de ensamble así como la duración del evento.

El más reciente desarrollo está diseñado no solo para detectar curvas, sino que estas son bien definidas y caracterizadas. Este sistema o diablo es también un diseño de dos módulos. El módulo posterior es flexible y se ajusta a la forma de la curva, el grado de esta flexión es medido por transductores y el dato es almacenado en un sitio preliminar para su posterior análisis.

13. DIABLO PARA DETECCIÓN DE PERFIL TOPOGRAFICO.

Este tipo de diablo basa su funcionamiento en una unidad de medición inercial. Esta unidad contiene acelerómetros y giróscopos los cuales al ser conectados entre sí proporcionan cierta información que permite calcular el grado de curvatura, orientación y posición del oleoducto. La información obtenida por este tipo de diablo permite determinar el perfil topográfico del ducto, lo cual es muy útil para la compañía encargada de él, ya que les permite conocer su ubicación exacta.

14. DIABLO PARA DETECCIÓN DE ANOMALÍAS GEOMÉTRICAS

Los diablos de inspección geométrica son utilizados para inspeccionar y medir la geometría interna del ducto. Usualmente estos dispositivos tienen un arreglo de brazos mecánicos montados en forma radial alrededor del cuerpo del diablo. Al viajar en el interior del ducto y encontrar alguna reducción del diámetro interno, los brazos se deflexionan, estos activan unos sensores de posición que envían señales eléctricas a los dispositivos de grabación localizados dentro del cuerpo del diablo. La mayoría de los dispositivos de inspección interna están equipados con uno o dos odómetros que permiten

determinar la distancia que ha recorrido el dispositivo y así se puede relacionar la información de la distancia con la de las anomalías para poder localizarlas a lo largo del trayecto.

El cuerpo del diablo es normalmente compacto, alrededor del 60 % del diámetro interno, el cual en combinación con las copas flexibles permite al diablo pasar por reducciones de hasta 25 % del diámetro interno. Los diablos de inspección geométrica pueden ser utilizados para calibrar el ducto, su habilidad para pasar a través de reducciones como abolladuras y torceduras significa que el diablo puede ser utilizado para probar que el trayecto a lo largo del ducto esta libre y tiene un riesgo mínimo de obstrucción. Esto es particularmente útil en ductos que corren bajo tierra o mar y que son demasiado largos, donde sería difícil y costoso localizar un diablo atorado.

La variedad de posibles causas de los defectos, subraya la necesidad de correr este tipo de instrumentos, aún en líneas recién tendidas, para detectar y corregir las posibles fallas. Una inspección con un diablo de inspección geométrica es esencial antes de introducir algún equipo más sofisticado, ya que este permite verificar que la tubería no presente alguna abolladura más allá del rango permisible que ocasionaría que el equipo se quedara atorado.



Fig.V Instrumento de inspección interna de ductos

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

-CAPITULO VI-

-DISEÑO DEL SISTEMA DE INSPECCION DE TUBERIAS-

VI.1.1.-DESCRIPCION GENERAL DEL PRINCIPIO DE MAGNETIZACION DEL SISTEMA-

La pérdida de metal debido a corrosión, erosión o cualquier otra causa, es potencialmente el defecto más serio en una tubería de transporte. Esto no es sorpresa, por lo tanto, se tiene más apoyo económico en investigaciones y desarrollos que se ocupan de diseñar herramientas que detecten pérdida de metal en comparación con otro tipo de investigaciones y desarrollos que se ocupan de herramientas combinadas. Se han dado investigaciones de alto nivel con el fin de determinar el mejor método de medición de pérdida de metal mientras una tubería de transporte permanece en operación.

Uno de los principios básicos que ha surgido es el de fuga de flujo magnético (MFL). Esta técnica básica es muy simple, pero los problemas que surgen al poner esto en práctica lo hacen extraordinariamente difícil.

Esta técnica tiene algunas ventajas y desventajas. La técnica de fuga por flujo magnético puede ser usada tanto en líquidos como en gases y se puede medir pérdida de metal aún en tuberías con paredes relativamente delgadas, pero no son capaces de medir en tuberías de paredes más gruesas.

El principio de operación del principio de fuga de flujo magnético se muestra en la fig. VI.1. Un flujo magnético es inducido dentro de la pared de la tubería por dos imanes.

De tal forma que cualquier pérdida de metal que ocurra en la pared, ocasiona que

las líneas de flujo magnético, sean distorsionadas. Esta distorsión es percibida por un detector el cual genera entonces una señal eléctrica indicando pérdida de metal. Esta señal es pasada a través de circuitos complejos basados en microprocesadores y el resultado o dato es almacenado para un posterior análisis detallado computarizado y para la elaboración de un reporte acerca de los resultados obtenidos.

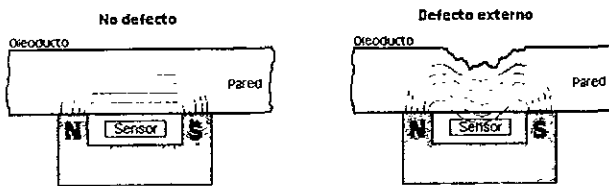


Fig.VI.1 Principio de fuga de flujo magnético.

VI.2.1-SISTEMA DE MAGNETIZACION-

El sistema de magnetización produce un campo magnético en la tubería, cuando un campo magnético en una tubería de acero encuentra de repente una imperfección en la superficie de ésta tal como un defecto de corrosión, un fenómeno llamado fuga de flujo magnético ocurre. Aunque muchas de las líneas de campo magnético permanecen en la pared del tubo, algunas de estas líneas escapan. El escape de algunas de las líneas de campo magnético de la pared del tubo en una discontinuidad es conocido como fuga de flujo magnético, ya que al ser cortadas las líneas de flujo del campo magnético generado por dos imanes permanentes (estos constituyen junto con una bobina electromagnética al sistema de magnetización), por alguna imperfección en la superficie de la tubería de acero pueden ser

fácilmente detectadas debido a que se induce o genera una señal analógica instantánea bien definida en amplitud y forma.

VI.2.2.- BOBINA ELECTROMAGNETICA-

La bobina electromagnética basa su funcionamiento en la ley de Gauss por lo que se analiza el modelo de la fig. VI.2

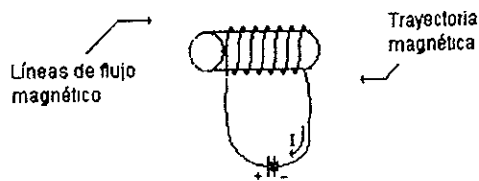


Fig.VI.2 Modelo Electromagnético

Cuando una espiral formada por un conductor se le hace circular una corriente eléctrica, se genera un campo electromagnético, el cual está formado por líneas de fuerza cerradas que salen de un punto del núcleo y entran en el extremo opuesto del mismo (fig. VI.3).

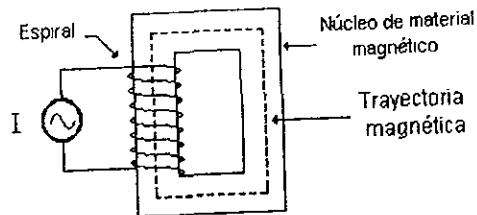


Fig.VI.3 Inducción de una corriente a través de la espiral

La intensidad del flujo magnético esta en función de la corriente que circula a través de la espiral y el número de vueltas de la espiral. A la fuerza generada por el producto de la fuerza I y el número de vueltas N se le conoce con el nombre de fuerza magnetomotriz (H).

A la relación entre la densidad magnética (B) y la fuerza magnetomotriz se le conoce como permeabilidad magnética. La magnitud de la permeabilidad magnética es una medida de la facilidad con la cual un material puede ser magnetizado y su ecuación es la siguiente:

$$\mu_0 = B/H \text{ [gauss/oersted]}$$

Entonces la permeabilidad absoluta estaría dada por:

$$\mu = \mu_r \mu_0$$

Donde:

μ .- Permeabilidad Absoluta

μ_r .- Permeabilidad Relativa

μ_0 .- Permeabilidad del vacío

$$\mu = (1) B/H \text{ [gauss/oersted]} = \text{[tesla/oersted } \times 10^{-4} \text{]} = 0.4\pi \times 10^{-8} \text{ [henry/m]}$$

La linealidad entre la densidad magnética y la fuerza magnetomotriz es la principal ventaja que ofrece el núcleo de aire. Esta proporcionalidad obliga a que al incrementar H incrementa B y el flujo de corriente en la bobina.

El vacío tiene una permeabilidad relativa del orden 1, al igual que un material no magnético como el aire, el papel o el cobre. Algunos materiales como el acero, el níquel, el cobalto u aleaciones entre estos presentan altas permeabilidades, del orden de cientos o hasta miles de gauss.cm/A. Si un material magnético (alta permeabilidad) es utilizado como núcleo de la espiral, el flujo es principalmente confinado al mismo núcleo.

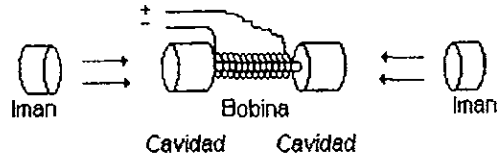


Fig.VI.4 Bobina Electromagnética

La bobina electromagnética de la figura VI.4 esta constituida simplemente por un soporte, un embobinado de cobre y dos imanes permanentes. Los imanes están fabricados a base de las llamadas “tierras raras”. El neodimio es una tierra rara con la cual se fabrican imanes permanentes ya que la fuerza magnética de éste material es muy alta.

El soporte además de utilizarse como contenedor de los imanes, sirve como núcleo para la espiral de cobre. Este es de acero al carbón debido a que el núcleo debe ser de material ferromagnético con el fin de aumentar la fuerza de la bobina electromagnética. El acero al carbón con el cual está construido el soporte es del tipo 836, el cual tiene una densidad de 0.29 lb/plg³, su resistencia eléctrica es de 74 $\mu\Omega$.Cm y su permeabilidad magnética a 200 Hz es de 1008 gauss/oersted.

El sistema, del equipo de fuga de flujo magnético, magnetiza una longitud de la pared de la tubería, este se mantiene siempre sobre la superficie interna del ducto, a través de un brazo mecánico como se muestra en la fig. VI.5.A. Así, al desplazarse el equipo de inspección, la bobina electromagnética se desliza sobre el interior del ducto, generando una señal analógica bien definida al ser cortadas las líneas de campo magnético.

Esta señal obtenida se filtra, amplifica y compara para obtener una señal de la misma forma de onda que la que proporciona el sensor pero totalmente libre de ruido (fig. VI.5.B).

El efecto de deslizamiento de la bobina electromagnética sobre el interior del ducto, produce múltiples picos (fig.VI.5.C) debido principalmente a los siguientes factores:

- Vibración vertical de la bobina electromagnética. El continuo golpeteo de este dispositivo sobre la pared de la tubería, genera picos de igual amplitud que los generados por alguna discontinuidad real, sin embargo, estos son discriminados por el microcontrolador (mediante programa).
- El simple deslizamiento de la bobina electromagnética sobre el interior de la tubería, produce ruido de alta frecuencia. Esto se debe a lo áspero de la superficie, ya que las líneas de campo magnético son cortadas un número infinito de veces por los pequeños excesos de metal sobre la superficie interna del ducto.
- Y finalmente, la infinidad de basura ferromagnética (o polvo metálico) que es característica de toda tubería de transporte. Aunque actualmente se utilizan herramientas de limpieza para disminuir al mínimo estos residuos metálicos.

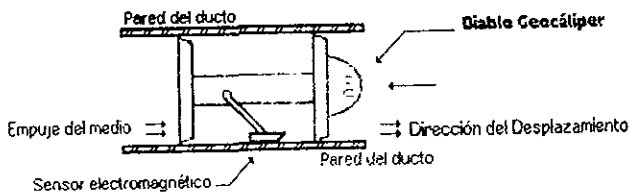


Fig.VI. 5.A Ubicación del sistema de magnetización.

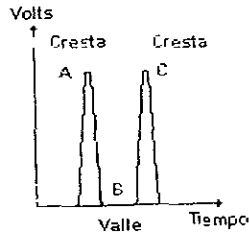


Fig.VI.5.B Señal analógica característica de un defecto libre de ruido.

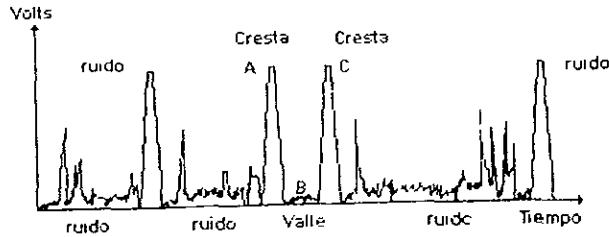


Fig.VI.5.C Señal analógica característica de un defecto con ruido.

A continuación se muestra el diagrama eléctrico del sistema de magnetización.

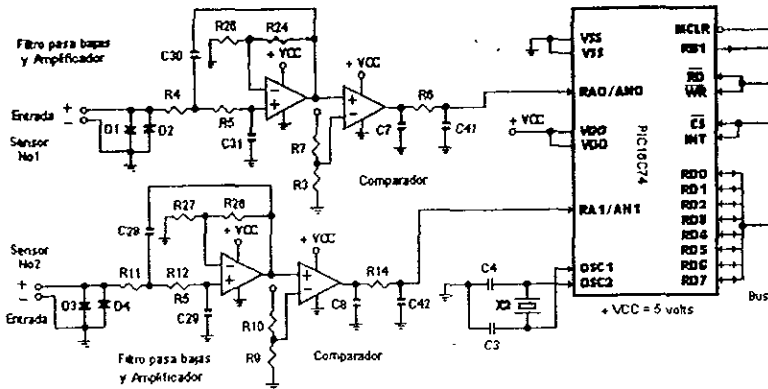


Fig.VI.6 Diagrama eléctrico de la sección "Sistema de Magnetización"

Antes de que un microcontrolador convierta a la señal analógica generada por los sensores a su equivalente digital, esta es adecuada por tres etapas, la de filtraje, amplificación y comparación.

VI.2.3.-ETAPAS DE FILTRAJE Y AMPLIFICACION-

En estas etapas se limpia a la señal analógica que entrega el sensor, de señales de alta frecuencia. Este ruido o señal de alta frecuencia es ocasionado por impurezas ferromagnéticas (polvo) o por el simple deslizamiento de la bobina electromagnética sobre el interior del ducto. Esta señal de ruido se muestra en la fig. VI.7. Al mismo tiempo que se filtra también se amplifica la señal.

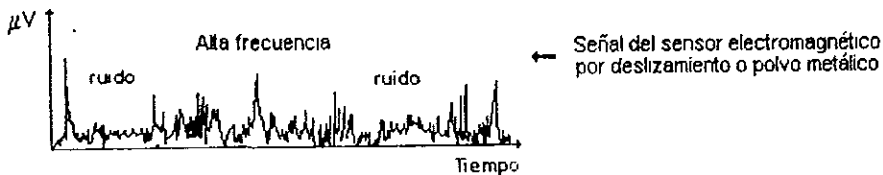


Fig. VI.7 Señal de alta frecuencia generada por la bobina electromagnética.

Para llevar a cabo el filtraje y amplificación de la señal, se hace uso de un filtro pasabajas de segundo orden. El circuito es el que sigue:

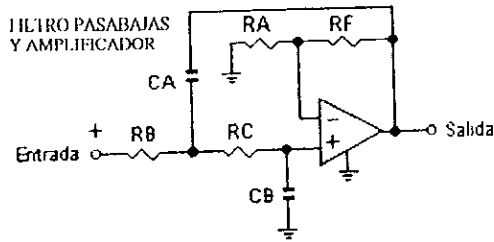


Fig.VI.8 Filtro pasa bajas y amplificador no inversor con operacional.

-ETAPA DE FILTRAJE-

Cálculo de RB, RC, CA y CB

1. -Los valores de los elementos se calculan como sigue:

Se propone el valor de C, donde $C=CA=CB$ y luego se calculan los valores de R_B y R_C con las siguientes relaciones:

$$R_B = \left(\frac{1}{4\pi f_c \alpha C} \right)$$

$$R_C = \left(\frac{\alpha}{\pi f_c C(\alpha^2 + \beta^2)} \right)$$

Donde α y β son las coordenadas real e imaginaria normalizadas del par de polos.

El filtro pasa bajas tiene las siguientes características:

- Frecuencia de corte (f_c) de 100Hz 3 dB.
- Filtro de segundo orden ($n = 2$).
- Se usan coordenadas de polos de los filtros Chebyshev de 0.1 dB.

$$\alpha = 0.6104 \quad \text{Para } n = 2$$

$$\beta = 0.7106 \quad \text{Para } n = 2$$

- Se propone C de 0.01 μfd .

Por lo tanto para R_B y R_C se tiene:

$$R_B = \left(\frac{1}{4\pi f_c \alpha C} \right) = \left(\frac{1}{4\pi \cdot (100 \text{ Hz}) \cdot (0.6104) \cdot (0.01 \times 10^{-6})} \right) = 130.3693 \text{ K}\Omega$$

$$R_C = \left(\frac{\alpha}{\pi f_c C(\alpha^2 + \beta^2)} \right) = \left(\frac{0.6104}{\pi \cdot (100 \text{ Hz}) \cdot (0.01 \times 10^{-6}) [0.6104^2 + 0.7106^2]} \right) = 221.4101 \text{ K}\Omega$$

Finalmente los valores comerciales más cercanos de R_B y R_C son:

$$R_B = 120 \text{ K}\Omega \quad R_C = 220 \text{ K}\Omega$$

$$C_A = C_B = 0.01 \mu\text{fd}$$

-ETAPA DE AMPLIFICACION-

Cálculo de R_F Y R_A .

La etapa de amplificación se encuentra insertada dentro del mismo filtro pasa bajas siendo esta una amplificación de tipo no inversora. Tomando entonces la función de transferencia de un amplificador operacional se realizará el cálculo de R_F y R_A . Considerando una ganancia igual a dos, se tiene:

$$\text{Ganancia en voltaje} = \frac{V_{\text{sal}}}{V_{\text{ent}}} = 1 + \frac{R_F}{R_A}$$

$$2 = 1 + \frac{R_F}{R_A} \longrightarrow 2 - 1 = \frac{R_F}{R_A} \longrightarrow 1 = \frac{R_F}{R_A} \longrightarrow R_F = R_A$$

El valor de R_F y R_A pueden ser cualquier valor conveniente, siempre y cuando se cumpla la condición de que ambos valores sean iguales. Por lo tanto se toma un valor comercial de 10 K Ω .

-ETAPA DE COMPARACION-

Esta etapa se emplea para eliminar picos de la señal ocasionados por el golpeteo (no-rozamiento) de la bobina electromagnética sobre el interior del ducto. El golpeteo de la bobina electromagnética sobre la pared metálica del ducto ocasiona que se corten las líneas de campo magnético, induciéndose una corriente en los sensores, lo cual se manifiesta

como un pico de cierta amplitud, lo cual depende del número de líneas de campo que se corten al momento del golpe. La señal que llega a la etapa de comparación se muestra en la siguiente figura. (Fig. VI. 9).

SEÑAL DE ENTRADA A LA ETAPA DE COMPARACIÓN

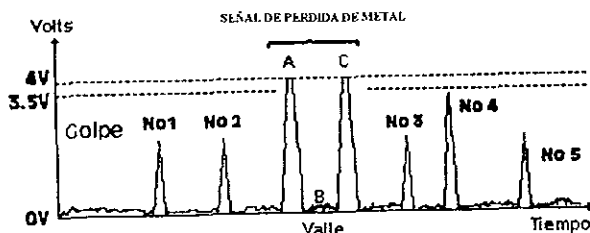


Fig.VI.9. Señal de la bobina electromagnética filtrada y amplificada

Se emplea un comparador sin histéresis y el circuito se muestra a continuación (fig. VI.10):

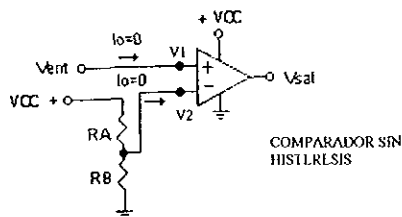


Fig.VI.10 Circuito comparador sin histéresis

El análisis del comparador considera que se trata de un amplificador operacional ideal, lo que implica que la corriente "I₀" que entra por las terminales inversora y no

inversora del amplificador es cero ($I_0 = 0$). Tomando en consideración esta relación, se obtiene la gráfica de transferencia del comparador y se justifican los valores de R_A y R_B .

-Cálculo de R_A y R_B y su Gráfica de Transferencia-

El comparador sin histéresis presenta un $V_{sat} \cong +V_{cc}$ sólo cuando el voltaje de entrada (señal de sensores filtrada y amplificada) es mayor al voltaje V_R . La amplitud de los pulsos generados por una imperfección es de 2 a 4 volts (dependiendo de la velocidad con que se desliza el equipo). Esta señal más la ganancia de la etapa amplificadora nunca será menor a 4 volts, por lo tanto para no eliminar los picos debidos a defectos o imperfecciones reales, el voltaje V_R debe ser menor a esta amplitud. El nivel de voltaje V_R se fija en 3.5 volts. De esta manera cualquier señal ocasionada por golpes que sea menor al voltaje V_R es eliminada. De la fig.VI.10 se deduce lo siguiente:

$$V_1 = V_{ent.} \longrightarrow (1)$$

$$V_2 = \left(\frac{(+V_{cc}).R_B}{R_A + R_B} \right) \longrightarrow (2)$$

Por lo tanto se tiene que: $V_1 = V_2 \Rightarrow V_1 = \left(\frac{(+V_{cc}).R_B}{R_A + R_B} \right)$

Como: $V_1 = V_{ent} \Rightarrow V_{ent} = \left(\frac{(+V_{cc}).R_B}{R_A + R_B} \right)$

Y finalmente, cuando $V_1 = V_2$ $V_R = V_{ent} \Rightarrow V_R = \left(\frac{(+V_{cc}) \cdot R_B}{R_A + R_B} \right) \rightarrow (3)$

Se propone una $R_A = 27 \text{ K}\Omega$ y se despeja a R_B de la ecuación (3), teniendo entonces:

$$R_B = \left(\frac{V_R \cdot R_A}{V_{cc} - V_R} \right) = \left(\frac{(3.5 \text{ V}) \cdot 27 \text{ K}\Omega}{5 \text{ V} - 3.5 \text{ V}} \right) = \left(\frac{94500 \text{ V}\cdot\Omega}{1.5 \text{ V}} \right) = 63 \text{ K}\Omega$$

Por lo tanto se toma el valor comercial más cercano el cual es:

$$R_B = 68 \text{ K}\Omega$$

Y su gráfica de transferencia es la que sigue:

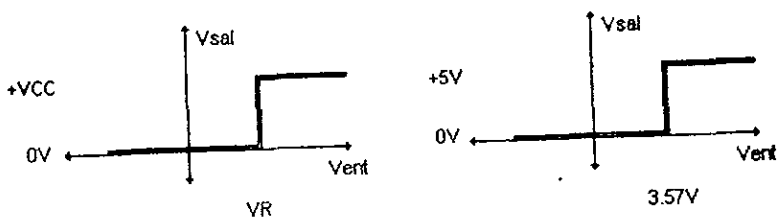


Fig. VI.11 Gráfica de transferencia del comparador sin histéresis.

Finalmente, la señal de salida de la etapa comparadora, es una señal totalmente libre de ruido, es decir ni la señal de alta frecuencia ocasionada por el rozamiento de bobina electromagnética sobre la pared del ducto, ni los picos de amplitud generados por el golpeteo de la bobina electromagnética logran llegar a la línea de conversión analógica-digital del microcontrolador.

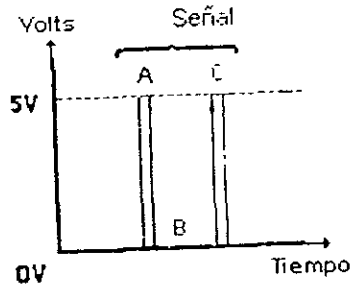


Fig.VI.12 Señal de entrada para el modulo analógico/digital en caso de pérdida de metal

VI.3.1.-SISTEMA SENSOR-

El papel principal del sistema sensor es medir el campo de fuga de flujo magnético (MFL). El campo de fuga de flujo magnético es un campo vectorial, esto es tienen magnitud, dirección y sentido. En la medición del campo de fuga de flujo magnético, la componente normal (radial) y tangencial (axial) puede ser registradas, la tercer componente de la dirección comúnmente no es examinada. Cada uno de estos campos componentes contiene información útil para la estimación geométrica de un defecto.

El sensor de flujo magnético tal como el de elementos (efecto) Hall, convierten directamente el nivel del campo magnético en una salida de voltaje. La salida de voltaje de un elemento Hall es directamente proporcional a la densidad de fuga de flujo magnético, también la salida sólo puede ser medida por una escala constante, para obtener la densidad de fuga de flujo magnético. Así, los elementos Hall requieren energía para operar, la ventaja de una medición directa de la densidad de fuga de flujo magnético es contrarrestada por la desventaja de un requerimiento de energía activa.

Un sensor de efecto Hall es un sensor de campo magnético basado en el efecto Hall. Usualmente este dispositivo consiste en una delgada placa de material semiconductor con cuatro contactos eléctricos. Una corriente I es aplicada por dos de los contactos (contactos de corriente CC_1 y CC_2) mientras que los otros dos contactos (contactos de sensor SC_1 y SC_2) son puestos en dos zonas equipotenciales o cercas de las orillas de la placa. Si algún campo magnético es aplicado al dispositivo, el voltaje Hall (señal de salida del sensor) aparece entre los contactos del sensor. El voltaje Hall es aproximadamente proporcional al producto de la componente de inducción magnética perpendicular al plano de la placa (componente B) y la corriente (I). La figura VI.13 muestra la estructura de un sensor de efecto Hall.

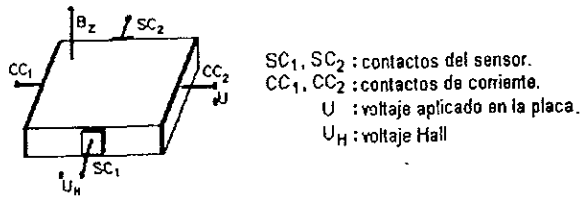


Fig.VI.13 Estructura de un sensor de efecto Hall

Los sensores Hall son usualmente placas delgadas y están hechas de un material de baja concentración de cargas, ya que el voltaje es inversamente proporcional tanto al grosor de la placa como a la concentración de cargas. Generalmente tiene una alta resistencia y el voltaje aplicado a los conductores de corriente, y la potencia de disipación tienen que estar minimizadas al máximo si un material con alta movilidad es usado para la construcción de la placa Hall.

VI.3.2.-SENSOR DE EFECTO HALL 103SR17A-1 MARCA MICRO SWITCH HONEYWELL DIVISION-

Las características principales de este dispositivo son:

- Empaque sellado de acero inoxidable roscado.
- Un metro de cable forrado con código de colores y aislados entre sí.
- Código de colores: rojo Vs (+), negro tierra (-) y azul, verde o blanco salida.
- Montura ajustable.
- Polarización de 4.5 a 24 volts.
- Fuente de corriente máxima 10 mA.
- Salida tipo colector abierto.
- Corriente de salida máxima 20 mA.
- Modo de operación unipolar.

El sensor trabaja debido al campo magnético ejercido por algún imán permanente o electroimán. La salida del sensor es tipo colector abierto, esto quiere decir que éste dispositivo puede ser conectado a dispositivos TTL o a elementos discretos. Como la salida del sensor es de tipo colector abierto, esto implica que la salida del dispositivo está constituida por una configuración a base de un transistor NPN, donde la carga es normalmente conectada entre la salida y una fuente de voltaje. El sensor esta diseñado para ser conectado directamente a cualquier dispositivo, por lo que cuenta con una resistencia de pull-up de aproximadamente 12 K Ω .

La operación básica del sensor de efecto Hall es que entrega una corriente de salida máxima de 20 mA cuando es excitado por el campo magnético de algún imán o electroimán y al suprimir el campo magnético la corriente de salida se hace cero.



Fig.VI.14.A *Sensor de efecto Hall 103SR Micro Switch.*

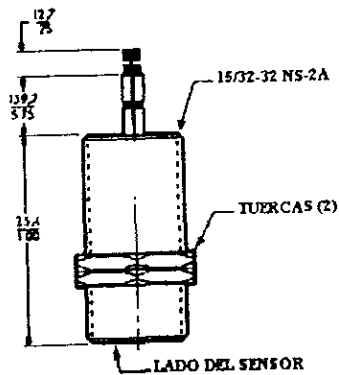


Fig.VI.14.B *Dimensiones del sensor de efecto Hall 103SR Micro Switch*

VI.4.1.-DIRECCIÓN DE BUSQUEDA DEL SENSOR-

La tarea principal que realiza esta sección del sistema, es calcular la distancia recorrida por el equipo a lo largo de la tubería, por tres razones principales:

- Una de las más importantes, es el poder referenciar a cada una de las discontinuidades magnéticas, con su localización longitudinal sobre la trayectoria de la tubería, con esta información completar el perfil de variación de cada uno de los parámetros medidos.
- Otro punto importante es el cálculo del perfil de velocidad, y para esto se necesita saber cual es la distancia recorrida por el instrumento en un intervalo de tiempo definido.
- Para determinar la longitud efectiva de la tubería en inspección.

Esta sección esta compuesta por cuatro odómetros (odómetro: Dispositivo para medir distancia lineal.). Los cuales basan su operación en cuatro sensores de efecto Hall unipolares con la salida tipo encendido-apagado.

La manera en que funcionan los cuatro odómetros es la misma. Para que opere adecuadamente el sensor de efecto Hall sólo se necesita un polo magnético (polo sur), ya que el sensor hace activa su salida (entregando una corriente de máxima de 20 mA) únicamente al detectar la presencia del polo sur del imán permanente, desactivándose la salida (el sensor no entrega corriente a su salida 0 mA) en ausencia del mismo polo.

En base en lo anterior, se calcula la distancia recorrida por el equipo ya que al avanzar este a lo largo de la tubería ocasiona el rodamiento de una rueda (odómetro) en la cual se encuentran dispuestos 10 imanes equidistantes uno de otro, produciendo estos la activación y desactivación (niveles lógicos altos y bajos) de la salida del sensor de efecto Hall.

Por lo anterior, esta sección se concentra en detectar los cambios de estado en la salida del sensor de efecto Hall y contabilizarlos. Ya que dos cambios de estado son equivalentes a un desplazamiento angular de 36° y éste a su vez es igual a un desplazamiento longitudinal de 2 cm. De tal forma que la distancia total recorrida por el equipo expresada en centímetros, es igual a dos veces el número de cuentas que registró la sección de búsqueda del sensor. Donde una cuenta es igual a dos cambios de estado de la salida del sensor de efecto Hall.

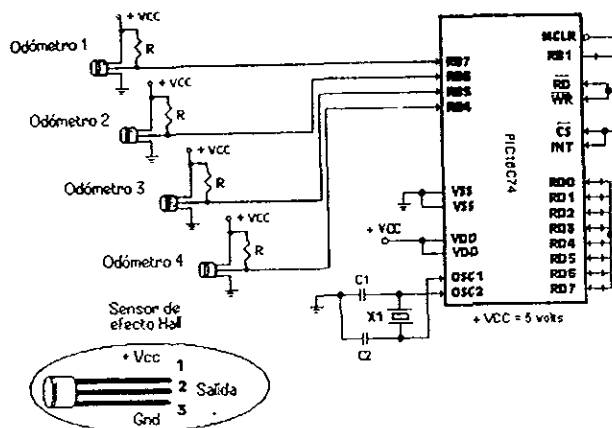


Fig.VI.15.A Diagrama eléctrico de la sección "Búsqueda del Sensor".

Así, el número de cambios de estado está íntimamente relacionado con la distancia recorrida por el equipo. La fig. VI.15.A muestra el diagrama eléctrico de la sección de búsqueda del sensor.

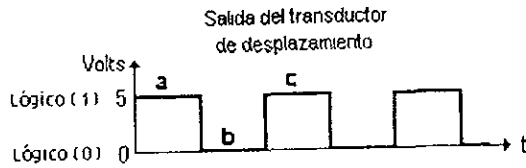


Fig.15.B Señal de salida del sensor de efecto Hall.

A continuación se presenta la señal proporcionada por los odómetros y la relación que tienen con la distancia recorrida por el equipo.

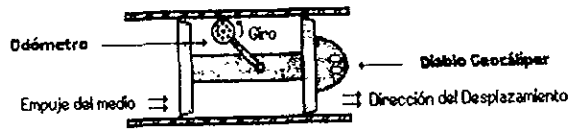


Fig.16.A Odómetro en operación.

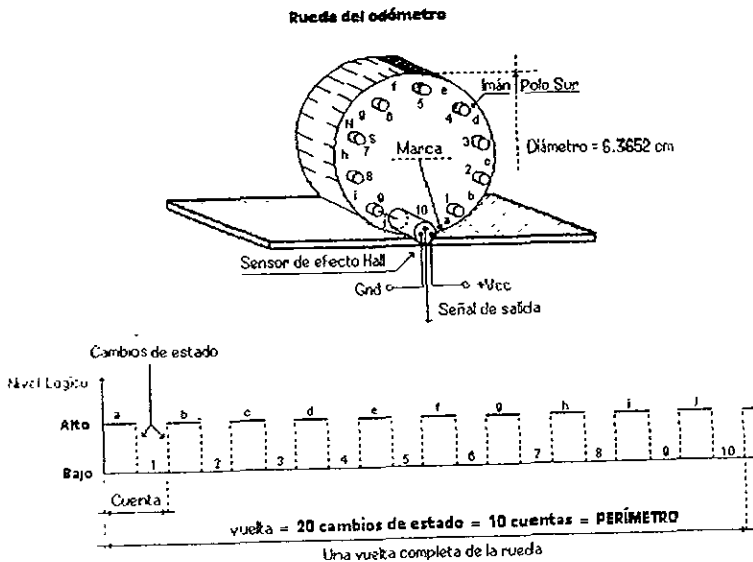


Fig.16.B Relación entre la distancia recorrida por el equipo y el número de cuentas registradas

Como se puede observar en la fig.VI.16.B una vuelta completa de la rueda equivale a diez ciclos completos de la señal generada, o lo que es lo mismo a 20 cambios de estado. Por programa el microcontrolador utiliza tres registros de 8 bits para registrar el número de ciclos completos sucedidos en la salida del sensor de efecto Hall (odómetro). Estos tres registros representan al número hexadecimal FFFFFFFh lo que permite registrar como máximo 16,777,215 cuentas o ciclos completos.

Sólo cuando el microcontrolador ha detectado dos cambios de estado en la salida del sensor de efecto Hall es cuando éste incrementa en una unidad el número de cuentas registradas. Donde:

$$\text{Cuenta} = \left(\frac{\text{Vuelta completa de la rueda}}{\text{Número de imanes permanentes}} \right) = \left(\frac{\text{Perímetro de la rueda}}{10} \right) = \left(\frac{20C_m}{10} \right)$$

$$\text{Cuenta} = 2C_m$$

O finalmente, una cuenta equivale a un movimiento angular de 36° de la rueda.

$$\text{Cuenta} = \left(\frac{\text{Movimiento angular total de la rueda}}{\text{Número de imanes permanentes}} \right) = \left(\frac{360^\circ}{10} \right)$$

$$\text{Cuenta} = 36^\circ$$

VI.4.2.-ALGORITMOS DE CONTROL-

-ALGORITMO DE CONTROL Y PROCESO DE SECCION "DIRECCIÓN DE BUSQUEDA DEL SENSOR"-

Para describir el algoritmo se consideran los siguientes parámetros:

PB₄ – PB₇ = Entradas del puerto B del PIC₀

R_i = Registro instantáneo

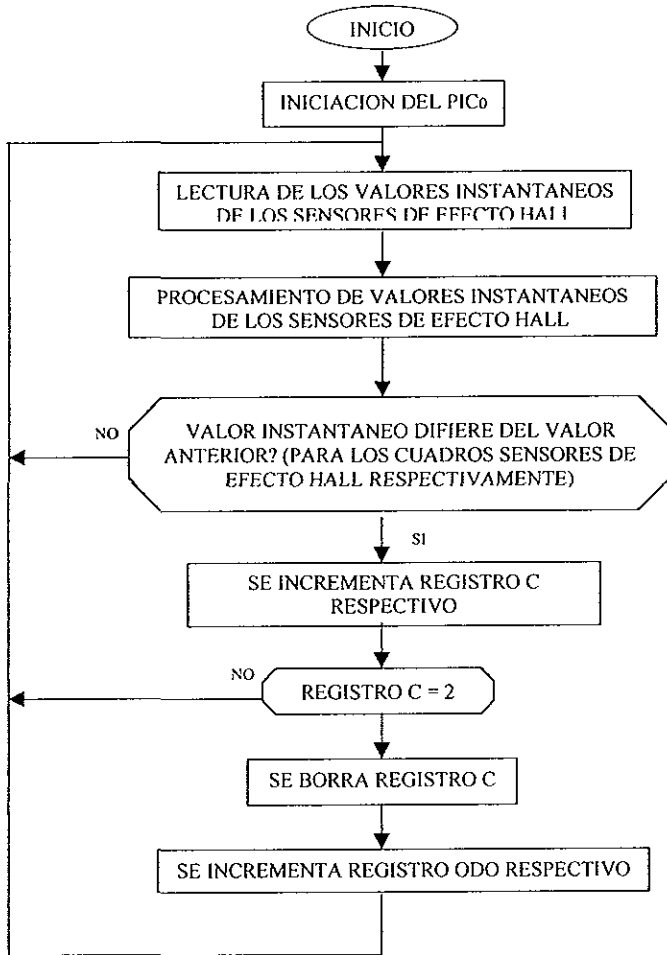
R_a = Registro anterior

C = Registro contador a 2

ODO = Odómetro, arreglo de tres registros de 8 bits

Los pulsos que generan los sensores de efecto Hall, son adquiridos en PB₀ – PB₃, para cada entrada se asignan R_i, R_a, C Y ODO. Se inicializan los registros en cero y se muestrean continuamente las entradas del puerto, se transfiere cada bit a su correspondiente R_i, se compara con el valor de R_a y si hay diferencia se transfiere R_i → R_a y se incrementa una cuenta en C, si la cuenta es 2, se incrementa en 1 el valor de ODO.

**ALGORITMO DE CONTROL PARA LA SECCION "DIRECCION DE
BUSQUEDA DEL SENSOR"**



C: Registro contador a 2. Un incremento de este registro representa un recorrido de 1 cm.

ODO: Registro de recorrido. Una cuenta de este registro representa un recorrido de 2 cm.

-ALGORITMO DE CONTROL Y PROCESO DE LA SECCIÓN "SISTEMA DE MAGNETIZACION"-

Para la detección de pérdida de metal se aprovecha el hecho de que la señal que proporciona el sensor al pasar por un defecto de pérdida de metal es una señal típica. El equipo cuenta con sensores diametralmente opuestos, las señales proporcionadas por los sensores son muestreadas continuamente por dos entradas analógicas del PIC1. Para describir el algoritmo se consideran los siguientes parámetros:

V_i = Valor instantáneo de la muestra.

V_0 = Valor inicial (valor de offset de la línea base).

V_{th+} = Valor de umbral alto

V_{th-} = Valor de umbral bajo.

T_1 = Temporizador 1 (50 ms).

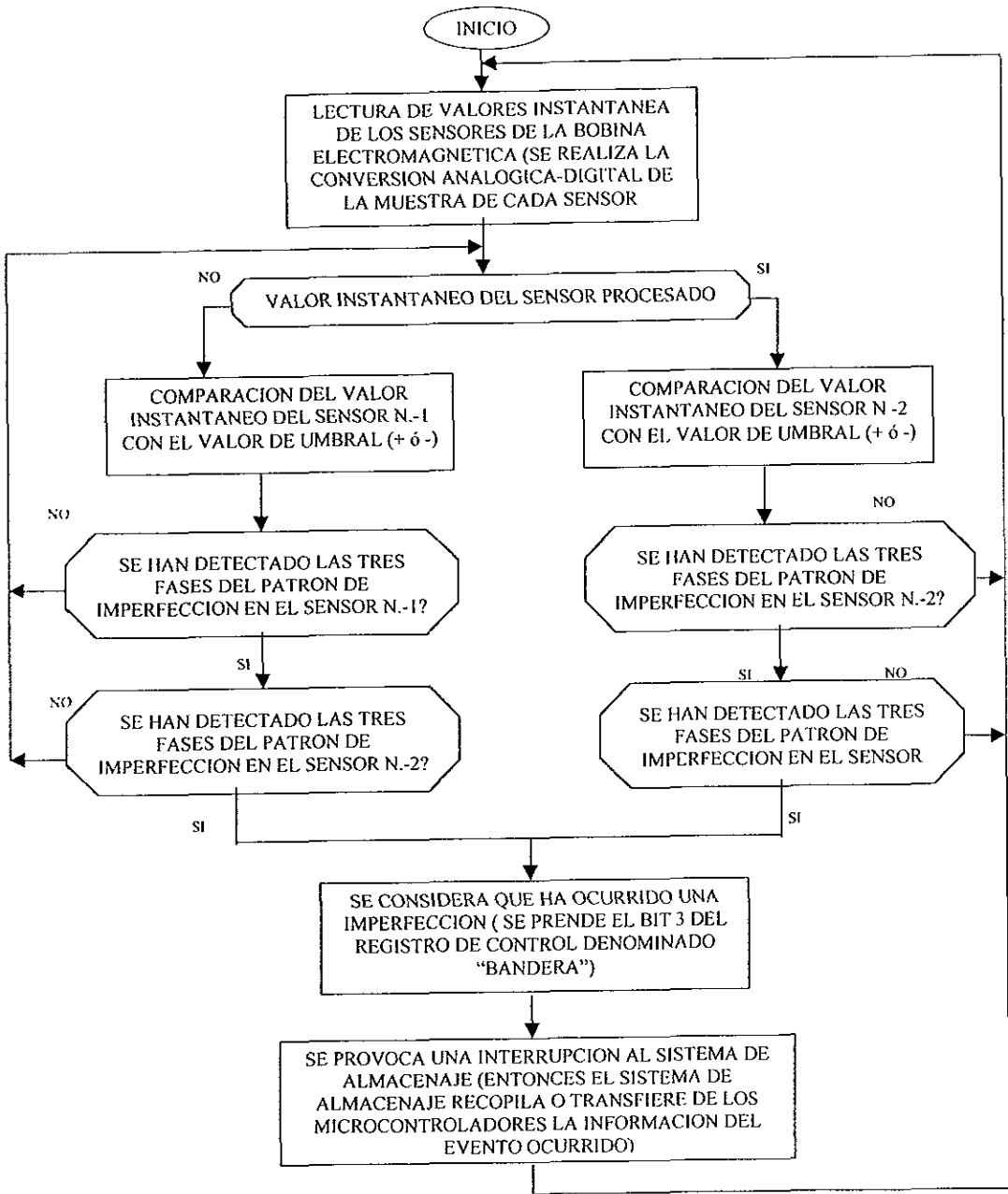
T_2 = Temporizador 2 (1 s).

T_3 = Temporizador 3 (50ms).

Se toman las 8 primeras muestras V_i y se calcula el promedio, el cual es valor inicial V_0 . Para el primer sensor las primeras muestras V_i se comparan continuamente con $V_i > V_{th+}$, si se cumple se arranca T_1 y T_2 , a partir de ese momento los siguientes V_i se comparan con $V_i \leq V_{th-}$, si se cumple se inicializa a T_1 . A partir de ese instante las siguientes V_i se comparan nuevamente con $V_i > V_{th+}$, si se cumple, se indica que acaba de recibirse una señal típica de pérdida de metal.

Debido a que en codos y curvaturas los sensores pueden tener una inclinación, esta inclinación se refleja como un defasamiento en el tiempo entre sensores, por lo que T_2 se habilita para esperar la señal del otro sensor. La señal del segundo sensor se adquiere de manera similar al primero, así sucesivamente, solo que la función de T_1 es ocupada por T_3 . El T_2 tiene como objetivo esperar que sea registrada la señal del sensor faltante. En caso de que cualquiera de que las condiciones no se cumplan no se considera el evento, o bien cuando uno de los sensores no registre una señal típica o cualquiera de los temporizadores llegue a su fin.

-ALGORITMO DE CONTROL DE LA SECCION "SISTEMA DE MAGNETIZACION"-



VI.4.3-COMPARACION CON LOS DISPOSITIVOS EXTRANJEROS-

PRINCIPIO UTILIZADO PARA LA DETECCIÓN:

EQUIPO INSTRUMENTADO (MEXICO): Se basa en el principio de localizar las fugas en el flujo magnético creadas en la vecindad de las anomalías e imperfecciones del espesor de la tubería.

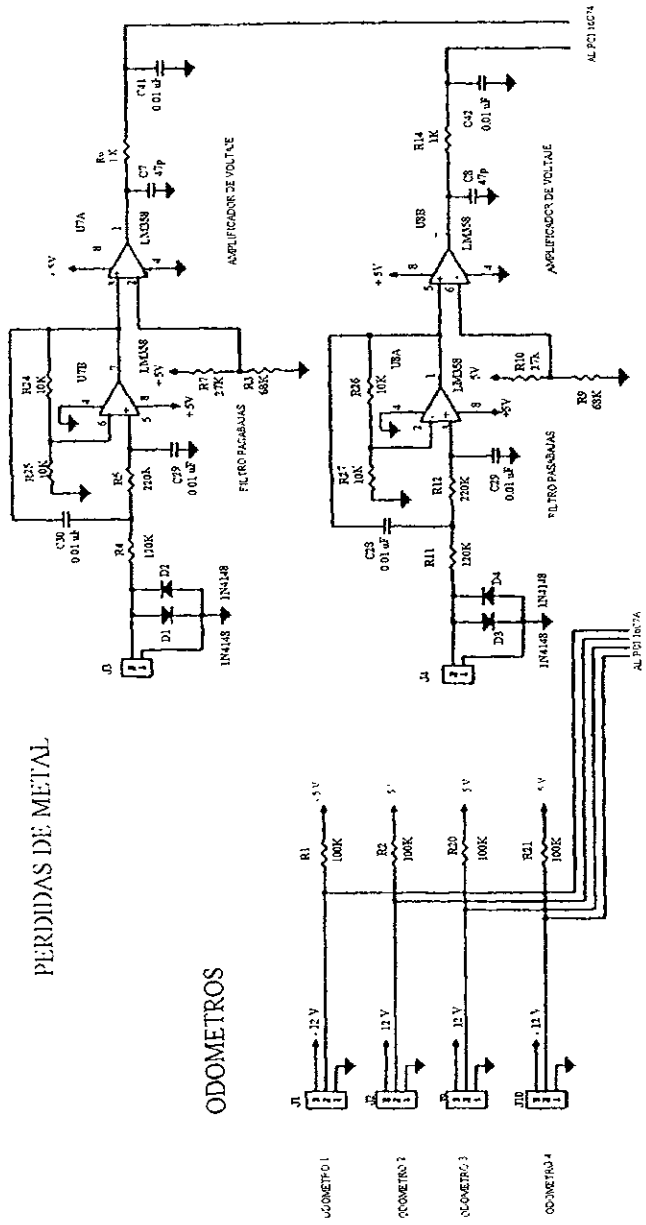
COMPAÑIA TRANSCANADA PIPELINES LTD: Emplea el principio de escape de flujo magnético, es decir utiliza un imán colocado en la vecindad inmediata de la pared del tubo logrando inducir un campo magnético que sufre distorsión en el momento de encontrar algún defecto.

VETCOLOG (USA): Utiliza el principio de flujo magnético para la detección de anomalías en las tuberías.

CARACTERISTICAS FISICAS Y DE OPERACIÓN

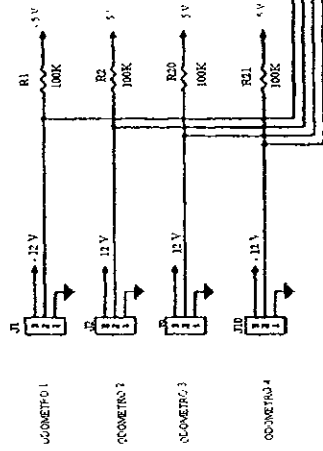
CARACTERISTICAS	VELOCIDAD (USA)	TRANSCANADA PIPELINE LTD	DISP. INST. (MEXICO)
LONGITUD (m)	3 33	1 a 2 5	3 50
PESO (Kg.)	895.5	80 a 404	275
RANGO DE VELOCIDAD (KM/hr)	10 a 15	1 5 a 12	5 a 15
TIEMPO MAXIMO DE CORRIDA (Hrs)	80	40	50
NUM DE SENSORES	20	12	12
RANGO DE TEMPERATURA (°C)	60 a 66	-20 a 60	-10 a 50
NÚM DE MODULOS	3 a 4	3 a 4	5
NÚM DE CANALES	25	14	21
NUM DE CANALES PARA LOS SENSORES	20	12	12
NUM DE CANALES PARA LOS ODOMETROS	2	2	4
MAXIMA PRESION (Kg./Cm ²)	40	105	100
TIPO DE SENSORES UTILIZADOS	HALL	HALL	HALL
CONTACTO DE SENSORES A LA TUBERIA	PASTILLAS C. TUGSTENO	CEPILLOS	PASTILLAS C TUGSTENO

VI.5-DIAGRAMA ELECTRICO GENERAL DEL EQUIPO-



PERDIDAS DE METAL

ODOMETROS



-CONCLUSIONES-

Para realizar un eficiente programa de mantenimiento de ductos de transporte, se debe incluir actividades de inspección interna, las cuales permitan determinar y corregir oportunamente daños en tuberías y así evitar daños posteriores.

Gracias al diseño del sistema de inspección de tuberías ahora se dispondrá de un equipo que permita estar al tanto de las condiciones en las cuales se encuentran operando las redes de transporte en el país. Ahorrándose con esto altos gastos de mantenimiento preventivo, ya que actualmente se paga un costo alto a empresas extranjeras para que realicen un sondeo del estado en que se encuentran estas vías de transporte. También lograr la independencia tecnológica en este renglón utilizando las nuevas tecnologías a nivel mundial, así, como la creación de mecanismos para regular los costos y calidad de servicios de inspección de esta naturaleza. Además de la formación de la infraestructura necesaria (equipo y personal) para el diseño de instrumentos de diferentes diámetros y con diferentes propósitos, para resolver problemas específicos e inherentes a los sistemas de ductos.

-APENDICE I-

-LAS ECUACIONES DE MAXWELL EN FORMA INTEGRAL-

Las formas integrales de las ecuaciones de Maxwell normalmente son más fáciles de reconocer en términos de las leyes experimentales a partir de las cuales se han obtenido por un proceso de generalización. Los experimentos deben tratar con cantidades físicas macroscópicas y, por lo tanto, sus resultados se expresan en términos de relaciones integrales. Una ecuación integral siempre representa una teoría. Se reunirán ahora las formas integrales de las ecuaciones de Maxwell.

$$1) \quad \int D \cdot ds = \int_{\text{vol}} \rho \, dv \quad \text{Ley de Gauss}$$

$$2) \quad \int B \cdot ds = 0 \quad \text{Ley de Ausencia de Monopolos Magnéticos}$$

$$3) \quad \int E \cdot dl = - \int \partial B / \partial t \cdot ds \quad \text{Ley de Inducción de Faraday}$$

$$4) \quad \int H \cdot dl = I + \int \partial D / \partial t \cdot ds \quad \text{Ley de Ampere-Maxwell}$$

Estas cuatro ecuaciones integrales permiten encontrar las condiciones en la frontera sobre B , D , H y E , las cuales se necesitan para evaluar las constantes obtenidas en la resolución de las ecuaciones de Maxwell, en la forma diferencial parcial. En general, estas

condiciones en la frontera permanecen sin cambio, respecto de sus formas para los campos estáticos o estables, y se pueden utilizar los mismos métodos para obtenerlas.

-ECUACIONES DE MAXWELL EN LA FORMA PUNTUAL-

- 1) $\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$ Ley de Gauss
- 2) $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ Ley de Ausencia de Monopolos Magnéticos
- 3) $\nabla \times \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t$ Ley de inducción de Faraday
- 4) $\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \partial \mathbf{D} / \partial t$ Ley de Ampere-Maxwell

La ecuación (1) afirma esencialmente que la densidad de carga es una fuente (o acumulador) de líneas de flujo eléctrico. Obsérvese que ya no se puede decir que todo el flujo eléctrico empieza y termina en una carga, debido a la forma puntual de la ley de Faraday (3) Muestra que \mathbf{E} , y consecuentemente \mathbf{D} , pueden tener circulación, si esta presente un campo magnético que cambia. Por lo tanto, las líneas de flujo eléctrico pueden formar espiras cerradas. Sin embargo el recíproco todavía es verdadero, y cada coulomb de carga debe tener un coulomb de flujo eléctrico que diverge de él.

La ecuación (2) reconoce nuevamente el hecho de que se ignora la existencia de "cargas magnéticas" o polos. El flujo magnético siempre se encuentra en espiras cerradas y nunca diverge de una fuente puntal.

Estas cuatro ecuaciones forman la base de toda la teoría electromagnética. Son ecuaciones diferenciales parciales y relacionan entre sí los campos eléctricos y magnéticos ya sus fuentes, densidad de carga y de corriente.

-LEY DE GAUSS-

$$\int_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = \int_{\text{vol.}} \rho \, dv$$

aplicando el teorema de la divergencia

$$\int_S (\nabla \cdot \mathbf{D}) \, ds = \int_{\text{vol.}} \rho \, dv$$

$$\therefore \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho$$

-LEY DE LA AUSENCIA DE MONOPOLOS MAGNETICOS-

$$\int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$$

aplicando el teorema de la divergencia

$$\int_S (\nabla \cdot \mathbf{B}) \, ds = 0$$

$$\therefore \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

-LEY DE INDUCCIÓN DE FARADAY-

$$\text{fem.} = - N \frac{d\phi_B}{dt}$$

$$\text{fem.} = \int E \, dl$$

$$\int E \, dl = - \frac{d}{dt} \int B \, ds$$

$$\text{fem} = \int E \, dl = - \int \frac{\partial B}{\partial t} \, ds$$

Aplicando teorema de Stokes

$$\int (\nabla \times E) \cdot ds = - \int \frac{\partial B}{\partial t} \, ds$$

$$\therefore \nabla \times E = - \frac{\partial B}{\partial t}$$

-LEY DE AMPERE-MAXWELL-

$$\int H \, dt = I + \int \frac{\partial D}{\partial t} \, ds$$

Aplicando teorema de Stokes.

$$\int (\nabla \times H) \cdot ds = \int J \cdot ds + \int \frac{\partial D}{\partial t} \cdot ds$$

$$\therefore \nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$$

-APENDICE II-

-CONCEPTOS BASICOS Y UNIDADES-

Las unidades de magnitudes eléctricas y magnéticas, y las magnitudes propiamente dichas. Se encuentran definidas en el Sistema Internacional de Unidades (SI). Las magnitudes básicas relacionadas con dichas magnitudes son la fuerza, la cantidad de electricidad, y la corriente eléctrica. La fuerza viene dada por la unidad básica de masa, longitud y tiempo; la unidad de fuerza es el *Newton (N)* ($N = \text{kg.m/s}^2$). La energía esta basada en la fuerza; la unidad de energía es el *Julio (J)* ($J = N.M$).

La potencia es la velocidad temporal de cambio de energía; la unidad de potencia es el Vatio (*W*) ($W = J/s$). (Las relaciones mostradas entre paréntesis son derivaciones de la *Unidades Básicas*.) De las seis unidades básicas del SI, la única que pertenece a las magnitudes eléctricas es la unidad de *corriente eléctrica*, el *Amperio (A)*. El amperio es aquella corriente constante que mantenida sobre dos conductores paralelos rectos de longitud infinita, de sección transversal despreciable, y situados a una distancia de un metro en el vacío, producen una fuerza entre ambos conductores igual a 2×10^{-7} Newton por metro de longitud. Se utilizan unidades derivadas (derivadas de las seis unidades básicas) para expresar otras magnitudes eléctricas y magnéticas, como se explica a continuación.

- La *carga* (carga eléctrica) es una magnitud de electricidad, siendo la corriente el flujo de carga por unidad de tiempo. La unidad de carga es el *Culombio (C)*, definido como la cantidad de corriente transportada en un segundo por una corriente de un Amperio, así $C = A.s$.

- La *tensión eléctrica* se refiere tanto a la diferencia de *potencial* eléctrico como a la *fuerza electromotriz* (fem.); la unidad es el *voltio* (V), definido como la corriente de potencial eléctrico entre dos puntos de un conductor por el que circula una corriente constante de un Amperio, cuando la potencia disipada entre estos puntos es igual a un Vatio ($V = W/A$).
- La *resistencia* (resistencia eléctrica) se expresa en *Ohms* (Ω). El Ohm es la resistencia eléctrica entre dos puntos de un conductor (que no es fuente de ninguna fuerza electromotriz) cuando la diferencia constante de potencial de 1 voltio aplicado a estos dos puntos, produce en este conductor una corriente de un Amperio; ($\Omega = V/A$)
- La *conductancia* es el recíproco de la resistencia ($1/R$); se expresa formalmente como Ohms inversos (Mho); la unidad del SI para la conductancia es *el Siemens* (S); ($S = 1/\Omega = A/V$).
- La *capacidad* (capacidad eléctrica) se expresa en *Faradios* (F); el Faradio es la capacidad de un condensador entre las armaduras del cual aparece una diferencia de potencial de 1 voltio cuando se carga con una cantidad de carga eléctrica igual a 1 Colombio; ($S = C/V = A.s/V$).
- La *inductancia* (inductancia eléctrica) se expresa en *Henrios* (H); el Henrio es la inductancia de un circuito cerrado en el cual se produce una fem. de un Voltio cuando la corriente eléctrica en el circuito varía uniformemente a una velocidad de 1 Amperio por segundo; ($H = V.s/A$).
- La *impedancia* (Z) de un circuito c.a. se compone de una parte *real*, *resistencia* (R) y una parte imaginaria, *reactancia* (X); $Z = R + jX$; la reactancia puede ser *capacitiva*

(X_c) o *inductiva* (X_L); cuando ambas existen en un circuito $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_c)^2}$; tanto la impedancia como la reactancia se expresan en *Ohmios*.

- De forma similar la *admitancia* (Y) de un circuito c.a. es el inverso de su impedancia, $Y = 1/Z$; la admitancia contiene una parte *real*, *conductancia* (G), y una parte *imaginaria*, *susceptancia* (B); $Y = G + jB$; la admitancia así como la susceptancia se expresan en *Siemens* (también se pueden expresar en Ohmios inversos, Mhos).
- La *frecuencia* se expresa en *Hertzios* (Hz); el Hertzio es la frecuencia de un ciclo por segundo.
- La *resistividad* (ρ), denominada también *resistencia específica*, es la resistencia ofrecida por un cubo unidad de una sustancia al flujo de corriente; $\rho = R.A/l$, en donde R es la resistencia de un conductor uniforme, A su área transversal, y l su longitud; la resistencia se expresa en *ohmios-metro* ($\Omega.m$) o por su submultiplo *ohmio-cm*.
- La *conductividad* (σ) es la relación de la densidad de corriente y el campo eléctrico en un material; la *densidad de corriente* es la corriente por unidad de área seccional de un conductor (o sustancia conductora); la *intensidad del campo eléctrico* es la fuerza eléctrica (vectorial) por unidad de carga positiva, expresada en voltio por metro; la conductividad eléctrica se expresa en Siemens por metro (S/m) o por centímetro.
- El *flujo magnético* se expresa en *Webers* (Wb); un Weber es el flujo magnético que al enlazar a un circuito de una vuelta produce una fuerza electromotriz de un voltio a medida que se reduce a 0 a una velocidad uniforme en 1 segundo; ($WB = V.s$).
- La *densidad de flujo magnético* se expresa en *Teslas* (T); una Tesla es la densidad de flujo magnético dada por un flujo magnético de un Weber por metro cuadrado; ($T = Wb/m^2$).

- La unidad de *fuerza magnetomotriz* es, hablando estrictamente, el *Amperio (A)*, pero es más comúnmente utilizado el *Amperio-vuelta*; una fuerza magnetomotriz de un Amperio-vuelta resulta de una corriente de un Amperio que fluye por una vuelta de hilo. o el resultado de una corriente de 0.01 Amperios que fluye por 100 vueltas de hilo.
- La unidad de campo magnético es el Amperio por metro (A/m).

A continuación se relacionan en orden alfabético otras unidades que no son del sistema SI, eléctricas y magnéticas.

1 abamperio = 10 A	1 faraday (físico) = 9.6522×10^4 C
1 aculombio = 10 C	1 gamma = 10^{-9} T (= 1 nT)
1 abfaradio = 10^9 F	1 gauss = 10^{-4} T
1 abhenrio = 10^{-9} H	1 gilbert = 0.7958 amperios-vuelta
1 abmho = 10^9 S	1 caballo de potencia (eléctrico) = 746 W
1 abohmio = 10^{-9} Ω	1 maxwell = 10^{-8} Wb
1 abvoltio = 10^{-8} V	1 oersted = 79.58 A/m
1 electron-voltio (eV) = 1.6×10^{-19} J	1 unidad polar = 1.25664×10^{-7} Wb

-GLOSARIO-

Amorfo.- Sin forma regular o bien determinada

Acuosa.- Dicese de una solución cuyo disolvente es el agua

Campo.- Un “campo” es toda cantidad física que toma un valor diferente en cada punto del espacio.

Campo Eléctrico.- Es la fuerza que se ejerce sobre una carga unitaria en reposo.

Campo Magnético.- Es la parte de la fuerza que involucra la velocidad de la carga y actúa sobre una carga en movimiento.

Circunferencia.- Curva cerrada cuyos puntos equidistan del centro.

Cuanto.- Cantidad mínima de energía que puede ser emitida propagada o absorbida.

Corrosión.- La corrosión se puede definir como la destrucción de un metal por una acción electrolítica entre el metal y el medio que lo rodea.

Efluvio.- Exhalación de pequeñas partículas o vapores de un cuerpo.

Electromagnetismo.- Es la parte de la física que estudia las interacciones entre corrientes eléctricas y campos magnéticos.

Exactitud.- Calidad de exacto.

Exacto.- medido, calculado, expresado o hecho con todo rigor y fidelidad.

Física.- Ciencia que estudia las propiedades de la materia y las leyes que dan cuenta de los fenómenos naturales.

Flujo Eléctrico.- Es el producto del campo eléctrico por el área de la sección que atraviesa.

Fuerza Electromotriz.- Se puede definir a la fuerza electromotriz como la cantidad proporcional al trabajo que se hace para mover la carga en cuestión a lo largo del circuito.

Hidrato.- Combinación de un cuerpo con el agua.

Homogéneo.- Dicese del conjunto formado por elementos de igual naturaleza y condición.

De estructura uniforme.

Inclusión de hidrogeno.- Es cuando él hidrogeno atómico penetra en la pared del ducto y la abre, generando lo que se conoce como fenómeno de laminación, que provoca que el ducto pierda su resistencia estructural.

Ingeniería.- Aplicación de las ciencias fisicomatemáticas a la invención, perfeccionamiento y utilización de la técnica industrial.

Ley de Gauss.- El flujo de campo eléctrico a través de cualquier superficie es proporcional a la carga total encerrada por esa superficie.

Ley de la Ausencia de Monopolos Magnéticos.- El flujo neto de campo magnético a través de cualquier superficie cerrada es cero.

Ley de Inducción de Faraday.- La fuerza electromotriz inducida en un circuito es proporcional a la variación temporal del flujo de campo magnético que rodea el circuito.

Ley de Ampere-Maxwell.- La razón de variación temporal del campo eléctrico más la corriente producida por cargas en movimiento es proporcional al campo magnético a lo largo de una trayectoria cerrada

Ley de Lenz.- El voltaje inducido actúa para producir un flujo en oposición.

Magnetómetro de bobina.- El cambiante campo magnético aplicado a la bobina genera una fem. Proporcional a la rapidez de cambio del campo con el tiempo.

Permeabilidad magnética.- Es una medida de la facilidad con la que un material ferrítico puede ser magnetizado.

Potencial Eléctrico.- Es una cantidad escalar, pues solo se describe con una magnitud, y sirve para medir la cantidad de trabajo por unidad de carga que se realiza para mover una carga positiva de un punto "a" a un punto "b" en el campo eléctrico.

Precisión.- Calidad de preciso, necesario.

Transductor de efecto Hall.- El campo magnético aplicado a una placa que lleva corriente eléctrica genera una diferencia de potencial en dirección perpendicular a la corriente y al campo magnético.

Vórtice.- Torbellino hueco que puede originarse en un fluido en movimiento

BIBLIOGRAFÍA:

1 -Electromagnetismo

Krauss John D. and Carver Keith R.

Mc Graw-Hill

2. - Teoría Electromagnética

Hayt William H

Mc. Graw-Hill

3 -Fundamentos de la Teoría Electromagnética

Reitz and Milford and Christhi

Mc, Graw-Hill

4. -Electricidad y Magnetismo

Gabriel A. Jaramillo y J. Alvarado

Trillas

5. -Física Vol. II

Electromagnetismo y Materia

Feynman

6. - De la Brújula al Spin El Magnetismo.

Julia Tagueña, Estaban Martina

Fondo de Cultura Económica

7 -Metodos experimentales para Ingenieros

Jack p Holman

Mc Graw-Hill

8. -Sensores y Analizadores

Harry N. Norton

Gustavo Gil S.A

9. - Ultrasonía

Carlin Benson

URMO S.A. De Ediciones

10.- Apuntes de Electrónica Analógica

Antonio Herrera M.

FES-C

11 - Pipeline Systems

Fluid Mechanics and Its Applications

B Coulbeck and E. Evans

Kluwer Academic Publitters

12. - Sensors and Switches Vol. II

Yamatake – Honeywell

Savemation. Control Products Division.

13. - Micro Switch. Sensing and Control Pressure and Airflow Sensor. Catalog 20

Honeywell Inc. June 1995

14. -British Gas On Line Inspection Centre

Assessment of Interactive Corrosion by High Resolution Pigging.

J D. Smith, P. Eng. and J.B. Lintz, P. Eng.

15. - Pipetronix Inc.

Association Transmission Conference february 1992

16. -Pipeline Pigging and Inspection Technology four day Conference.

Gulf Publishing Company USA, 1990

17. - Pipeline Pigging and Inspection Technology four day Conference.

Gulf Publishing Company USA, 1994