



Universidad Anáhuac
del Sur

24 323817

UNIVERSIDAD ANAHUAC DEL SUR
Con Estudios Incorporados a la Universidad
Nacional Autónoma de México.

ESCUELA DE INGENIERIA

**"SISTEMA DIGITAL PARA EL ESTUDIO
DE LA HISTERESIS MAGNETICA"**

Tesis

Que para obtener el título de :

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

Presenta:

GERARDO MORENO BENAVENT

Director de tesis:

FIS. ESTEBAN AMANO TOYOMOTO

México, D. F.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Febrero 1991



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.

C O N T E N I D O

| | |
|---|---------|
| INTRODUCCION |7 |
| CAP 1 - IMPORTANCIA DE LOS CONOCIMIENTOS DE LA HISTERESIS MAGNETICA |9 |
| 1.1 - EL FENOMENO DE HISTERESIS |10 |
| 1.2 - PERDIDAS DE ENERGIA EN LOS NUCLEOS FERROMAGNETICOS |12 |
| 1.3 - VENTAJA DE LA OBTENCION Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS |13 |
| 1.4 - MODELO CONCEPTUAL DEL DISEÑO Y SOLUCION (HISTERESISSCOPIO Y DIGITALIZADOR) |22 |
| 1.5 - DIGITALIZADOR (9111A/HP-85 GRAPHIC TABLET) |29 |
| 1.5.1 - PROGRAMA DE CALCULO AREA Y DISTANCIAS |33 |
| 1.5.2 - PROGRAMA DE ENTRADA DE DATOS GRAFICOS |33 |
| 1.6 - FORMULAS MATEMATICAS PARA EL CALCULO DE LA HISTERESIS MAGNETICA |33 |
| CAP 2 - PROCESO DE DISEÑO DEL DISPOSITIVO Y SISTEMA UTILIZADO |37 |
| 2.1 - MANEJO DEL DIGITALIZADOR Y PROGRAMA UTILIZADO |38 |
| 2.2 - FORMA DEL DISEÑO |40 |
| CAP 3 - PRUEBA DEL SISTEMA COMPLETO |44 |
| - DISEÑO DEL EXPERIMENTO |45 |
| - REALIZACION DEL EXPERIMENTO |46 |
| CONCLUSIONES |49 |
| INDICE DE FIGURAS Y FOTOGRAFIAS |52 |

APENDICE A.

| | |
|---|-------|
| CAMPO MAGNETOSTATICO | ...54 |
| CONTINUIDAD DE LAS LINEAS DE INDUCCION | ...55 |
| FUERZA ELECTROMOTRIZ DEBIDA AL MOVIMIENTO | ...55 |
| LEY DE INDUCCION DE FARADAY | ...60 |
| DOMINIOS MAGNETICOS | ...62 |
| CALCULO DEL CAMPO EN EL EJE DE UN SOLENOIDE | ...64 |
| CAMPO MAGNETICO DE UN TOROIDE | ...67 |
| FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE DE EXCITACION DE UN SISTEMA FERROMAGNETICO CON FLUJO SENOIDAL | ...69 |
| MEDICION DE LOS PARAMETROS DE LA HISTERESIS MAGNETICA | ...71 |
| AMPLIFICADORES OPERACIONALES | ...74 |

I N T R O D U C C I O N

La Histéresis Magnética es una propiedad compleja que tiene innumerables aplicaciones, por ejemplo, en núcleos de transformadores y reguladores de voltaje. Una de sus características principales es que involucra pérdidas de Energía.

En este trabajo presentamos un método para evaluar las pérdidas de energía por Histéresis Magnética basado en la medición del área del ciclo por medio de un Digitalizador. La potencia disipada se obtiene en Watts, multiplicado por la frecuencia del campo y el volúmen de la muestra.

Para la realización de este trabajo solo nos afocamos a la parte de pérdidas de energía pero con este mismo dispositivo podemos obtener diferentes datos de nuestra muestra, obteniendo una huella digital, con esto queremos expresar que nos proporciona las características unicas del material.

Como podremos observar al usar las diferentes variables podremos obtener tambien por ejemplo: La "reluctancia", La "permeabilidad". A manera de acordarnos que hay una relación entre un circuito eléctrico y uno magnético pondremos una tabla de analogias.

ANALOGIAS ENTRE CIRCUITOS ELECTRICOS Y MAGNETICOS.

| CIRCUITO ELECTRICO. | | CIRCUITO MAGNETICO. | |
|----------------------|----------|----------------------|-----------|
| Fuerza Electromotriz | V | Fuerza Magnetomotriz | F |
| Corriente | I | Flujo | ϕ |
| Resistencia | R | Reluctancia | R |
| Conductancia | G | Permeancia | P |
| Conductividad | σ | Permeabilidad | μ_0 * |

*Se supone que el medio dentro de la estructura magnética es el vacío.

CAP 1- IMPORTANCIA DE LOS CONOCIMIENTOS DE HISTERESIS MAGNETICA

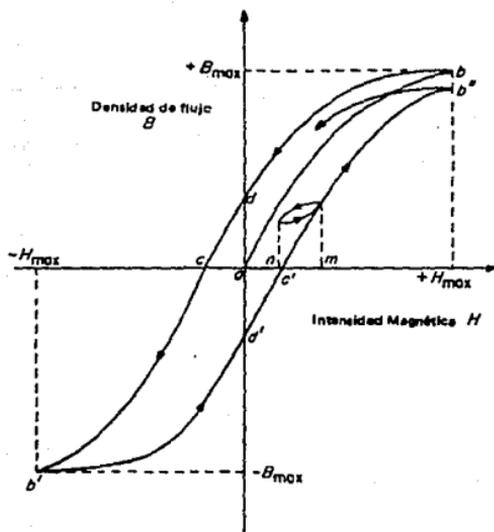
CAP 1- IMPORTANCIA DE LOS CONOCIMIENTOS DE HISTERESIS MAGNETICA

1.1 FENOMENO DE HISTERESIS

Supongase que un toroide se somete a un campo aplicado cíclico. La variación de la inducción B con respecto al campo H se muestra en la FIGURA 1. Para empezar, supondremos que el material está magnetizado. La corriente en el embobinado es cero y esta condición se representa por el punto "O" en la misma figura. El campo magnético H se incrementa al aumentar la corriente en el embobinado de excitación. La densidad de flujo B se incrementa a lo largo de la curva "OB", la cual es igual a la curva de la FIGURA 1. En "B", $H=H_{max}$ y $B=B_{max}$. La intensidad magnética se disminuye ahora gradualmente. Al contrario de lo que se puede esperar, la densidad de flujo varía a lo largo de una curva diferente llamada "BD". Para un valor específico de H , el valor de B es más grande cuando H disminuye, que cuando se incrementa. Se dice entonces que el flujo no es función reversible con respecto al campo magnético. A esta característica se le llama HISTERESIS. Si se hace circular una corriente en la dirección opuesta, el material se magnetizará en dirección opuesta. La inducción B varía a lo largo de la curva "DCB". El campo magnético "OC" se llama campo coercitivo. En el punto "B'" el campo magnético es $-H_{max}$ y la correspondiente inducción es $-B_{max}$.

Si se disminuye gradualmente el campo magnético, la densidad de flujo B varía a lo largo de la curva "B'D'B''" debido a la histéresis. El punto "B''" difiere de "B" por una pequeña

FIGURA 1 CURVAS DE HISTERESIS.



Efecto de histeresis de un material ferromagnético.

diferencia por lo cual la curva no llega a cerrarse todavía. Si el material se sujeta a ciclos de magnetización repetidos, la curva B contra H formará finalmente una curva cerrada. Esta curva se conoce como el ciclo de histéresis. La amplitud de B depende de la amplitud de H y la forma del anillo depende del material ferromagnético usado.

12-PERDIDAS DE ENERGIA EN LOS NUCLEOS FERROMAGNETICOS

Cuando disminuyen los campos magnéticos asociados con núcleos ferromagnéticos parte de la energía almacenada se regresa a la fuente o se convierten en alguna otra forma útil de energía. Sin embargo, parte de la energía almacenada se pierde irremediabilmente en el núcleo en forma de calor. Esta pérdida de energía se debe a dos causas principalmente: a) característica de histéresis del material y b) corrientes inducidas en el núcleo. Estas corrientes son llamadas corrientes parásitas¹. También se tienen pérdidas de energía en núcleos sujetos a magnetizaciones y desmagnetización cíclica por medio de excitaciones periódicas. Es por esto, que se penso en hacer un sistema digital para medir el porcentaje de perdidas en este tipo de materiales. El ciclo de Histéresis a bajas frecuencias puede obtenerse sobre un osciloscopio con relativa facilidad, mediante el uso de amplificadores operacionales. Los sistemas para los cuales se penso el uso del prototipo, son para aquellos que trabajan a 60 Hz., por que es el que utilizan: CFE Comisión Federal de

¹ TAMBIEN LLAMADAS CORRIENTES DE EDDY O FOUCALT

Electricidad y CLF Compañía de Luz y Fuerza.

Si se desea ampliar esta información se puede consultar el apéndice A.

13- VENTAJA DE LA OBTENCION Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS DIGITALES

El procesamiento digital de la información nos facilita y simplifica los analisis, por que no tenemos que hacer algun procedimiento matemático posterior al diseño de nuestro sistema. Solamente se tiene que aplicar una Analogía con el Cálculo de Area y Obtenemos los resultados.

Al obtener los datos en forma gráfica por medio del sistema y un osciloscopio, podemos obtener una fotografía (FOTOGRAFIA) para despues poderlo digitalizar obteniendo los datos con mayor rapidez y seguridad. La digitalización no es directa, ya que primero se toma una fotografía para despues digitalizar.

Para calcular la Histéresis Magnética se debe calcular el area encerrada por el ciclo y así poder determinar su valor. Al digitalizar los datos nos ahorramos mucho tiempo así como el hacer muchos calculos largos, tambien se eliminan los errores que pueden acarrear los calculos.

FOTOGRAFIA 1 RESULTADO DE LA CURVA DE HISTERESIS POR EL
HISTERESISCOPIO.



IMPORTANCIA EN PERDIDAS DE ENERGIA.

La irreversibilidad es una causa de pérdida de energía en muchas de las aplicaciones de los materiales ferromagnéticos.

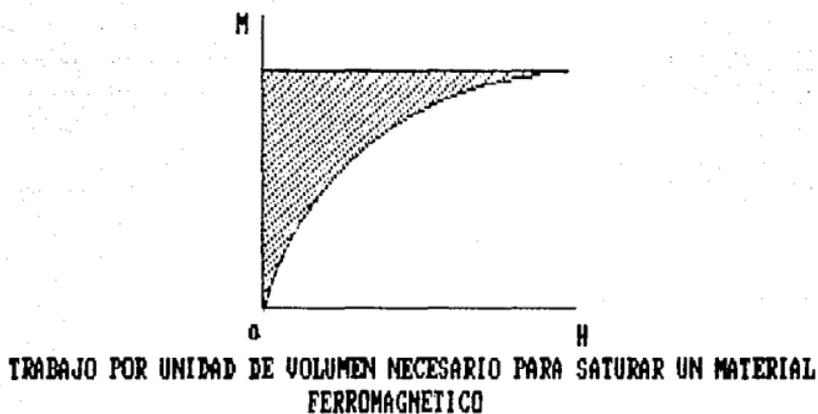
Durante el proceso de magnetización de un material ferromagnético, se consume una cierta cantidad de energía, la cual es obtenida de la corriente de magnetización suministrada. Se efectúa así un trabajo por unidad de volumen, necesario para magnetizar dicho material, de un estado de magnetización M_1 a un estado de magnetización M_2 . Este trabajo está dado por la siguiente expresión :

$$W = \int_{M_1}^{M_2} H dM$$

Si queremos magnetizar una muestra de hierro, desde un estado desmagnetizado $M_1 = 0$, a un estado de saturación $M_2 = M_s$, el trabajo por unidad de volumen necesario para saturar dicha muestra, está dado por la ecuación arriba mencionada y es igual al área encerrada por la curva de magnetización inicial, la línea $M = M_s$ y el eje de las ordenadas, ver FIGURA 2.

Parte de la energía suministrada para este trabajo, se almacena como energía potencial y parte se disipa como calor, el cual es generado por los procesos irreversibles que tienen lugar dentro del

FIGURA 2



material.

Ahora bien, dado que en un ciclo de histéresis, FIGURA 3, la energía potencial puede regresar a su valor original, el trabajo resultante se debe únicamente a los efectos disipativos que tienen lugar en el material.

La pérdida total de energía durante el ciclo completo esta dada por:

$$W = \oint H \, dM = 2 \left(\int_{-M_r}^{M_a} H \, dM - \int_{M_a}^{-M_r} H \, dM \right)$$

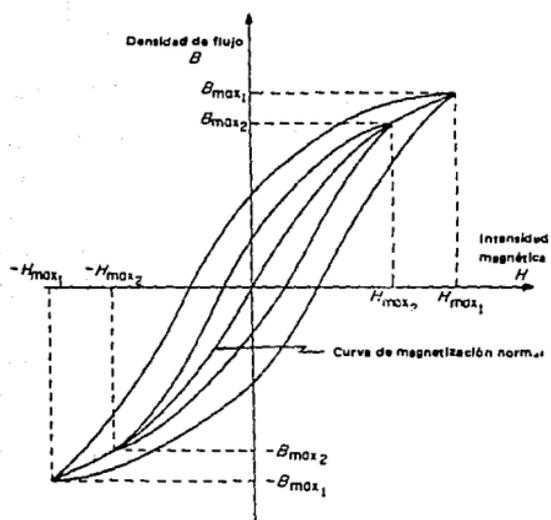
Que es el área total dentro del ciclo de histéresis, FIGURA 3.

Por todo lo anterior y otros puntos a considerar vemos la importancia de tener unos datos confiables.

Por otro lado, es interesante señalar que la pérdida de energía por histéresis ocurre 120 veces por segundo en un dispositivo como un transformador de potencia. La pérdida por ciclo es pequeña: aproximadamente de "20 mW-seg/Kg " en un transformador de alta calidad a 60 Hz.² Pero hay muchísimos ciclos en un día así como una gran cantidad de hojas de acero magnético en servicio en nuestra vida diaria. Sumar las pequeñas pérdidas de energía de cada transformador o equipo de inducción, nos daremos cuenta de los millones de miles de millones de pesos que se pierden por este

²CONVERSION DE ENERGIA ELECTROMECANICA - GOURISHANKAR

FIGURA 3.



Familia de anillos de histéresis y curva de magnetización normal.

concepto. Por lo que hay gran interés de hacer que estas pérdidas disminuyan.

También hay que saber que un ciclo de histéresis, o sea la relación que resulta, entre la intensidad del campo magnético aplicado y la magnetización, es complejo y no se puede representar por una fórmula sencilla, ya que la magnetización no sólo está dada por el valor del campo H, sino que depende de muchas otras variables (historia de la muestra).

La Histéresis magnética es una propiedad compleja que tiene innumerables aplicaciones, por ejemplo, en núcleos de transformadores y reguladores de voltaje. Una de sus características principales es que involucra pérdidas de energía, ya que no está determinada unívocamente (para un valor de campo existen dos valores posibles de magnetización), y el área encerrada por el ciclo es proporcional a la energía disipada.

En este trabajo presentamos un método para evaluar las pérdidas de energía por histéresis magnética basado en la medición del área del ciclo por medio de un digitalizador (H.F.9111a). El área del ciclo es igual a

$$w = \frac{W}{V} = \int_0^B H dB \quad (\text{J/m}^3)$$

donde:

w = pérdidas por ciclo y por unidad de volumen

W = pérdidas por ciclo

H = campo aplicado

B = inducción producida

v = volúmenes

La potencia disipada se obtiene en watts, multiplicado por la frecuencia del campo y el volumen de la muestra.

Presentamos algunos resultados obtenidos con muestras de cintas amorfas ferromagnéticas y ferritas.

Prácticamente, para obtener las pérdidas en unidades absolutas, es necesario transformar las mediciones de área (en cm^2 sobre una figura de histéresis típica) a las escalas de voltaje en osciloscopio, y de estos voltajes, a unidades de ampere/metro en campo aplicado H y tesla en inducción B.

Las ecuaciones de transformación resultantes son:

$$H = \frac{n_p}{2\pi R_p \left(\frac{R}{2} + r \right)}$$

$$B = \frac{R_i C_i}{n_s \gamma (R - r) k} V_y$$

donde:

H = campo aplicado

n_p = número de vueltas en el primario

R_p = resistencia en serie en el primario

R = radio mayor del toroide

r = radio menor del toroide

V_x = voltaje fijo en la via X

B = inducción resultante

R_I = resistencia del integrador

C_I = capacitancia del integrador

n_s = número de vueltas en el secundario

y = espesor del toroide

k = constante de amplificación del sistema

V_y = voltaje pico en la via y

Las ecuaciones están en el sistema MKS.

Las pérdidas resultan entonces:

$$W = H B = V_x V_y \alpha$$

donde α incluye todos los parámetros constantes para el sistema y una muestra de geometría dada.

El area calculada es: $V_x V_y$

14-MODELO CONCEPTUAL DEL DISEÑO Y SOLUCION

HISTERESIS COPIO.

El ciclo de Histéresis magnética es una de los mas fundamentales expresiones de orden magnético.

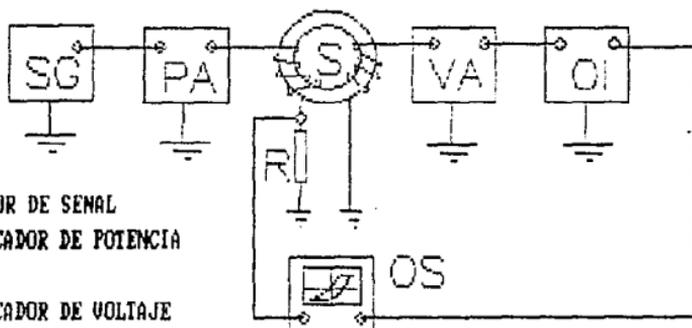
En el caso de los materiales magnéticos suaves, los ciclos de histeresis son fáciles de obtener en el osciloscopio por medio de un simple circuito electrónico. La muestra magnética en forma toroidal se usa como núcleo de transformador. Al campo externo se le aplica una corriente a.c. en su embobinado primario como se muestra en la FIGURA 4. El campo aplicado indica la variación del flujo en la muestra y se detecta en el voltaje a.c. en el embobinado secundario, como resultado de la ley de inducción electromagnética. Esta señal se integra y recibe en el eje "y" del osciloscopio. Se usa una serie de resistencias en el embobinado primario, para obtener una señal proporcional a la corriente a partir del campo aplicado. Este voltaje se aplica al eje "x" del osciloscopio y la comparación de B vs H pueden observarse en la pantalla del osciloscopio.

Las componentes usadas son un generador de señal, un amplificador de potencia para generar el campo aplicado, el voltaje del secundario es generalmente bajo, por lo que conviene un amplificador de voltaje antes del circuito integrador.

El arreglo general descrito puede usarse también para medir la permeabilidad magnética como función de la temperatura. Esta

FIGURA 4.

FORMA PARA EL ESTUDIO DE LOS CICLOS DE HISTERESIS



- SG -GENERADOR DE SENAL
- PA -AMPLIFICADOR DE POTENCIA
- S -MUESTRA
- VA -AMPLIFICADOR DE VOLTAJE
- OI -OPAM INTEGRADOR
- OS -OSCILOSCOPIO

propiedad es útil para determinar la temperatura de Curie³. Para medir la permeabilidad inicial, el campo aplicado (a partir de la corriente primaria) debe ser muy pequeña para permanecer en el intervalo de magnetización reversible (no que resulte la histéresis). El voltaje secundario es proporcional a la permeabilidad magnética. En el presente caso, la alta corriente del primario es necesaria para obtener el intervalo de magnetización irreversible y el voltaje secundario debe integrarse para obtener la inducción magnética de la muestra.

Para determinar el valor del campo aplicado en el eje "x" tenemos:

$$H = \frac{n_p i_p}{2 r_m}$$

donde:

H- campo aplicado.

n_p vueltas en el embobinado primario.

i_p corriente eléctrica en el embobinado primario.

r_m radio medio de la muestra toroidal

así como

$$i_p = V_p / R_p$$

³ LA TEMPERATURA DE CURIE O PUNTO DE CURIE ES LA TEMPERATURA POR ENCIMA DE LA CUAL LA SUSTANCIA FERROMAGNETICA SE CONVIERTE EN PARAMAGNETICA [PROPIEDAD DE LAS SUSTANCIAS CUYAS CAPAS ELECTRONICAS NO ESTAN COMPLETAMENTE SATURADAS DE FORMAR MOLECULAS DIPOLARES MAGNETICAS]

donde:

V_p - Es la caída de voltaje a través de la resistencia en serie en el primario.

R_p - Resistencia en serie en el primario.

y usando los diámetros interior y exterior de la muestra tenemos:

$$H = \frac{n_p}{R_p (D + d)} V_p$$

El campo aplicado se detecta a partir del voltaje del eje "x" del osciloscopio.

El voltaje secundario es función de la variación de flujo de la muestra esto es:

$$V_s = - n_s \frac{d\phi}{dt}$$

donde

V_s - Voltaje secundario

n_s - Vueltas del embobinado secundario

$d\phi/dt$ - Variación del flujo magnético con respecto al tiempo

El flujo esta dado por:

$$d\phi = B dA$$

donde:

B- Inducción Magnética

dA- Diferencial de area y dA = y dr

dφ = δ y dr FIGURA 5

y- Espesor de la muestra

podemos escribir

$$V_s dt = - n_s B y dr$$

esta ecuación podra ser integrada al suponer que B es uniforme adentro de la muestra, que es una buena aproximación.

$$B = \frac{V_s dt}{n_s y (R_o - r_o)}$$

El circuito de integración obtenemos

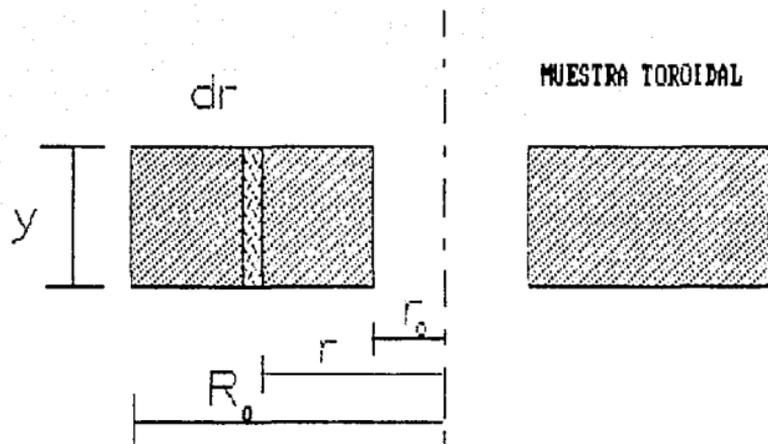
$$V_i = \frac{1}{RC} V_s dt$$

donde

V_i- voltaje integrado

RC- Componentes en el amplificador operacional (valores de las resistencias y capacitancias)

FIGURA 5



r_0 RADIO INTERNO, R_0 RADIO EXTERNO, dr DIFERENCIAL DE RADIO

Finalmente la inducción magnética es dada en función de los términos del voltaje integrado.

$$B = \frac{R C}{n_s \mu (R_o - r_o)} V_i$$

En el caso de los materiales ferromagnéticos la frecuencia de trabajo puede ser tan alta como 1 KHz. La resistencia eléctrica de estos materiales es lo suficientemente pequeña para prevenir pérdidas de conductividad.

Esta frecuencia esta por abajo del fenomeno de resonancia o relajación del dominio magnético (Apendice A) de las paredes. Un amplificador normal es capaz de producir una corriente pico de 4A, en una muestra de dimensiones normales (2 cm OD, 0.5 cm ID), con una n_p de 20 vueltas que da unos 1000 A.m (picos) en el campo aplicado. Este campo es suficiente para el estudio de pequeños ciclos de Histéresis en un rango completo de materiales magnéticos suaves.

Como sea, en algunos casos la corriente aplicada en el embobinado primario es suficientemente alta para producir calentamiento en la muestra. El incremento en temperatura encamina a un cambio del valor en la saturación magnética coactuando los valores de el campo y el magnetismo anisotrópico⁴. Estos cambios introducen o provocan algunos cambios en los ciclos de Histéresis.

⁴ QUE TIENE CIERTA DEPENDENCIA , NO INTRODUCE UN CAMBIO EN LA PERMEABILIDAD MAGNETICA.

15 - DIGITALIZADOR. (9111A/HP-85 GRAPHICS TABLET)

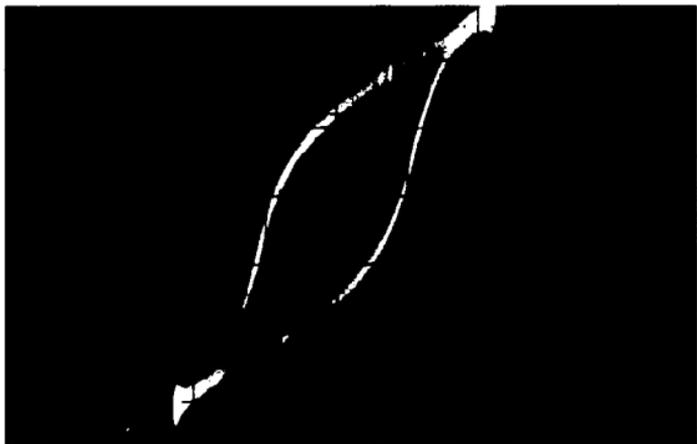
Para poder usar el digitalizador debemos obtener algunos datos ya que no se tiene una conexión directa con nuestro dispositivo. Esto es , como se explicó antes, a que usaremos los recursos existentes adaptandolos de la mejor manera. Esto implica un ahorro de dinero por que usamos nuestros equipos al máximo.

Para poder digitalizar los datos, se obtuvieron unas fotografías de los datos en el osciloscopio. Se hicieron unas ampliaciones conservando la escala para que se pudieran hacer los cálculos del area , para así poder obtener la Histéresis de las diferentes muestras. (como se muestra en las fotografías)
FOTOGRAFIA 2 ES DE UNA FERRITA Y LA FOTOGRAFIA 3 DE UN MATERIAL AMORFO.

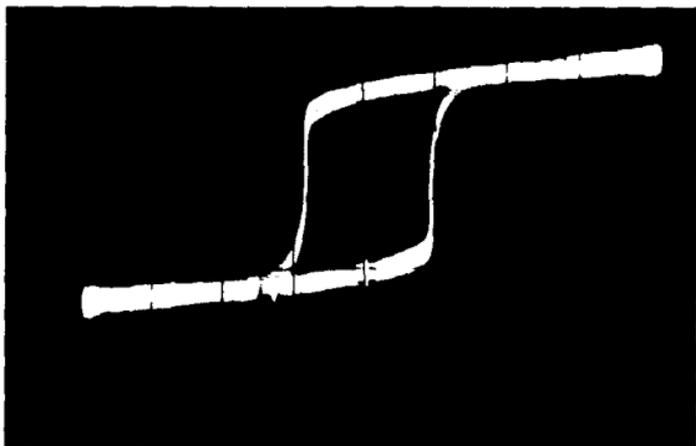
El digitalizador tiene un conjunto de programas que nos dan una ayuda y versatilidad para el cálculo. Los programas que contiene son:

- 1) El programa de dibujo llamado "DRAW"
- 2) Menu creador para el programa de dibujo, llamado "PLOTD"
- 3) Programa para el cálculo de areas y distancias llamado "AR&DIS"
- 4) Menu creador para el programa de area y distancia llamado "PLOT A"

FOTOGRAFIA 2



FOTOGRAFIA 3



- 5) Programa de línea continua llamado "CONTIN"
- 6) Menu creador para el programa de línea continua.
- 7) Programa de entrada de datos graficos llamado "GRDATA"
- 8) Demostración musical llamada "DAISY" (interacción del computador y la tarjeta)
- 9) Juego de asteroides llamado "ASTER"
- 10) La demostración llamada "DEMO"
- 11) El auto comienzo "AUTOST"

Muchos de éstos no los vamos a utilizar, solo los de cálculo de areas y distancias, así como el de introducción de datos gráficos.

Por lo que se dara una breve explicación solo de los programas involucrados en este trabajo.

El digitalizar, se hace de una manera muy sencilla. Se tiene la pluma conectada a la base del digitalizador. Y se siguen los pasos siguientes:

- a) Con la pluma en la mano se acerca hasta la superficie que queremos digitalizar.
- b) Se presiona ligeramente hacia abajo hasta que se siente que se conecta (switch), y se deja de presionar.
- c) Cada una de las digitalizaciones es acompañada por uno de cuatro tonos diferentes. Son dos propósitos fundamentales el de los diferentes tonos.

- 1) Significa que se ha digitalizado algo.
- 2) Dependiendo del tono se van dando diferentes indicaciones.

15.1 PROGRAMA PARA EL CALCULO DE AREA Y DISTANCIA.-

Para empezar se debe de especificar la escala en la que se encuentra el plano, en cualquiera de las unidades (pueden ser centímetros, pulgadas, etc). Despues de esto es facil el cálculo deseado.

En este programa se puede establecer que tan preciso se desean los cálculos, así como las variaciones deseadas tanto en un eje como en otro.

Tambien se puede marcar o indicar, si al variar determinado porcentaje en un eje u otro se haga la digitalización o no.

15.2 PROGRAMA DE ENTRADA DE DATOS GRAFICOS.

Este programa nos sirve para poder almacenar los datos de la digitalización y ayudarnos para otros posibles cálculos.

16 FORMULAS MATEMATICAS PARA EL CALCULO DE LA HISTERESIS MAGNETICA

Para aplicar el método, una de las partes más importantes es el definir las dimensiones que se van a utilizar, ya que las variables utilizadas deben estar en los sistemas CGS o en MKS. En este trabajo se utilizo el sistema MKS.

El area bajo la curva BH es equivalente al area que se obtiene

en el osciloscopio, en donde el "eje_X" es proporcional a H y el "eje_Y" proporcional a B de acuerdo a las siguientes relaciones:

$$B = \frac{R C V_Y}{e (R_M - r_m) K}$$

R = resistencia del integrador

C = capacitancia del integrador

V_Y = el voltaje que se lee en el osciloscopio en el eje Y.

e = espesor de la muestra

R_M = radio mayor

r_m = radio menor

K = factor de amplificación de los operacionales.

$$y \quad H = \frac{j}{2 \pi r_{m0}}$$

sabemos que

$$i = \frac{V_x}{R_{ent}}$$

de lo anterior podemos escribir H de la manera siguiente

$$H = \frac{V_x}{2\pi r_{mo} R_{ent}}$$

V_x = Voltaje leído en le eje X del osciloscopio

$$r_{mo} = (R_M + r_m)/2$$

R_{ent} Resistencia limitadora en el primario.

En el caso de B, las variables constituyen el factor geométrico, ya que

$$\frac{RC}{K} = cte = K_o$$

$$\therefore B = \frac{K_o V_y}{e (R_M - r_m)} = \frac{K_o V_y}{R r_{mi}}$$

con

$$r_{mi} = R_M - r_m$$

Para el caso de H,

$$K_t = \frac{1}{2\pi R_{ent}}$$

entonces

$$H = K_t \frac{V_x}{r_{mo}}$$

Por lo que

$$W = HB = \frac{K_o V_y}{e r_{mi}} - \frac{K_i V_x}{r_{mo}}$$

o sea que

$$W = \frac{K_o K_i}{e r_{mi} r_{mo}}$$

$$V_y V_x = \frac{K_o K_i}{e r_{mi} r_{mo}} * (\text{AREA})$$

CAP 2-PROCESO DE DISEÑO DEL DISPOSITIVO Y SISTEMA UTILIZADO.

CAP 2- PROCESO DEL DISEÑO DEL DISPOSITIVO Y SISTEMA UTILIZADO
2.1) MANEJO DEL DIGITALIZADOR Y PROGRAMA UTILIZADO.

CALCULO DE AREA Y DISTANCIA.

FORMA DE CORRER EL PROGRAMA.

Se requiere el programa de Cálculo de Area/Distancia por lo que se corren los comandos siguientes:

- 1) LOAD "AR&DIS"
- 2) LOADBIN "TRACKA"
- 3) Despues la tecla de correr programas "RUN"

La tarjeta tiene 16 teclas de funciones de las cuales este programa solo usa 14. Como no concierne el explicar cada una de las funciones sino el decir la operación que realizan, solo se nombraran.

| SOFTKEY | FUNCION | ABREVIACIÓN |
|---------|---|-------------|
| 1 | Ingresar un solo punto del modo muestreo | SNGL |
| 2 | Ingresar puntos continuos del modo muestreo | CONT |
| 3 | Establecer unidades | UNITS |
| 4 | --Sin uso. | |
| 5 | Calcular el área de una figura cerrada. | AREA |
| 6 | Cálculo del área bajo la curva. | AREA CURVE |
| 7 | Calcular distancia de la línea | DIST |
| 8 | Borrar las pantallas. | CLEAR CRT |
| 9 | Sumar al total de areas calculadas | ADD TOTAL |

| | | |
|----|---|-------------|
| 10 | Restar al total de areas calculadas | SUBTR TOTAL |
| 11 | Borrar el total de areas calculadas | CLEAR TOTAL |
| 12 | --Sin uso. | |
| 13 | Imprimir los datos de calculo del programa | STATUS |
| 14 | Imprimir ayudas | HELP |
| 15 | Terminar una línea | END LINE |
| 16 | Salir del programa | EXIT |

Como se explico en la parte anterior y en el capítulo uno, esta tarjeta digitalizadora nos simplificara los cálculos de los datos obtenidos por nuestro sistema. Este programa nos ayudara en la obtención de datos y nos liberara de tener que hacer cálculos de areas por integrales o de otra forma. Como ya se explico las pérdidas son obtenidas a partir del cálculo del area. Al utilizar este programa de Hewlett Packard con su respectiva tarjeta digitalizadora, es una forma de utilizar los recursos existentes en el Instituto de Investigaciones de Materiales (U. N. A. M.), y dar un ahorro a esta Institución al no tener que comprar equipo nuevo.

2.2) FORMA DEL DISEÑO.

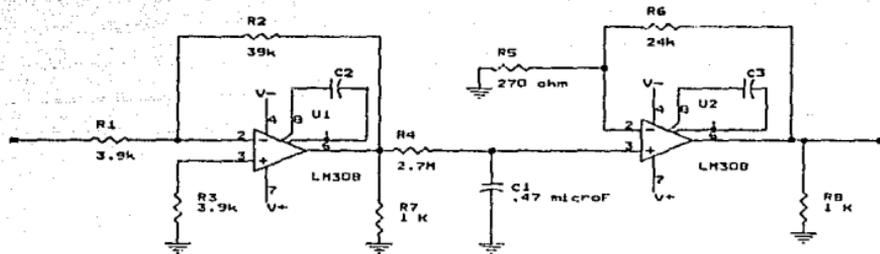
Para realizar estas pruebas, montamos el sistema en una tableta de experimentos (proto-board) *PIOURA* α , embobinamos algunas muestras tanto de ferrita como de material amorfo y llevamos acabo el experimento preliminar. También hay que tener en cuenta el arreglo para que no se tenga una desviación de C.D. o tambien llamada offset.

Como se explico en el capítulo uno las pérdidas que se tienen son pequeñas, aunque al sumar todas las pérdidas de todos los aparatos son cuantiosas, estas perdidas son de muy poca potencia y mas si son muestras de laboratorio⁵, por lo que en las pruebas preliminares se tuvieron problemas al ser la señal demasiado pequeña, lo que nos dio como resultado el tener que cambiar la forma de integrar la señal y el tener que hacer otro tipo de sistema.

Despues de analizar los datos obtenidos en las pruebas preliminares se lleo a la conclusión, de utilizar un sistema que amplificara la señal y que lo integrara, por lo que se escogio un par de amplificadores operacionales para amplificar la señal y eliminar la corriente de offset y por simplicidad en el diseño el integrador se prefirio que fuese pasivo.

Para amplificar la señal se utiliza un amplificador operacional con un arreglo para que tenga una ganancia determinada por sus componentes. Pero esta señal se tiene por la entrada inversora

⁵SON MUESTRAS PARA HACER EXPERIMENTOS DE LA SATURACION, E HISTERESIS MAGNETICA Y SON DE TAMAÑO MUY PEQUEÑO.



41

| | | |
|-------|------------------|--------------|
| Size | Document Number | REV |
| A | HISTERESISCOPIO | OK |
| Date: | February 1, 1981 | Sheet 1 of 1 |

de operacional por lo que hay que hacer todo un arreglo para obtener esta señal en forma positiva.

Como se sabe según los valores de las resistencias de retroalimentación será la ganancia del voltaje. (Apéndice A).

Para este sistema se realizara la placa para colocar los circuitos, que se hace el diseño por computadora con un programa llamado ART WORK. El diseño definitivo se muestra en la figura 7. Esta impresión muestra el circuito como quedara en la parte para soldar. Se tiene que tomar en cuenta que algunas de las componentes deben de estar fuera de esta placa. Así como que algunas conecciones son por medio de cables.

FIGURA 1

2X artwork 1 Feb 1991 20:24:03
V1.1
D.P.N r y holes: 51 solder side
Droximate size: 2.40 by 2.50 inches

HISTORIA DE LA INVESTIGACIONES
DE MATERIALES DE LA UNIVERSIDAD
AUTONOMA DE MEXICO
1991.



CAP 3- PRUEBA DEL SISTEMA COMPLETO.

CAP 3- PRUEBA DEL SISTEMA COMPLETO.

3.1) DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Para llevar acabo el experimento se tuvo que embobinar varios toroides de diferentes materiales para el poder hacer las diferentes pruebas. En realidad el llevar acabo este experimento no es de una gran complejidad.

1- Preparación de las muestras (tipo de materiales y saber algunas pequeñas características de cada toroide)

2- Utilizar el sistema y así obtener los datos necesarios, para mostrar el buen funcionamiento de éste.

3- Obtener las fotografías necesarias para poder digitalizar los datos obtenidos.

4- Decir lo bueno y lo malo de obtener los datos de esta forma.

Esta es una forma muy simple de llevar acabo el experimento en el cual se nota como se utilizó los recursos existentes, que es uno de los principios para la realización de este sistema.

3.2) REALIZACION DEL EXPERIMENTO.

Los pasos que se siguieron en el desarrollo del experimento fueron los siguientes:

1-Se embobinaron varias muestras de diferentes materiales, para que al saturarse se obtengan diferentes curvas de Histéresis. Las muestras de las que se obtuvieron los resultados fueron de los materiales: 1) amorfo FOTOGRAFIA 2, 2) ferrita FOTOGRAFIA 3

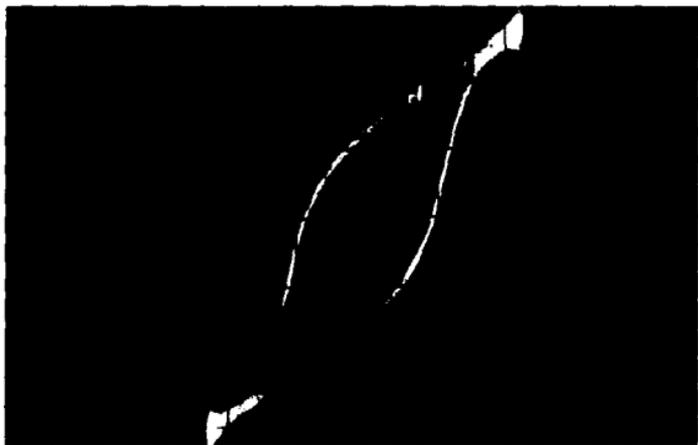
2-Se colocaron las muestras en el sistema para obtener fotografías de cada una de las pruebas.(LAS FOTOGRAFIAS SON FOTOGRAFIA 4 MATERIAL AMORFO, Y LA FOTOGRAFIA 5 FERRITA) En esta parte se tuvo que tener especial cuidado de observar un orden riguroso para no cambiar los datos de cada una de las fotografías.

3-Despues de que se revelaron las fotografías, se hizo una amplificación, para despues digitalizar los datos en la tarjeta 9111A de Hewlett Packard.

FOTOGRAFIA 4



FOTOGRAFIA 5



CONCLUSIONES

Después de la elaboración de este trabajo podemos constatar los resultados obtenidos por nuestro sistema, el cual nos facilita el estudio de la Histéresis Magnética, para obtener un ahorro de tiempo durante la elaboración de las mediciones así como un ahorro de dinero al determinar si determinado Nucleo tendrá un mayor rendimiento que otro.

Se darán algunos datos de las muestras utilizadas, los cuales son de gran importancia para la obtención de las curvas de Histéresis Magnética (valores).

En la muestra de material Amorfo usamos dos embobinados uno con 20 (veinte) vueltas y otro con 10 (diez) vueltas. El diámetro mayor de la muestra es de 4 cm, así como el diámetro menor es de 3 cm.

El Toroide de Ferrita tiene dos embobinados también, uno de ellos con 20 (veinte) vueltas y el segundo con 10 (diez) vueltas. En lo que respecta a los diámetros, el mayor mide 3.15 cm y el menor 2 cm.

De las Fórmulas Matemáticas explicadas en el capítulo uno obtenemos los valores:

$$B = \frac{K_0 V_y}{e r_{mi}}$$

y tambien tenemos

$$H = K_1 \frac{V_x}{r_{mo}}$$

Para obtener W

$$W = HB = \frac{K_0 K_1}{e r_{mi} r_{mo}} V_x V_y$$

Para obtener los valores de el producto de los voltajes es donde se aplicó un factor :

- 1.44 cm² calculado en el digitalizador es el equivalente a 1cm² reales de nuestra lectura.

Al digitalizar nuestra amplificación obtuvimos una area de 38.04 cm² de lo cual es en realidad de 26.42 cm². Como nuestra señal se encontraba en la lectura a 1V y a 20mV osea un equivalente de .02V² tenemos que el valor de voltaje es de 0.5284V². De todo lo anterior obtenemos el valor de:

$$W = 0.23 \text{ mW}$$

Como se ve al utilizar este sistema nos ahorramos muchos posibles errores de cálculo y errores humanos.

Para hacer una conclusión más en forma de aplicación, al ver que el dispositivo nos proporciona unos resultados reales y al

pensar todas las aplicaciones posibles del mismo para el uso de CFE (Comosi3n Federal de Electricidad) y CLF (Compa1a de Luz y Fuerza), as3 como su bajo costo de fabricaci3n y su alto precio de venta para las grandes compa1as, podemos decir que si se fabricaran para venderse a estas compa1as seria un gran negocio.

INDICE DE FIGURAS Y FOTOGRAFIAS

| | | |
|-----------|---|----|
| FIGURA 1 | Curvas de Histéresis..... | 11 |
| FIGURA 2 | Trabajo para saturar material ferromagnético..... | 16 |
| FIGURA 3 | Familias de anillos de Histéresis..... | 18 |
| FIGURA 4 | Diagrama para obtener muestras..... | 23 |
| FIGURA 5 | Corte muestra Toroidal..... | 27 |
| FIGURA 6 | Diagrama del Circuito (orcad)..... | 41 |
| FIGURA 7 | Placa del Circuito..... | 43 |
| FIGURA 8 | Lineas de Inducción de un Solenoide..... | 56 |
| FIGURA 9 | Corriente en espira..... | 57 |
| FIGURA 10 | Línea de flujo enlazado bobina de 1 vuelta... .. | 61 |
| FIGURA 11 | Línea de flujo enlazado bobina de 3 vuelta... .. | 63 |
| FIGURA 12 | Inducción Magnética Interior de un solenoide..... | 65 |
| FIGURA 13 | Campo magnético en un Toroide..... | 68 |
| FIGURA 14 | Toroide con n vueltas..... | 70 |
| FIGURA 15 | Bobina Excitada por una sola Fuente..... | 72 |
| FIGURA 16 | Amplificador Operacional (inversor)..... | 76 |
| FIGURA 17 | Flujo corriente en Amp. Operacional..... | 78 |
| FIGURA 18 | Tierra Virtual en Amp. Operacional..... | 79 |
| FIGURA 19 | Amplificador Operacional (no inversor)..... | 81 |
| FIGURA 20 | Corriente y Voltaje (Opam no inversor)..... | 82 |
| FIGURA 21 | Diferencia Potencial en las entradas..... | 84 |
| FIGURA 22 | | |
| FIGURA 23 | | |
| FIGURA 24 | | |
| FIGURA 25 | Opam conectado como Integrador..... | 88 |
| FIGURA 26 | Opam conectado como Integrador (no offset).... | 91 |

| | | |
|--------------|---|----|
| FOTOGRAFIA 1 | Curva Histéresis por Histerescopio..... | 14 |
| FOTOGRAFIA 2 | Curva Material Ferromagnético..... | 30 |
| FOTOGRAFIA 3 | Curva Material Amorfo..... | 31 |
| FOTOGRAFIA 4 | Curva Material Amorfo..... | 47 |
| FOTOGRAFIA 5 | Curva Material Ferromagnético..... | 48 |

APENDICE A

PARAMETROS CARACTERISTICOS DE LA HISTERESIS MAGNETICA

Los circuitos magnéticos surge de la semejanza con el análisis de los circuitos resistivos de cd . La única diferencia importante radica en la naturaleza no lineal de las porciones ferromagnéticas del circuito magnético; los métodos adoptados son similares a los que se requieren en los circuitos eléctricos no lineales.

CAMPO MAGNETOSTATICO-

Consideramos las fuerzas sobre cargas colocadas en un campo eléctrico creado por otras cargas fijas. Si alguna o todas las cargas, incluyendo a la de prueba están en movimiento, estas cargas movibles experimentan algunas fuerzas adicionales (además de la fuerza de Coulomb). Estas fuerzas que son debidas a la velocidad de las cargas en movimiento, son llamadas fuerzas magnéticas y la región en la cual existen es llamada como campo magnético. En otras palabras, nosotros definimos un campo magnético en terminos de campos eléctricos en movimiento.

Un campo magnético es usualmente considerado compuesto de líneas de fuerza llamadas líneas de flujo o líneas de inducción representadas por ϕ . El número de líneas de inducción por unidad de área (el área se mide en un plano perpendicular a las líneas de inducción), es una medida de la fuerza del campo magnético y es llamada densidad de flujo, representada por B .

CONTINUIDAD DE LINEAS DE INDUCCION.-

El flujo o Línea de Inducción producidas por las corrientes, siempre forman un circuito cerrado. En una región específica, el número que entra es igual al número de líneas que sale. Por ejemplo en la FIGURA 8, las líneas punteadas representan una superficie cerrada. El flujo que entra a esta superficie es el mismo que sale.

Esto se expresa matemáticamente por la relación

$$\int_A \mathbf{B} \cdot \mathbf{n} \, dA$$

\mathbf{n} -es el vector unitario normal a la superficie A

Otra forma de esta relación es

Divergencia $\mathbf{B}=0$

Las ecuaciones anteriores son algunas veces llamadas Ley de Gauss para campos magnéticos \mathbf{B} .

FUERZA ELECTROMOTRIZ DEBIDA AL MOVIMIENTO.

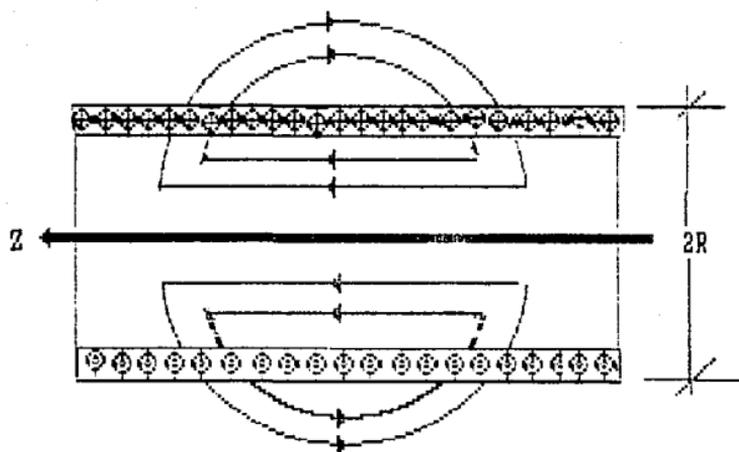
Cuando se desplaza un circuito de forma fija en una región en la que existe un campo magnético, aparece en el circuito una FEM^Z inducida. Podemos calcular la magnitud de este efecto aplicando las leyes que dan la fuerza magnética que obra sobre una carga en movimiento. En la FIGURA 9, se ve una espira rectangular conductora que se mueve hacia la derecha en un campo perpendicular

\mathbf{E} LAS RELACIONES CORRESPONDIENTES PARA UN CAMPO ELECTRICO SON

$$\int_A \mathbf{D} \cdot \mathbf{d}\mathbf{a} = \int_V \rho \, dv$$

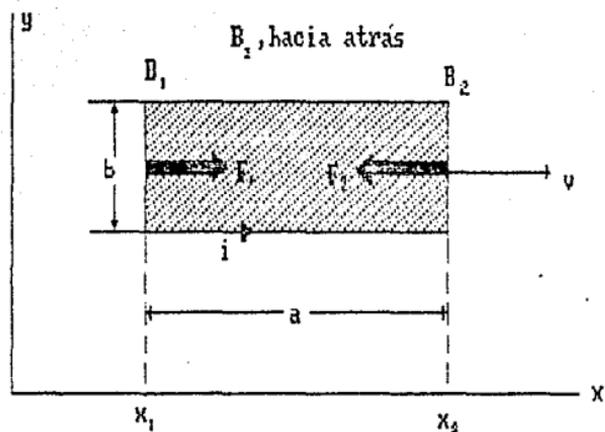
^Z FEM-- FUERZA ELECTROMOTRIZ

FIGURA 8



LÍNEAS DE INDUCCIÓN EN UN SOLENOIDE

FIGURA 9



El movimiento en un campo magnético produce una corriente en la espira conductora

al plano de la espira y que varía únicamente a lo largo del "eje x". Se calcula la fuerza de origen magnético ejercida sobre una carga q , situada en una posición fija respecto a la espira. De la ecuación

$$F = e(v \times B)$$

nos da esta fuerza,

$$F = q v_x B_z$$

estando dirigida F hacia la parte positiva del "eje y " si q es positiva, B_z es la inducción magnética hacia dentro del papel y v_x la velocidad con que se mueve la espira en la dirección x . Esta fuerza actuará sobre todas las cargas existentes en el hilo y realizará trabajo sobre todas aquellas que puedan moverse verticalmente por los lados de la espira. Solo necesitamos tomar en cuenta estos lados verticales, puesto que en los horizontales la fuerza de origen magnético es perpendicular, y no puede realizar trabajo sobre cargas que se mueven a lo largo de ellos. La FEM que aparece en la espira puede hallarse calculando el trabajo por unidad de carga realizado por las fuerzas magnéticas al recorrer una carga toda la espira. De acuerdo con nuestro convenio anterior, de considerar positiva una corriente que circule por la espira en sentido inverso a las manecillas del reloj, tomaremos las fuerzas que tengan este sentido como positivas. Por esto y como se ve en la FIGURA 9, la fuerza F_2 en

el lado de la derecha de la espira es positiva, mientras que la fuerza F_1 , aunque dirigida igualmente hacia arriba, es negativa. La fuerza magnética neta en toda la espira es, $F_2 - F_1$. Para aclarar la situación, supongamos que el valor B_2 del campo en el lado derecho de la espira es mayor que su valor B_1 en el de la izquierda. La fuerza neta entonces es en sentido inverso al reloj, o sea, positiva.

El trabajo realizado por las fuerzas magnéticas al hacer recorrer a una carga q la espira vendrá dado por

$$W = \oint F \, dl = (F_2 - F_1)b = |B_2 - B_1| q v_x b = -q \frac{d\phi}{dt}$$

en la que $d\phi/dt$ es la derivada respecto al tiempo del flujo de inducción magnética abrazado por la espira. Este resultado se deduce del hecho de que $Bb v_x = Bb \, dx/dt$, y $B_2 b \, dx$ representa al aumento de flujo en el tiempo dt correspondiente al lado derecho de la espira, mientras que $B_1 b \, dx$ es la disminución de flujo correspondiente al lado izquierdo en el tiempo dt , es, $|B_2 - B_1| v_x b = -d\phi/dt$. El signo negativo es debido a que hemos elegido B en dirección negativa (hacia adentro del papel, es decir, alejándose del observador). A medida que la espira se mueve hacia la derecha aumenta el valor de este flujo negativo.

Si dividimos la ecuación del trabajo por q , tendremos la FEM

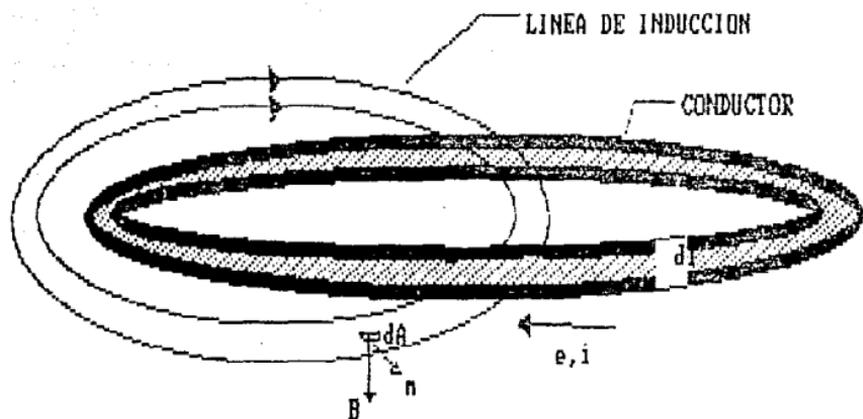
$$\frac{W}{q} = \mathcal{E} = - \frac{d\phi}{dt}$$

Esta FEM arrastrará las cargas alrededor de la espira exactamente igual que la de una pila. Por lo que si la resistencia de la espira es R, la corriente estará dada por $\mathcal{E}=iR$. Cuando una espira se mueve en una región en la que la inducción magnética varía de un punto a otro aparece una FEM que puede expresarse en función de la velocidad de variación del flujo magnético abrazado por la espira.

LEY DE INDUCCIÓN DE FARADAY

Se muestran un conductor en forma de anillo y algunas líneas de flujo, son debidas a un magneto o una bobina portadora de corriente, como la que está en la FIGURA 10. Como las líneas se cierran sobre sí mismas y el conductor tiene forma de anillo, podemos decir que las líneas de flujo están enlazando al conductor. Este concepto de enlazamiento de flujo es muy útil, especialmente cuando el conductor tiene más de una vuelta y por tanto se enlaza a las líneas de flujo tantas veces como vueltas tiene. En la FIGURA 10, el número de vueltas es 1 y el número de enlazamientos es igual al número de líneas de flujo. Por otro

FIGURA 10



LINEAS DE FLUJO ENLAZANDO UNA BOBINA DE UNA VUELTA

lado en la FIGURA 11 tenemos una bobina de tres vueltas, el número de enlazamientos de flujo será tres veces el número de líneas de flujo. En el sistema mks, el flujo está dado en webers y el eslabonamiento o enlazamiento de flujo, esta por consiguiente, expresado en webers por vueltas.

A principios del siglo XIX, el científico M. Faraday, observó que una corriente eléctrica se induce en una trayectoria conductora cerrada cuando se mueve un magneto en la cercanía del conductor. Así también observó el flujo de una corriente cuando el conductor es movido relativamente al magneto, o cuando se cambia la intensidad del campo magnético. Esto lo podemos sintetizar de la forma:

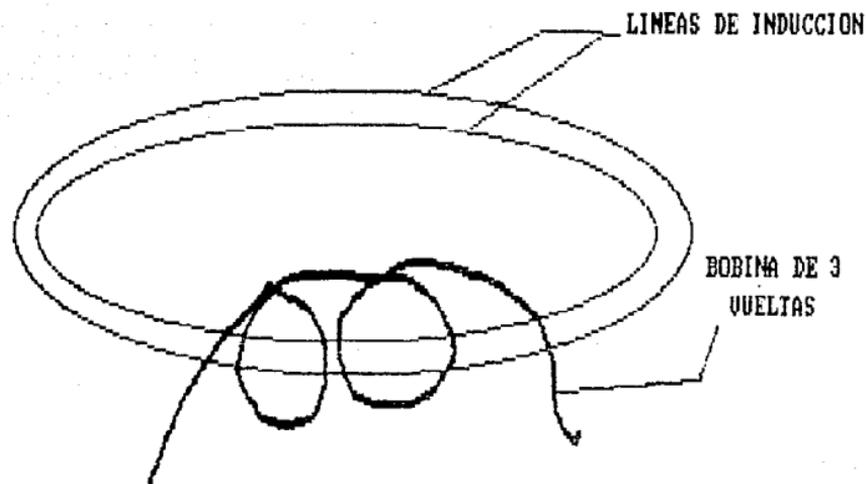
"Una fuerza electromotriz es inducida en un medio cuando se cambia el enlazamiento de flujo magnético asociado con el medio. Si el medio es un conductor de electricidad y forma una trayectoria cerrada, una corriente fluye en él, debido a la fuerza electromotriz inducida. La magnitud de la fem^B inducida es proporcional a la rapidez de cambio en el tiempo de los enlazamientos del flujo." (Ley de Inducción de Faraday).

DOMINIOS MAGNETICOS

Weiss, fué el que introdujo el concepto de dominios magnéticos para explicar el resultado siguiente: A temperaturas inferiores

^B
FEM FUERZA ELECTROMOTRIZ

FIGURA 11



LINEAS DE FLUJO ENLAZANDO UNA BOBINA DE 3 VUELTAS

al punto de Curie, los momentos magnéticos de los átomos dentro del material ferromagnético están, a escala atómica, prácticamente alineados. Sin embargo a escala macroscópica, el momento magnético en general tiene un valor inferior al de saturación y es necesario aplicar un campo magnético externo para saturar la muestra.

Weiss explica este fenómeno suponiendo que los materiales realmente están compuestos por un gran número de regiones, conocidas como dominios, en donde la magnetización local está saturada en alguna dirección, que no es necesariamente la misma para todos.

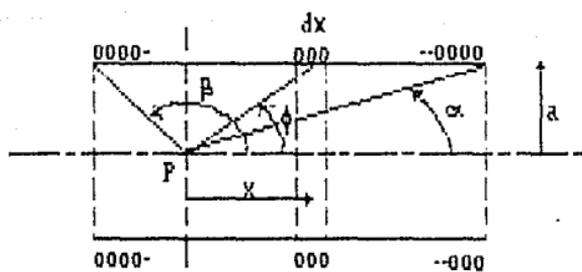
Los dominios microscópicos, que solo son visibles con microscopios, a escala atómica son de gran tamaño, cada dominio incluye a millones de magnetos elementales. La magnetización en estos materiales involucra reorientaciones de las direcciones de los vectores de magnetización a escala macroscópica, lo que explica los cambios considerables en su comportamiento aún cuando los campos aplicados son pequeños.

La pared que divide dos dominios adyacentes magnetizados en direcciones antiparalelas se conoce como pared de Bloch.

CALCULO DEL CAMPO EN EL EJE DE UN SOLENOIDE.

Una bobina enrollada en forma de espiral sobre un cilindro se llama solenoide. A fin de hallar el campo en un punto P del eje interior al solenoide (como se muestra en la FIGURA 12, debemos de saber el número de espiras por unidad de longitud, y

FIGURA 12



Inducción magnética en interior solenoide

para ello llamaremos N al número total de espiras y L a la longitud del solenoide. Aplicando la ecuación

$$B = \frac{\mu_0 i}{2} \frac{a^2}{(a^2 + b^2)^{3/2}} \quad \text{weber/m}^2$$

a una sección del solenoide de longitud dx , en la que la corriente total será $i(N/L)dx$:

$$dB = \frac{\mu_0 Ni}{2L} \frac{a^2}{(a^2 + x^2)^{3/2}} dx$$

Ahora debemos de integrar esta ecuación y para ello escogemos como variable de integración el ángulo ϕ . Haciendo las sustituciones, $x = a \operatorname{ctg} \phi$ y $dx = -a \operatorname{cosec}^2 \phi d\phi$, la ecuación se transforma en

$$B = - \frac{\mu_0 Ni}{2L} \int_{\beta}^{\alpha} \operatorname{sen} \phi d\phi = \frac{\mu_0 Ni}{2L} (\cos \alpha - \cos \beta)$$

Si escogemos el punto P en el centro de un solenoide muy largo $\alpha = 0$ y $\beta = 180^\circ$, con lo que resulta

$$B = \frac{\mu_o Ni}{L} \quad \text{weber/m}^2$$

Si P está en un punto de los extremos del solenoide, tenemos $\alpha = 90^\circ$ y $\beta = 180^\circ$, y por tanto,

$$B = \frac{\mu_o Ni}{2L} \quad \text{weber/m}^2$$

Es decir, el campo en un extremo de un solenoide muy largo es precisamente la mitad de su valor en el centro.

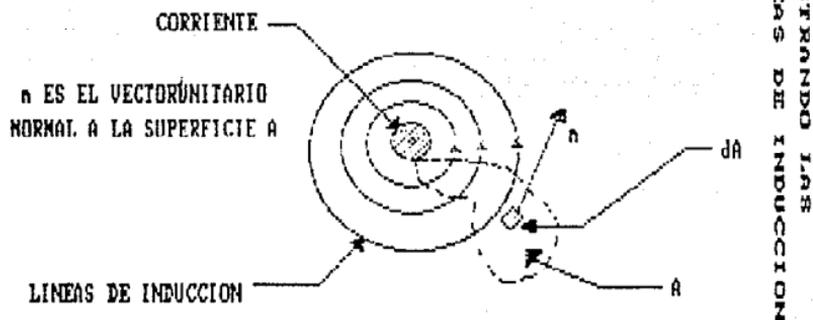
CAMPO MAGNETICO DE UN TOROIDE-

El esquema de un toroide es mostrado en la FIGURA 19. Puede ser considerado como un solenoide enrollado en círculo con sus terminales unidas. Se ve que en la ecuación

$$B = \frac{\mu_o NI}{L} z_o \quad \text{explicada anteriormente como solenoide}$$

que el vector de la densidad de flujo en un solenoide es a lo largo del eje. Por consiguiente se deduce que las líneas de inducción dentro de un toroide son circulares. Aunque esta ecuación se puede utilizar en el caso del toroide, esta expresión

FIGURA 13



para la densidad de flujo dentro de un toroide será derivada de nuevo haciendo uso de la ley de ampere en lugar de la ley de Biot-Savart.

FORMA DE ONDA DE LA CORRIENTE DE EXCITACION EN UN SISTEMA FERROMAGNETICO CON FLUJO SENOIDAL

Se describirá , un procedimiento gráfico para obtener la forma de onda de la corriente de excitación. Si la caída de voltaje en la resistencia $R + R_g$ en la FIGURA 14, se considera despreciable y si $v(t)$ se supone senoidal, se deduce de la ecuación

$$v(t) = N \frac{d\phi}{dt}$$

que el flujo $\phi(t)$ es también senoidal. Quedando

$$v(t) = V_{\max} \sin \omega t \quad \text{y} \quad E_{\max} \sin \omega t$$

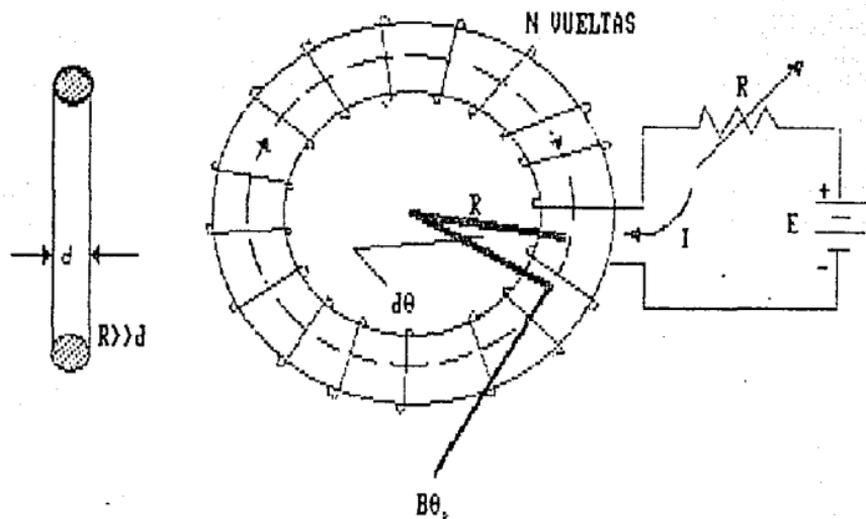
Considerando $e(t)$ como una caída de voltaje, $V_{\max} = E_{\max}$

$$\phi(t) = -\phi_{\max} \cos \omega t$$

obteniendo ϕ_{\max} de las ecuaciones

$$\phi_{\max} = \frac{V_{\text{promedio}}}{4fN}$$

FIGURA 14



UN TOROIDE CON N VUELTAS ESPACIADAS UNIFORMEMENTE

$$\phi_{\max} = \frac{\text{Área bajo medio ciclo de } v(t)}{2N}$$

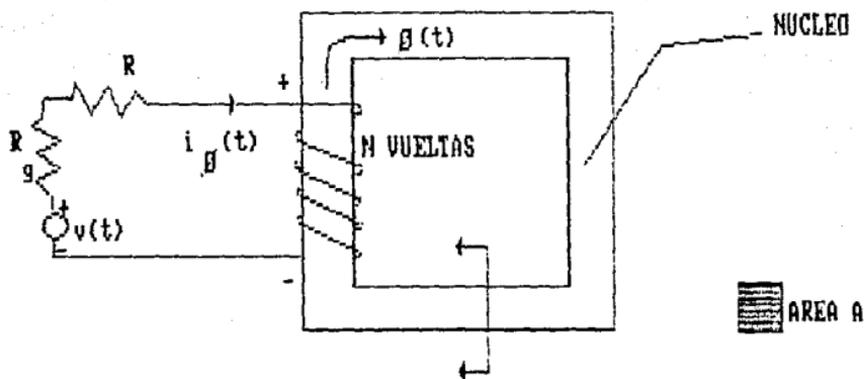
La FIGURA 15 muestra $v(t)$ y $\phi(t)$, pero no a $i(t)$. También se muestra la onda de flujo vs. i_{ϕ} para el núcleo. Esta se obtiene de la onda B vs. H del material del núcleo, al multiplicar la ordenada por el área de la sección transversal A y la abscisa por l/N , donde l es la longitud media de la trayectoria magnética en el núcleo y N el número de vueltas de la bobina de excitación. La forma de onda de $i_{\phi}(t)$ puede ser obtenida ahora gráficamente.

Los puntos 1,2,3,... son escogidos de la curva ϕ vs. i_{ϕ} según se muestra en la FIGURA 15. Horizontalmente y verticalmente, se dibujan líneas de estos puntos. Los valores de tiempo correspondientes a los valores de flujo en estos puntos se obtienen del eje tiempo de la curva $\phi(t)$ y se transfieren al tiempo de $i_{\phi}(t)$. Los valores de $i_{\phi}(t)$ correspondientes a estos instantes de tiempo son leídos en el anillo de histéresis, en los puntos 1,2,3,... Se dibuja entonces la curva i_{ϕ} vs. tiempo. Como el anillo de histéresis es no lineal y tiene dos valores para una misma abscisa, la forma de onda de la corriente de excitación no es senoidal, aún cuando el flujo es senoidal.

MEDICION DE LOS PARAMETROS DE LA HISTERESIS MAGNETICA.

El modelo desarrollado por A.Globus en 1963, está basado en el modelo de Weiss. Considerando a la muestra representada por un grano esférico dividido en dos dominios magnéticos por una pared

FIGURA 15



UNA BOBINA EXCITADA POR UNA SOLA FUENTE

de Bloch. Cuando no hay campos magnéticos externos la pared se encuentra anclada a la frontera del grano en una posición diametral. Los volúmenes relativos de los dominios con magnetización opuestas son iguales y la magnetización resultante es nula. La aplicación de un campo magnético es pequeño, produce sólo una deformación elástica reversible en la pared, la cual permanece anclada a la frontera del grano y se comporta como una membrana elástica. La deformación elástica de la pared explica la zona reversible del ciclo de histéresis. Si se incrementa la intensidad del campo externo, la pared deformada se desancla y se desplaza dentro del grano, el campo para el cual resulta el desanclaje se llama campo crítico, H_{cr} , y representa el límite entre los mecanismos reversible e irreversible. El valor del campo de acuerdo al modelo se obtiene cuando el campo aplicado llega a un valor tal que la fuerza que ancla a la pared al grano es igualada por la fuerza magnética producida por el campo aplicado. Cuando H es mayor que H_{cr} la pared se desplaza hasta la nueva posición de la pared, permanece convexa debido a la acción del campo magnético. Si se elimina el campo aplicado la pared recobra la forma plana pero no regresa a su posición inicial quedando así la muestra magnetizada aun en ausencia de campos aplicados.

Esto explica la existencia de la magnetización remanente. Al invertir el campo aplicado se completa el ciclo de histéresis; al hacerlo la pared se deforma en sentido contrario permaneciendo anclada hasta que H alcanza el valor del campo crítico de la pared en esa posición. Cuando el campo aplicado es mayor este campo

critico, la pared se desancla y se desplaza a una posición equivalente en el otro lado del grano.

AMPLIFICADORES OPERACIONALES

Para poder entender el por que de las componentes del circuito, se dara una pequeña introducción a los amplificadores operacionales.

Al parecer el termino de "*amplificador operacional*" fue acuñado por John R. Ragazzini y colaboradores, en un artículo² publicado por el IRE en 1947. En el artículo se describían las propiedades básicas del amplificador cuando se usaba con retroalimentación lineal y alineal, y se basaba en las labores ejecutadas en 1943 y 1944 por el Consejo de Investigación de la Defensa Nacional Estadounisense. Este, y casi todos los trabajos sobre los amplificadores operativos, se concentran principalmente en el uso de ellos en la simulaciones analógicas y en la solución de ecuaciones integrodiferenciales.

Sin embargo, no fue sino hasta el advenimiento de los amplificadores modulares de semiconductores, en 1962, hechos por la Burr-Brown Research Corporation y por la firma G. A. Philbrick Researchs, Inc., cuando se hizo manifiesta su gran importancia. Desde ese tiempo el amplificador operativo, en la forma de circuito integrado y modular ha dominado, en un grado siempre creciente, los sistemas digitales. Hacer predicciones sobre su

²J. R. RAGAZZINI, Y OTROS, ANALYSIS OF PROBLEMS IN DYNAMIC BY ELECTRONIC CIRCUITS, PROC. IRE, 1947.

futuro desarrollo es muy audaz, pero es seguro que el amplificador operativo continuará siendo un recurso extremadamente importante en el diseño de sistemas y circuitos por muchos años más.

AMPLIFICADOR INVERSOR¹⁰

El lazo cerrado en la entrada negativa nos permite seleccionar y controlar la ganancia en voltaje de una manera muy sencilla. Generalmente un amplificador de lazo cerrado negativo tiene un defasamiento de la entrada con respecto a la salida, por que una porción de la señal de salida se regresa por el lazo a manera de retroalimentación. El amplificador operacional de la FIGURA 16 es un amplificador con señal negativa. Hay que hacer notar que la resistencia R_f esta de forma que se hace una retroalimentación de la salida a la entrada inversora. Esto provoca que una porción de la salida V_o se realimente a la entrada inversora. Con este tipo de realimentación, la ganancia de voltaje V_o es mucho más pequeño que si se tiene un amplificador de lazo abierto.

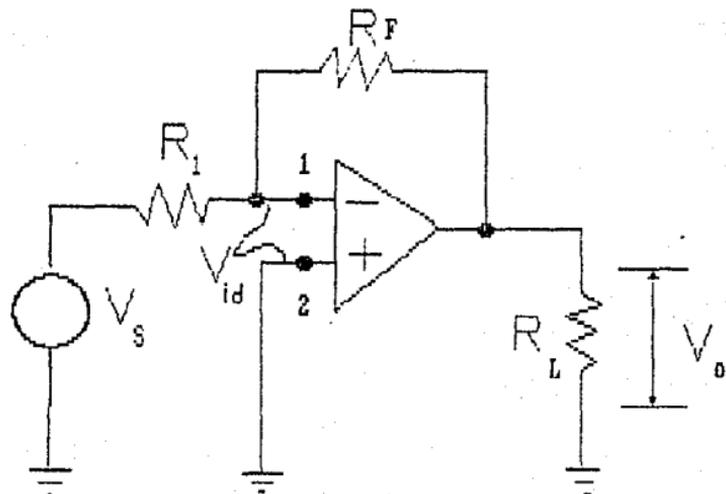
En el circuito mostrado en la FIGURA 16, nos enseña una señal de voltaje V_s , por lo que la ganancia efectiva es

$$A_v = \frac{V_o}{V_s}$$

¹⁰OBTENIDO DEL LIBRO HANDBOOK OF INTEGRATED-CIRCUIT OPERATIONAL AMPLIFIERS. GEORGE B. RUTKOWSKI

FIGURA 16

AMPLIFICADOR OPERACIONAL CONECTADO DE FORMA INVERSORA



El resultado de esta división es llamada la ganancia de lazo cerrado, debido a que la resistencia R_f completa un lazo de la salida del amplificador a la entrada inversora del amplificador. El valor específico de la ganancia de voltaje también está dada por las resistencias R_i y R_f .

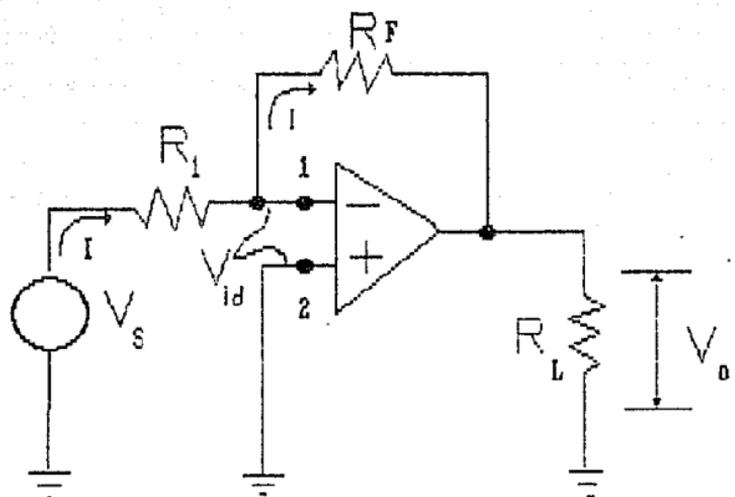
Si analizamos el amplificador de la FIGURA 16, por medio de corrientes y voltajes, podremos obtener la ganancia de voltaje. Si vemos en la FIGURA 17 nos percataremos que el voltaje V_o nos da una corriente I a través de R_i . Asumiendo que es un amplificador ideal, o sea que tiene una resistencia de entrada infinita en el punto 1, nos indica que toda la corriente I se va por R_f . Por la ley de Ohm sabemos que el voltaje a través de R_i es $R_i I$ y que el voltaje por R_f es $R_f I$. Como se sabe entre los puntos 1 y 2 la diferencia de potencial es prácticamente cero, y como la parte del punto 2 está aterrizada, la parte 1 está prácticamente aterrizada también. Este circuito equivalente se puede ver en la FIGURA 18. Como se tiene el voltaje V_o aterrizado y como se tiene una tierra virtual a la izquierda de R_f por la misma ley de Ohm

$$V_o \cong R_f I$$

De manera similar podemos ver que el voltaje V_o está aterrizado y que la resistencia R_i tiene tierra virtual. Por que de una manera práctica podemos hacer que el voltaje a través de R_i es V_o . Utilizando de nuevo la ley de Ohm obtenemos que

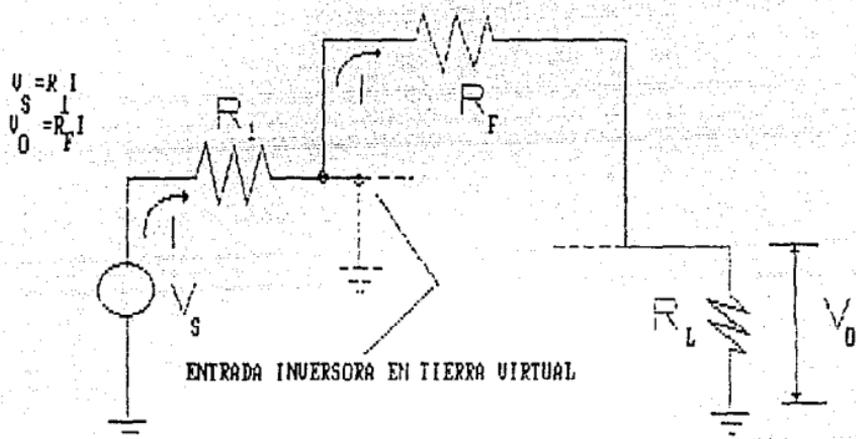
$$V_o \cong R_i I$$

FIGURA 17



LA CORRIENTE EN R_1 ES CASI IGUAL QUE EN R_F

FIGURA 18



CIRCUITO EQUIVALENTE DE LAS FIGURAS 16 Y 17

Como sabemos que la ganancia de lazo cerrado es la división del voltaje de salida entre el de entrada, obtenemos

$$A_v = \frac{V_o}{V_a} \cong - \frac{R_f I}{R_i I} \cong - \frac{R_f}{R_i}$$

El signo negativo significa que la entrada y la salida están fuera de fase. La ecuación anterior nos enseña que la ganancia de lazo cerrado es la división de R_f entre R_i .

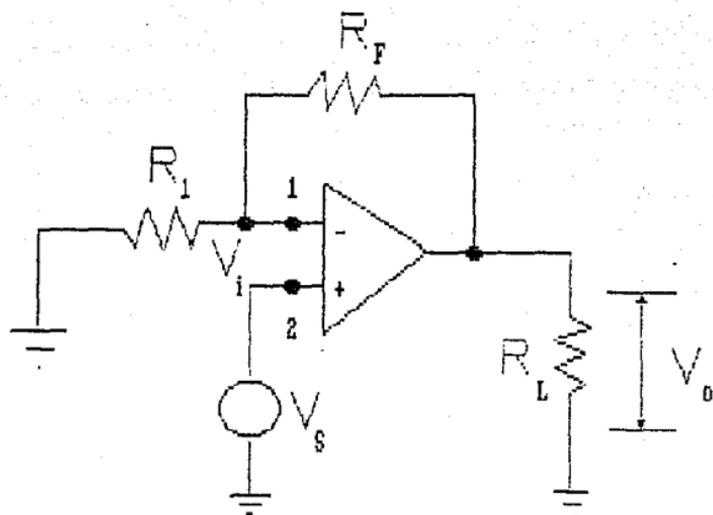
AMPLIFICADOR NO INVERSOR¹¹

Podemos poner a la entrada no inversora (que es la 2), un voltaje V_a que no está conectado a la entrada inversora (punto 1) como se muestra en la FIGURA 19. Los valores de las resistencias externas R_i y R_f nos dan el valor de la ganancia de lazo cerrado A_v . La ganancia se puede escribir en una ecuación en términos de R_i y R_f al analizar los amplificadores no inversores en corriente y voltaje.

Como se muestra en la FIGURA 20, la corriente I es la misma que pasa por las resistencias R_i y R_f , a lo largo de la resistencia R_i observamos que es de un valor infinito o al menos muy grande. En otras palabras, las resistencias R_i y R_f están en serie. Por esto podemos escribir que el voltaje está dado por

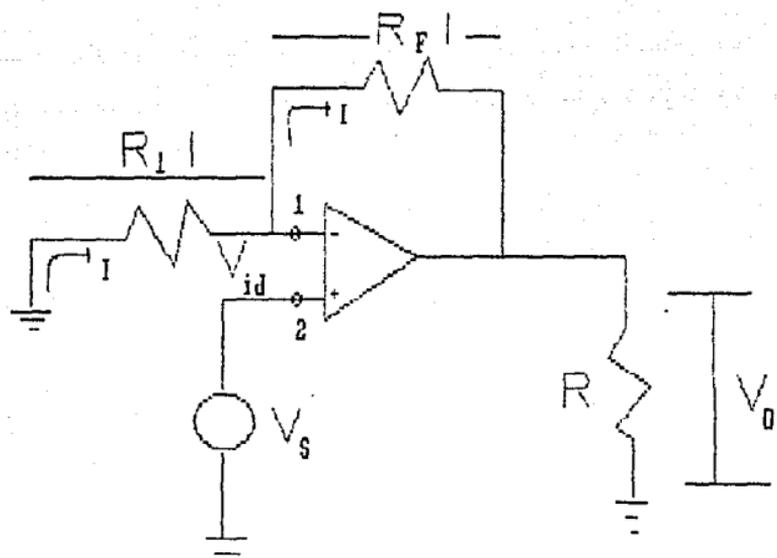
¹¹HANDBOOK OF INTEGRATED CIRCUIT OPERATIONAL AMPLIFIERS RUTKOWSKI

FIGURA 19



AMPLIFICADOR OPERACIONAL QUE TRABAJA DE FORMA NO INVERSORA

FIGURA 20



AMPLIFICADOR NOINVERSOR MOSTRANDO CORRIENTES Y VOLTAJES

$R_1 I$ y $R_f I$. En la parte derecha de R_f tenemos el voltaje V_o a tierra. Este voltaje es el mismo que el de R_1 mas R_f , por que como se vio las resistencias estan efectivamente en serie y la parte izquierda de la resistencia R_1 esta conectada a tierra. Por lo que podemos poner el valor del voltaje V_o como la suma de los voltajes en las resistencias R_1 y R_f

$$V_o \cong R_1 I + R_f I$$

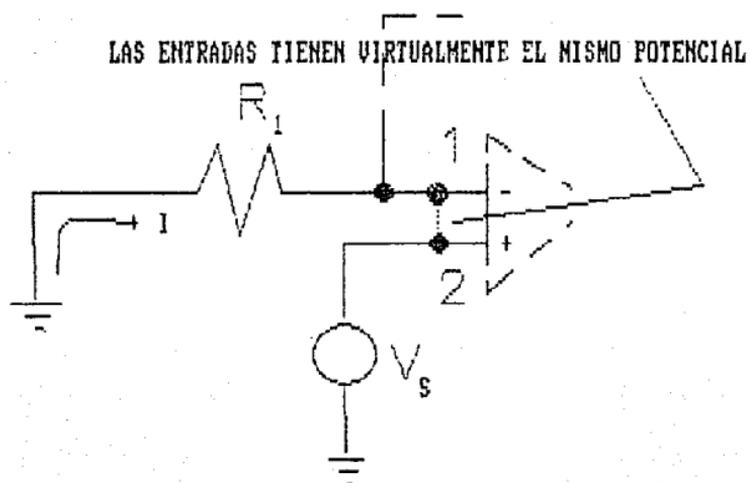
Asi como en los amplificadores inversores la diferencia en el voltaje de entrada en los puntos 1 y 2 es cero por un propocito facil. FIGURA 21. Por la señal de entrada de voltaje V_e es el de la señal atraves de R_1 , y por la ley de Ohm. podemos escribirla como

$$V_e \cong R_1 I$$

La ganancia de voltaje A_v del amplificador no inversor es la relación que se da de dividir V_o entre V_e . Y al substituir en las ecuaciones antes explicadas obtenemos.

$$A_v = \frac{V_o}{V_e} \cong \frac{(R_f + R_1) I}{R_1 I} = \frac{R_f + R_1}{R_1} = \frac{R_f}{R_1} + 1$$

FIGURA 21



ALGUNAS CONFIGURACIONES DE LOS AMPLIFICADORES .

EMISOR COMUN

Modelo de ganancia de voltaje y frecuencia baja

$$A_o \approx \frac{-\alpha R_c r_c}{R_o (R_c + r_c) + R_o [R_c + r_c (1-\alpha)]}$$

donde

$$R_o = R_e + r_e \qquad R_o \ll r_c (1-\alpha)$$

Bajo cargas típicas del colector, la ganancia se convierte en

$$A_o = \frac{-R_c}{R_o + R_o/\beta} \quad \text{para} \quad R_o \ll r_c (1-\alpha)$$

La resistencia de entrada de emisor común, cuando la resistencia de entrada es muy grande, será

$$R_i \approx \beta R_o \frac{R_c + r_c}{\beta R_c + r_c}$$

Cuando la resistencia de carga está en niveles normales, la resistencia de entrada se simplifica a

$$R_i = \beta R_o \quad \text{para} \quad R_o \ll r_c (1-\alpha)$$

Las resistencias de salida sin carga y con carga R_o son

$$R'_o = r_c \frac{R_o + R_o/\beta}{R_o + R_o} \quad \text{para } R_c \ll r_c$$

$$R_o \approx \frac{r_c R_c (R_o + R_o/\beta)}{r_c (R_o + R_o/\beta) + R_o R_c} \quad \text{para } R_c \ll r_c$$

La capacitancia de entrada será

$$C_i \approx \left(1 + \frac{Z_c}{R_o}\right) C_c \quad Z_c = \frac{R_o}{1 + j\omega R_o C_o}$$

Debido a esta capacitancia el polo de respuesta dominante, de la ganancia ocurre aproximadamente a

$$f_p \approx \frac{1}{2\pi R_c C_c} \frac{R_o + R_o/\beta}{R_o + R_o}$$

FORMA SENCILLA¹²

en uno de emisor común

$$A_v > 1$$
$$A_i > 1$$
$$\phi = 180^\circ \text{ defasamiento}$$
$$Z_i \text{ Baja}$$
$$Z_o \text{ Alta}$$

en uno de colector común

$$A_v <= 1$$
$$A_i >> 1$$
$$\phi = 0^\circ$$
$$Z_i \text{ Baja}$$
$$Z_o \text{ Alta}$$

en uno de base común

$$A_v >> 1$$
$$A_i < 1$$
$$\phi = 0^\circ$$
$$Z_i \text{ Baja}$$
$$Z_o \text{ Alta}$$

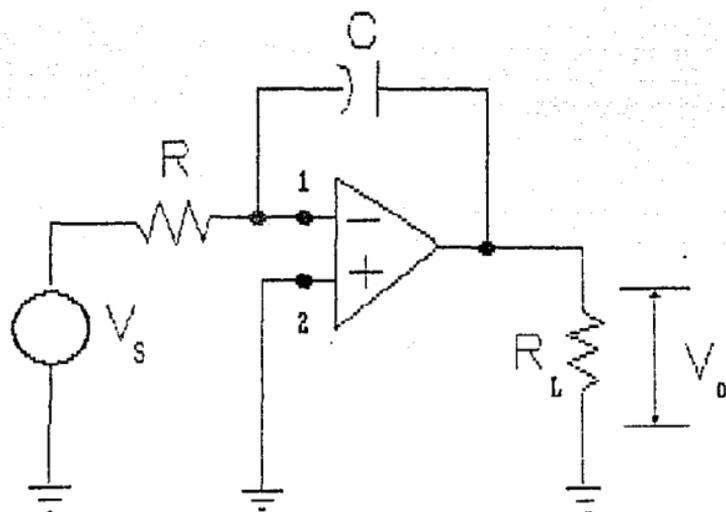
Para diseñar el circuito necesitamos un integrador y debemos tener en cuenta la corriente de offset. Para poder hacer un circuito que satisfaga nuestras necesidades analizaremos algunos circuitos propuestos por varios autores.

El amplificador operacional que se muestra en la FIGURA 25¹³

¹² INFORMACION DEL CURSO DE ELECTRONICA ANALOGICA, PROF. CESAR VARGAS

¹³ CIRCUITO OBTENIDO DEL LIBRO INTEGRATED CIRCUIT DE RUTKOWSKI

FIGURA 25



AMPLIFICADOR OPERACIONAL CONECTADO COMO INTEGRADOR

tiene una conexión para ser un integrador. El forma de la señal a la salida es de forma negativa (integral negativa), a la de la forma de entrada, teniendo en cuenta los valores de R y C.

La forma de analizar el amplificador operacional es como sigue:

Debemos de asumir que el amplificador operacional es ideal, que la entrada inversora i así como la parte de la derecha de la resistencia R están aterrizadas debido a que la entrada no inversora está aterrizada. Por lo que podemos afirmar que el voltaje aplicado V_c cruza por R, y la corriente I por la ley de Ohm es

$$I = \frac{V_c}{R}$$

Por la gran resistencia de entrada, prácticamente toda la corriente I es forzada a través del capacitor C, que cambia el voltaje a través de él.

La corriente y el voltaje de un capacitor los expresamos con las ecuaciones siguientes:

$$i = C \frac{dv_c}{dt}$$

$$v_c = \frac{1}{C} \int i_c dt$$

Si la parte izquierda del capacitor de la FIGURA 25 tiene una tierra virtual, podemos decir que el voltaje de salida es el mismo

que a través del capacitor, por lo que podremos hacer la ecuación del voltaje del capacitor como

$$V_o = - \frac{1}{C} \int I dt$$

donde I es la corriente que esta forzada a través del capacitor, por lo que al sustituir la parte derecha de la ecuación por la ecuación de corriente del capacitor nos queda

$$V_o = - \frac{1}{C} \int \frac{V_e}{R} dt$$

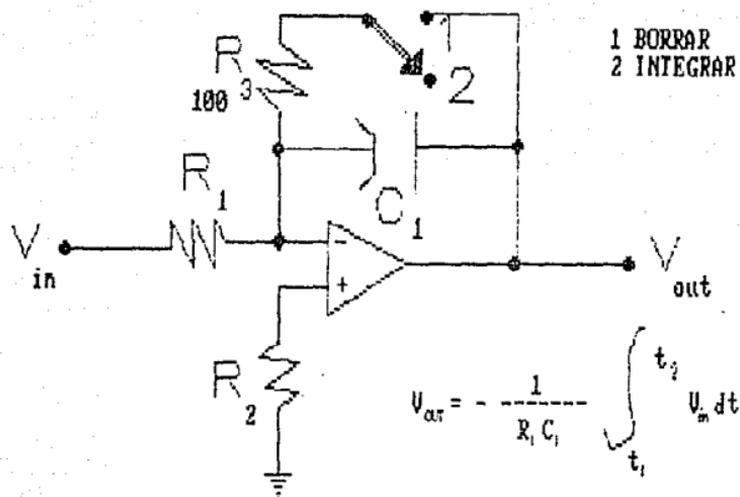
o de la forma

$$V_o = - \frac{1}{RC} \int V_e dt$$

el signo negativo representa la fase invertida en el circuito. Si seleccionamos unos valores de R y C que den 1, obtendremos que el voltaje de salida sera la integral del voltaje de entrada con respecto al tiempo, pero con signo negativo.

Tambien obtenemos un integrador con el minimo error de offset que es la figura 26, que por simplicidad no se pone el analisis sino solo el circuito.

FIGURA 26



CONEXION PARA UN MINIMO ERROR DE OFFSET

Aunque se puede ver que es el mismo amplificador pero con una resistencia para descargar al capacitor.

$$V_{out} = - \frac{1}{R_1 C_1} \int V_{in} dt$$

$$R_1 = R_2$$