

9  
2eJ

# PAGINACION VARIA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO



FACULTAD DE CIENCIAS

TUBOS ATRAPADOS POR  
FRICCION

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
F I S I C O  
P R E S E N T A

**GUILLERMO CERVANTES MARTINEZ**



MEXICO, D. F.

FACULTAD DE CIENCIAS  
SECCION DE FISICA

OCTUBRE 1994

TESIS CON  
FALLA DE ORIGEN



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 está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MEXICO

**M. EN C. VIRGINIA ABRIN BATULE**  
Jefe de la División de Estudios Profesionales  
Facultad de Ciencias  
Presente

Los abajo firmantes, comunicamos a Usted, que habiendo revisado el trabajo de Tesis que realizó con el pasante(s) CERVANTES MARTINEZ GUILLERMO

con número de cuenta 8132028-8 con el Título: "TUBOS ATRAPADOS POR FRICCIÓN"

Otorgamos nuestro Voto Aprobatorio y consideramos que a la brevedad deberá presentar su Examen Profesional para obtener el título de FISICO

GRADO	NOMBRE(S)	APELLIDOS COMPLETOS	FIRMA
	DR. ALIPIO GUSTAVO CALLES	MARTINEZ	
Director de Tesis	DR. TATSUO AKACHI	MIYAZAKI	
	DR. GUILLERMO PULOS	CARDENAS	
	DR. CESAR TREVINO	TREVINO	
Suplente	M. EN C. RAUL MAURICIO	RECHTMAN SCHRENZEL	
Suplente			

**TUBOS ATRAPADOS  
POR  
FRICCION**

**GUILLERMO CERVANTES MARTINEZ**

---

## **AGRADECIMIENTOS**

---

**- A la Facultad de Ciencias.**

**- Al Instituto Mexicano del Petróleo que permitió realizar en sus instalaciones algunas pruebas de los dispositivos aquí presentados.**

**- A mi asesor de tesis Dr. ALIPIO GUSTAVO CALLES MARTINEZ por la ayuda prestada en la realización de este trabajo.**

---

## DEDICATORIA

---

- A mis padres:

César y Guillermina.

- A mis hermanos:

César, Luis, Alejandro, Miriam y Mauricio.

- A mi esposa:

Beatriz.

- Muy especialmente a mis hijas:

Mariana y Ximena.



Guillermo Cervantes Martínez.  
Octubre de 1994

---

# INDICE

---

## - Introducción

### - Capítulo I - Deformaciones elásticas en tubos de acero

1.1 - Deformación lineal .....	1 - 1
1.2 - Deformación de materiales elásticos cargados axialmente .....	1 - 3
1.3 - Análisis de deformación lineal para cadenas de tubos .....	1 - 10
1.4 - Torsión .....	1 - 13

### - Capítulo II - Descripción del sistema de punto libre

2.1 - Aspectos generales de la sonda .....	2 - 1
- Alimentación .....	2 - 4
- Caracterización eléctrica .....	2 - 5
- Oscilador de fondo .....	2 - 6
- El circuito acoplador .....	2 - 11
2.2 - Electrónica de superficie .....	2 - 12
- Fuente de corriente .....	2 - 13
- PC .....	2 - 13
- Filtros y amplificadores .....	2 - 13
- Frecuencímetro .....	2 - 14

### - Capítulo III - Fijadores electromagnéticos

3.1 - Materiales magnéticos .....	3 - 2
- Histéresis .....	3 - 4
3.2 - Circuitos magnéticos .....	3 - 6
3.3 - Métodos iterativos para solución a circuitos magnéticos .....	3 - 8
3.4 - Energía magnética .....	3 - 11

## **- Capítulo IV - Diseño de fijadores electromagnéticos**

4.1 - Geometría propuesta .....	4 - 2
4.2 - Caracterización eléctrica .....	4 - 4
4.3 - Resultados magnéticos .....	4 - 8
4.4 - Análisis de resultados .....	4 - 21

## **- Capítulo V - Tuberías atrapadas en Ingeniería Petrolera**

5.1 - ¿Que es la recuperación de tuberías? .....	5 - 1
5.2 - Causas de atrapamiento de tuberías .....	5 - 4
i) Atrapamiento por arena .....	5 - 4
ii) Atrapamiento por lodo .....	5 - 5
iii) Atrapamiento por ojo de llave .....	5 - 6
iv) Atrapamiento por cemento .....	5 - 7

## **- Conclusiones.**

## **- Bibliografía.**

**- Apéndice.** Caracterización magnética de la sección con curvatura de los polos de un electroimán.

**- Anexo I** Rutinas en Turbo Pascal para el cálculo de las variables magnéticas de un circuito magnético de 3 elementos.

**- Anexo II** Programa de control para el sistema medidor de Punto Libre.

**- Anexo III** Software para la construcción de un frecuencímetro utilizando un microcontrolador INTEL 80C196KC.



---

## INTRODUCCION

---

La mecánica de sólidos es un tema interesante que permite comprender el comportamiento de los cuerpos sólidos sujetos a esfuerzos aplicados. Un problema particular que puede ser planteado dentro de esta área, es la determinación de la zona de atascamiento de un tubo atrapado por fricción en el interior de un recipiente de paredes rugosas. La solución a este problema planteado, puede ser obtenida a través de un modelo puramente mecánico, basado en las deformaciones elásticas que sufre el tubo cuando se le aplican esfuerzos de tensión o momentos de torsión.

Si se considera que el tubo dentro del recipiente está alineado a la vertical y que el atascamiento es puntual, las expresiones correspondientes a las deformaciones caracterizadas por la ley de Hooke, permiten cuantificar en forma directa la zona de atoramiento, siempre que sean conocidos algunos parámetros que caracterizan en forma elástica al tubo en consideración.

Haciendo un poco más general el problema planteado, se considera una distribución no conocida del coeficiente de fricción entre la pared del recipiente y el tubo en consideración. Para precisar la zona de atoramiento en este caso, es necesario determinar en forma experimental las deformaciones en secciones cortas a lo largo del tubo. De esta forma, se obtiene un conjunto de medidas que describen el rozamiento alrededor de la zona de atascamiento, previamente estimada con el modelo del atrapamiento puntual.

Para cuantificar las deformaciones en longitudes cortas, es utilizado un sistema que con propósitos de identificación es llamado "DETECTOR DE PUNTO LIBRE", constituido por una sonda que se introduce en el tubo atrapado y por un bloque de medición que interpreta en el exterior la información obtenida por ésta.

La sonda es una herramienta cilíndrica dividida en dos secciones desacopladas mecánicamente, cada una de ellas contiene un dispositivo de anclaje electromagnético que le permite adherirse a la pared interna del tubo. De esta forma, al generar una deformación elástica sobre el tubo, las dos secciones de la herramienta presentan un movimiento relativo entre sí, produciendo una señal eléctrica que es enviada al exterior para su interpretación.

El diseño de los electroimanes que constituyen los dispositivos de anclaje, se puede realizar a partir del concepto de conservación de la energía, aplicado al sistema magnético formado por un electroimán, deduciendo así la ecuación que determina su fuerza de pegado con la pared interna del tubo. Esta ecuación depende de las variables magnéticas asociadas con el electroimán cuya magnitud se puede determinar a través de las ecuaciones de campo o por un proceso *iterativo* basado en los resultados de la teoría de circuitos magnéticos.

El proceso que puede ser utilizado para el diseño de los electroimanes de la herramienta del sistema, consiste en establecer una geometría particular y obtener una serie de resultados para la fuerza de pegado como función de la potencia aplicada, utilizando algunos materiales ferromagnéticos comunes. Con base en estos resultados y en los requerimientos que exige el sistema, se puede determinar la potencia aplicada y el material ferromagnético que debe ser utilizado.

La solución teórica y experimental al problema de atascamiento de un tubo en el interior de un recipiente de paredes rugosas, tiene gran aplicación en la industria de perforación de pozos. En esta área se presentan problemas de recuperación de tuberías atrapadas por diversas causas, situaciones que son modeladas perfectamente por el problema aquí planteado.

Este trabajo presenta la determinación teórica y experimental de la zona de atrapamiento de un tubo atascado por fricción, así como el desarrollo de las ecuaciones y métodos necesarios para el diseño de las anclas electromagnéticas del dispositivo de medición. Así mismo, se presenta la construcción, pruebas y funcionamiento de un sistema de recuperación de cadenas de tubos atrapadas por fricción (SISTEMA DE PUNTO LIBRE).

## **Plan general del trabajo:**

En el capítulo I se desarrolla un procedimiento teórico basado en la ley de Hooke, para la determinación de la zona de atascamiento de un tubo atrapado en el interior de un recipiente con paredes rugosas.

Una vez explicado el método teórico para la detección de la zona de atrapamiento, el capítulo II muestra las características de un sistema denominado "DETECTOR DE PUNTO LIBRE" que permite detectar en forma experimental el punto de atascamiento de un tubo real atrapado.

Los capítulos III y IV contienen la información técnica necesaria para el diseño de los dispositivos de anclaje electromagnético utilizados por el sistema detector de punto libre; se expone el método de circuitos magnéticos y se obtiene la expresión correspondiente para el flujo magnético que se presenta en el sistema formado por un electroimán. Así mismo, se analiza un método *iterativo* que permite cuantificar este flujo y se deduce la expresión para la fuerza de pegado con base en el concepto de conservación de la energía.

El capítulo V describe de manera general, el problema real del pegado de tuberías en el interior de un pozo petrolero.

En el apéndice se hace una revisión de las consideraciones tomadas en el análisis magnético del dispositivo de anclaje diseñado a lo largo del capítulo IV.

El anexo I contiene las rutinas en el lenguaje de TURBO PASCAL para el cálculo de las variables magnéticas con base en los resultados de circuitos magnéticos.

El anexo II contiene el programa en lenguaje ensamblador utilizado para el manejo del sistema de "PUNTO LIBRE" y el anexo III presenta el desarrollo del software para la construcción de un frecuencímetro con base en un microcontrolador.

---

## CAPITULO I

---

### DEFORMACIONES ELASTICAS EN TUBOS DE ACERO

En este capítulo se deducen las expresiones correspondientes a las deformaciones elásticas de un tubo de acero, el cual está alineado a la vertical y presenta un atrapamiento puntual.

#### 1.1 Deformación lineal

Un cuerpo sólido se deforma cuando es sometido a cambios de temperatura o a una carga externa, figura (1-1). Por ejemplo, cuando una muestra de material llamado *probeta* es sometido a una fuerza creciente, ocurrirá un cambio en la longitud acotada por dos puntos cualesquiera. Estos dos puntos pueden seleccionarse inicialmente a una distancia arbitraria llamada longitud de medición.

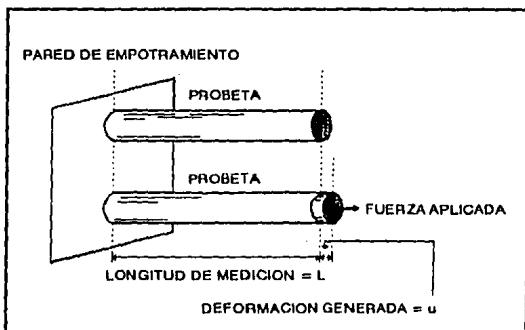


Fig. 1-1. Deformación longitudinal de una muestra de material.

Si se aplica cierta fuerza a una probeta, se observa que la deformación aumenta cuando es mayor la longitud de medición. Debido a esta dependencia, es necesario utilizar la deformación por unidad de longitud  $\epsilon$ , denominada deformación lineal.

$$\epsilon = \lim_{L \rightarrow 0} \frac{u}{L}$$

Donde "u" es la deformación que sufre un intervalo de longitud "L".

La relación funcional entre la deformación lineal  $\epsilon$  y la fuerza por unidad de área llamada esfuerzo  $\sigma$ , es obtenida en forma experimental y constituye el llamado diagrama *Esfuerzo-Deformación*.

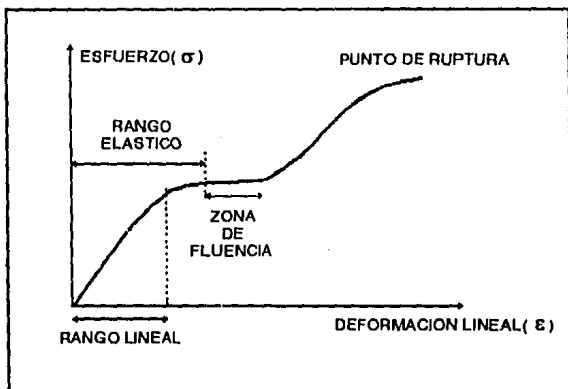


Fig. 1-2. Gráfico típico Esfuerzo-Deformación. La zona llamada rango lineal es la zona de validez de la ley de Hooke.

Los diagramas *Esfuerzo-Deformación* que se obtienen para secciones cortas a compresión, son razonablemente iguales a los que se obtienen para tensión. Sin embargo, para algunos materiales difieren considerablemente según el sentido de la fuerza que se les aplique. Por ejemplo, en el hierro colado y el concreto el punto de ruptura para tensión es alcanzado con un esfuerzo menor al correspondiente a compresión.

Para la mayoría de los materiales reales, al menos a cierta distancia desde el origen y con un grado suficiente de exactitud, los valores experimentales de la curva *Esfuerzo-Deformación* están esencialmente sobre una línea recta. Aun cuando en algunos materiales esta parte recta es demasiado pequeña, como en el concreto, puede decirse en general que la relación entre esfuerzo y deformación es lineal para todos los materiales. Esta idealización y generalización es la base de la ley de Hooke y sólo es válida hasta el límite de proporcionalidad del material.

En el diagrama *Esfuerzo-Deformación*, la pendiente de la recta que parte del origen, es el llamado módulo de elasticidad E (módulo de Young), que físicamente representa la rigidez del material a una carga impuesta.

Tabla 1-1. Módulos de Young para algunos materiales comunes.

	(10 <sup>10</sup> ) N/m <sup>2</sup>
ACEROS AL CARBON	11.5 - 16.0
ACEROS ALEADOS	15.5
ALUMINIO LAMINADO	6.9
COBRE LAMINADO	11.0
PLOMO	1.7
HIELO	1.0

## 1.2 Deformación de materiales elásticos cargados axialmente

La deformación que adquiere un material elástico, es la suma o integral de las deformaciones que sufre cada uno de sus pequeños componentes cuando se le aplica un esfuerzo.

$$\epsilon = \frac{du}{dL} \quad \therefore u = \int_{L_0}^{L_1} \epsilon \, dx + C \quad [\text{POPOV, 1982}]$$

Donde du es la deformación que sufre el intervalo dL debido a un esfuerzo aplicado y la constante C indica el corrimiento del extremo inferior de la sección.

Para una muestra de material linealmente elástico sujeta a un esfuerzo aplicado, se tiene:

$$\text{Por ley de Hooke} \quad \sigma = E * \varepsilon \Rightarrow \varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \text{donde} \quad \sigma \equiv \frac{F(L)}{A(L)}$$

La variable  $L$  indica la distancia medida entre el origen de un sistema de referencia que se establezca y un punto a lo largo de la muestra considerada,  $A(L)$  representa el área transversal a lo largo de la muestra y  $F(L)$  la fuerza aplicada sobre ella.

Debido a que la fuerza considerada presenta la misma dirección al desplazamiento, debe ser considerado un signo (+) en la expresión correspondiente a la ley de Hooke.

De las dos expresiones anteriores se obtiene:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} = \frac{F(L)}{A(L) * E} \quad \therefore \quad u = \int_{L_0}^{L_1} \varepsilon dL = \int_{L_0}^{L_1} \frac{F(L)}{A(L) * E} dL + C \quad (1.1)$$

Para determinar la deformación "u", es necesario conocer el valor de la fuerza  $F(L)$  en cualquier punto a lo largo de la muestra y la función  $A(L)$  que permite describirla en forma geométrica.

Para determinar el procedimiento teórico que permite estimar la posición del atascamiento puntual de un tubo atrapado en el interior de un recipiente de paredes rugosas, se analizan dos ejemplos donde se considera un tubo en posición vertical sujeto a su propio peso y a una fuerza adicional aplicada.

### Ejemplo I:

Se considera un tubo vertical en el interior de un recipiente de paredes rugosas sujeto a su propio peso y a una fuerza externa aplicada.  $A$  y  $L_0$  son el área transversal y la longitud del tubo respectivamente, medidos en un estado libre de fuerzas exteriores.

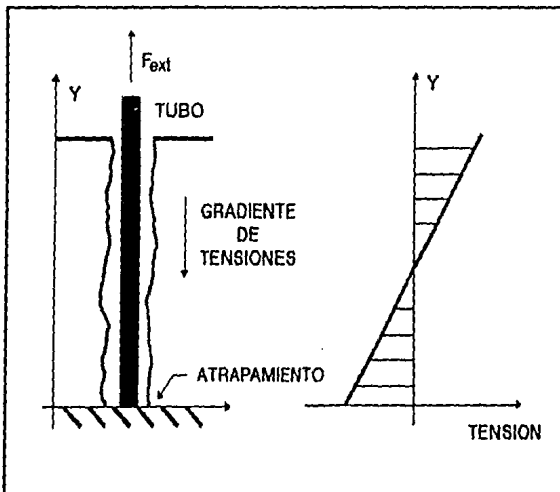


Fig. 1-3. Atrapamiento puntual para un tubo en el interior de un recipiente. El esquema en la parte derecha del diagrama muestra el valor de la fuerza medida en cualquier punto a lo largo del tubo.

Definiendo a la fuerza medida en un punto cualquiera a lo largo del tubo, como la tensión  $T(y)$ , se tiene que:

$$T(y) = F_{ext} - p^*(L_0 - y) \quad (1.2)$$



El segundo término de la ecuación (1.2), corresponde al gradiente de tensiones que se genera por el propio peso del tubo, la variable "y" representa la posición de un punto cualquiera sobre él, "p" su peso por unidad de longitud y  $F_{\text{ext}}$  es la fuerza adicional al peso, generada por un agente externo.

Sustituyendo la expresión (1.2) en la ecuación (1.1) se obtiene una expresión para la deformación del tubo, medida respecto al estado en el cual el tubo se encuentra libre de fuerzas externas:

$$u = \int_{y_0}^{y_1} \frac{F_{\text{ext}} - p \cdot (L_0 - y)}{E \cdot A} dy = \frac{1}{E \cdot A} \cdot \left[ (F_{\text{ext}} - p \cdot L_0) \cdot y + \frac{p \cdot y^2}{2} \right]_{y_0}^{y_1}$$

$$u = \frac{1}{A \cdot E} \cdot \left[ (F_{\text{ext}} - p \cdot L_0) \cdot (y_1 - y_0) + \frac{p}{2} \cdot (y_1^2 - y_0^2) \right] \quad (1.3)$$

La ecuación (1.3) determina la deformación del tubo respecto a su longitud inicial  $L_0$  medida en un estado libre de fuerzas externas.

Un segundo ejemplo que puede ser desarrollado con la ecuación (1.1), es la determinación de la deformación que sufre el tubo debida a una fuerza externa aplicada, tomando como condición inicial la longitud que presenta en el estado estable resultante de la aplicación de una fuerza mayor a la de su propio peso.

## Ejemplo II:

Se considera un tubo con atrapamiento puntual en el interior de un recipiente, el cual se encuentra sujeto al efecto de su propio peso y a una fuerza externa  $F_1$ . A partir de este estado se requiere la expresión correspondiente a la deformación que sufre el tubo al ser aplicada una fuerza extra denominada OVRP. El análisis de este ejemplo es realizado con el objeto de mostrar que a partir del estado inicial indicado, la expresión que describe la deformación lineal media en cualquier sección a lo largo del tubo, presenta la misma forma que la correspondiente a la deformación lineal puntual.

### Estado inicial

La fuerza total aplicada es:  $F_{\text{ext}} = p * L_0 + F_1$  y entonces

La longitud  $Y_i$  entre dos puntos cualesquiera  $y_0, y_1$  se establece por medio de la ecuación (1.3):

$$Y_i = (y_1 - y_0) + \frac{1}{A * E} * \left[ F_1 * (y_1 - y_0) + \frac{p}{2} * (y_1^2 - y_0^2) \right]$$

Si  $y_0 = 0$  y  $y_1 = L_0 \therefore Y_i = L$

Donde  $L$  es la longitud que presenta el tubo en el estado de tensiones analizado.

### Estado final

Para este estado se considera la aplicación de una fuerza adicional llamada OVRP (over pull).

La fuerza total aplicada es:  $F_{\text{ext}} = p * L_0 + F_1 + \text{OVRP}$  y entonces

$$Y_f = (y_1 - y_0) + \frac{1}{A * E} * \left[ F_1 * (y_1 - y_0) + \frac{p}{2} * (y_1^2 - y_0^2) + \text{OVRP} * (y_1 - y_0) \right]$$

La deformación medida respecto al estado inicial es:

$$\Delta Y = Y_f - Y_i = \frac{\text{OVRP}}{A \cdot E} \cdot (y_1 - y_0) \quad (1.4)$$

Para obtener la deformación lineal media respecto al estado inicial, se divide la ecuación (1.4) por  $Y_i$

$$\frac{\Delta Y}{Y_i} = \frac{\text{OVRP} \cdot (y_1 - y_0)}{A \cdot E \cdot \left[ (y_1 - y_0) + \frac{1}{A \cdot E} \cdot \left[ F_1 \cdot (y_1 - y_0) + \frac{p}{2} \cdot (y_1^2 - y_0^2) \right] \right]}$$

$$\frac{\Delta Y}{Y_i} = \frac{\text{OVRP}}{A \cdot E + \left( F_1 + \frac{p}{2} \cdot (y_1 + y_0) \right)}$$

Según los valores de la tabla (1-1), el módulo de Young para los tubos de acero es del orden de  $10^{11}$  N/m<sup>2</sup>, si se considera que el área transversal del tubo es del orden de  $10^{-3}$  m<sup>2</sup> y que presenta peso por unidad de longitud del orden de  $10^3$  N/m, entonces, el denominador de la expresión anterior puede ser considerado como el producto de  $A \cdot E$ .

$$A \cdot E \approx 10^8 \text{ N}$$

$$T_1 + \frac{p}{2} \cdot (y_1 + y_0) \approx 2 \cdot \text{peso total del tubo} \approx 10^3 \text{ N/m}$$

$$\frac{10^8}{10^3} = 10^5$$

Para hacer que el segundo término del divisor sea del mismo orden que el producto  $A \cdot E$ , es necesario tener un tubo de 100 Km de longitud. Para situaciones reales esta longitud es muy grande, por lo cual es válido considerar al denominador de la ecuación analizada como el producto  $A \cdot E$ .

Aun cuando el análisis anterior está basado en el caso particular de un tubo de acero, puede ser considerado válido para el caso de tubos utilizados en perforación de pozos, debido a que las características que presentan son comparables a las propuestas.

Con base en lo anterior, si se considera el producto  $A \cdot E$  mucho mayor al peso del tubo, el valor de la profundidad del punto de atoramiento puede ser aproximada por la siguiente expresión:

$$Y_i = \frac{\Delta Y \cdot A \cdot E}{OVRP} \quad \text{[POPOV, 1982]}$$

$$\text{Si } w = \frac{\text{Peso}}{\text{Longitud}} ; \quad v = \frac{\text{Peso}}{\text{Volumen}} = \frac{\text{Peso}}{\text{Area} \cdot \text{Longitud}} ; \quad Y_i = L$$

donde  $L$  es la longitud total libre del tubo, entonces:

$$L = \frac{\Delta L \cdot E \cdot w}{OVRP \cdot v} \quad (1.5)$$

La ecuación (1.5) expresa la longitud del tubo en función de algunos de sus parámetros que pueden obtenerse experimentalmente. Por lo tanto, esta ecuación permite calcular en forma aproximada la profundidad del atascamiento del tubo atrapado en función de la deformación medida.

Tabla 1-2. Fuerza necesaria para deformar 0.1 m de un tubo libre de 300 m. Se considera  $v = 7.684 \cdot 10^4 \text{ N/m}^3$  y  $E = 2.068 \cdot 10^{11} \text{ N/m}^2$ .

Diámetro nominal del tubo	Peso por unidad de longitud	Fuerza requerida
m	N/m	$10^3 \cdot \text{N}$
2 3/8" - 0.06032	70.8	63.5
2 3/8" - 0.06032	97.0	87.1
3 1/2" - 0.08890	194.1	174.1
3 1/2" - 0.08890	226.2	202.9
4 1/2" - 0.11430	242.3	217.3
5 1/2" - 0.13970	319.5	286.7

### 1.3 Análisis de deformación lineal para cadenas de tubos.

En esta sección se analiza el caso de una cadena de tubos de diferentes diámetros. Considerando la sección  $i$ -ésima contenida en una cadena de tubos cualquiera, se fija el sistema de referencia en su parte inferior, de tal forma que cuando se aplique una fuerza exterior el sistema se mueva junto con la sección correspondiente. Esta condición permite afirmar que la sección  $i$ -ésima cumple con las expresiones anteriormente deducidas.

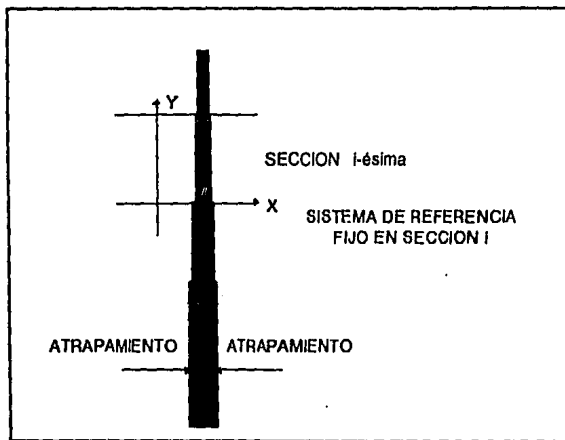


Fig. 1-4. Cadena de tubos unidos mecánicamente. El sistema de referencia es colocado en la parte inferior de una sección de área transversal constante.

Aplicando la ecuación (1.5) a cada una de las secciones de la cadena se tiene:

$$L_i = \frac{\Delta L_i \cdot E_i \cdot A_i}{OVRP} \quad \Rightarrow \quad \Delta L_i = \frac{L_i \cdot OVRP}{E_i \cdot A_i}$$

Se asocia una constante multiplicativa  $k$  a cada una de los  $m$  tubos que componen la cadena, cuyo valor está definido por el siguiente procedimiento:

Siendo  $\Delta L_{total}$  la deformación total que sufre la cadena por la aplicación de la fuerza externa OVRP se tiene que:

$$k_i = 1 \quad \text{para} \quad 1 \leq i \leq n$$

donde  $n$  es el mayor de los subíndices que cumplen la siguiente desigualdad

$$\Delta L_{total} \leq \sum_{i=1}^n \Delta L_i$$

$$k_i = 0 \quad \text{para} \quad n+1 < i \leq m \quad \text{y}$$

$$k_{n+1} = \frac{\Delta L - \sum_{i=1}^n \Delta L_i}{\Delta L_{n+1}}$$

Con base en lo anterior se puede calcular la profundidad del atoramiento que corresponde a la longitud de tubo libre:

$$L_{total} = \sum_{i=1}^m k_i \cdot L_i \quad (1.6)$$

### Ejemplo:

Considere una cadena de tubos alineada a la vertical que se encuentra anclada en un punto intermedio.

Tabla 1-3. Caracterización de la cadena.

Intervalo de profundidad	Tipo de tubo
0 a 654 m	3 1/2" con 226.2 N/m
654 a 5 399 m	3 1/2" con 194.1 N/m
5 399 a 5 998 m	5 1/2" con 319.5 N/m

$$\text{OVRP} = 174.12 * 10^3 \text{ N}$$

$$E = 2.068 * 10^{11} \text{ N/m}^2 \quad \nu = 7.684 * 10^4 \text{ N/m}^3$$

Deformación total debido al OVRP aplicado = 1.0 m

Utilizando la ecuación (1.5) para cada sección de la sarta con sección transversal constante, se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 1-4. Resultados parciales para el ejemplo.**

Profundidad(m)	Deformación(m)	Suma parcial(m)
0 a 654	0.182	0.182
654 a 5 399	1.540	1.722
5 399 a 5 998	0.118	1.840

Debido a que la deformación medida a profundidad cero es de 1 m, el punto de atascamiento estimado estará en el segundo tramo de la cadena y la longitud en esta sección está definida por el siguiente procedimiento:

$$\Delta L_1 = \Delta L_1 + k * \Delta L_2 \quad \text{donde } \Delta L_1 \text{ indica la deformación en la sección } i$$

$$L_1 = L_1 + k * L_2 \quad \text{donde } k = \frac{\Delta L_1 - \Delta L_1}{\Delta L_2} = \frac{1.0 \text{ m} - 0.187 \text{ m}}{1.769 \text{ m}} = 0.460$$

$$\text{Profundidad de punto libre} = L_1 + k * L_2 = 654 \text{ m} + 0.460 * 4 745 \text{ m} = 2 837 \text{ m}$$

## 1.4 Torsión

La deformación de un tubo debido a momentos de torsión, define un parámetro adicional para determinar la zona de atrapamiento.

Se ha establecido experimentalmente, que cuando una barra (árbol) está sujeto a momentos de torsión en sus extremos, experimenta torcedura; las secciones transversales han de girar entre si, mientras que la longitud se mantiene constante. [PISARENKO, 1985]

Examinando la deformación de una barra cilíndrica sujeta a un momento de torsión figura (1-5), es fácil notar que el ángulo de giro  $\phi$  de una sección que se encuentre a una distancia  $z$  del lugar del empotramiento, será mayor cuando sean mayores la longitud  $z$  y/o el momento de torsión aplicado.

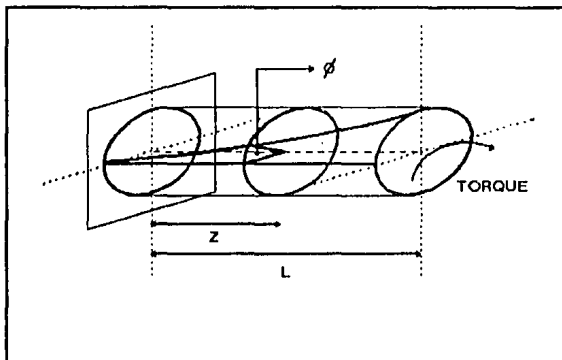
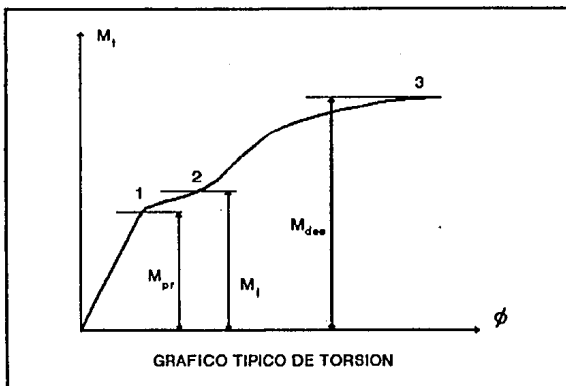


Fig. 1-5. Deformación de una barra cilíndrica por momentos de torsión aplicados.

Si se hace torcer el árbol hasta su destrucción, representando gráficamente la dependencia entre el ángulo de giro  $\phi$  y el momento de torsión, se obtiene el gráfico de torsión para una barra metálica, figura (1-6).





**Fig. 1-6. Diagrama Esfuerzo-Deformación para una barra metálica sujeta a momentos torsionantes.**

En el diagrama de la figura (1-6), como el correspondiente a tensión, pueden verse una serie de tramos y puntos característicos (1,2,3);  $M_{pr}$  es el valor de momento de torsión hasta el cual se mantiene la dependencia lineal entre el ángulo de giro y el momento torsional,  $M_f$  es el momento que corresponde al inicio de la fluencia y  $M_{des}$  es el momento para el cual se genera la destrucción.

De acuerdo a la teoría de elasticidad aplicada a muestras de sección circular, las secciones planas antes de la deformación del árbol siguen siendo planas después de la deformación, girando una respecto a otra un ángulo  $\gamma$ . Esta es la esencia de la hipótesis de las secciones planas, base en la cual se edifica el análisis de la deformación de las barras. [PISARENKO, 1985]

De la figura (1-7), puede ser deducida la siguiente expresión:

Debido a que  $\gamma$  es pequeño  $\tan \gamma \cong \gamma$

$$\gamma = \frac{BB'}{AB} = \frac{c \cdot d\phi}{dz} \quad (1.7)$$

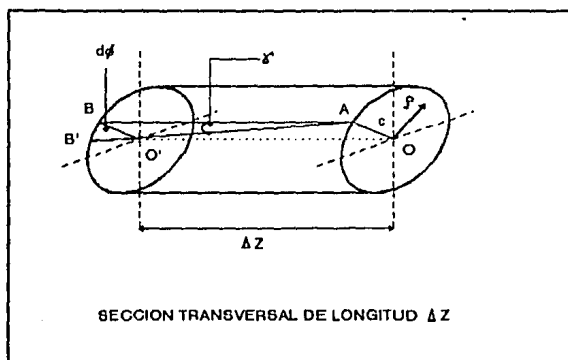


Fig. 1-7. Sección cilíndrica de longitud  $\Delta z$  aislada de una barra sujeta a momentos de torsión.

Debido a que la deformación  $\phi$  varía linealmente desde el centro, ya que los radios de cualquier sección transversal se mantienen rectos después de la deformación, los esfuerzos variarán linealmente desde el eje longitudinal o central de un miembro circular. [PISARENKO, 1985]

En virtud de la variación lineal del esfuerzo, en cualquier punto arbitrario a una distancia  $\rho$  desde el centro de la sección de radio  $c$ , el esfuerzo cortante será  $(\rho/c) \cdot \tau_{\max}$ .

Una vez establecida la distribución de esfuerzos en una sección, se puede expresar la resistencia al momento de torsión aplicado, comúnmente llamado torque, en función del esfuerzo. La resistencia a dicho momento así desarrollado debe ser equivalente al momento torsionante interno.

$$T = \int_A \rho \cdot \tau(\rho) \, dA = \int_A \rho^2 \cdot \frac{\tau_{\max}}{c} \, dA$$

$$T = \frac{\tau_{\max}}{c} \cdot \int_A \rho^2 \, dA = \frac{\tau_{\max}}{c} \cdot J(\text{GEOMETRIA}) \quad (1.8)$$

Donde T es el torque que actúa sobre la sección transversal y J llamado momento polar de inercia, es una función de la geometría del sistema.

Para un cilindro hueco de radios  $r_1$  y  $r_2$   $J = \frac{\pi * (r_2^4 - r_1^4)}{2}$  donde  $r_2 > r_1$ .

Aplicando la ley de Hooke  $\tau_{max} = G * \gamma_{max}$  a la ecuación (1.8) se tiene que:

$$T = \frac{G}{c} * \gamma_{max} * J \quad \text{y por ecuación (1.7)} \quad T = G * \frac{d\phi}{dz} * J$$

$$\phi = \int_{z_0}^{z_1} \frac{T(x)}{J(x) * G} dx + C \quad (1.9) \quad \text{[PISARENKO, 1985]}$$

Donde la constante C determina el ángulo de rotación respecto a un sistema de referencia.

Para un tubo de sección transversal constante sujeto al torque T en uno de sus extremos se tiene:

$$\phi(z) = \frac{T * (z_1 - z_0)}{J * G} + C \quad (1.10) \quad \text{[PISARENKO, 1985]}$$

Tabla 1-5. Momento polar de inercia para algunos tubos de acero.

Tamaño del tubo			J
O.D.(m)	NOM(m)	I.D.(m)	$10^{-6} * m^4$
0.0603	2 3/8" - 0.0603	0.0507	0.6
0.0603	2 3/8" - 0.0603	0.0461	0.9
0.0889	3 1/2" - 0.0889	0.0702	3.7
0.0889	3 1/2" - 0.0889	0.0661	4.3
0.1143	4 1/2" - 0.1143	0.1005	7.8
0.1397	5 1/2" - 0.1397	0.1214	16.0

Una aplicación de la ecuación (1.10) es el de una cadena de tubos en posición vertical tensionada por una fuerza igual a la de su propio peso, figura (1-8).

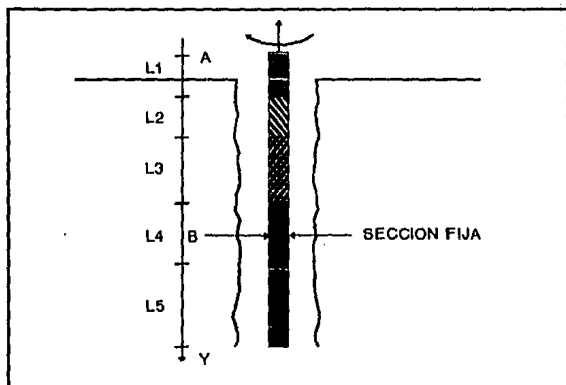


Fig. 1-8. Cadena de tubos atrapada en forma puntual en el interior de un recipiente de paredes rugosas.

Se considera que la cadena está formada por intervalos de secciones transversales diferentes y que en alguno de ellos se encuentra fijo el sistema de referencia.

Midiendo el ángulo de giro en la parte superior de la cadena debido al torque aplicado, se puede calcular la profundidad a la cual la cadena se encuentra anclada.

Sea  $\phi_i$  el ángulo de giro medido en superficie debido al torque  $T$  aplicado y  $\phi_n$  los ángulos correspondientes a cada sección de la cadena comprendido en el intervalo  $AB$  de la figura (1-8).

$$\phi_i = \sum \phi_j \quad \text{para } i = 1 \dots (n - 1) \quad \phi_n = \frac{T \cdot k \cdot L_n}{G \cdot J_n} \quad 0 < k < 1 \quad (1.11)$$

Para determinar el valor n-ésimo, se obtienen los ángulos  $\phi_i$  para todas las secciones de la cadena y se generan sumas parciales consecutivas hasta obtener el primer valor mayor o igual al ángulo  $\phi_t$ . La diferencia entre esta suma y el valor de la deformación total determina el valor de  $\phi_n$  y éste permite determinar el valor de la constante k.

$$\phi_n = \phi_t - \sum_{i=1}^{n-1} \phi_i \quad k = \frac{G \cdot J_n \cdot \phi_n}{T \cdot L_n}$$

En función del valor de la constante k y del entero n se calcula la profundidad del atrapamiento.

$$L_t = \sum L_i + k \cdot L_n \quad (1.12)$$

### Ejemplo:

Se considera una cadena de tubos con una longitud total de 5998 m, constituida por 3 tubos con sección transversal diferente, a la cual se aplica un torque de 7000 N\*m obteniéndose una deformación total de 10 vueltas.

Tabla 1-6. Cadena de tubos considerada  $G = 8.273 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ .

Profundidad(m)	Tipo de tubo	J( $10^{-6} \text{ m}^4$ )
0 a 654	3 1/2" - 226.2 N/m	4.3
654 a 5 399	3 1/2" - 194.1 N/m	3.7
5 399 a 5 998	5 1/2" - 319.5 N/m	16.1

Utilizando la ecuación (1.10) se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 1-7. Resultados de sumas parciales para las deformaciones angulares del problema planteado.

SECCIÓN	$\phi_i$ (radianes)	$\phi_i$ (vueltas)	Suma parcial
1	12.87	2.05	2.05
2	108.51	17.27	19.32

Debido a que la deformación total fue de 10 vueltas, la zona de atoramiento se encuentra en el tubo de 3 1/2" de diámetro nominal. Utilizando las ecuaciones (1.11) y (1.12) se obtiene el siguiente resultado:

$$\phi_t = \phi_1 + k * \phi_2 \Rightarrow k = \frac{10 - 2.05}{17.27} = 0.46$$

Por lo que la profundidad de atoramiento =  $L_1 + k * L_2 = 2.837$  m

## Resumen de resultados

Las ecuaciones deducidas con anterioridad, permiten resolver el problema teórico correspondiente a una cadena de tubos en el interior de un recipiente que presenta un atascamiento puntual. En el procedimiento de su deducción, se establece que la deformación en secciones cortas se mantiene constante a lo largo de su longitud para una misma fuerza aplicada. Este hecho permite determinar de una forma sencilla, una caracterización cualitativa de la distribución de la fuerza de fricción para un tubo atrapada en el interior de un recipiente de paredes rugosas.

Para resolver el problema donde se considera una distribución de la fuerza de fricción a lo largo de la cadena de tubos, es necesario registrar en forma experimental las deformaciones en secciones de longitud corta alrededor de la zona de atrapamiento estimada, obteniendo un gráfico de deformaciones relativas llamados porcentajes de libertad, referidas a la deformación que presenta el tubo en una sección de longitud pequeña situada en el exterior del recipiente.

Considerando un 100% de libertad en la zona exterior del recipiente donde no existe fricción y 0% de libertad en la zona de empotramiento, se tiene que el porcentaje de libertad en cualquier punto del tubo en el interior del recipiente está definido por la siguiente expresión.

$$\% \text{ de libertad a profundidad } x = \frac{\text{Deformacion medida a la profundidad } x}{\text{Deformacion medida a profundidad cero}} * 100$$

Las deformaciones en longitudes cortas a lo largo del tubo son medidas experimentalmente con ayuda de una sonda que se introduce en él. Esta sonda detecta los cambios en la longitud a cualquier profundidad entre dos puntos separados una distancia de 1.5 m.

Las gráficas en la figura (1-9) muestran el porcentaje de libertad para una tubo en la situación de pegado puntual.

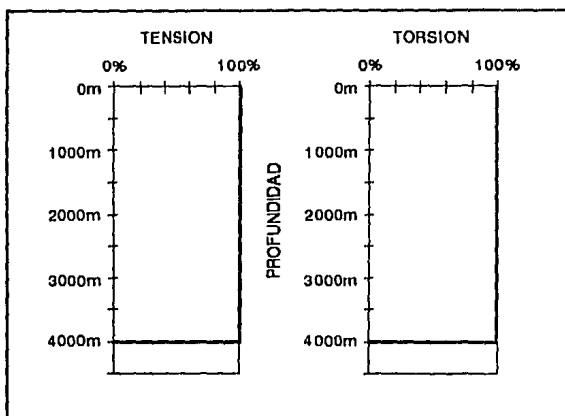


Fig. 1-9. Porcentaje de libertad para un tubo que presenta atrapamiento puntual en el interior de un recipiente de paredes rugosas.

En el esquema se muestra claramente el punto de atrapamiento a una profundidad de 4000 m. Obsérvese que el porcentaje de libertad a una profundidad menor es del 100% debido a la ausencia de fricción.

Las gráficas en la figura (1-10), muestran el comportamiento del porcentaje de libertad a lo largo de la tubo en una situación donde existe fricción con las paredes del recipiente a lo largo de él.

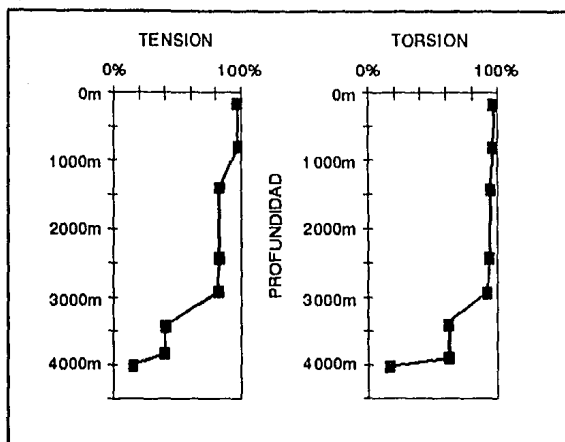


Fig. 1-10. Porcentaje de libertad para un tubo que presenta un gradiente de fricción en el interior de un recipiente de paredes rugosas.

Este capítulo ha presentado la información teórica necesaria para la determinación de la zona de atrapamiento de un tubo atascado por efectos de fricción en el interior de un recipiente de paredes rugosas. El procedimiento establecido consiste en medir, en el exterior del recipiente, la deformación total que sufre el tubo debido a fuerzas externas aplicadas para estimar la posición de la zona de atrapamiento mediante la expresión correspondiente a la ley de Hooke.



---

## CAPITULO II

---

### DESCRIPCION DEL SISTEMA DE PUNTO LIBRE

En el capítulo anterior se mostró la necesidad de medir las deformaciones mecánicas en longitudes cortas a lo largo del tubo en consideración. Este capítulo describe en forma general las partes que constituyen el sistema de punto libre, el cual permite cuantificar los porcentajes de libertad para describir en forma cualitativa el estado de fricción a lo largo del tubo.

Este sistema consta de una sonda que se introduce en el tubo para medir las deformaciones mecánicas provocadas por momentos de torsión y esfuerzos de tensión aplicados, así como de un bloque electrónico que mide e interpreta la señal eléctrica generada por la herramienta como respuesta a la deformación medida. La conexión eléctrica entre los dos dispositivos se realiza a través de un cable coaxial de 4000 m de longitud aproximadamente.

#### 2.1 Aspectos generales de la sonda

La sonda es una herramienta cilíndrica de 1.5 pulgadas de diámetro exterior con una longitud aproximada de 2 m, figura (2-1). Está dividida en dos secciones desacopladas en forma mecánica para permitir un desplazamiento relativo entre ellas. Cada una de estas secciones contiene un dispositivo que le permite fijarse a la parte interna del tubo en consideración, así, una deformación en el tubo, producirá un movimiento relativo entre las dos secciones de la herramienta que será transmitido al *sensor*.

El sensor que permite cuantificar la deformación generada, está formado por un núcleo magnético dividido en dos partes a través de las cuales circula el flujo magnético generado por una bobina que es alimentada con corriente alterna. Cuando en las dos secciones en que está dividida la herramienta se presenta un movimiento relativo debido a una deformación elástica en el tubo, se modifica la distancia de separación entre las dos partes del sensor y cambia el valor de la inductancia de la bobina asociada al núcleo magnético. El cambio en valor de tal inductancia permite cuantificar en forma eléctrica la deformación en el tubo en consideración.

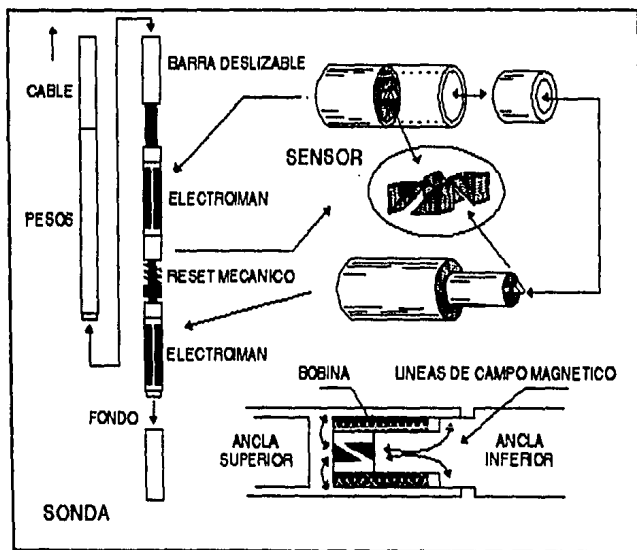


Fig. 2-1. Sonda del sistema de punto libre.

Debido a que la sonda puede ser introducida en recipientes que contengan fluido, es necesario adicionarle barras pesadas (contrapesos) para permitir su descenso. El elemento llamado barra deslizante está formado por un cilindro hueco en cuyo interior se encuentra una barra maciza de menor diámetro que puede deslizarse. Este dispositivo permite mantener desacoplada la herramienta de los contrapesos cuando se acciona el sistema de anclaje. De esta forma, la fuerza de pegado de las anclas deberá ser únicamente lo suficientemente grande para soportar el peso de la herramienta y no del sistema de contrapeso.

Las anclas que presenta la herramienta del denominado "SISTEMA DE PUNTO LIBRE" están constituidas por electroimanes, dispositivos que forman parte esencial en el funcionamiento del sistema.

Existen diversos dispositivos mecánicos que pueden ser utilizados en la fabricación de las anclas de este tipo de herramientas, pero presentan ciertas desventajas como son:

- Proceso elaborado para la activación y desactivación.
- Utilización en un rango pequeño de diámetros de tubos.
- Funcionamiento deficiente en ambientes líquidos de hasta 200°C y 20,000 lb/in<sup>2</sup>

Estas son algunas de las causas más importantes que contribuyeron a seleccionar los electroimanes como dispositivos de anclaje para la sonda del sistema.

Otra de las partes importantes del sistema es el mecanismo de *reset*, el cual mantiene al *sensor* en una posición fija antes de la deformación del tubo. Está constituido por dos resortes, cuya fuerza de restitución mantiene en la posición fija al *sensor* de la sonda.

Adicionalmente a estos elementos mecánicos descritos, existe un bloque electrónico en el interior de la herramienta que genera una señal eléctrica alterna cuya frecuencia es función de la impedancia de la bobina del *sensor*. Esta señal es acoplada al voltaje que alimenta a los electroimanes y es recibida en el exterior del tubo para ser medida e interpretada por una computadora.

## - Alimentación

El voltaje que alimenta a los electroimanes, generado por una fuente de 600 V en el bloque electrónico de superficie, activa dos diodos zener que permiten obtener 10 y 20V referidos a tierra, con los cuales es alimentado el bloque electrónico contenido en la sonda. La corriente que circula por ellos, está limitada por la resistencia de potencia R mostrada en el diagrama eléctrico de la figura (2-2).

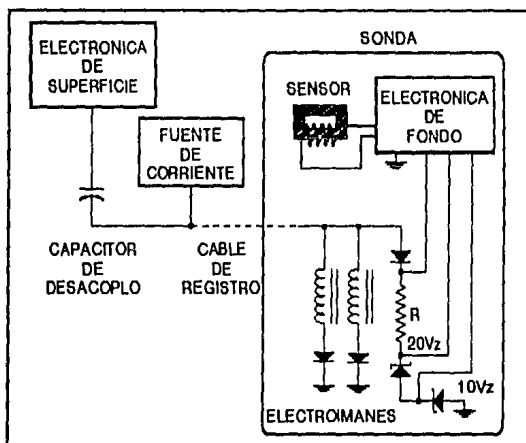


Fig. 2-2. Caracterización eléctrica del sistema de punto libre.

La operación de la herramienta del sistema de Punto Libre se realiza mediante la aplicación de una corriente de 650 mA. Esta corriente es generada por una fuente de corriente cuyo voltaje de aplicación depende del valor de la impedancia que presente la herramienta y el cable de registro, la cual es función de la temperatura del ambiente en el cual estén inmersos.

## - Caracterización eléctrica

Los siguientes valores que se describen están referidos al diagrama mostrado en la figura (2-2).

Tabla 2-1. Resistencia eléctrica para el embobinado del electroimán.

Electroimán	600 ohms @ 20 °C	1200 ohms @ 270 °C
Resistencia R	16800 ohms @ 20 °C	17100 ohms @ 270 °C

*Nota: El embobinado de los electroimanes están fabricados con alambre de cobre y la resistencia R con alambre de nicromel.*

Tabla 2-2. Resistencia eléctrica de la herramienta.

300 ohms @ 20 °C	600 ohms @ 270 °C
------------------	-------------------

Tabla 2-3. Voltaje de alimentación en la punta de la herramienta.

300 ohms * 650 mA = 195 Volts	@ 20 °C
600 ohms * 650 mA = 390 Volts	@ 270 °C

Potencia máxima  $P = 390 \text{ V} * 650 \text{ mA} = 254 \text{ W}$

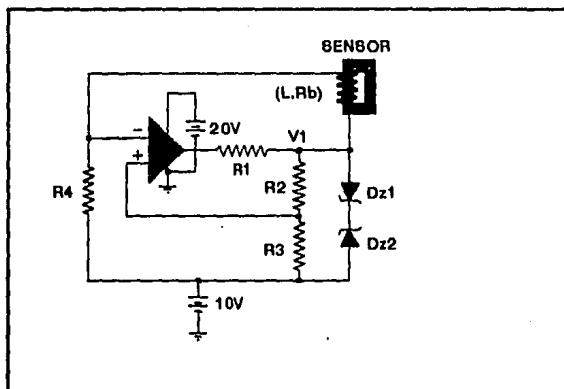
Para determinar el voltaje y la potencia aplicados por la fuente de corriente que alimenta a la sonda, debe tomarse en cuenta la resistencia eléctrica que presente el cable de registro.

Tabla 2-4. Caracterización eléctrica para la resistencia R mostrada en la figura (2-2).

Corriente	$I = (195 \text{ V} - 20 \text{ Vz}) / 16.8 \text{ Kohms} = 10.4 \text{ mA}$	
Potencia	$P = (195 \text{ V} - 20 \text{ Vz}) * 10.2 \text{ mA} = 1.8 \text{ W}$	@ 20 °C
Corriente	$I = (390 \text{ V} - 20 \text{ Vz}) / 17.1 \text{ Kohms} = 21.6 \text{ mA}$	
Potencia	$P = (390 \text{ V} - 20 \text{ Vz}) * 21.3 \text{ mA} = 7.9 \text{ W}$	@ 270 °C

## - Oscilador de fondo

El bloque electrónico de fondo consiste de un oscilador que genera una señal cuadrada cuya frecuencia de oscilación es función de la inductancia de la bobina del *sensor*; dispositivo que trabaja como transductor para presentar las deformaciones del tubo como señales eléctricas. Este método tiene la ventaja de no permitir que la información correspondiente a la medición se altere por posibles cambios en la impedancia total del sistema eléctrico de la sonda.



**Fig. 2-3.** Oscilador de señal cuadrada cuya frecuencia es función del valor de la inductancia de la bobina del sensor.

El oscilador está constituido por un circuito operacional que trabaja como comparador. La respuesta de este circuito depende de la diferencia de voltaje entre sus dos entradas; si el voltaje en la entrada no inversora (+) es mayor que en la inversora (-), el comparador se satura al voltaje positivo de alimentación. Si sucede lo contrario, el comparador se satura al voltaje negativo de alimentación.

Para entender el comportamiento del circuito oscilador, se analiza el diagrama de tiempo de la figura (2-4).

## Análisis del oscilador

En la figura (2-4) la señal cuadrada de amplitud  $V_z$ , representa el voltaje recortado por los diodos zener, punto V1 figura (2-3). La señal cuadrada de amplitud  $k \cdot V_z$  corresponde al voltaje en la entrada no inversora y la tercer señal mostrada en la figura, es la respuesta del circuito R-L conectado a la entrada inversora del circuito operacional.

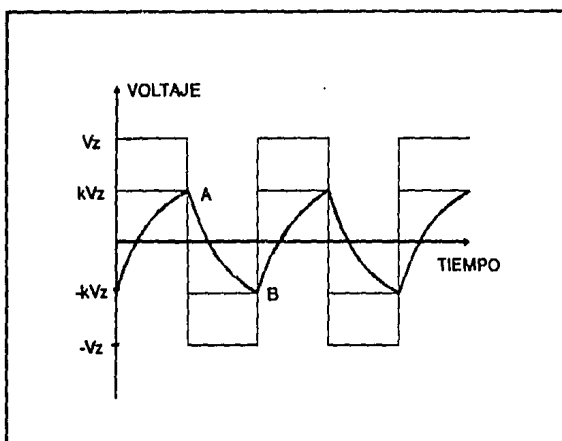


Fig. 2-4. Comportamiento del voltaje en las entradas del circuito operacional del oscilador.

En el tiempo  $t = 0$ , la salida del circuito operacional es  $+V$ . El voltaje en la entrada (+) es  $V_z$  atenuado por el factor  $k$  que representa el divisor de voltaje  $R_3$  y  $R_2$ . El voltaje en la entrada inversora (-) se modificará en forma exponencial desde el valor inicial  $-V_z$ . Cuando este voltaje supere al correspondiente en la entrada (+), el circuito operacional responderá cambiando al estado  $-V$ . En este momento, el voltaje en (+) es de  $-k \cdot V_z$  y en (-) se decreta desde  $k \cdot V_z$  hacia  $-k \cdot V_z$ . Este comportamiento se repite indefinidamente mientras el circuito esté oscilando.

Para obtener la frecuencia de oscilación del circuito, es necesario encontrar el tiempo entre dos intersecciones consecutivas de los voltajes correspondientes a las entradas (+) y (-) del circuito comparador. Se considera como condición inicial el punto A de la figura (2-4).

Los voltajes en el circuito oscilador están dados en la siguiente tabla:

Tabla 2-5. Niveles de voltaje en el circuito operacional.

V1	+ Vz	cambia a	- Vz
(+)	+k*Vz	cambia a	-k*Vz
(-)	+k*Vz		

Basado en el circuito de la figura (2-3), la ecuación diferencial correspondiente al arreglo L - R de la entrada (-) es:

$$-V_z = L \cdot \frac{di}{dt} + (R_4 + R_b) \cdot I$$

Donde  $R_b$  es la resistencia a corriente directa correspondiente a la bobina del sensor e  $I$  es la corriente que circula por el arreglo L - R.

Resolviendo la ecuación anterior se obtiene el valor de la corriente eléctrica para cualquier tiempo  $t$ .

$$\frac{di}{dt} + \frac{(R_4 + R_b)}{L} \cdot I = -\frac{V_z}{L}$$

$$\frac{R_4 + R_b}{L} = \alpha$$

$$I(t) = -\frac{V_z}{L \cdot \alpha} + \exp^{-\alpha t} \cdot (I(0) + \frac{V_z}{L \cdot \alpha})$$



El voltaje que aparece en la entrada (-) del circuito operacional es:

$$V(t) = R4 * I(t)$$

Sustituyendo la función correspondiente a la corriente eléctrica se tiene:

$$V(t) = -\frac{Vz * R4}{R4 + Rb} + \exp^{-\alpha t} * (k * Vz + \frac{Vz * R4}{R4 + Rb})$$

El periodo de oscilación del sistema es dos veces el tiempo de intersección entre la curva de voltaje en la entrada (-) y el valor de  $-k * Vz$ .

$$\text{Periodo } T = 2 * \frac{L}{R4 + Rb} * \text{Ln} \left( \frac{\gamma + k}{\gamma - k} \right) \quad [\text{SCHILLING, 1979}]$$

$$\text{Donde } \gamma = \frac{R4}{R4 + Rb} \quad \text{y} \quad k = \frac{R3}{R3 + R2}$$

Esta ecuación describe la relación funcional entre la frecuencia del oscilador y el valor de la inductancia de la bobina del sensor.

Las siguientes dos gráficas muestran la curva de respuesta del bloque de medición (sensor-oscilador) construida en forma experimental a través de una prueba en laboratorio.

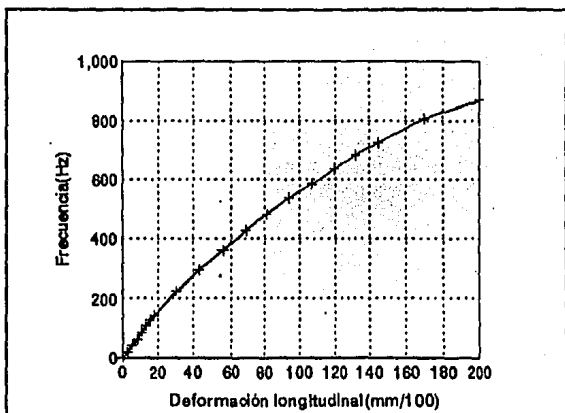


Fig. 2-5. Respuesta experimental del bloque de medición de la herramienta para deformaciones longitudinales.

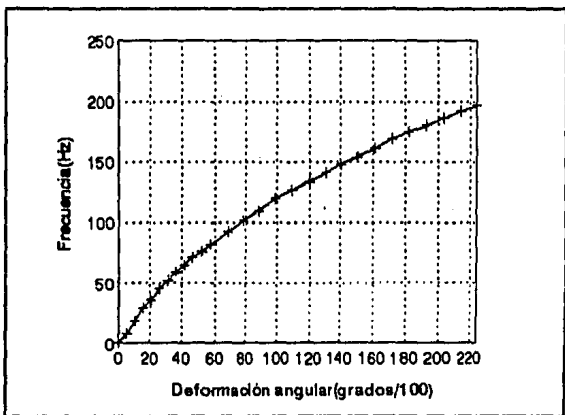


Fig. 2-6. Respuesta experimental del bloque de medición de la herramienta para deformaciones angulares.

## - El circuito acoplador

Es un circuito que permite transmitir la señal del oscilador hacia la electrónica de superficie. Este dispositivo se comporta como un *switch* y una resistencia en serie conectadas a tierra. El voltaje de control para el cierre del *switch*, es el voltaje que genera el oscilador de fondo. Cuando el *switch* es cerrado, nivel alto en la señal del oscilador, el sistema acoplador presenta una impedancia baja y consume cierta corriente eléctrica. Por el contrario, cuando el *switch* es abierto debido a la presencia de un nivel bajo en el oscilador, la impedancia que presenta el sistema acoplador es alta y por lo tanto prácticamente no hay consumo de corriente eléctrica.

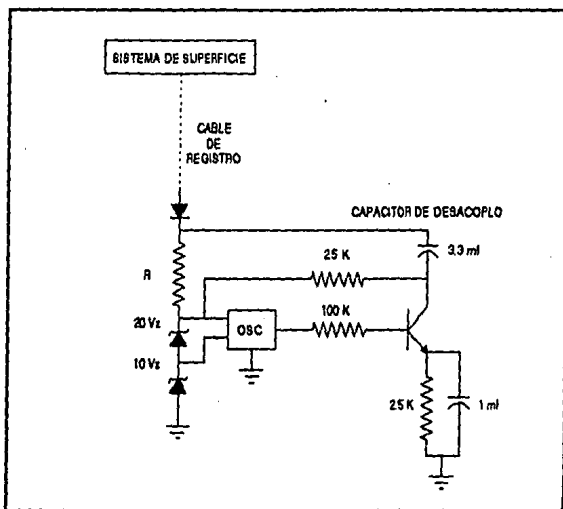


Fig. 2-7. Circuito acoplador que permite montar la señal generada por el oscilador, sobre el voltaje que alimenta los electroimanes.

La impedancia total de la sonda es la resultante de dos impedancias en paralelo; la de los electroimanes y la que presente el sistema acoplador. El valor de la resultante es función del tiempo debido a la presencia del oscilador.

Debido a que la fuente de alimentación de la sonda trabaja como fuente de corriente, el voltaje en superficie que demanda la herramienta estará fluctuando con la frecuencia del oscilador de fondo. Este voltaje se presenta como un nivel de voltaje DC y una pequeña perturbación generada por el cambio en la impedancia del dispositivo acoplador.

El consumo de la corriente eléctrica que circula por el colector del transistor, está en el intervalo de (0,10) mA y el voltaje alterno que se presente en la parte superior de la sonda es de aproximadamente 35 milivolts.

## 2.2 Electrónica de superficie

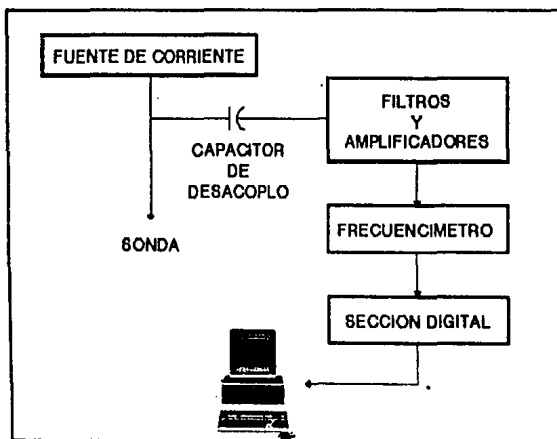


Fig. 2-8. Diagrama a bloques del sistema de superficie de Punto libre.

El módulo de superficie tiene dos funciones básicas: medir la frecuencia de la señal alterna generada en la sonda y transmitir esta información a una computadora para que sea analizada.

- La figura (2-8) representa un diagrama a bloques de la configuración de dispositivos en superficie.

### **- Fuente de corriente**

Es una fuente de 600V con la cual son alimentados los electroimanes. Debido al principio de operación para la transmisión de la señal generada en la sonda, es necesario que la fuente trabaje como fuente de corriente para mostrar una impedancia alta de salida.

Potencia máxima de salida = 1000W

Voltaje máximo = 600V

Corriente máxima = 1.7 Amp.

### **- PC**

PC HP con microprocesador 80486 que trabaja a 25 Mhz. Tiene disponibles 8 Mbytes de memoria RAM y trabaja con sistema operativo UNIX.

### **- Filtros y amplificadores.**

La señal alterna que recibe el módulo de superficie, es una señal cuadrada que se deforma por la presencia de la impedancia del cable de registro y su amplitud es de aproximadamente 35 milivolts.

Debido a la existencia de aparatos generadores de ruido cercanos al lugar de medición, es necesario la utilización de un conjunto de filtros y amplificadores que permitan recibir una señal confiable. Estos dispositivos de filtraje están formados por filtros de ranura centrados en 60 Hz y filtros activos pasa banda en la ventana de 900 a 5000 Hz, intervalo de trabajo de la señal de la sonda.

## **- Frecuencímetro**

Para medir la frecuencia de la señal que es recibida en superficie, se construyó un frecuencímetro utilizando el microcontrolador INTEL 80C196KC. El resultado de esta medición es presentado en una palabra digital de 16 bits que es leída por la PC.

En el anexo III se describe detalladamente el procedimiento utilizado para la construcción del frecuencímetro con base en el microcontrolador mencionado.

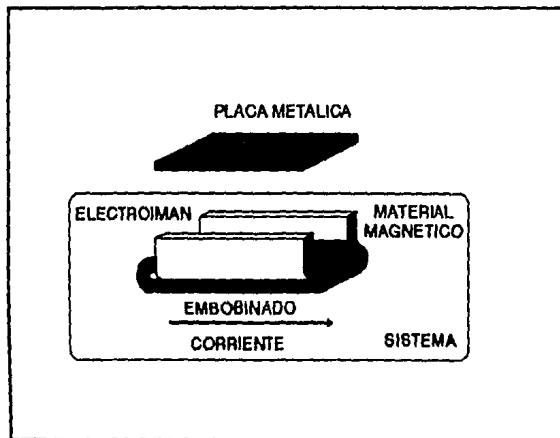
---

## CAPITULO III

---

### FIJADORES ELECTROMAGNETICOS

A lo largo de este capítulo se describe el sistema físico que constituye el electroimán de la sonda de punto libre, con base en la teoría de circuitos magnéticos y el concepto de conservación de la energía. Aunque los resultados aquí descritos son de aplicación general, no debe olvidarse que el objetivo perseguido es describir el comportamiento físico de este dispositivo, figura (3-1).



**Fig. 3-1.** Separación del sistema formado por un electroimán y el medio que lo rodea.

El electroimán, es un dispositivo constituido por un material magnético que modifica el campo generado por la corriente eléctrica de un embobinado enrollado a él.

Considerando  $m_i$  como el momento dipolar magnético debido al  $i$ -ésimo átomo de una muestra de material de volumen  $\Delta V$ , se define una cantidad macroscópica  $M$  llamada magnetización:

$$M = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta V} \sum m_i$$

En estado desmagnetizado, la magnetización  $M$  en el material es cero como resultado de la orientación al azar de los átomos. Pero cuando se aplica un campo magnético externo, los dipolos magnéticos tienden a orientarse con el campo y se produce un efecto neto diferente de cero.

La forma en que el electroimán de la figura (3-1), altera el campo magnético generado por la corriente en el embobinado, depende de su propia geometría, del tipo de material magnético utilizado y de la interacción que se tenga con el medio ambiente que lo rodea.

### 3.1 Materiales magnéticos

Para analizar la deformación de campos magnéticos por materiales magnetizables, es necesario conocer la relación funcional entre los vectores de campo. Estas relaciones dependen de la naturaleza del material y son obtenidas experimentalmente.

En una extensa clase de materiales existe una relación aproximadamente lineal entre los vectores de magnetización  $\vec{M}$  y de intensidad magnética  $\vec{H}$ . Si el material es isotrópico, la relación funcional es:  $\vec{M} = \chi * \vec{H}$

Donde  $\chi$  es una cantidad adimensional llamada susceptibilidad magnética.



Para la mayoría de materiales magnéticos el valor de la susceptibilidad magnética toma valores próximos a la unidad. Si  $\chi$  es positiva, el material es llamado paramagnético y la inducción magnética se ve reforzada por su presencia. Si  $\chi$  es negativa, el material es llamado diamagnético y la inducción magnética se ve debilitada.

Los materiales ferromagnéticos forman otra clase de material magnético. Dichos materiales se caracterizan por tener una magnetización permanente posible y su presencia tiene un efecto profundo en la inducción magnética. Una característica importante en estos materiales es la no linealidad que presentan, por lo que la susceptibilidad es una función de la intensidad magnética.

$$\vec{M} = \chi(H) * \vec{H} \quad (3.1)$$

Utilizando la definición del vector de intensidad  $\vec{H}$  y la relación funcional dada por la ecuación (3.1), se tiene:

$$\vec{H} \equiv \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} \quad \vec{B} = \mu_0 * (\vec{H} + \vec{M})$$

$$\vec{B} = \mu_0 * (\vec{H} + \chi * \vec{H}) \quad \vec{B} = \mu_0 * (1 + \chi) * \vec{H}$$

Donde  $\vec{B}$  es el vector de inducción magnética y  $\mu_0$  es la permeabilidad en el vacío.

Considerando  $\mu_r = 1 + \chi$  entonces  $\mu = \mu_0 * \mu_r$

$$\vec{B} = \mu(H) * \vec{H} \quad (3.2)$$

Otra de las características importantes de los materiales ferromagnéticos que debe tomarse en cuenta para posibles aplicaciones, es la propiedad de histéresis.

## - Histéresis

Se considera como condición inicial al material desmagnetizado. Se incrementa la corriente eléctrica en el embobinado de forma monótona desde el valor de cero. La intensidad magnética generada por la bobina seguirá el mismo crecimiento monótono y la inducción magnética crecerá, inicialmente, rápido en el tramo O-a de la curva de magnetización inicial figura (3-2), y después de una forma suave en el tramo a-b. Para valores grandes de  $H$ , la relación entre la inducción y la intensidad magnética resulta ser lineal, efecto conocido como saturación magnética del material.

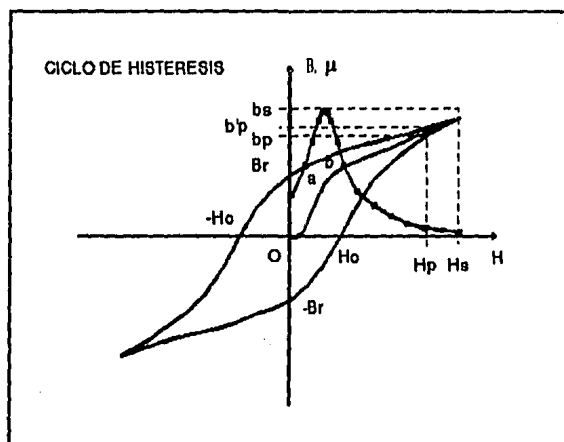


Fig. 3-2. Curvas típicas de histéresis, magnetización y permeabilidad relativa para un material ferromagnético.

Este proceso de magnetización se caracteriza por ser irreversible. Por ejemplo, si durante la magnetización inicial figura (3-2), la intensidad magnética aumenta de  $H_p$  hasta  $H_s$ , la inducción del material crece desde  $b_p$  a  $b_s$ . En el proceso inverso de desmagnetización, la disminución del campo desde  $H_s$  hasta  $H_p$ , lleva

aparejado el descenso del campo desde  $b_s$  hasta  $b_p'$  con la particularidad de que  $b_p > b_p'$ . A este fenómeno se le denomina histéresis magnética.

El valor de la intensidad magnética  $H_0$  llamado fuerza coercitiva, es un dato importante que permite hacer una clasificación adicional para los materiales ferromagnéticos; materiales ferromagnéticos blandos y duros.

Los materiales ferromagnéticos blandos que permiten construir electroimanes, presentan un valor pequeño en la fuerza coercitiva y un ciclo de histéresis delgado. Los materiales ferromagnéticos duros que tienen fuerza coercitiva grande, presentan un ciclo de histéresis ancho y permiten producir imanes permanentes.

Es claro que la fabricación de un electroimán se realiza con un material ferromagnético blando, debido a la necesidad de generar un campo considerable únicamente cuando se aplica una corriente eléctrica en su embobinado.

Hasta este momento se ha descrito el sistema físico de la figura (3-1), formado por el electroimán de la herramienta de punto libre, pero aún no se conoce la deformación que sufre el campo debido a la presencia del electroimán y el medio que lo rodea. Para realizar esta caracterización cuantitativa, es necesario determinar en forma experimental la curva de permeabilidad del material que compone al electroimán y resolver el problema planteado a través de dos posibles métodos:

- 1.- Resolver las ecuaciones de campo estableciendo condiciones a la frontera.
- 2.- Utilizar el procedimiento de circuitos magnéticos.

Debido a que el sistema no presenta simetría sencilla como la que se encuentra en los problemas de esferas o cilindros con magnetización uniforme, la solución al problema utilizando el método de las ecuaciones de campo, no es tan directo y la solución podría ser tal que su aplicación pueda ser demasiado complicada. Debido a esto, se resuelve el problema utilizando la teoría de circuitos magnéticos.

### 3.2 Circuitos magnéticos

Debido a que las líneas magnéticas para cualquier distribución de corrientes forman curvas cerradas, se puede confinar un flujo magnético a una trayectoria bastante bien definida y hablar de un circuito magnético. Este concepto de circuito magnético es utilizado para la solución de problemas magnéticos asociados a distribuciones que contienen materiales ferromagnéticos y permite establecer un procedimiento, que con cierta facilidad, calcula los valores de las variables magnéticas asociadas a dicha distribución.

Para explicar el método de análisis de un circuito magnético, se considera un devanado toroidal de  $N$  número de espiras que encierra un medio magnético, por el cual circula una corriente eléctrica  $I$  generada por una batería externa.

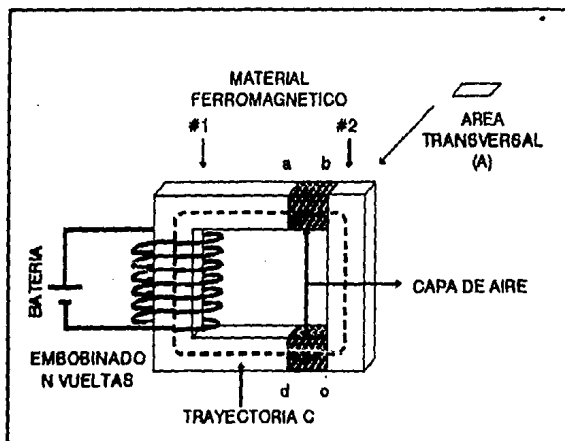


Fig. 3-3. Circuito magnético formado por dos materiales ferromagnéticos diferentes y dos capas de aire.

El flujo magnético que sigue la trayectoria C mostrada en la figura anterior, está definido por el flujo de la densidad del campo a través del área transversal de cada elemento del circuito  $\phi = \vec{B} \cdot \vec{\tau} * A$  . donde A es el área transversal del circuito en el punto analizado y  $\tau$  es un vector tangente a la trayectoria C en el mismo punto.

Aplicando la ley circuital de Ampere a una trayectoria que sigue un circuito magnético, como la trayectoria C en la figura (3-3), se obtiene:

$$\oint_C \vec{H} \cdot \vec{\tau} dl = N * I \quad \text{Como } \vec{B} = \mu * \vec{H} \quad \text{y} \quad \phi = \vec{B} \cdot \vec{\tau} * A \quad \therefore$$

$$\oint_C \vec{H} \cdot \vec{\tau} dl = \oint_C \frac{1}{\mu} * \vec{B} \cdot \vec{\tau} dl ;$$

$$\oint_C \vec{H} \cdot \vec{\tau} dl = \phi * \oint_C \frac{dl}{\mu * A} = N * I \quad (3.3)$$

Dividiendo la trayectoria "C" en secciones de área transversal constante, la ecuación (3.3) toma la siguiente forma:

$$\phi * \sum_{i=1}^m \frac{L_i}{\mu_i * A_i} = N * I \quad (3.4)$$

Donde m es el número de elementos en el circuito magnético.

Para calcular el valor de  $\phi$  en la ecuación (3.4), es necesario conocer los valores de  $\mu_i$ . Debido a que estas variables dependen directamente del propio valor del flujo, es necesario utilizar algún procedimiento *iterativo* que permita encontrar la solución a este tipo de problemas.

### 3.3 Métodos iterativos para solución a circuitos magnéticos.

Las condiciones iniciales para un problema de circuitos magnéticos definen dos tipos de casos:

El problema directo, que consiste en obtener el producto  $N \cdot I$ , llamado fuerza magnetomotriz (*fem*), necesaria para generar un flujo  $\phi$  dado en un circuito magnético particular. Y el problema inverso, en el que se determina el flujo magnético generado por una *fem* conocida.

#### - Método para la solución del problema directo.

Se considera un flujo  $\phi$  que circula a través de un circuito magnético particular, formado por  $n$  secciones de longitud  $L_i$  y sección transversal  $A_i$ .

Si los elementos del circuito forman un arreglo de conexión en serie, entonces el flujo es el mismo en todos ellos y la inducción magnética puede calcularse con la siguiente expresión:

$$B_i = \frac{\phi}{A_i}$$

Los materiales magnéticos blandos que forman el circuito, quedan perfectamente caracterizados por su curva inicial de magnetización, por lo cual:

$$H_i = \text{Curva}_i(B_i)$$

Donde  $\text{Curva}_i$  corresponde a la función inversa de la relación que caracteriza la curva inicial de magnetización para el material  $i$ -ésimo.

La *fem* que genera el flujo  $\phi$ , es la suma de todas las caídas de *fem* en cada uno de los elementos.

$$Fem = \sum_{i=1}^n H_i * L_i = \sum_{i=1}^n \text{Curva}(\phi / A_i) * L_i$$

$$Fem = \sum_{i=1}^n \text{Curva}(\phi / A_i) * L_i \quad (3.5)$$

Ecuación que permite resolver el problema directo.

### - Solución al problema inverso

Se considera una *fem* aplicada a un circuito magnético formado por *n* elementos conectados en serie, cada uno de ellos caracterizado por su longitud  $L_i$ , área  $A_i$  y curva de magnetización en el dominio  $[H_{\min}, H_{\max}]$ .

A través de los datos proporcionados por las curvas de magnetización para cada uno de los elementos del circuito magnético, pueden ser obtenidos los siguientes vectores:

$$\text{Flujo}_{\max} = \begin{bmatrix} B_1(H_{\max}) * A_1 \\ \vdots \\ B_n(H_{\max}) * A_n \end{bmatrix} \quad \text{Flujo}_{\min} = \begin{bmatrix} B_1(H_{\min}) * A_1 \\ \vdots \\ B_n(H_{\min}) * A_n \end{bmatrix}$$

$$c = \max[\text{Flujo}_{\min}] ; d = \min[\text{Flujo}_{\max}]$$

Donde *c* es el valor máximo del vector  $\text{Flujo}_{\min}$  y *d* es el valor mínimo correspondiente al vector  $\text{Flujo}_{\max}$ .

El valor mínimo del vector  $\text{Flujo}_{\max}$  y el valor máximo del vector  $\text{Flujo}_{\min}$ , determinan el intervalo de flujos que pueden ser calculados con la información contenida en las curvas de magnetización que se manejan.

El método de solución al problema directo permite calcular la *fem* necesaria para generar los flujos *c* y *d* definidos anteriormente.

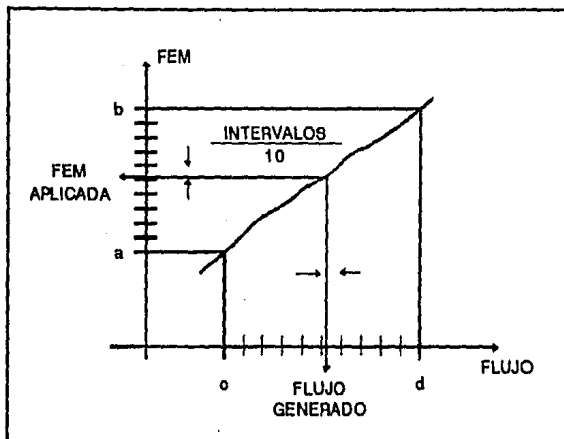


Fig. 3-4. Representación gráfica del procedimiento iterativo que permite determinar el flujo generado por una fem aplicada a un circuito magnético.

Si la fem que se aplica al circuito magnético está contenida en el intervalo [a,b] figura (3-4), entonces el flujo que genera dicha fem se encuentra en el intervalo [c,d] y es precisado con el siguiente procedimiento:

- 1.- Encontrar los intervalos [a,b] y [c,d].
- 2.- En el caso de que la fem aplicada esté fuera del intervalo [a,b], deben ser ampliados los límites  $[H_{min}, H_{max}]$
- 3.- Sobre el eje vertical FEM, se calcula la distancia de separación entre el valor de la fem aplicada y el valor conocido que se encuentra más cercanos a él.
- 4.- Si la distancia antes calculada es menor que un error previamente establecido, el problema está resuelto, en caso contrario seguir al paso número 5.
- 5.- Dividir el intervalo de flujos, cuyos extremos son las imágenes de los valores de fem más cercanos a la aplicada, en 10 partes iguales y obtener los valores de fem correspondientes utilizando el método de solución al problema directo.
- 6.- Regresar al paso número 3.



Este procedimiento resuelve el problema inverso con la aproximación requerida y permite resolver la ecuación (3.4) describiendo al sistema físico de la figura (3-1).

Para encontrar una expresión de la fuerza de pegado del electroimán y poder caracterizar su comportamiento, es necesario analizar los conceptos de energía magnética.

### 3.4 Energía magnética

Se considera nuevamente el sistema físico que forma el electroimán para la herramienta de punto libre, figura (3-5),

Considerado inicialmente desmagnetizado el circuito magnético, se mueve el *switch* del punto C al B, cerrando el circuito eléctrico que forma la batería externa con el embobinado del electroimán. La corriente  $I$  que se genera es una función del tiempo y se incrementa en forma asintótica desde el valor cero hasta el valor máximo dado por :  $I = \varepsilon_0 / R_b$

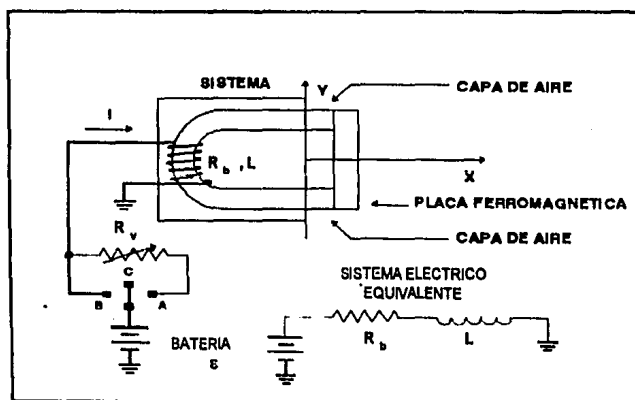


Fig. 3-5. Sistema físico que representa al electroimán de la sonda de punto libre.

La existencia de este efecto asintótico es debido a la generación de una *fem* inducida que se opone al cambio en el flujo magnético encontrado en el interior de la bobina.

Aplicando la ley de ohm para este circuito eléctrico se tiene:

$$\varepsilon + \varepsilon_0 = I * R_b \quad (3.6)$$

Donde  $\varepsilon$  es la *fem* que se induce en oposición al cambio en el flujo magnético de la bobina y  $\varepsilon_0$  el valor del voltaje de la batería externa.

Aplicando la ley de Faraday a la ecuación (3.6), se tiene:

$$\varepsilon = - N * \frac{d\phi}{dt} \quad \text{Donde } N \text{ es el número de espiras en la bobina}$$

$$\varepsilon_0 = I * R_b + N * \frac{d\phi}{dt} \quad (3.7)$$

La potencia gastada por la batería externa es:

$$P(t) = \varepsilon_0 * I(t) = I^2 * R_b + N * I * \frac{d\phi}{dt} \quad [\text{REITZ, 1972}]$$

$$P(t) = P_1 + P_2(t)$$

$P_1$  corresponde a la potencia que gasta la batería externa en mantener la corriente  $I$  circulando por el circuito, la cual se disipa en forma de energía calorífica al medio ambiente que rodea al sistema.  $P_2$  corresponde a la potencia que gasta la batería en contra de la *fem* inducida, la cual se almacena en el campo magnético generado por la bobina.

El termino  $P_2$  permite deducir una expresión para la fuerza de pegado del electroimán, por lo cual sólo se analizará este valor.

Debido a que la energía gastada por la batería es trabajo desarrollado, la potencia puede expresarse como:

$$P_2(t) = \frac{dW_b}{dt} = N * I * \frac{d\phi}{dt} \Rightarrow dW_b = N * I * d\phi \quad (3.8)$$

Por ley de conservación de la energía se tiene:

$$\Delta E_m = W_b - W; \quad dE_m = N * I * d\phi - dW \quad (3.9)$$

El cambio de la energía magnética es igual al trabajo realizado por la batería en establecer la corriente  $I$ , menos el trabajo realizado por el sistema sobre el medio que lo rodea.

Una vez establecida la expresión correspondiente a la conservación de la energía, se analizan los siguientes procesos que determinan una expresión para la fuerza de pegado.

**Nota:** Los dos procesos que se analizarán están referidos al sistema mostrado en la figura (3-5)

### Proceso No. 1 (Placa fija)

Este proceso permite encontrar el valor de la energía magnética del sistema debido únicamente al trabajo desarrollado por la batería en establecer una corriente  $I$ .

Manteniendo la placa ferromagnética fija en la posición  $x$  respecto al sistema de referencia, se cierra el *switch* de la posición  $C$  a la posición  $A$  para obtener una corriente eléctrica. Inicialmente  $R_v \gg R_b$ .

Para obtener un conjunto de estados de equilibrio, se disminuye en forma diferencial el valor de la resistencia variable  $R_v$  esperando la estabilización de  $I$  en cada caso.

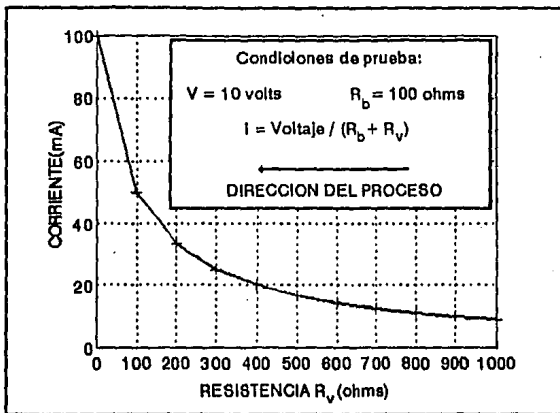


Fig. 3-6. Comportamiento de la corriente en el embobinado del electroimán durante el proceso de disminución de la resistencia variable  $R_v$ .

Este proceso caracteriza el incremento de la energía magnética que se almacena en el campo, debido a la existencia de los transitorios en cada uno de los procesos cuasiestáticos.

Durante el proceso, el trabajo desarrollado por el sistema sobre el medio ambiente es cero, debido a que el electroimán y la placa ferromagnética se encuentran fijos al sistema de referencia establecido.

De la ecuación (3.9)  $dE_m = N \cdot I \cdot d\phi$  ∴

$$\Delta E_m = \int_{\phi_0}^{\phi} N \cdot I \cdot d\phi = N \cdot \int_0^I I \cdot \frac{d\phi}{dI} dI \quad (3.10)$$

$$\Delta E_m = N \cdot \int_0^I I \cdot \frac{d\phi}{dI} dI \quad E_m(x, I) - E_m(0, I) = N \cdot \int_0^I I \cdot \frac{d\phi}{dI} dI \quad (3.11)$$

Donde "x" es la longitud de la capa de aire mostrada en la figura (3-5).

Si los materiales que se manejan tienen un ciclo de histéresis suficientemente delgado, entonces se puede considerar que las curvas de magnetización de los materiales caracterizan correctamente a éstos. Con base en esta hipótesis, la derivada del flujo respecto a la corriente eléctrica que circula por el circuito eléctrico, es independiente de la trayectoria que se siga para llegar a la corriente  $I$  final y por lo tanto no es necesario calcularla como una integral de línea.

Como el valor inicial de la corriente  $I$  es cero, entonces la energía magnética inicial debe ser cero. (No existencia de campo magnético) y la ecuación (3.11) se modifica de la siguiente forma:

$$E_m(x, I) = N \int_0^I I \frac{d\phi(x, I)}{dI} dI \quad (3.12)$$

### - Proceso No. 2 (Placa móvil)

Manteniendo una corriente  $I_1$  fija en el embobinado, se aplica una fuerza  $F$  para desplazar la placa ferromagnética una distancia  $x$  y generar una modificación en el flujo magnético del valor  $\phi_0$  a  $\phi_1$ .

El trabajo desarrollado por el sistema sobre la placa es:  $W = - \int_0^x F(x) dx$

El signo menos indica que la fuerza aplicada por el sistema sobre el medio, presenta dirección opuesta al desplazamiento.

El trabajo desarrollado por la batería externa en mantener la corriente  $I_1$  fija se calcula a partir de la ecuación (3.8). El término correspondiente al trabajo desarrollado por la batería en mantener estable la corriente  $I_1$  es:

$$dW_b = N \cdot I_1 \cdot d\phi \quad \text{por lo que}$$

$$W_b = N \cdot I_1 \cdot \int_{\phi_0}^{\phi_1} d\phi = N \cdot I_1 \cdot (\phi_1 - \phi_0) \quad (3.13)$$

Sustituyendo las expresiones anteriores en la ecuación (3.9) se tiene:

$$\Delta E_m = N * I_1 * (\phi_1 - \phi_0) + \int_0^x F(x) dx$$

Derivando respecto a x se obtiene:

$$F(x) = \frac{\partial}{\partial x} (-N * I_1 * (\phi_1 - \phi_0) + \Delta E_m)$$

$$\text{Donde } \phi_1 = \phi(x, I_1) \quad \phi_0 = \phi(0, I_1) \quad \Delta E_m = E_m(x, I_1) - E_m(0, I_1)$$

Por lo tanto:

$$F(x) = \frac{\partial}{\partial x} (-N * I_1 * \phi(x, I_1) + E_m(x, I_1))$$

Por la ecuación (3.12) se tiene:

$$F(x) = \frac{\partial}{\partial x} (-N * I_1 * \phi(x, I_1) + N * \int_0^{I_1} I * \frac{\delta \phi(x, I)}{\delta I} dI)$$

Introduciendo la derivada parcial en la integral, permutando las derivadas e integrando por partes, la fuerza de pegado puede expresarse de la siguiente forma:

$$F(x) = -N * \int_0^{I_1} \frac{\partial \phi(x, I)}{\partial x} dI \quad (3.14)$$

Una vez definida la geometría particular del electroimán, deben obtenerse los valores correspondientes a la función  $\phi(x, I)$  a través del método de solución al problema inverso para circuitos magnéticos y obtener el valor de la fuerza de pegado en forma numérica.

---

## CAPITULO IV

---

### DISEÑO DE FIJADORES ELECTROMAGNETICOS

Este capítulo presenta los resultados, obtenidos a través de las expresiones encontrados en el capítulo III, del comportamiento de un electroimán particular que representa los dispositivos de anclaje de la sonda de punto libre.

Debido a las restricciones geométricas que impone el diseño de la herramienta, se propuso una geometría particular para el electroimán correspondiente y se caracterizó en forma eléctrica obteniéndose la relación funcional entre la *fem* aplicada y la potencia consumida. Con el método de solución al problema inverso para circuitos magnéticos sección (3.3), se calculó el flujo  $\phi$  en el electroimán para diferentes materiales ferromagnéticos, con el propósito de encontrar la relación funcional entre la fuerza de pegado y la *fem* aplicada. Por último, se concluye con base en estos resultados obtenidos, al costo, acceso y facilidad de maquinado de los materiales para la fabricación del dispositivo. Este es en esencia el método utilizado para el diseño de las anclas electromagnéticas de la sonda de punto libre.

La figura (4-1) muestra un diagrama del estado en el cual la sonda de punto libre trabaja en el interior del tubo. Obsérvese que el peso total de la herramienta es de aproximadamente 20kgf, por lo que la fuerza de pegado para cada electroimán, debe ser tal que la fricción generada con la pared interna del tubo sea lo suficientemente grande para soportar este peso y ofrecer un margen de seguridad.

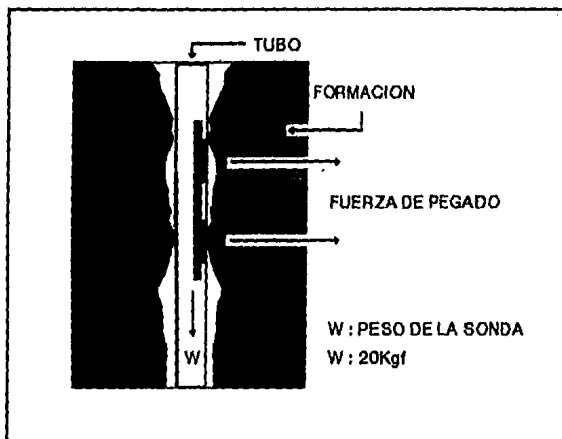
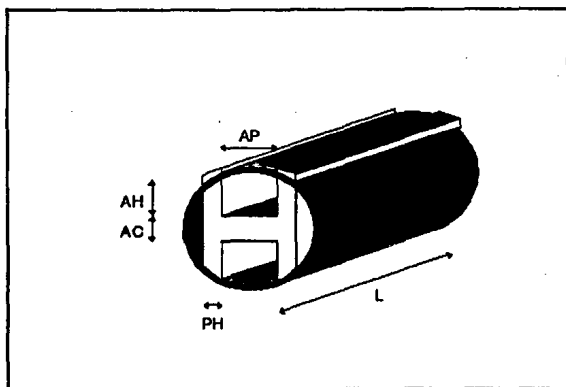


Fig. 4-1. Herramienta de punto libre en el interior de un tubo atrapado por fricción en un recipiente de paredes rugosas.

#### 4.1 Geometría propuesta

Debido a que los electroimanes están rodeados por una camisa protectora en forma de cilindro hueco, se induce que la forma de los electroimanes debe ser la de una H proyectada. Esta geometría propuesta es favorable, debido a que se permite espacio para el embobinado y sus polos generan estabilidad mecánica en el estado de adherencia.





**Fig. 4-2.** Electroimán de la herramienta de Punto Libre en el interior de una camisa metálica protectora.

Las variables geométricas que deben considerarse en la geometría propuesta se muestran en la tabla (4-1). Los valores asignados a estas variables fueron obtenidos en función de la geometría de la camisa contenedora, de las condiciones de estabilidad en el estado de pegado y del diámetro del tubo con el que se pretende trabajar con mayor frecuencia.

Posibles variaciones a las magnitudes de estas variables, pueden ser generadas al analizar los resultados magnéticos que se obtienen para dicha geometría particular.

**Tabla 4-1.** Caracterización geométrica para el electroimán propuesto.

	VARIABLE	(pg)	(cm)
Longitud del electroimán	L	7.874	20
Ancho de la pared	PH	0.300	0.762
Altura del embobinado	AH	0.350	0.889
Altura central	AC	0.300	0.762
Abertura de polos	AP	0.250	0.635

## 4.2 Caracterización eléctrica

Se considera que el embobinado en el electroimán tiene la distribución mostrada en la figura (4-3):

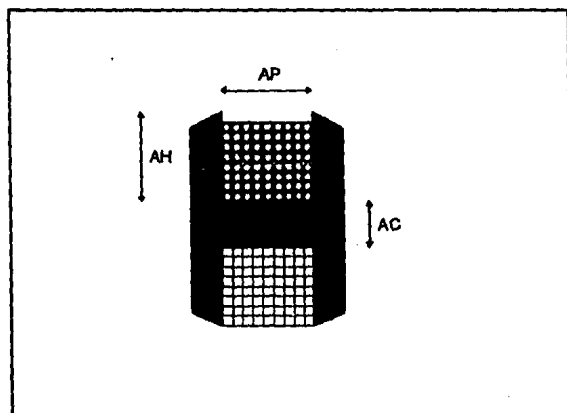


Fig. 4-3. Corte transversal del electroimán donde se muestra la distribución del embobinado.

Número de renglones =  $N_{\text{Renglones}} = \text{menor entero } (AH / D)$

Número de columnas =  $N_{\text{Columnas}} = \text{menor entero } (AP / D)$

Donde D es el diámetro del alambre magneto utilizado.

Número de vueltas =  $N = N_{\text{Renglones}} * N_{\text{Columnas}}$

Para determinar la resistencia eléctrica que presenta el embobinado, es necesario calcular la longitud del cable magneto correspondiente.

Longitud del cable =  $N * (P_0 + 4 * D * N_{\text{Renglones}})$        $P_0 = 2 * L + 2 * AC$

$$R = \eta(T) * \frac{\text{Longitud del cable}}{\text{Area transversal}} \quad (4.1)$$

Siendo  $\eta(T)$  la resistividad del material una función de la temperatura  $T$ , se obtiene la expresión correspondiente a la serie de Taylor.

$$\eta(t) = \eta(20^\circ\text{C}) + \left[ \frac{d\eta}{dT} \right]_{T=20^\circ\text{C}} * (T - 20^\circ\text{C}) + \text{Error}$$

$$\alpha = \frac{1}{\eta} * \frac{d\eta}{dt}$$

Utilizando la expresión correspondiente al coeficiente de la temperatura  $\alpha$ , se obtiene una expresión para la resistencia eléctrica del embobinado como función de la temperatura.

$$\eta(t) = \eta(20^\circ\text{C}) + \alpha * \eta * (t - 20^\circ\text{C})$$

$$R(t) = \eta(t) * \frac{L \text{ del cable}}{A}$$

$$R(t) = \frac{L \text{ del cable}}{A} * \eta(20^\circ\text{C}) * [1 + \alpha * (t - 20^\circ\text{C})]$$

Tomando en cuenta que el embobinado está construido con alambre de cobre, las constantes  $\alpha$  y  $\eta$  toman los siguientes valores:

$$\alpha(20^\circ\text{C}) = 0.00393 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \quad ; \quad \eta(20^\circ\text{C}) = 1.69 * 10^{-8} \text{ ohms} * \text{m}$$

$$\therefore R(T) = 2.15 * 10^{-8} * \frac{L \text{ del cable}}{D^2} * [1 + 0.00393 * (T - 20)] \quad (4.2)$$

Una vez obtenida la expresión para la resistencia eléctrica, puede calcularse la potencia necesaria para mantener la corriente eléctrica en el embobinado.

$$P(T) = R(T) * I^2$$

$$P(T) = 2.15 * 10^{-8} * I^2 * \frac{L \text{ del cable}}{D^2} * [1 + 0.00393 * (T - 20)]$$

Sustituyendo la expresión correspondiente a la longitud del cable se tiene:

$$P(T) = 2.15 \cdot 10^{-8} \cdot N \cdot I^2 \frac{2 \cdot L + 2 \cdot AC + 4 \cdot D \cdot N_{\text{Renglones}}}{D^2} \cdot [1 + 0.00393 \cdot (T - 20)] \quad (4.3)$$

Considerando que las funciones  $N_{\text{Renglones}}$  y  $N_{\text{Columnas}}$  son funciones continuas, se obtiene una nueva expresión para la potencia eléctrica representada por la ecuación (4.3):

$$N = N_{\text{Renglones}} \cdot N_{\text{Columnas}} = AH \cdot AP / D^2$$

$$D^2 = AH \cdot AP / N$$

$$P(T) = 2.15 \cdot 10^{-8} \cdot N^2 \cdot I^2 \frac{2 \cdot L + 2 \cdot AC + 4 \cdot AH}{AH \cdot AP} \cdot [1 + 0.00393 \cdot (T - 20)]$$

Debido a que el producto  $N \cdot I$  es la fuerza magnetomotriz  $fem$ , la ecuación anterior puede ser expresada de la siguiente forma:

$$P(T) = 2.15 \cdot 10^{-8} \cdot Fem^2 \cdot \frac{2 \cdot L + 2 \cdot AC + 4 \cdot AH}{AH \cdot AP} \cdot [1 + 0.00393 \cdot (T - 20)] \quad (4.4)$$

La ecuación (4.4) expresa la potencia eléctrica, como una función de la  $fem$  aplicada que no depende del calibre del alambre utilizado.

Para alambre magneto de calibres mayores a 29 AWG, la potencia calculada con la ecuación (4.4), presenta un error del 8 % respecto al cálculo efectuado por la ecuación (4.3). Para fines prácticos se puede considerar que la potencia eléctrica no depende del diámetro del alambre utilizado.

**Tabla 4-2. Descripción eléctrica del embobinado del electroimán.**

Calibre (AWG)	Diámetro (mm.)	Vueltas	Longitud (m)	Resistencia (ohms)
29	0.330	518	233	46
30	0.305	606	273	63
31	0.254	875	394	131
32	0.229	1076	485	199
33	0.203	1370	617	322
34	0.178	1782	803	545
35	0.127	3500	1578	2105
36	0.102	5426	2446	5059

Una vez caracterizado el sistema eléctrico con base en la geometría propuesta, fue necesario determinar el tipo de material ferromagnético con el cual se fabricarían los electroimanes.

Inicialmente se propuso el material que presenta un valor alto de saturación magnética y una curva de magnetización con pendiente positiva grande para valores de H pequeños. Este tipo de material resuelve las necesidades magnéticas, pero presenta problemas mecánicos, debido a que resultan ser materiales extremadamente duros para ser maquinados, además de tener un costo más elevado al del acero recocido. Es importante determinar entonces, si en forma práctica es conveniente utilizar un acero recocido o un material ferromagnético de muy buena calidad.

Una vez establecida la geometría del sistema y la caracterización eléctrica correspondiente, únicamente falta determinar el tipo de material ferromagnético a utilizar. La siguiente sección muestra las tablas de los valores de las variables magnéticas correspondientes y la fuerza de pegado resultante para el sistema de la figura (4-4). Estos resultados son obtenidos mediante la aplicación del método iterativo discutido en la sección (3.3) y por un método numérico para evaluar la integral de la ecuación (3.18). En función de estos datos se concluye el tipo de material ferromagnético que se ajusta a las necesidades de construcción del dispositivo.

### 4.3 Resultados magnéticos

Esta sección muestra los resultados para los valores de las variables magnéticas y la fuerza de pegado, correspondientes a cinco electroimanes construidos de diferente tipo de material. Se considera el circuito magnético de la figura (4-4).

Tabla 4-3. Materiales que forman el circuito magnético del electroimán para cinco casos diferentes propuestos.

Sistema	Material para electroimán	Material para placa
1	Material lineal	Material lineal
2	Hierro colado	Hierro colado
3	Acero recocido	Acero recocido
4	Acero recocido	Hierro colado
5	Supermendur	Hierro colado

Todos los materiales que se indican en la tabla anterior, representan materiales ferromagnéticos caracterizados completamente por su curva de magnetización.

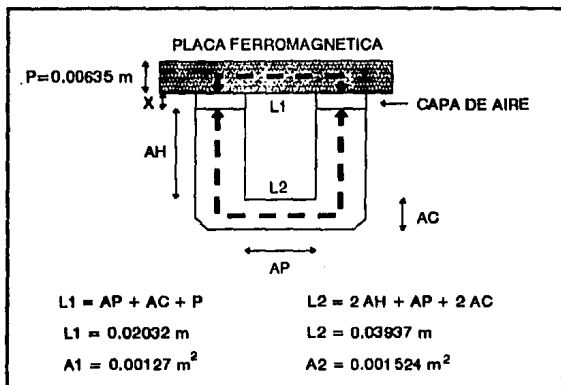


Fig. 4-4. Caracterización geométrica del circuito magnético que forma el electroimán.

Para el caso del sistema #1, los materiales lineales presentan una curva de magnetización lineal con permeabilidad magnética constante. Los valores de las variables magnéticas para este caso, no necesitan ser obtenidas mediante el proceso iterativo mencionado, por lo cual, se analiza en esta sección como un caso particular.

### Sistema #1

Los materiales involucrados presentan curva de magnetización lineal.

Punto de saturación = (H, B) = ( 15780 A/m , 2.407 T )

$$B = \mu * H \quad \mu = \text{cte.} = 0.0001525 \text{ T} * \text{m} / \text{A}$$

Considerando  $A_3$  como el área transversal que ocupa una capa de aire, igual al área transversal que ocupa el electroimán se tiene:

$$\phi = \frac{N * I}{\frac{L_1}{\mu * A_1} + \frac{L_2}{\mu * A_2} + \frac{2 * x}{\mu_0 * A_3}} \quad \frac{\partial \phi}{\partial x} = -2 \frac{Fem}{\mu_0 * A_3} \frac{1}{\left[ \frac{L_1}{\mu * A_1} + \frac{L_2}{\mu * A_2} + \frac{2 * x}{\mu_0 * A_3} \right]^2}$$

Aplicando la ecuación (3.14) se tiene:

$$\text{Fuerza}(x, Fem) = \frac{Fem^2}{\mu_0 * A_3} \frac{1}{\left[ \frac{L_1}{\mu * A_1} + \frac{L_2}{\mu * A_2} + \frac{2 * x}{\mu_0 * A_3} \right]^2}$$

$$\text{Fuerza}(x, Fem) = 12.15 * Fem^2 * \frac{1}{(41.8 + 1.593 * 10^5 * x)^2}$$

Donde la fuerza esta dada en Newtons.

Debe observarse que los resultados del caso anterior son fáciles de expresar debido a que la curva de magnetización es lineal.

En condiciones reales, el electroimán de la herramienta de punto libre deberá trabajar en el interior de tubos de diámetros diversos, por lo que el área de contacto entre los polos del electroimán y la superficie interna del tubo es variable.

Las siguientes tablas y curvas presentan los valores del flujo magnético y la fuerza de pegado como función de la fem aplicada, para cada uno de los casos mencionados en la tabla (4-3).

Los valores calculados fueron obtenidos mediante los resultados encontrados en el capítulo III (APENDICE Y ANEXO I).

Las secciones marcadas con C en las siguientes tablas, corresponden al caso en el que los polos del electroimán se consideran con cierta curvatura y están en contacto con una sección de placa ferromagnética plana; condición en la cual se presenta la mayor distancia efectiva entre el electroimán y la pared interna del tubo en condiciones de pegado.



Sistema ( Lineal - Lineal )

Electroimán: Material con curva de magnetización lineal y permeabilidad magnética constante.

Placa metálica: Material con curva de magnetización lineal y permeabilidad magnética constante.

Tabla 4-4. Resultados para el circuito magnético de la figura (4-4) donde el electroimán y la placa metálica están contruidos por un material lineal. Se considera como variable independiente la Fem aplicada.

Fem	Potencia	x	Flujo	$\frac{\partial \phi}{\partial x}$	Fuerza	x	Flujo	$\frac{\partial \phi}{\partial x}$	Fuerza
A	W	mm	$10^{-4} \cdot W$	- W/m	Kgf	mm	$10^{-4} \cdot W$	- W/m	Kgf
		<b>C1</b>				<b>C2</b>			
0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0
100	1.7	0	3.50	1.28	6.4	0.1	2.56	0.69	3.4
200	6.9	0	7.00	2.56	26	0.1	5.01	1.37	14
300	15	0	10.5	3.84	58	0.1	7.69	2.06	31
400	27	0	14	5.12	102	0.1	10.3	2.74	55
500	43	0	17.5	6.39	160	0.1	12.8	3.43	86
		<b>C3</b>				<b>C4</b>			
0	0	1.6	0	0	0	C	0	0	0
100	1.7	1.6	0.51	0.03	0.1	C	2.79	0.81	4.6
200	6.9	1.6	1.03	0.06	0.6	C	4.80	0.77	13
300	15	1.6	1.54	0.08	1.3	C	6.33	1.02	22
400	27	1.6	2.06	0.11	2.2	C	7.71	0.85	31
500	43	1.6	2.57	0.14	3.5	C	8.76	0.97	40

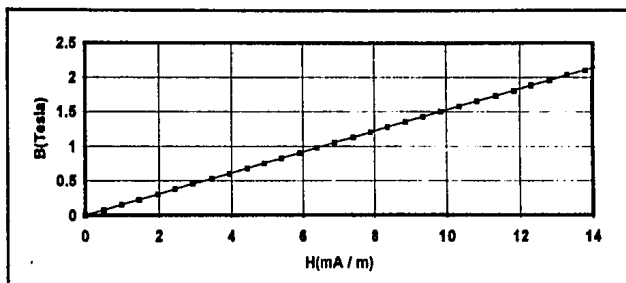


Fig. 4-5. Curva de magnetización para un material lineal.

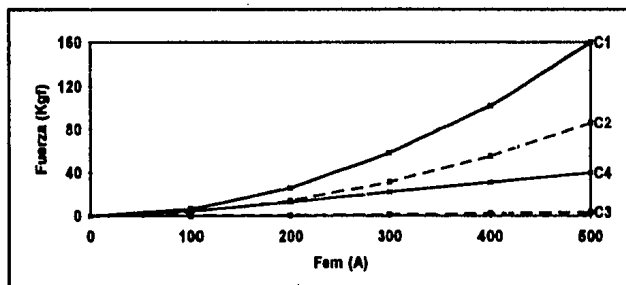


Fig. 4-6. Fuerza de pegado entre el electroimán de material lineal de la figura (4-4) y una placa delgada construida con el mismo material.

Resultados mostrados en la tabla (4.4)

C1 - Curva para  $x = 0$  mm.

C2 - Curva para  $x = 0.1$  mm.

C3 - Curva para  $x = 1.6$  mm.

C4 - Curva para el caso de un electroimán con curvatura en los polos.

Sistema ( Hcolado - Hcolado)

Electroimán: Hierro Colado.

Placa metálica: Hierro Colado.

Tabla 4-5. Resultados para el circuito magnético de la figura (4-4) donde el electroimán y la placa metálica están contruidos por Hierro colado. Se considera como variable independiente la Fem aplicada.

Fem	Potencia	x	Flujo	$\frac{\partial \phi}{\partial x}$	Fuerza	x	Flujo	$\frac{\partial \phi}{\partial x}$	Fuerza
A	W	mm	$10^{-4} \cdot W$	- W/m	Kgf	mm	$10^{-4} \cdot W$	- W/m	Kgf
		C1				C2			
0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0
10	0.02	0	1.06	1.02	0.5	0.1	0.5	0.27	0.1
30	0.2	0	3.04	2.91	5	0.1	1.48	0.74	1.1
50	0.4	0	4.72	3.23	11	0.1	2.48	1.26	3
70	0.8	0	5.86	3.07	18	0.1	3.43	1.68	6
90	1.4	0	6.71	2.45	23	0.1	4.33	1.98	10
100	1.7	0	7.04	2.47	30	0.1	4.75	1.93	12
200	6.9	0	9.18	1.36	48	0.1	7.65	1.54	28
300	15	0	10.5	1.13	59	0.1	9.23	1.19	42
400	27	0	11.5	1.27	73	0.1	10.4	1.01	53
500	43	0	12.6	1.39	86	0.1	11.4	1.12	63
		C3				C4			
0	0	1.6	0	0	0	C	0	0	0
10	0.02	1.6				C	0.83	0.59	0.3
30	0.2	1.6				C	1.89	0.96	2
50	0.4	1.6				C	2.78	1.17	4
70	0.8	1.6				C	3.19	0.66	5.5
90	1.4	1.6				C	3.58	0.73	7
100	1.7	1.6	0.57	0.03	0.2	C	3.78	0.77	8
200	6.9	1.6	1.14	0.07	0.7	C	5.42	0.64	15
300	15	1.6	1.71	0.10	1.5	C	6.50	0.69	22
400	27	1.6	2.28	0.14	2.7	C	7.48	0.71	29
500	43	1.6	2.85	0.17	4.2	C	8.18	0.59	35

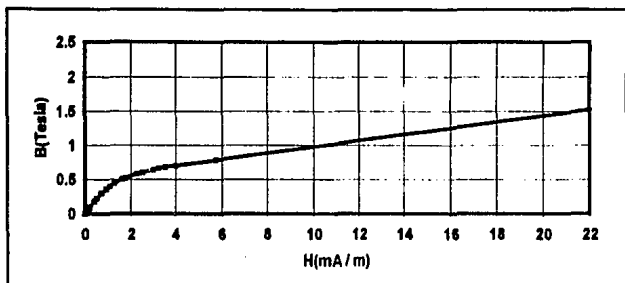


Fig. 4-7. Curva de magnetización para el Hierro colado.

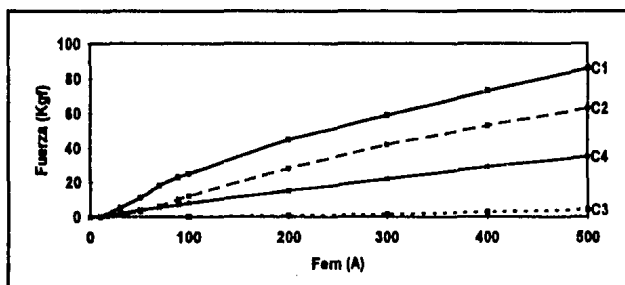


Fig. 4-8. Fuerza de pegado entre el electroimán de Hierro colado de la figura (4-4) y una placa delgada construida con el mismo material.

Resultados mostrados en la tabla (4.5)

C1 - Curva para  $x = 0$  mm.

C2 - Curva para  $x = 0.1$  mm.

C3 - Curva para  $x = 1.6$  mm.

C4 - Curva para el caso de un electroimán con curvatura en los polos.

Sistema ( Acero - Acero )

Electroimán: Acero recocido denominado 1005.

Placa metálica: Acero recocido denominado 1005.

Tabla 4-6. Resultados para el circuito magnético de la figura (4-4) donde el electroimán y la placa metálica están construidos por Acero recocido. Se considera como variable independiente la Fem aplicada.

Fem	Potencia	x	Flujo	$\frac{\partial \phi}{\partial x}$	Fuerza	x	Flujo	$\frac{\partial \phi}{\partial x}$	Fuerza
A	W	mm	$10^{-4}W$	- W/m	Kgf	mm	$10^{-4}W$	- W/m	Kgf
		C1				C2			
0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0
10	0.02	0	3.18	14.21	3	0.1	0.73	0.55	0.3
30	0.2	0	1.56	40.6	106	0.1	2.18	1.66	2.5
50	0.4	0	1.83	16.8	158	0.1	3.78	2.49	7
70	0.8	0	1.94	8.56	182	0.1	5.55	5.10	16
90	1.4	0	2.0	4.70	196	0.1	7.31	6.67	28
100	1.7	0	2.03	4.62	200	0.1	8.18	7.47	35
200	6.9	0	2.21	3.01	246	0.1	16.1	10.3	133
300	15	0	2.30	2.06	269	0.1	20.0	3.81	204
400	27	0	2.37	1.40	287	0.1	21.7	2.80	234
500	43	0	2.42	1.08	298	0.1	22.7	1.10	256
		C3				C4			
0	0	1.6	0	0	0	C	0	0	0
10	0.02	1.6				C	2.37	3.18	2
30	0.2	1.6				C	3.54	1.3	6
50	0.4	1.6				C	4.20	1.36	9
70	0.8	1.6				C	4.76	1.36	11
90	1.4	1.6				C	5.28	1.34	14
100	1.7	1.6	0.59	0.04	0.18	C	5.52	1.41	15
200	6.9	1.6	1.18	0.07	0.7	C	7.35	1.16	29
300	15	1.6	1.77	0.11	1.6	C	8.70	1.14	40
400	27	1.6	2.37	0.15	2.9	C	9.91	1.12	51
500	43	1.6	2.96	0.18	4.6	C	10.9	1.04	62

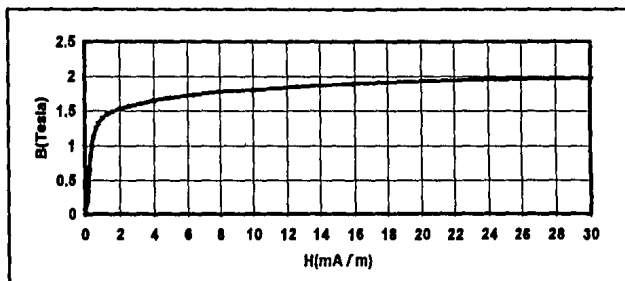


Fig. 4-9. Curva de magnetización para el Acero recocido.

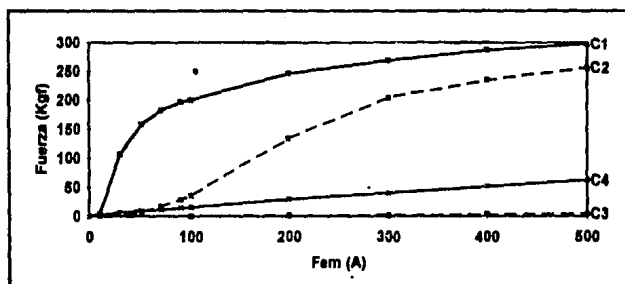


Fig. 4-10. Fuerza de pegado entre el electroimán de Acero recocido mostrado en la figura (4-4) y una placa delgada construida con el mismo material.

Resultados mostrados en la tabla (4.6)

C1 - Curva para  $x = 0$  mm.

C2 - Curva para  $x = 0.1$  mm.

C3 - Curva para  $x = 1.6$  mm.

C4 - Curva para el caso de un electroimán con curvatura en los polos.

Sistema ( Acero - Hcolado )

Electroimán: Acero recocido denominado 1005.

Placa metálica: Hierro Colado.

Tabla 4-7. Resultados para el circuito magnético de la figura (4-4) donde el electroimán está construido por Acero recocido y la placa metálica por Hierro colado. Se considera como variable independiente la Fem aplicada.

Fem	Potencia	x	Flujo	$\frac{\partial \phi}{\partial x}$	Fuerza	x	Flujo	$\frac{\partial \phi}{\partial x}$	Fuerza
A	W	mm	$10^{-4} \cdot W$	- W/m	Kgf	mm	$10^{-4} \cdot W$	- W/m	Kgf
		C1				C2			
0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0
10	0.02	0	1.71	3.08	1.4	0.1	0.62	0.41	0.2
30	0.2	0	5.02	7.47	15	0.1	1.84	1.18	1.8
50	0.4	0	6.83	4.74	27	0.1	3.05	1.90	4.8
70	0.8	0	7.90	3.71	34	0.1	4.30	2.68	10
90	1.4	0	8.70	2.30	41	0.1	5.41	2.88	15
100	1.7	0	8.96	2.43	43	0.1	5.90	2.92	18
200	6.9	0	1.16	3.12	77	0.1	9.04	1.94	44
300	15	0	1.41	3.75	110	0.1	11.1	2.37	64
400	27	0	1.67	4.38	151	0.1	13.2	2.76	90
500	43	0	1.91	4.56	196	0.1	15.2	3.18	120
		C3				C4			
0	0	1.6	0	0	0	C	0	0	0
10	0.02	1.6				C	1.54	2.51	1.5
30	0.2	1.6				C	3.17	1.31	5.2
50	0.4	1.6				C	3.83	1.09	7.5
70	0.8	1.6				C	4.36	1.13	9.8
90	1.4	1.6				C	4.84	1.14	12
100	1.7	1.6	0.58	0.04	0.2	C	5.06	1.19	13
200	6.9	1.6	1.17	0.07	0.7	C	6.80	0.93	25
300	15	1.6	1.75	0.11	1.6	C	7.96	0.87	33
400	27	1.6	2.33	0.14	3	C	8.92	0.83	42
500	43	1.6	2.91	0.18	4	C	9.75	0.78	50

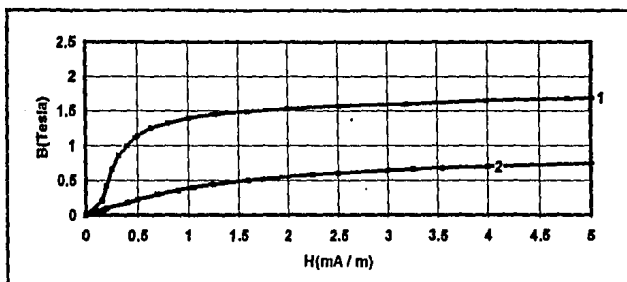


Fig. 4-11. Curvas de magnetización para el Acero recocido(1) y Hierro Colado(2).

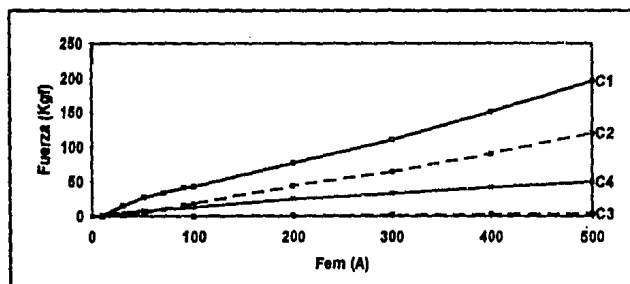


Fig. 4-12. Fuerza de pegado entre el electroimán de Acero recocido mostrado en la figura (4-4) y una placa delgada construida con Hierro colado.

Resultados mostrados en la tabla (4.7)

C1 - Curva para  $x = 0$  mm.

C2 - Curva para  $x = 0.1$  mm.

C3 - Curva para  $x = 1.6$  mm.

C4 - Curva para el caso de un electroimán con curvatura en los polos.



Sistema ( Supermendur - Hcolado )

Electroimán: Material ferromagnético llamado Supermendur.

Placa metálica: Hierro Colado.

Tabla 4-8. Resultados para el circuito magnético de la figura (4-4) donde el electroimán está construido por un material llamado Supermendur y la placa metálica por Hierro colado.

Fem	Potencia	x	Flujo	$\frac{\partial \phi}{\partial x}$	Fuerza	x	Flujo	$\frac{\partial \phi}{\partial x}$	Fuerza
A	W	mm	$10^{-4} \cdot W$	- W/m	Kgf	mm	$10^{-4} \cdot W$	- W/m	Kgf
		C1				C2			
0	0	0	0	0	0	0.1	0	0	0
10	0.02	0	2.54	5.82	3	0.1	0.69	0.49	0.2
30	0.2	0	5.78	5.95	18	0.1	2.07	1.50	2.2
50	0.4	0	7.36	5.30	28	0.1	3.42	2.41	6
70	0.8	0	8.28	3.99	36	0.1	4.68	2.88	11
90	1.4	0	8.93	2.46	42	0.1	5.76	2.92	17
100	1.7	0	9.19	2.53	44	0.1	6.25	3.17	20
200	6.9	0	11.8	3.23	71	0.1	9.27	2.0	50
300	15	0	14.5	3.99	108	0.1	11.3	2.45	70
400	27	0	17.1	4.72	152	0.1	13.4	2.90	100
500	43	0	19.8	5.45	203	0.1	15.5	3.25	128
		C3				C4			
0	0	1.6	0	0	0	C	0	0	0
10	0.02	1.6				C	2.44	5.76	3
30	0.2	1.6				C	4.04	1.14	8
50	0.4	1.6				C	4.58	1.26	11
70	0.8	1.6				C	5.11	1.33	13
90	1.4	1.6				C	5.61	1.41	16
100	1.7	1.6	0.59	0.04	0.18	C	5.85	1.47	17
200	6.9	1.6	1.18	0.07	0.7	C	7.73	0.96	31
300	15	1.6	1.77	0.11	1.6	C	8.85	0.91	39
400	27	1.6	2.36	0.14	2.9	C	9.85	1.02	49
500	43	1.6	2.94	0.18	4.5	C	10.8	1.05	60

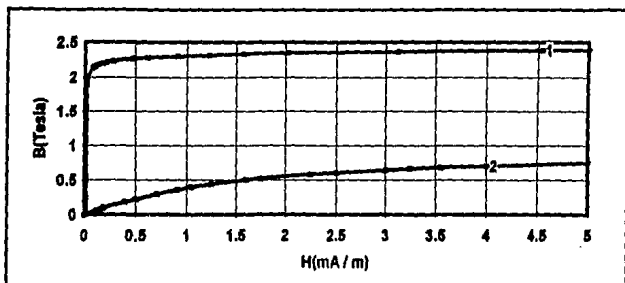


Fig. 4-13. Curva de magnetización para el material ferromagnético Supermendur(1) y para el Hierro colado(2).

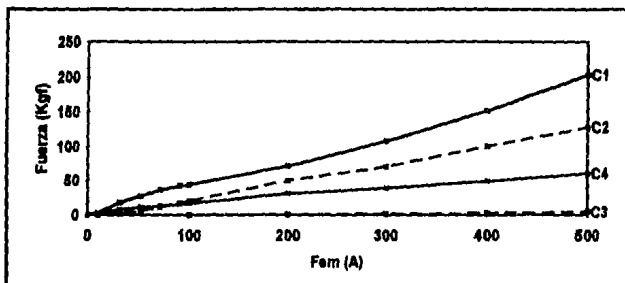


Fig. 4-14. Fuerza de pegado entre el electroimán de supermendur de la figura (4-4) y una placa delgada de Hierro colado.

Resultados mostrados en la tabla (4.8)

C1 - Curva para  $x = 0$  mm.

C2 - Curva para  $x = 0.1$  mm.

C3 - Curva para  $x = 1.6$  mm.

C4 - Curva para el caso de un electroimán con curvatura en los polos.

#### 4.4 Análisis de resultados:

El objetivo de haber realizado el análisis para un electroimán con polos planos, es el de comparar los resultados obtenidos con los datos editados para un electroimán comercial construido por la compañía MAGNETOOL, para asegurar la eficiencia del método utilizado.

Debido a que el diseño del electroimán exige curvatura en los polos, la selección del material ferromagnético se realizó comparando las curvas etiquetadas C4 de los 5 casos considerados en la tabla (4-3).

La fuerza mínima de fricción entre un electroimán y el tubo considerado se exige que sea del orden de 15 Kgf, por lo que si se considera un coeficiente mínimo de fricción del orden de 0.3, es necesario que la fuerza de pegado del electroimán sea de 50 Kgf.

De los resultados en las tablas (4-6), (4-7) y (4-8) se observa que la potencia aplicada para generar dicha fuerza es de 27 W, 43 W y 27 W respectivamente.

Considerando que los tubos atrapados están contruidos con aceros de alto contenido de carbón, se les puede asignar la curva de magnetización para el Hierro colado, la cual no presenta un valor alto de B en el punto de saturación.

La potencia necesaria para generar una fuerza de 50 Kgf para el sistema Acero-Hcolado, es de 43 W, que representa 1.6 veces la potencia consumida por el sistema Supermendur-Hcolado. Considerando que 43 W es una potencia que fácilmente puede ser generada y que no representa un valor mucho mayor a 27 W, así como la dificultad para maquinar y el alto costo que presentan los materiales del tipo Supermendur, son factores importantes para omitir la construcción del electroimán con este tipo de materiales.

El conjunto de consideraciones manejadas anteriormente, permiten concluir que el electroimán debe ser construido por un material del tipo Acero 1005. El conjunto de datos presentados en la tabla (4-7) permite asegurar que la fuerza de pegado de 50Kgf puede ser generada con 43 W.

En función del voltaje máximo que maneja la fuente de alimentación en superficie y de los 43W de potencia calculada, se encontró que los valores teóricos de la corriente aplicada a cada electroimán es de 280 mA, circulando en un embobinado de alambre magneto de calibre 34 AWG.

Los electroimanes reales de la herramienta de punto libre fueron construidos con base en los resultados de este análisis y presentaron los siguientes resultados:

La resistencia eléctrica por electroimán es del orden de 600 ohms y necesita ser alimentado con una corriente eléctrica de 300 mA para generar una fuerza de fricción de 15 Kgf con la pared interna de un tubo de 6.3", cuando se presenta un coeficiente de fricción del orden de 0.35. Por lo tanto, considerando su distribución eléctrica, la sonda necesita ser alimentada con 650 mA.

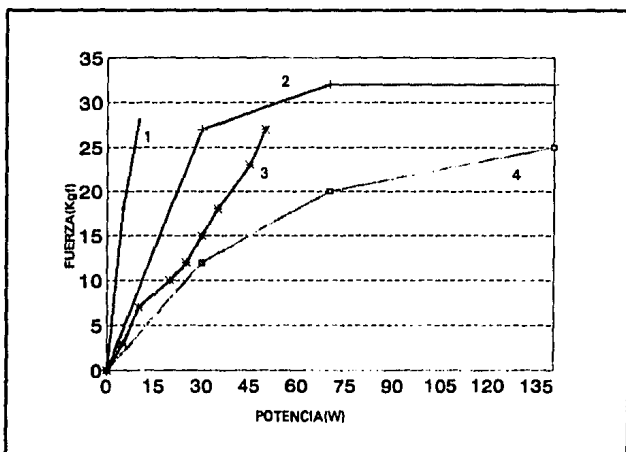


Fig. 4-15. Datos experimentales para la fuerza de fricción del electroimán diseñado. Diámetros internos de tubos trabajados:

1: Tubo de 2", 2: Tubo de 2.1", 3: Tubo de 3.1", 4: Tubo de 6.3".

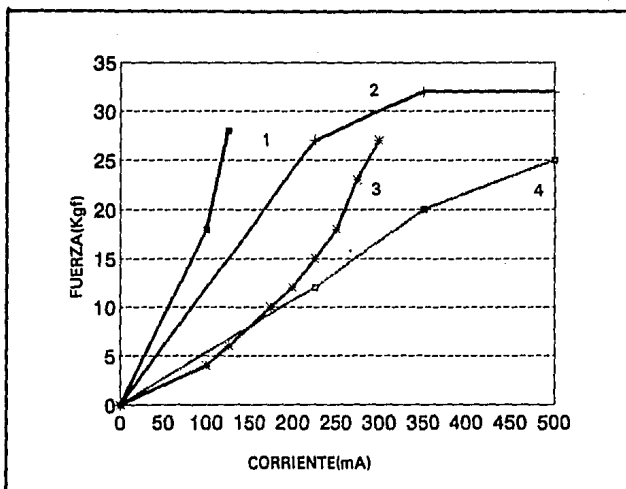


Fig. 4-16. Datos experimentales para la fuerza de fricción del electroimán diseñado.  
 Diámetros internos de tubos trabajados:  
 1: Tubo de 2", 2: Tubo de 2.1", 3: Tubo de 3.1", 4: Tubo de 6.3".

---

## **CAPITULO V**

---

### **TUBERIAS ATRAPADAS EN INGENIERIA PETROLERA**

En este capítulo se describe de manera general el procedimiento de perforación de un pozo petrolero y los problemas que se presentan de manera frecuente en el desarrollo de esta actividad. El objetivo de haber desarrollado este capítulo, es introducir al lector en las situaciones reales que se presentan en la perforación de pozos y presentar una situación real del atrapamiento de una cadena de tubos en el interior de un recipiente de paredes rugosas, situación que puede ser modelada por el problema que plantea este trabajo de tesis.

#### **5.1 ¿Que es la recuperación de tuberías?**

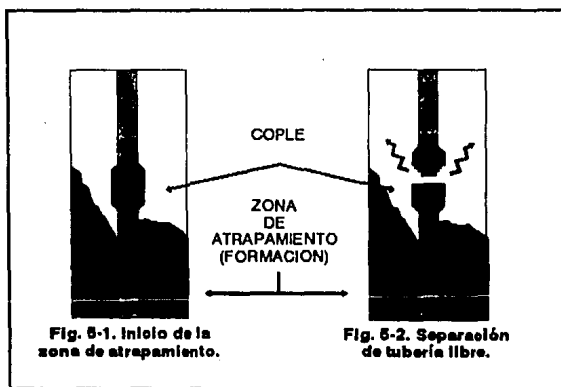
Los yacimientos petroleros son concentraciones de aceite, agua y gas almacenados en estratos de roca porosa, como caliza y arenisca, que son alcanzados generalmente mediante perforaciones con la finalidad de explotarlos. A veces es la presión del gas que escapa la que empuja al petróleo hacia la superficie de la Tierra, esta clase de pozos se denominan impulsados por gas. En los pozos impulsados por agua, ésta residente en el yacimiento empuja al aceite hacia la superficie.

La perforación del pozo, que comunica la superficie de la Tierra con el yacimiento, se realiza mediante una especie de broca dentada llamada barrena sujeta a una sarta de perforación; constituida por secciones de tubos de aproximadamente 10 m de longitud unidos mecánicamente mediante coples. La sarta de perforación es conectada a una mesa giratoria que transmite el movimiento de rotación y que descansa sobre el piso de una estructura de acero llamada torre de perforación.

Adicionalmente, la sarta es suspendida por una gran polea (el bloque viajero) que permite subir, bajar y adicionar secciones de tybos a la sarta.

La formación que rompe la barrena, es llevada a superficie a través del espacio existente entre la sarta y la pared del pozo con ayuda de un fluido llamado lodo de perforación; formado por una mezcla de varias arcillas y productos químicos con agua.

El pozo que se perfora es trabajado por secciones de cierta longitud, al finalizar cada una de ellas, es recuperada la sarta de perforación y se introduce la tubería de revestimiento que se fija a la pared del pozo mediante un proceso de cementación. Las secciones consecutivas disminuyen de diámetro hasta alcanzar la profundidad del empaque. A esta profundidad, se perfora el pozo hasta alcanzar el yacimiento, se recupera la barrena y es introducida la tubería de producción.



A menudo, por una gran variedad de razones, se atrapa la tubería en el pozo durante el proceso de perforación. Esto puede suceder aun cuando se hayan tomado todas las medidas preventivas. Cuando esto ocurre, es necesario liberarla con rapidez debido a la posibilidad de que empeoren las condiciones de pegado y sea más difícil o imposible la recuperación.

Para liberar o despegar una tubería es necesario hacer esencialmente dos cosas:

- 1.- Localizar el punto más profundo donde la tubería se encuentre libre (PUNTO LIBRE) figura (5-1).
- 2.- Con ayuda del perforador, desenroscar la tubería justo arriba del punto de atoramiento usando una carga explosiva (STRING SHOOT) o carga química cortante, figura (5-2).

De ahora en adelante, el término "PUNTO LIBRE" se refiere al punto más profundo en una sarta desde el cual puede ser recuperada.

Una vez localizado el punto libre, se aplica a la tubería un torque inverso, de tal forma que una explosión en el cople más cercano al punto de atrapamiento provoque la división de la sarta.

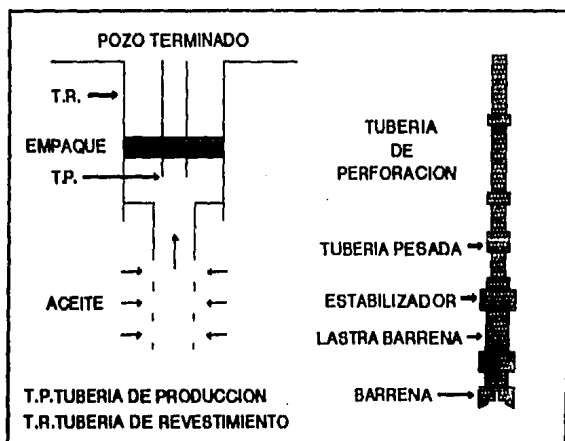


Fig. 5-3. Tipo y distribución de tuberías utilizadas en la perforación de pozos.



## 5.2 Causas de atrapamiento de tuberías

Las sargas de tubería pueden quedar atrapadas en el fondo del pozo debido a varias razones. Aquí se listan algunas de las causas más comunes de atrapamientos típicos de tuberías.

### i) ATRAPAMIENTO POR ARENA

El atrapamiento por arena en la tubería de perforación o revestimiento, es originado por la caída de arena alrededor de la tubería, debido a que la presión hidrostática del fluido en el pozo no es lo suficientemente alta para soportar la presión de la formación.

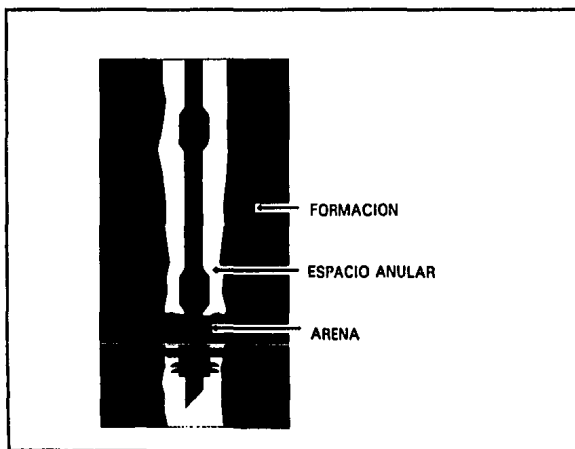


Fig. 5-4. Tubería atrapada por arena.

## ii) ATRAPAMIENTO POR LODO

Es originado por el endurecimiento o deshidratación del lodo de perforación en el espacio anular. En pozos con tubería de revestimiento, la temperatura podría afectar algunos de los aditivos del lodo, originando la degradación de los mismos y posiblemente permitiendo el asentamiento de la *barita* (uno de los componentes del lodo de perforación). Así mismo, para el caso de pozos sin revestimiento, podrían entrar fluidos extraños en el sistema de lodo y contaminarlo.

Los contaminantes más comunes son lutitas, sales solubles y gases ácidos.

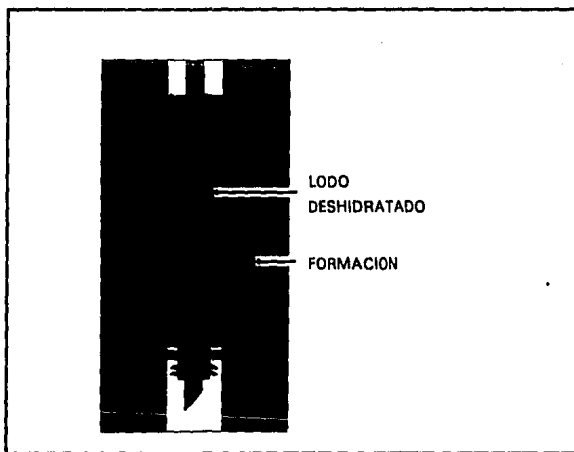
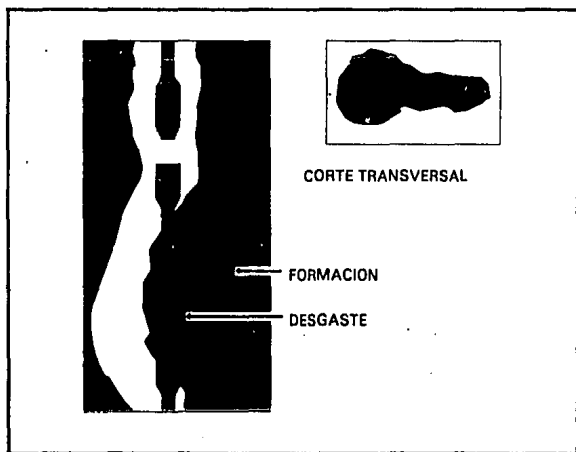


Fig. 5-3. Tubería atrapada por la deshidratación del Lodo de perforación.

### iii) ATRAPAMIENTO POR OJO DE LLAVE

Se origina cuando la tubería de perforación, bajo tensión, desgasta la pared del pozo originando una ranura durante la perforación. Ocurre en pozos sin tubería de revestimiento, cuando se perfora un pozo direccional o el pozo se desvía de la vertical.

Generalmente la ranura es del tamaño del diámetro externo de la tubería y las partes de la sarta de perforación con diámetro externo mayor a ésta, como los coples, son las partes que más fácilmente se atorán en el ojo de llave.



**Fig. 5-6.** Tubería atrapada por ojo de llave. La zona del recuadro muestra un corte transversal con vista superior, en la que se puede observar a la tubería desplazada hacia la derecha del agujero principal, introducida en una ranura de menor diámetro.

#### iv) ATRAPAMIENTO POR CEMENTO

Este tipo de atrapamiento puede ocurrir debido a un mal funcionamiento mecánico como lo es la ruptura de la bomba del camión de cementación, como resultado del intento de contener una pérdida de circulación o por un mal cálculo en el lavado del pozo para eliminar el exceso de cemento.

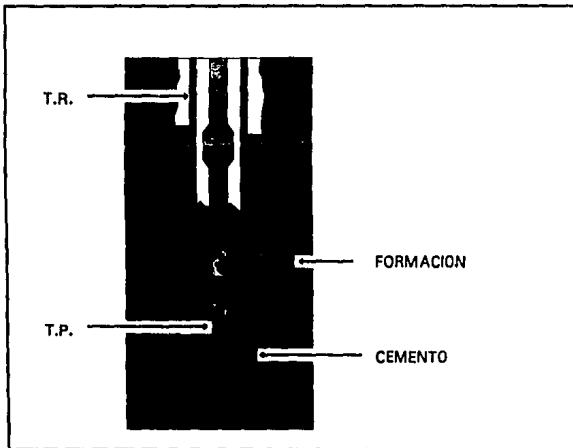


Fig. 5-7. Tubería atrapada por cemento.

---

## CONCLUSIONES

---

La determinación teórica y experimental de la zona de atascamiento por fricción de un tubo en el interior de un recipiente de paredes rugosas, es el objetivo principal de este trabajo. Para desarrollar este objetivo, se analiza el problema particular del atrapamiento puntual del tubo, con base en las deformaciones elásticas caracterizadas por la ley de Hooke, y se construye un sistema que permite caracterizar en forma experimental la fuerza de fricción a lo largo de él. Esta segunda actividad obliga a plantear algunos objetivos particulares, como son: el diseño de un dispositivo de anclaje electromagnético y la construcción de un bloque electrónico para el interior de la herramienta, el cual actúa como transductor para interpretar las deformaciones elásticas del tubo como una señal eléctrica que puede ser cuantificada en el exterior del recipiente.

El procedimiento teórico basado en las deformaciones elásticas de tubos de acero con atrapamiento puntual, desarrollado en el capítulo I, permite la determinación en forma aproximada de la zona de atrapamiento. Esto presenta grandes ventajas, debido a que la sección del tubo donde se toman datos con la herramienta, es del orden de unos cientos de metros y no se tiene necesidad de caracterizar la distribución de la fuerza de fricción en todo lo largo de ellos. Así mismo, permite estimar el valor de la deformación del tubo que se espera medir con la herramienta. Aun cuando este problema se plantea de forma ideal, muchos de los problemas reales que se presentan en la industria de perforación de pozos, pueden ser modelados en primera aproximación con este planteamiento. Por ejemplo, en la industria de perforación de pozos petroleros donde se ha podido aplicar este método, ha permitido establecer de manera cercana la zona de mayor fricción que presenta la cadena de tubos atrapada.

El sistema detector de punto libre construido con base en los principios básicos de la teoría de circuitos magnéticos, electricidad, electrónica, programación y deformaciones elásticas de los tubos de acero, que indica el cumplimiento de los

objetivos particulares propuestos, ha presentado buenos resultados en cuanto a la operación del despegue de tuberías reales en pozos petroleros, actividad que a través del Instituto Mexicano del Petróleo se ha podido realizar. La fuerza de pegado que desarrollan los electroimanes así como su geometría, permiten gran estabilidad en su adherencia con el tubo en consideración. Así mismo, su facilidad de activación y desactivación implican su fácil manejo para cualquier operador que no este completamente familiarizado con el funcionamiento de los dispositivos internos.

Otro aspecto importante de los beneficios que presenta esta herramienta, es la gran resolución con la cual detecta las deformaciones en los tubos debido a fuerzas externas aplicadas. Este hecho, permite determinar con mayor precisión la zona de atoramiento, logrando un trabajo más eficiente en operaciones de recuperación de tuberías reales.

El *software* en lenguaje ensamblador que controla el proceso de adquisición de la información, permite la independencia del sistema respecto a la PC que presenta la información en pantalla. Esto genera grandes ventajas ya que el sistema puede ser utilizado en cualquier área de perforación de pozos.

---

## **BIBLIOGRAFIA**

---

**[PISARENKO, 1985]**

1.- Pisarenko. Manual de resistencia de materiales. Editorial Mir Moscú. 1985.

**[POPOV, 1982]**

2.- Popov. Introducción a la mecánica de sólidos. Editorial Limusa. 1982.

**[REITZ, 1972]**

3.- Reitz, Milford. Fundamentos de la teoría electromagnética. Editorial Hispano Americana. 1969.

**[SCHILLING, 1979]**

4.- Schilling. Belove. Electronic circuits. McGRAW-HILL International book Company. 1979.

## **REFERENCIAS ADICIONALES**

1.- American society for metals. Metals handbook vol1. Properties and seleccion of metals. USA American society for metals. 1961.

2.- B. G. Livshits, V. S. Kraposhin, Y. L. Linetski. Propiedades físicas de metales y aleaciones. Editorial Mir. 1982.

3.- H. C. Rovers. Electromagnetic devices. N.Y. John Wiley and Sons Inc. 1963.

4.- McCOLLOUGH. Manual de recuperación de tuberías.

---

## APENDICE

---

### CARACTERIZACION MAGNETICA DE LA SECCION CON CURVATURA DE LOS POLOS DE UN ELECTROIMAN

A lo largo del capítulo IV se desarrollo el procedimiento utilizado para el análisis de la fuerza de pegado de un electroimán con polos planos, figura (4.4). Para el análisis de la fuerza de pegado de un electroimán con curvatura en los polos, debe realizarse una corrección en el procedimiento establecido para polos planos. Esta corrección consiste en calcular la caída de la fuerza magnetomotriz correspondiente a la sección aislada de curvatura. En esta sección se describe el análisis de la curvatura del polo de un electroimán.

Se considera que la curvatura puede describirse en forma geométrica como el volumen generado por un triángulo proyectado, al que puede ser dividido en secciones de volumen definidos por paralelepípedos rectangulares de altura constante (L).

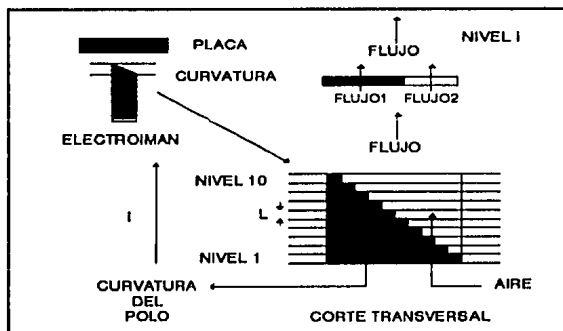


Fig. A-1. Modelaje de la terminación de los polos para el electroimán con puntas curvadas.



En la figura (A-1) se puede observar claramente que el triángulo está seccionado por niveles que contienen dos rectángulos; uno conteniendo parte del material ferromagnético del electroimán y el segundo encerrando una capa de aire.

Debido a la analogía existente entre los circuitos magnéticos y los eléctricos, se puede considerar que cada uno de los niveles contiene dos elementos en paralelo y puede obtenerse un elemento equivalente.

La fuerza magnetomotriz aplicada a cada nivel está definida como:

$$F_{em} = L * H_{im} = L * H_{ia} \quad (\text{Por ser paralelos}) \quad (\text{A.1})$$

$H_{im}$  = La intensidad del campo para el material en el nivel i-ésimo

$H_{ia}$  = La intensidad del campo para el aire en el nivel i-ésimo

$L$  = Altura para cada rectángulo.

Esta última expresión asegura que el valor de H es el mismo en los dos rectángulos de cualquier nivel.

Debido a que el flujo total se divide en dos partes al pasar por un nivel, se tiene:

$$(\text{A.2})$$

$$\phi_t = \phi_{im} + \phi_{ia} = B_{im} * A_{im} + B_{ia} * A_{ia} = B_{im} * (11 - i) * A_t + B_{ia} * (i - 1) * A_t$$

$\phi_t$  = Flujo total que circula por el electroimán

$\phi_{im}$  = Flujo para el material en el nivel i.

$\phi_{ia}$  = Flujo para el aire en el nivel i.

$B_{im}$  = Densidad del campo magnético para el material en el nivel i.

$B_{ia}$  = Densidad del campo magnético para el aire en el nivel i.

$A_{im}$  = Area transversal en el nivel i para el material

$A_{ia}$  = Area transversal en el nivel i para el aire

$A_t$  = Area transversal total para el rectángulo de cualquier nivel / 10

Para obtener la inducción del Campo efectivo se tiene:  $\phi_t = B_{ef} * A_t * 10$   
Sustituyendo esta última expresión en (A.2) se obtiene:

$$B_{ef} = (B_{im} * (11 - i) + B_{ia} * (i - 1)) / 10$$

Debido a que el valor de H es el mismo para el material y el aire en cada uno de los niveles, la expresión anterior asegura que es posible construir una curva de magnetización para cada nivel. Esto permite la descripción completa del electroimán con curvatura, debido a que puede ser considerado como un electroimán de polos planos con un conjunto de capas de diversos materiales cercanas a los polos.

La rutina *errorfem* descrita en el anexo I utiliza estos resultados para calcular la contribución de la fuerza magnetomotriz adicional necesaria para generar un flujo dado en el circuito, debido a la presencia de la zona con curvatura.



**Function linterp(Dato:real;indice:integer;A:arreglo):integer;**

La siguiente función determina la posición del primer valor mayor o igual al valor de la variable *Dato*, del conjunto de valores almacenados en la primer columna de la matriz *A* de dimensiones ( $N \times 2$ ).

```
var
inter, Zona, posicion      :integer;
salida                      :Boolean;

begin
  if Dato > A[indice,0] then
  begin
    Writeln('Error en linterp');
    halt;
  end;

inter:=round(indice/4);

  if (Dato - A[inter,0] <= 0) then Zona:=1
  else
  if (Dato - A[2*inter,0] <= 0) then Zona:=2
  else
  if (Dato - A[3*inter,0] <= 0) then Zona:=3
  else
    Zona:=4;
  posicion:=inter * (Zona - 1) + 1;
  Salida:=False;

  Repeat
  if Dato > A[posicion,0] then
    Posicion := posicion + 1
  else
    Salida := True;
  Until Salida;

linterp:=posicion;

end;
```

**Function interp(Dato:real;indice:integer;A:arreglo):real;**

**Rutina que determina el valor de interpolación de la variable independiente en una función, definida en forma discreta por los valores almacenados en la matriz A (Nx2).**

**Columna 1 : Valores de la variable dependiente B**

**Columna 0 : Valores de la variable independiente H**

**(Aproximación lineal)**

**var**

**Slope,Orden:real;**

**posicion:integer;**

**begin**

**posicion := linterp(Dato,indice,A);**

**Slope := ( A[posicion,1] - A[posicion-1,1] ) / ( A[posicion,0] - A[posicion-1,0] )**

**;**

**Orden := A [posicion-1, 1] - ( Slope \* A [posicion-1,0] );**

**interp := Slope \* Dato + Orden;**

**end;**

**Function errorfem(fi:real) : real;**

Esta rutina calcula el valor de la fem necesaria para establecer un flujo magnético dado, que circula a través de la sección de curvatura del polo de un electroimán caracterizado por las figuras (4-4) y (A-1). Ver consideraciones en el apéndice.

La variable *fi* contiene el valor del flujo magnético que se pretende establecer en el electroimán.

La matriz **Material\_2** = [B,H] contiene los valores discretos que caracterizan al material del electroimán.

La matriz **QQ** con 10 renglones, y cuyo número de columnas corresponde al número de puntos discretos que definen a la curva de magnetización del material del electroimán, almacena por renglones a las curvas de magnetización discretas correspondientes a cada tableta de división de la zona de curvatura.

```
const
partes_total= 10;

var
Befe,Femefe:real;
partes,x:integer;

begin

  Befe:= fi/ A4;
  Femefe:= 0.0;

  For partes:= 1 to partes_total do
    begin
      For x:= 0 to N_puntos_2 do
        begin
          QQ[x,1]:= Material_2[x,1];
          QQ[x,0]:= (Material_2[x,0] * (partes_total - partes + 1) +
                    Material_2[x,1] * (partes - 1) * miu0) / partes_total;
        end;
        Femefe:= Femefe + (L4/partes_total)* interp(Befe,N_puntos_2,QQ);
      end;
    end;

  errorFem:= Femefe;

end;
```

```

Function flujo(var   Var_Femm           : Arreglo;
                Flujomax,Flujomin      : real;
                Femm                    : real;
                Mat1,Mat2              : Arreglo;
                NPMat1,NPMat2         : integer ) : real;

```

Esta rutina permite determinar una nueva aproximación al valor del flujo que genera una fem definida. El procedimiento utilizado se definió en la sección (3.3), y corresponde a la solución del problema inverso.

Esta función utiliza los valores extremos del intervalo mínimo conocido, que contiene al flujo buscado.

Se considera un circuito magnético compuesto por 2 materiales ferromagnéticos diferentes y una capa de aire conectados en serie.

```

var Delta_flujo : real;
    i:integer;

```

Begin

```

Delta_flujo := (Flujomax - Flujomin) / 30.0 ;

```

```

For i:= 0 to 30 do
begin

```

```

    Var_Femm[i,1] := Flujomin + (Delta_flujo* i);

```

```

    Var_Femm[i,0]:=

```

```

        L1* Interp( Var_Femm[i,1] / A1,NPMat1,Mat1 ) +

```

```

        L2* Interp( Var_Femm[i,1] / A2,NPMat2,Mat2 ) +

```

```

        L3* ( Var_Femm[i,1] / (A3* miu0) ) ;

```

```

    if Errores then

```

```

        Var_Femm[i,0]:= Var_Femm[i,0] + 2 * ErrorFem(Var_Femm[i,1]) ;

```

```

end;

```

```

if Var_Femm[30,0] < Femm then

```

```

begin

```

```

    writeln('Error en flujo');

```

```

    Halt;
end;

Indice_aprox_femm := Linterp(Femm,30,Var_Femm);

flujo:= Var_Femm[Indice_aprox_femm,1];

end;

```

Los datos de las variables magnéticas reportados en el capítulo V, fueron obtenidos mediante una rutina que utiliza las funciones anteriormente definidas, y consiste básicamente el lo siguiente:

1.- Definir la geometría del sistema

2.- Calcular los valores del flujo  $\phi$  para un conjunto de valores, en la corriente I aplicada y en la longitud x de la capa de aire.

$$\begin{array}{l}
 I - \{0, I_1, 2 I_1, \dots, 20 I_1\} \\
 x - \{0, x_1, 2 x_1, \dots, 5 x_1\}
 \end{array}$$

donde

$I_1$  = Corriente máxima manejada / 20  
 $x_1$  aproximadamente igual a 0.0001 m

Este conjunto de datos forman una superficie discreta  $\phi(x, I)$ , mediante la cual puede ser evaluada la integral de la ecuación (3.13) que determina la fuerza de pegado generada por el electroimán.



---

## ANEXO II

---

### PROGRAMA DE CONTROL PARA EL SISTEMA MEDIDOR DE PUNTO LIBRE (MEDFREC 2. ASM).

(Lenguaje ensamblador para el microcontrolador 80C196KC)

28/Enero/93

#### Direccionamiento de registros para funciones internas

IOC0	equ	15H
IOC1	equ	16H
IOC2	equ	0BH
PWM0_CONT	equ	17H
WSR	equ	14H
PORT1	equ	0FH
PORT2	equ	10H
PORT3	equ	1FFEh
PORT4	equ	1FFFh
AD_COMMAND	equ	02H
AD_RESULT_LO	equ	02H
AD_RESULT_HI	equ	03H
HSI_MODE	equ	03H
HSO_COMMAND	equ	06H
HSI_STATUS	equ	06H
HSO_TIME	equ	04H
HSI_TIME	equ	04H
Int_pending	equ	09H
Int_Mask	equ	08H
sp	equ	18H
Timer1	equ	0AH

## Declaración de variables

rseg at 40h

Almacen:	dsb	1
Cont2:	dsb	1
OJO:	dsb	1
Gun:	dsb	1
Indico:	dsb	1
Lim_H:	dsb	1
Led_off:	dsb	1
Led_on:	dsb	1
Led_Status:	dsb	1
re:	dsb	1
re0:	dsb	1
re1:	dsb	1
NewVar:	dsb	1
Status:	dsb	1
Period:	dsw	1
Refuse:	dsw	1
Refuse_L	equ	(Refuse)
Refuse_H	equ	(Refuse + 1)
Time_old:	dsw	1
Time_new:	dsw	1
Lim_L:	dsw	1
Cont1:	dsw	1
Frec:	dsw	1
Frec_L	equ	Frec
Frec_H	equ	(Frec + 1)
full:	dsw	1
Frec_PLLb:	dsw	1
Frec_PLLa:	dsw	1

cseg at 200Eh

dcw Resetear

; Subrutina de reseteo del sistema

## PROGRAMA PRINCIPAL

cseg at 2080h

Ldb WSR, #00H ;Selecciona ventana de comandos 00  
Ld sp, #0100h  
Andb IOC1, #11011100b ;Activa P2.5 como salida digital  
Ldb Int\_Mask, #10000000b  
EI

Orb IOC2, #10000000b ;Limpia CAM file de eventos anteriores

Ldb IOC0, #00000101b ;Activa la entrada a HSI.0 y HSI.1  
Ldb HSI\_MODE, #00000101b ;HSI.0,.1 registran eventos positivos

Ldb Led\_off, #00000000b ;Basado en Timer1 limpiar HSO.0  
Ldb Led\_on, #00100000b ;Basado en Timer1 activar HSO.0

Ldb HSO\_COMMAND, Led\_off ;Apaga led  
Add HSO\_TIME, Timer1, #0005h

Ld Frec\_PLLb, #01E4h ;Frec baja de PLL = 500 Hz  
Ld Frec\_PLLa, #1388h ;Frec alta de PLL = 5000 Hz

Andb IOC2, #01111111b ;Restablece entrada a CAM file

Ldb Led\_Status, Led\_off  
Ld full, #0FFFFh

Ldb NewVar, Port2  
Jbs NewVar, 4, DoceMhz

**; Para un cristal externo de 16MHz, 1seg corresponde a 625 000 cuentas  
; del Timer1.**

Ldb Lim\_H, #0Fh ;1seg con base de 1 microseg.  
Ld Lim\_L, #4240h ;65536 \* 15 + 16960 = 1 millón  
Br Común

**; Para un cristal externo de 12MHz, lseg corresponde a 750 000 cuentas  
; del Timer1.**

**DoceMhz:**

Ldb Lim\_H, #0Bh ;lseg con base de 1.33 microseg.  
Ld Lim\_L, #71B0h ;65536 \* 11 + 29104 = 750 000

**;Prueba de comunicación entre MODULE y BLUE**

Clr Frec  
Lcall W\_Dato  
Ld Frec, #0001h

ciclos: Ldb Almacen, #0Fh  
Lcall reta  
Lcall W\_Dato

SHL Frec, #01h  
Cmp Frec, #0000h  
jne ciclos

Ldb Almacen, #0Fh  
Lcall reta  
Lcall W\_Dato

.....

**Stat:**

Clr Frec  
Clr Cont1  
Clr Cont2  
Clr Indico  
Clr Gun  
Clr Time\_new  
Clr Time\_old  
Clr OJO

**Reflush:**  
 Ld Refuse, HSI\_TIME ;Limpia el Holding register de pasados  
 NOP ;eventos  
 NOP  
 NOP  
 NOP  
 JBS IOC1, 7, Reflush

**wait:**  
 Jbs IOC1, 6, Reading ;Pregunta por el Holding register  
 jbc IOC1, 7, wait

**Reading:**  
 Ldb Status, HSI\_STATUS ;Obtiene el tiempo del evento basado  
 Ld Time\_new, HSI\_TIME ;en timer1

**;Indica al led externo si es que hubo una lectura  
 ;Prepara el sistema para un Reset para prueba de comunicacion**

**Inicia:**  
 Cmpb Gun, #00h  
 Jne med\_frec ;Salta si Z = 0  
 Andb Refuse\_L, STATUS, #00001000b ;HSI.1 is set ?  
 Jne shoot ;Salta si Z = 0  
 Andb Refuse\_L, STATUS, #00000100b ;Hubo pulso en HSI.1 ?  
 Je med\_frec ;Salta si Z = 1

**shoot:**  
 Ldb HSO\_COMMAND, Led\_off  
 Add HSO\_TIME, Timer1, #0005h  
 NOP  
 NOP  
 NOP  
 NOP  
 NOP  
 Ldb HSO\_COMMAND, Led\_Status  
 Add HSO\_TIME, Timer1, #0FFFh  
 Ldb Gun, #01h  
 Ldb IOC0, #00000001b ;Desactiva HSI.1  
 Ldb HSI\_MODE, #00000001b

```

med_frec:
    Andb Refuse_L,STATUS, #00000001b
    Je wait
    Cmpb OJO, #00h
    JNE Inicia_O
    Incb OJO
    Ld Time_old, Time_new
    br wait

Inicia_O:
    Cmp Time_new, Time_old
    Jlt Subt2
    Sub Period, Time_new, Time_old
    br Add_P

Subt2:
    Sub Period, Full, Time_old
    Add Period, #0001h
    Add Period, Time_new

Add_P:
    Ld Time_old, Time_new
    Add Cont1, Period
    JNC C_Ind ;(Salta si C = 0)
    Incb Cont2
    Cmpb Lim_H, Cont2
    JLT Printed ;(Salta si N = 1 )
    JNE Incre ;(Salta si Z = 0 )
    Ldb Indico, #01h

C_Ind:
    Cmpb Indico, #00h
    JE Incre ;(Salta si Z = 1 )
    Cmp Lim_L, Cont1
    JLE Printer ;(Salta si N = 1 OR Z = 1)

Incre:
    Inc Frec
    br Wait

```

## SUBROUTINAS DE IMPRESION Y RETARDO

Printed:

```
Cmp Frec, Frec_PLLb
JLE Turn_off           ;(Salta si N=1 o Z=1) Frec < Frec_PLL
Cmp Frec_PLLa, Frec
JLE Turn_off
```

```
Ldb Led_Status, Led_on
Ldb HSO_COMMAND, Led_on
Add HSO_TIME, Timer1, #0005h
br came
```

Turn\_off:

```
Ldb Led_Status, Led_off
Ldb HSO_COMMAND, Led_off
Add HSO_TIME, Timer1, #0005h
Clr Frec
```

Came:

```
call W_Dato

Ldb IOC0, #00000101b
Ldb HSI_MODE, #00000101b
br stat
```

W\_Dato:

```
PushF

Orb Port2, #10000000b
Andb Port2, #10111111b
Ldb Port1, Frec_H
NOP
NOP
NOP
Orb Port2, #01000000b
NOP
NOP
NOP
Ldb Port1, Frec_L
```

```
andb Port2, #01111111b
NOP
NOP
NOP
orb Port2, #10000000b
PopF
Ret
```

#### **;Rutina de retraso**

```
reta:  ldb re, Almacen

reta0:  ldb re0, #0ffh

reta1:  ldb re1, #0ffh
reta2:  decb re1
        jne reta2

        decb re0
        jne reta1

        decb re
        jne reta0
Ret
```

#### **;Rutina de Reset**

```
Resetear:
RST
Ret
```

End



---

## ANEXO III

---

### SOFTWARE PARA LA CONSTRUCCION DE UN FRECUENCIMETRO UTILIZANDO UN MICROCONTROLADOR INTEL 80C196KC.

Para explicar como se efectúa la medición de la frecuencia en el sistema de "PUNTO LIBRE", es necesario describir algunas características importantes del microcontrolador con el cual se construyó el frecuencímetro correspondiente.

La velocidad de operación del microcontrolador está referenciada a la frecuencia de un cristal externo. El tiempo de cualquier operación efectuada por el dispositivo, es un múltiplo del llamado "estado de tiempo" el cual representa dos periodos de oscilación del cristal externo.

Tabla AIII-1. Estados de tiempo para algunos cristales externos.

Frecuencia del cristal	Estado de tiempo
8 MHz	250 ns
10 MHz	200 ns
12 MHz	167 ns
16 MHz	125 ns

### Registro Timer1

El timer1 es un registro de 16 bits que se incrementado cada 8 estados de tiempo. Este registro es utilizado para control de sistemas que trabajan en ciclos.

Tabla AIII-2. Tiempos asociados con el registro TIMER 1.

Frecuencia del cristal	Tiempo para incremento del registro Timer1	Tiempo para que se recicle el registro Timer1
8 MHz	2.0 $\mu$ s	0.131072 s
10 MHz	1.6 $\mu$ s	0.104858 s
12 MHz	1.3 $\mu$ s	0.087381 s
16 MHz	1.0 $\mu$ s	0.065536 s

## Entradas HSI

Las entradas de alta velocidad HSI, son cuatro entradas digitales a través de las cuales puede ser generado un disparo, que permite almacenar el valor del registro Timer1 en el momento en que suceda cualquiera de los siguientes cuatro eventos:

- Un cambio de un estado digital alto a un estado digital bajo.
- Cambio de bajo a alto
- Cualquier cambio
- Cada 8 transiciones de bajo a alto

Cada una de estas entradas puede ser programada en forma independiente.

## Registro HSI\_MODE

Los cuatro posibles modos de operación de las entradas HSI, están controlados y programados en el registro HSI\_MODE

**Tabla AIII-3. Registro HSI\_MODE**

Numero de bit	Entrada HSI
0	HSI0
1	HSI0
2	HSI1
3	HSI1
4	HSI2
5	HSI2
6	HSI3
7	HSI3

Cada grupo de dos bits definen uno de los cuatro posibles modos de operación de las entradas de alta velocidad HSI:

**Tabla AIII-4. Programación del tipo de transición que reconocerá las entradas de alta velocidad.**

0	0	8 transiciones positivas
0	1	Transición positiva
1	0	Transición negativa
1	1	Toda transición

### Registro IOC0

Las entradas de alta velocidad HSI, pueden ser habilitadas o deshabilitadas en forma individual a través del registro IOC0:

**Tabla AIII-5. Habilitación de las entradas de alta velocidad.**

Entradas HSI	Bits de IOC0
0	0
1	2
2	4
3	6

### FIFO y el Holding register

Cuando un evento ocurre en alguna de las entradas HSI habilitadas, una pila de 7 localidades de 20 bits, almacena los 16 bits del Timer1, y 4 bits almacenan la información necesaria para determinar en cual de las entradas sucedió el evento.

Cuando la pila se llena, un evento adicional no será registrado. Para limpiar alguna de las localidades es necesario leer el dato que ahí se encuentre.

Para obtener la información de los eventos ocurridos y almacenados en la pila, se deben leer los registros HSI\_STATUS y HSI\_TIME.

El registro HSI\_TIME contiene el valor del Timer1 correspondiente al evento almacenado. El registro HSI\_STATUS contiene la información del estado actual de las entradas HSI, así como la información necesaria para conocer el número de entrada que recibió el evento.

**Tabla AIII-6. Relación entre el registro HSI\_STATUS y las entradas de alta velocidad.**

<b>Numero de bit</b>	<b>Entrada HSI</b>
0	HSL0
1	HSL0
2	HSL1
3	HSL1
4	HSL2
5	HSL2
6	HSL3
7	HSL3

Donde el bit más significativo de cada campo, indica el estado actual de la entrada HSI correspondiente, y el bit menos significativo es una bandera que permite saber si la entrada recibió el evento producido.

Las características del dispositivo antes mencionadas son suficientes para describir el proceso de medición de la frecuencia de una señal cuadrada. El siguiente listado describe el procedimiento de medición de frecuencia para una señal cuadrada con amplitud de 5 volts.

- 1.- Se habilitan las entradas de alta velocidad HSI para transiciones positivas.
- 2.- Esperar a que aparezca un dato en el Holding Register, y obtener el valor del Timer1 correspondiente. (el dato aparecerá como consecuencia del disparo generado por la transición)
- 3.- Se toma el número de unidades del Timer1 que existen entre este evento y el anterior, y se incrementa el contador de eventos ocurridos.
- 4.- Incrementar el tiempo de los eventos anteriores en una cantidad igual al tiempo medido. De esta forma se tendrá el tiempo en que ocurren n eventos.
- 5.- Comparar este tiempo total con un número previamente definido.
- 6.- Si esta suma es menor al valor establecido, entonces regresar al paso #2
- 7.- Si el valor del tiempo es mayor o igual al previamente establecido, entonces, el número de pulsos contabilizados es el valor de la frecuencia medida.

$$\text{Frecuencia} = N_{\text{pulsos contabilizados}} \pm 1 \text{ pulso}$$

Para obtener mayor precisión en la medición, debe realizarse el cociente entre el número de pulsos contabilizados y el tiempo transcurrido. Este procedimiento genera un error mucho menor y su valor depende del número de bits con los cuales se genera la división, así como del ancho del "estado de tiempo".