

GAUSSMETRO DE ELEMENTO HALL

DISEÑO Y CONSTRUCCION

Tesis previa a la obtención del título de Ingeniero en la especialización de Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional.

FAUSTO HERRERA CHECA

QUITO

MARZO DE 1.978

Certifico que este trabajo ha sido  
realizado en su totalidad por el

Señor FAUSTO HERRERA CHECA

Bruce Hoeneisen

DR. BRUCE HOENEISEN

DIRECTOR DE TESIS

Quito, Marzo de 1.978

A MTS PADRES

P R O L O G O

Cuando el Dr. Bruce Hoeneisen, profesor del Departamento de Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional, me invitó a discutir la posibilidad de elaborar un trabajo de tesis, sobre el diseño y construcción de un Gaussmetro, me interesó vivamente el tema, por cuanto brinda la oportunidad de actualizar los conocimientos y experimentar en la realidad el aprovechamiento del Efecto Hall para medir campos magnéticos en los imanes permanentes o en los entrehierros de los electroimanes.

La tarea de analizar el presente tema, no es fácil porque además de su complejidad, no se dispone del equipo de laboratorio suficiente, que permita profundizar más en la experimentación.

Por lo tanto el presente trabajo pretende inspirar el suficiente interés en los estudiantes generando nuevas inquietudes que contribuyan a desarrollar el afán de la investigación.

Agradezco al Dr. Bruce Hoeneisen, consultor de tesis así como también a los profesores y ayudantes de la Escuela Politécnica que directa o indirectamente contribuyeron a la búsqueda de las soluciones más adecuadas y a llevar a feliz término esta tesis de grado.

FAUSTO HERRERA CH.

INDICE GENERAL

	PAGINA
PROLOGO	V
INTRODUCCION	1
Capítulo Primero.- EFECTO HALL	3
1.1 Generalidades	4
1.2 Efecto Hall	5
1.3 Aplicaciones del Efecto Hall	9
1.3.a Tipo de portadores de la muestra	9
1.3.b Movilidad de los portadores	11
1.3.c Concentración de portadores	13
1.4 El Generador Hall	14
1.5 Aplicaciones de los Generadores Hall	16
1.5.a Instrumento de medida	17
1.5.a.1 Vatímetro electrónico	17
1.5.a.2 Vatímetro para microondas	19
1.5.a.3 Amperímetro de Efecto Hall	20
1.5.a.4 Medida de distancia	23
1.5.a.5 Medida del par de rotación de mo- tores de corriente continua	23
1.5.a.6 Medición de potencia de corrien- tes transitorias	24
1.5.b Como calculador analógico	25

1.5.c	Amplificadores para voltajes o corrientes pequeñas continuas	26
1.6	Utilización de los Generadores como medida de inducción magnética	27
1.7	Características del Generador disponible	28
1.7.a	Un alto voltaje Hall generado	28
1.7.b	Bajo efecto de temperatura	29
1.7.c	Bajo magneto resistencia	30
1.7.d	Linealidad y simetría de la señal	30
1.7.e	Características	31
Capítulo Segundo.- DISEÑO DEL GAUSSMETRO		33
2.1	Especificaciones Generales	34
2.2	Características del Gaussmetro	35
2.3	Alternativas	36
2.4.a	Diagrama de bloques de las diferentes etapas	41
2.4.b	Fuente de corriente	42
2.5	Amplificador	51
2.5.a	Amplificador diferencial	51
2.5.b	Etapas del amplificador diferencial	56
2.5.c	Fuente de corriente constante	59
2.5.d	Etapa final	61

Capítulo Tercero.- REGULADOR DE TENSION Y DISEÑO		
	MECANICO DEL GAUSSMETRO	64
3.1	Fuente regulada de tensión	65
3.2	Transformador	66
3.2.a	Cálculo del transformador	66
3.3	Etapa rectificadora	69
3.4	Filtro	70
3.5	Circuito de regulación	70
3.6	Diseño mecánico del gaussmetro	73
3.7	Las tarjetas	73
3.7.a	Tarjeta de potencia	73
3.7.b	Tarjeta de amplificación	75
3.7.c	Tarjeta de control	78
3.8	Programación del conmutador principal	81
3.9	Punta de Prueba	83
3.10	Diagrama de interconexión de las etapas del gaussmetro	84
Capítulo Cuarto.- CALIBRACION, RESULTADOS EXPERIMENTALES		
	RIMENTALES	86
4.1	Calibración del gaussmetro	87
4.2	Resultados experimentales	92
4.3	Operacion y manejo	102
4.4	Aplicaciones	103

		x
4.5	Conclusiones	103
	Apéndice	104
A - 1	Inducción magnética	105
A - 2	Movilidad de los portadores	106
A - 3	Conductividad eléctrica	107
A - 4	Relaciones magnéticas	109
	BIBLIOGRAFIA	111
	DIAGRAMAS	116

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

En la realización del presente trabajo se dan los pasos adecuados para lograr el diseño de un medidor de intensidad de campos magnéticos (Gaussmetro) sirviéndonos del Efecto Hall.

Un conocimiento ligero y resumido de los principios de operación, propiedades y aplicaciones del Efecto Hall se desarrolla en el primer capítulo.

Con la finalidad de conseguir las medidas de intensidad de campo magnético aprovechando un Generador Hall, se diseñó una fuente regulada de corriente, un amplificador de corriente continua, así como los elementos de control de corriente y ganancia del amplificador. Aspectos que se desarrollan en el segundo capítulo.

Las características mecánicas del instrumento diseñado se trata en el tercer capítulo así como el diseño de su fuente regulada de tensión; mientras que la utilización, calibración y ajuste son tópicos tratados en el capítulo cuarto.

Siendo el gaussmetro un instrumento especialmente útil para el laboratorio, puede ser también utilizado en la industria como sensor magnético.

El gaussmetro tipo de Efecto Hall ha sido diseñado y construido como una colaboración para el laboratorio de la Escuela Politécnica Nacional.

CAPITULO PRIMERO

EFECTO HALL

## 1.1 GENERALIDADES

El nombre de Efecto Hall fue puesto en honor de su descubridor Edmund Hall, el año de 1879. Mientras experimentaba en una placa de oro la naturaleza de las fuerzas que actúan en un conductor que porta una corriente eléctrica, observó que en presencia de un campo magnético se inducía un voltaje perpendicular al conductor.

Algunos experimentadores han continuado estos estudios en conductores eléctricos, las tensiones Hall por ellos obtenidas fueron pequeñas; las tensiones Hall obtenidas en el cobre fueron del orden de 0,024 milivoltios por kilogauss, debido a la moderada velocidad de corrimiento de los portadores con intensidades de corriente moderadas.

Al comenzar a utilizar los semiconductores en dispositivos como diodos, transistores, se pudo observar que se producían tensiones Hall más elevadas a las antes obtenidas en conductores eléctricos, las tensiones fueron del orden

de las décimas de milivoltio por kilogauss, debido a que la velocidad de corrimiento de los portadores son mucho mayores con corrientes e intensidades de campo moderados.

## 1.2 EFEECTO HALL

Si una muestra de conductor o semiconductor por el que circula una corriente  $I$  es colocado en un campo magnético transverso  $B$ , como se indica en la Fig. 1.1, aparece un voltaje  $V_h$  que es perpendicular al campo y perpendicular a la corriente. Este fenómeno se conoce como Efecto Hall y se debe a la redistribución de portadores en la muestra, por la acción combinada de los campos magnético y eléctrico.

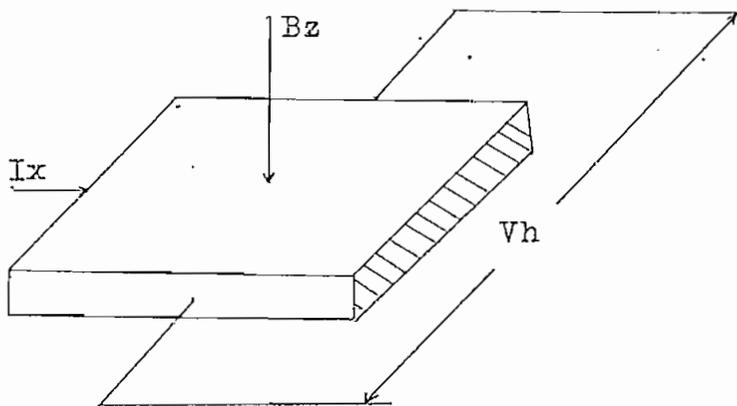


Fig. 1.1

Para explicar este fenómeno consideremos un semiconductor extrínseco tipo n, el cual se encuentra sometido a los campos magnético y eléctrico. El campo magnético actúa sobre los electrones móviles de la muestra, aplicándoles una fuerza (Fuerza de Lorentz), que es perpendicular a la dirección de movimiento de los electrones; esta fuerza produce una deflexión de los electrones y ésta a su vez produce una acumulación de cargas negativas en una de las caras del cristal y una escasez de cargas negativas (exceso de cargas positivas) en la otra cara de la muestra y estas cargas producen un campo eléctrico, de tal forma que la fuerza eléctrica es exáctamente igual y de sentido opuesto a la fuerza magnética. Puesto que las fuerzas magnética y eléctrica se compensan exáctamente, podemos establecer la condición de equilibrio en régimen permanente.

De acuerdo a la Fig. 1.2 y Fig. 1.4 vamos a encontrar una expresión matemática que resuma este efecto.

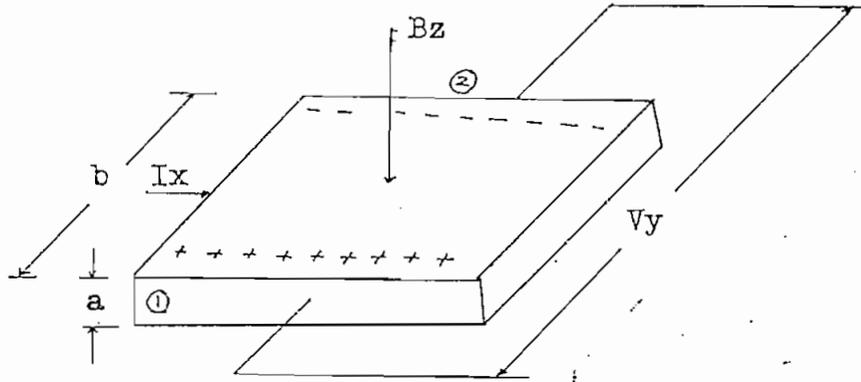


Fig. 1.2

$$(\text{Fuerza magnética})_y = (\text{Fuerza eléctrica})_y$$

$$(e\bar{v}x\bar{B})_y = e\bar{E}_y$$

Con las orientaciones de la figura se tiene:

$$BeVd = e.Ey \quad (1-1)$$

B = Inducción magnética.

e = Carga del electrón.

Vd = Velocidad de corrimiento de los electrones.

Ey = Campo eléctrico creado por la distribución de cargas.

La velocidad de corrimiento de los portadores está

definida como:

$$V_d = \mu E_x \quad (1-2)$$

$\mu$  = Movilidad de los portadores

$E$  = Campo eléctrico creado al circular  $I_c$  a través del cristal.

De la ecuación:

$$(1-1) \quad E_y = BV_d \quad (1-3)$$

Reemplazando: (1-2) en (1-3) se puede encontrar:

$$E_y = \mu E_x B \quad (1-4)$$

Multiplicando ambos miembros de (1-4) por el ancho  $b$  de la muestra:

$$bE_y = b\mu E_x B \quad (1-5)$$

$$V_h = b\mu E_x B \quad (1-6)$$

Constituyendo  $V_h$  la diferencia de potencial en la muestra por la acción de  $E_x$  v  $B$  campos eléctrico y magnético.

### 1.3 APLICACIONES DEL EFECTO HALL

Analizando el Efecto Hall en una muestra semiconductor, nos permite conocer lo siguiente:

#### 1.3.a EL TIPO DE PORTADORES DE LA MUESTRA

Para saber el tipo de portadores existentes en el semiconductor en referencia, únicamente es necesario conocer la polaridad del voltaje Hall, - producido por acción del campo eléctrico y magnético.

Consideremos primero el caso en el cual los portadores son únicamente electrones. Como se indica en la Fig. 1.3, el semiconductor es un paralelepípedo, que tiene un área transversal  $A$  por el cual circula una corriente  $I$  en dirección  $X$ .

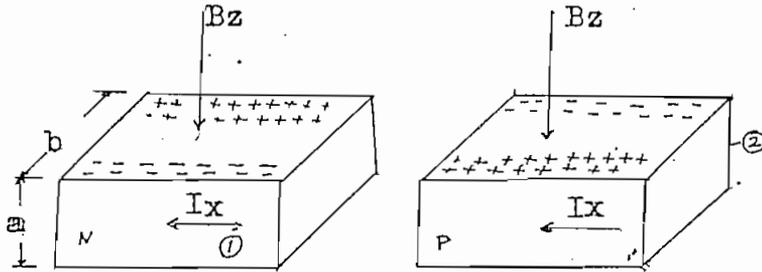


Fig. 1.3

Los electrones tienen una velocidad  $V_x$  en sentido opuesto a la dirección de la corriente; al aplicar un campo magnético  $B_z$ , los electrones experimentan una fuerza que es perpendicular a la velocidad y al campo magnético.

La fuerza magnética produce una deflexión de los electrones que curvan sus trayectorias hacia la cara (1) y esa deflexión a su vez produce una acumulación de cargas negativas en la cara (1) del cristal como se indica en la figura número (1-3) y una escasez de cargas negativas en la cara (2) (exceso de cargas positivas), entonces se produce una diferencia de potencial de una polaridad de-

terminada.

En el segundo caso cuando los portadores son sólo huecos, y hacemos consideraciones similares, podemos concluir que la cara (1) se hace positiva y la cara (2) se hace negativa, produciéndose una diferencia de potencial cuya polaridad es diferente. al caso anterior.

Cuando se encuentran los dos tipos de portadores en cantidades comparables, sus efectos tienden a cancelarse y las mediciones pierden sentido.

### 1.3.b MOVILIDAD DE LOS PORTADORES

El Efecto Hall permite conocer la movilidad de los portadores en una muestra de material semiconductor, midiendo el campo  $E_x$ ,  $E_y$  y  $B_z$ . siendo  $E_x$  creado al circular la corriente  $I_x$ .  $E_y$  el voltaje Hall creado por la redistribución de cargas que aparece en el sentido Y ;  $B_z$  el campo que actúa en sentido Z.

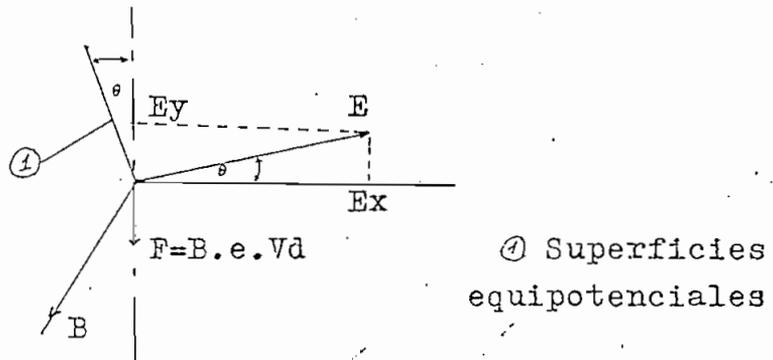


Fig. 1.4

De la ecuación (1-1), en la que, la fuerza magnética es igual a la fuerza eléctrica y se obtiene:

$$eE_y = BeV_d$$

La velocidad de difusión  $V_d$  de los portadores está definida por:

$$V_d = \mu E_x \quad (1-7)$$

$$eE_y = Be\mu E_x$$

$$\mu = \frac{E_y}{BE_x} \quad (1-8)$$

$\mu$  representa la movilidad de los portadores. Las movilidades medidas son movilidades Hall que difieren de las movilidades de corrimiento, porque la velocidad  $V_c$  de corrimiento de los portadores es el valor promediado sobre un intervalo de tiempo grande de las velocidades de corrimiento instantáneas que determinan el Efecto Hall.

Para el Silicio se ha encontrado la relación:

$$1^* \quad \mu = \frac{\mu_H}{1.18} \quad (1-9)$$

La expresión anterior varía de acuerdo al material utilizado y concentración de impurezas; experimentalmente se han encontrado valores de  $\mu_H/\mu$  entre 1 a 1.7.

1\* (Electrónica de los semiconductores, de Paul Ankrum pág. 24, ecuación 1-27).

### 1.3.c CONCENTRACION DE PORTADORES

Se puede determinar la conductividad eléctrica.

$$\sigma = \frac{J}{E} = \frac{NeVd}{E} \quad (1-10)$$

$$V_d = \mu E \quad (1-11)$$

$$\sigma = \mu Ne \quad (1-12)$$

$\sigma$  = Conductividad

J = Densidad de corriente

E = Campo eléctrico

N = Número de portadores/unidad de volumen.

Si medimos la conductividad y al mismo tiempo medimos la movilidad, es posible determinar la concentración de portadores N.

#### 1.4 EL GENERADOR HALL

Es un elemento activo de comportamiento eléctrico, cuya función es generar un voltaje por acción de la corriente que fluye a través del elemento y sobre el cual actúa un campo magnético.

Posee dos pares de terminales; el primero por el cual fluye la corriente, denominado terminal de control; el segundo en el cual aparece el voltaje generado, denominado terminal Hall.

El voltaje obtenido se encuentra dado por la siguiente ecuación:

$$V_h = \frac{R_h I_x B_z}{a} \quad (1-13)$$

$V_h$  = Voltaje Hall =  $V_y$

$R_h$  = Constante Hall

$I_x$  = Corriente de Control

$B_z$  = Intensidad de campo magnético

$a$  = Espesor del generador Hall en el sentido Z.

La ecuación (1-13) ha sido deducida de la ecuación (1-6).

$$V_y = b \mu B_z E_x$$

$$I = J_x \cdot A \quad (1-14)$$

$$A = a \times b$$

$A$  = Area de la sección transversal del generador.

$a$  = Espesor del generador

$b$  = Ancho del generador

$$E_x = \frac{J_x}{\sigma} = \frac{I_x}{a \cdot b} \frac{1}{\sigma} \quad (1-15)$$

$$E_x = \frac{I_x}{ab \mu N_e} \quad (1-16)$$

Reemplazando en la ecuación (1-6) se obtiene:

$$V_H = \frac{I_x \cdot B_z}{N_e \cdot a} \quad (1-17)$$

$$\text{Si : } R_H = \frac{1}{N_e} \quad (1-18)$$

$$V_H = \frac{R_H \cdot I_x \cdot B_z}{a} \quad (1-19)$$

La constante Hall  $R_H = \frac{1}{N_e}$  es una característica del material.

### 1.5. APLICACIONES DE LOS GENERADORES HALL

Un generador Hall bien proyectado y construido puede dar un voltaje Hall muy aproximadamente proporcional al producto de la intensidad de campo magnético por la corriente. Este dispositivo tiene valiosas aplicaciones prácticas, como base

de muchos equipos utilizados tanto en el laboratorio, como en la industria; equipos como:

- Instrumentos de medida.
- Conmutador sin contactos para proveer a las instalaciones, señales de mando y regulación.
- Para modular señales muy pequeñas y de muy baja frecuencia.

#### 1.5.a INSTRUMENTO DE MEDIDA

##### 1.5.a.1 Vatímetro electrónico

Para la construcción de un vatímetro, utilizando un Generador Hall como elemento transductor, es necesario conseguir una inducción magnética y una corriente en el circuito a medirse y así obtener un voltaje Hall, cuyo valor es proporcional a la potencia,

La inducción magnética  $B$ , necesaria para que actúe el dispositivo, se produce por medio de un electroimán con entrehierro, la corriente que circula en la bobina del electroimán es proporcional a la tensión aplicada al circuito a medirse, cuya corriente circula por el generador.

La inducción magnética en un electroiman está dada por la ecuación:

$$B = NI \left( \frac{1}{\frac{L}{\mu} + \frac{\Delta}{\mu_0}} \right) \text{ con } \Delta = \text{entrehierro}$$

y suponiendo que:  $\frac{\mu}{L} \gg \frac{\mu_0}{\Delta}$

se tiene que:  $B = \mu_0 \times \frac{NI}{\Delta}$  (1-20)

$\mu$  = Permeabilidad del medio

$N$  = Número de vueltas

$L$  = Longitud del circuito magnético

$I$  = Corriente que circula.

$\mu_0$ ,  $N$ ,  $\Delta$  Permanecen constantes en el electroiman lo que varía es la corriente, que es proporcional al voltaje aplicado.

$$I = kv \quad (1-21)$$

$$B = Kv \quad (1-22)$$

En la ecuación (1-13) se demuestra que:

$$V_h = \frac{R_h \cdot B \cdot I}{a}$$

Reemplazando en la ecuación anterior (1-22), se ob  
tiene:

$$V_h = \frac{KRh.V.I.}{a}$$

Si cuatro constantes las reunimos en una sóla cons  
tante H.

$$H = \frac{K.Rh}{a}$$

$$V_h = H.V.I \quad (1-23)$$

$$V_h = HP \quad (1-24)$$

#### 1.5.a.2 Vatímetro para Microondas

El generador Hall puede ser utilizado como ba  
se para la construcción de un vatímetro para micro  
ondas.

Para ser usado como tal se debe orientar al -  
elemento, en el campo electromagnético de una guía

de ondas, de tal modo que el campo eléctrico induzca una corriente longitudinal en el dispositivo; al reaccionar corriente y campo en la guía, se genera en el semiconductor en referencia un voltaje Hall que es proporcional a la potencia en la guía de ondas.

### 1.5.a.3 Amperímetro de Efecto Hall

La característica que se trata de conseguir con este instrumento es poder medir la corriente directamente sin necesidad de interrumpir la circulación de la misma y se lo ha conseguido gracias al Generador Hall.

Colocando el generador en el entrehierro de un núcleo magnético en C y disponiendo ésta en torno de una barra portadora de corriente, el movimiento de cargas en la barra crea en el espacio libre que lo rodea un campo magnético, el cual es proporcional a la corriente que circula; el cual incide perpendicularmente sobre el generador como se indica en la Fig. (1.5) y al mante

ner una corriente constante en el elemento a través de una fuente adicional, el dispositivo genera un voltaje proporcional a la corriente que circula por la barra, cuyo valor deseamos conocer.

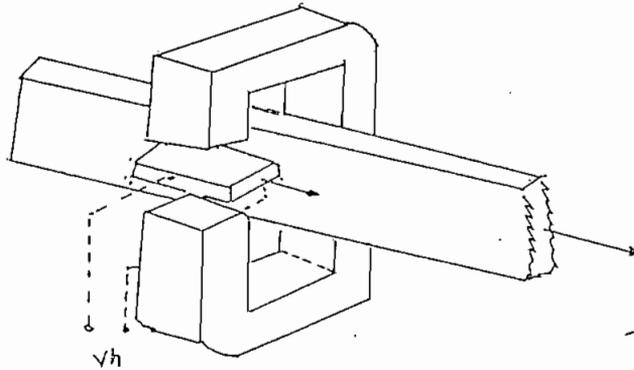


Fig. 1.5

La intensidad de campo creado:

$$B = \frac{\mu_0 i}{\Delta} \quad (1-25)$$

B = Intensidad de campo magnético

i = Corriente que circula por la barra conductora.

$\Delta$  = Entrehierro.

De la ecuación (1-13)  $V_h$

$$V_h = \frac{R_h \cdot B_z \cdot I}{a}$$

$I$  = Corriente que circula por la muestra semiconductoras obtenida de una fuente auxiliar.

Reemplazando el valor de  $B$  en la ecuación (1-13) :

$$V_h = \frac{R_h \cdot i \cdot I \cdot \mu_o}{\Delta}$$

Los factores constantes los hacemos valer  $K$ .

$$K = \frac{R_h \cdot I \cdot \mu_o}{\Delta}$$

Entonces:  $V_h = K_i$  (1-26)

La corriente puede ser medida por la evaluación del voltaje Hall presente. Con este método puede medirse incluso corrientes continuas sin interrumpir el circuito.

#### 1.5.a.4 Medida de Distancia

Se establece un campo magnético y se transmite una corriente constante de control al generador. El voltaje Hall del generador es entonces función de la distancia entre el generador y el polo magnético. De esa manera, el generador puede hacer las veces de indicador de posición.

#### 1.5.a.5 Medida del Torque de Motores de Corriente Continua

El generador Hall ha sido empleado para medir el torque de los motores de c.c. Esto se hace de varias maneras, la más común de las cuales consiste en disponer el generador Hall en el entrehierro, sobre la superficie de una de las piezas polares. Se hace pasar por él una corriente proporcional a la del inducido. Como el torque de una máquina de c.c. es proporcional al producto de la corriente de inducido multiplicada por la densidad del flujo en el entrehierro, el voltaje Hall del generador es propor

cional al torque de la máquina. Colocando el generador sobre el inducido, las variaciones exáctas del flujo magnético pueden determinarse en función de la rotación del inducido.

#### 1.5.a.6 Medición de Potencia de Corrientes Transitorias

A causa de su alta velocidad de reacción, el generador Hall puede emplearse para medir la potencia inherente de las corrientes transitorias. En las curvas relativas a la destrucción de un pararrayos, la elevación brusca de la corriente no coincide con la del voltaje. Para calcular la potencia máxima que se produce en el aparato durante una falla, se multiplican punto por punto, las curvas de voltaje y de corriente. Se aplica al generador Hall el voltaje de falla o parte de ese voltaje y la corriente de falla produce un campo magnético. El voltaje Hall produce entonces en un osciloscopio, un trazo que es resultado de ambos y por lo tanto, proporcional a la potencia instantánea del pulso de falla.

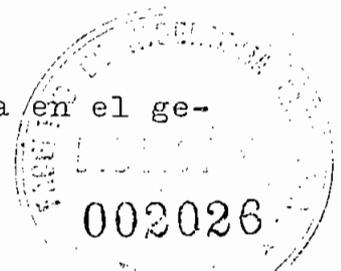
1.5.b COMO 'CALCULADOR ANALOGICO

Aprovechando la propiedad de que el voltaje Hall es proporcional al producto del campo magnético por la corriente, este dispositivo tiene -- ciertas aplicaciones, como elemento para un calculador analógico.

El generador Hall, por ejemplo puede servir para multiplicar directamente dos cantidades -- eléctricas. Una de éstas se expresa en términos de corriente y la otra en términos de campo magnético.

La cantidad eléctrica puede ser asimismo -- elevada al cuadrado por ese elemento analógico.- La cantidad que ha de elevarse al cuadrado se expresamente simplemente en términos de campo magnético y de corriente. En esas condiciones, la aplicación de la cantidad eléctrica al voltaje de salida del aparato da un voltaje Hall proporcional al cuadrado del parámetro de entrada.

Cuando el campo magnético penetra en el ge-



nerador Hall a un ángulo que no sea el de  $90^{\circ}$  respecto de la corriente, el voltaje Hall es proporcional a la componente Z del campo magnético. Esto constituye un método muy preciso y sencillo para la obtención de una analogía eléctrica del seno o coseno de un desplazamiento mecánico rotatorio.

1.5.c AMPLIFICADORES PARA VOLTAJES O CORRIENTES PEQUEÑAS CONTINUAS

Los amplificadores para voltajes continuos de alta sensibilidad necesitan de un modulador a la entrada que transforma la magnitud de corriente continua a ser amplificada a un voltaje alterno proporcional.

Puede utilizarse un generador Hall para la modulación de voltajes o corrientes continuas pequeñas; la magnitud de corriente continua a ser modulada, se alimenta al generador Hall como corriente de control; mientras que la modulación se lleva a cabo por medio de un campo magnético alterno en un circuito magnético abierto,

con una frecuencia de modulación típica de 1KHz.

El modulador desarrollado está libre de efectos termoeléctricos.

#### 1.6 UTILIZACION DE LOS GENERADORES COMO MEDIDA DE INDUCCION

De la ecuación (1-13) podemos observar que la tensión Hall obtenida en los generadores Hall es proporcional al campo magnético si consideramos la corriente y espesor constantes.

$$V_h = \frac{R_h \cdot I_c}{a}$$

$$\frac{R_h \cdot I_c}{a} = h_H \quad (1-27)$$

$$V_h = h_H \cdot B \quad (1-28)$$

Es evidente que se puede utilizar este principio para construir un aparato de medida para campos magnéticos. Esta aplicación es la que nos ocupará en el presente trabajo de tesis.

## 1.7 CARACTERISTICAS DEL GENERADOR DISPONIBLE

Los parámetros considerados para la selección del generador con el propósito de utilizarlo en medida de intensidad de campo, en los entrehierros de los electroimanes son:

### 1.7.a Un alto voltaje Hall generado

Como  $V_h = \frac{R_h \cdot I_x B_z}{a}$  de acuerdo a (1-19) y

$$R_h = \frac{1}{Ne} = \frac{1}{\rho} = \frac{\mu}{\sigma} \quad \gamma \quad (1-29)$$

$$V_h = \frac{\mu}{\sigma} \frac{I_x \cdot B_z}{a} \quad (1-30)$$

Se tiene que, mientras más alta sea la movilidad y más baja la conductividad, mayor será el voltaje Hall generado.

De los cuatro semiconductores más utilizados (Silicio, Germanio, Arseniuro de Indio, Antimoniuro de Indio), el que mayor voltaje Hall genera es el Silicio con 100 mV/KG, como se puede observar en la figura 1.6.

1.7.b Bajo Efecto de Temperatura

En la figura 1.6 muestra las variaciones de voltaje Hall con la temperatura; los generadores de InAs y InAsP, son los que mayor es tabilidad térmica poseen.

El generador utilizado en este trabajo - de tesis es el de InAs.

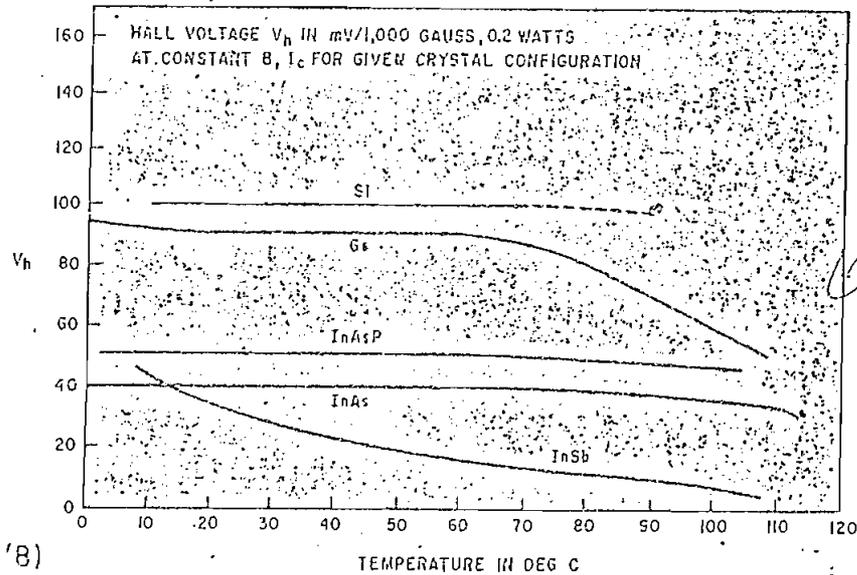


Fig. 1.6

1.7.c Bajo Magnetoresistencia

La resistencia del elemento Hall entre los contactos de corriente depende de la intensidad de campo, ya que ella afecta la movilidad de los electrones en el semiconductor y por consiguiente el voltaje generado.

1.7.d Linealidad y Simetría de la Señal

El voltaje no se debe alterar con el cambio de dirección de la corriente y el campo.

En la figura (1 - 7) se puede observar que los mejores materiales en cuanto a linealidad o simetría son : el Silicio y el Arseniuro de Indio.

Para el diseño del gaussmetro, motivo del presente trabajo se ha utilizado un generador Hall de Arseniuro de Indio.

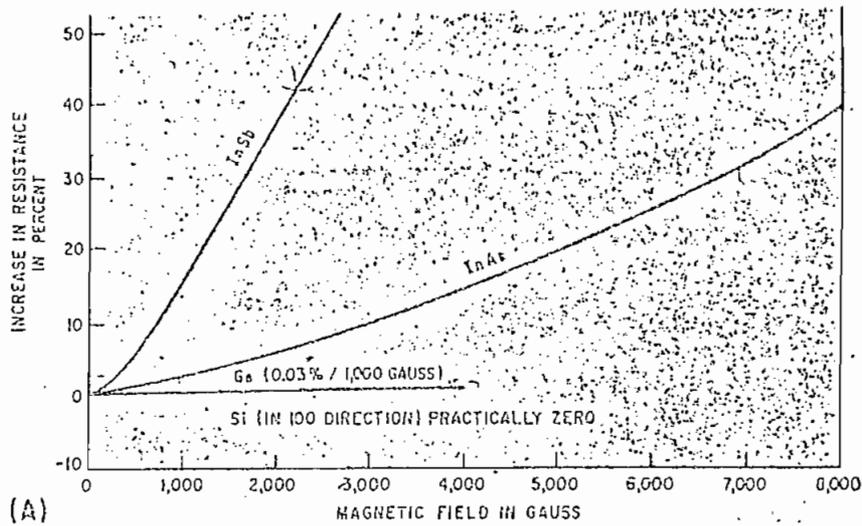


Fig. 1-7

### 1.7.e Características

- Tipo de generador utilizado EA-218 de la Casa SIEMENS.
- Máxima inducción magnética 10 KG.
- Máxima corriente de operación en el aire 100 MA.
- Voltaje inducido con 100 MA y 10 KG 85 MV.
- Resistencia entre contactos de la corriente de control = 3 ohm.
- Resistencia de carga óptima entre los termina-

les de voltaje Hall para obtener la mejor linea  
lidad para el campo de 0 a 10 KG = 6.7 ohm.

- Resistencia entre los contactos Hall = 1.5 ohm.
- Constante Hall = 0,085 V/AKG.
- Material de construcción InAs.

En condiciones normales de operación en un ge  
nerador Hall los terminales Hall pueden ser utili-  
zados como terminales de corriente y viceversa.

Sin embargo este dispositivo no puede ser uti  
lizado como fuente de intensidad de campo.

CAPITULO SEGUNDO

EL GAUSSMETRO

DISEÑO

## 2.1 ESPECIFICACIONES GENERALES

Se ha denominado gaussmetro de Efecto Hall al instrumento que mide campos magnéticos, utilizando un generador Hall como elemento transductor de campo magnético a voltaje continuo.

El funcionamiento del gaussmetro se basa en la amplificación del voltaje inducido por el generador. El voltaje inducido se debe a la acción de la corriente que circula por el dispositivo semiconductor y a la presencia del campo magnético sobre el elemento.

De la ecuación (1-28) se puede concluir -- que el voltaje será directamente proporcional al campo magnético.

El instrumento consiste fundamentalmente de una fuente regulada de corriente, un amplificador de corriente continua y una punta de prueba.

El gaussmetro ha sido diseñado en base a las características del generador Hall disponible.

2.2 CARACTERISTICAS DEL GAUSSMETRO

1. Rangos de variación.

TABLA Nº 2.1

ESCALA	CORRIENTE	VOLTAJE HALL A ESCALA COM- PLETA	1 V. DE SALID. GANANCIA DEL AMPLIFICADOR
10 KG	1 mA	0,85 mV.	1.176
1 KG	10 mA	0,85 mV.	1.176
0.1 KG	100 mA	0,85 mV.	1.176
0.01 KG	100 mA	0,085 mV.	11.760

La tensión de salida del amplificador a esca-  
la completa en todos y cada uno de sus rangos, es  
1 voltio.

2. Tipo de amplificador utilizado.- Amplificador  
diferencial.

3. Excitación del elemento a través de una fuente  
regulada de corriente.

4. Elementos utilizados.- Son de estado sólido.

5. Fuente de alimentación.- 110 voltios a.c. 60 ci  
clos.

6. Variación de la fuente de alimentación =  $\pm 10\%$
7. Consumo de potencia = 4 W.
8. Temperatura de operación  $0^{\circ}\text{C}$ . -  $40^{\circ}\text{C}$ .
9. Instrumento de lectura.- Voltímetro con escala de 0 a 1,5 V.; posee una salida de tensión análoga, cuya finalidad es facilitar el análisis en un osciloscopio.
10. Calibración.- Para la fuente de corriente y ganancia del amplificador.
11. Punta de prueba.- En la cual se aloja al generador Hall.
12. Ajuste para poner en cero la salida, sin inducción magnética.

### 2.3 ALTERNATIVAS

El funcionamiento del gaussmetro está basado en la amplificación del voltaje inducido por el generador, por efecto de la corriente y el campo magnético. Existen configuraciones que pueden ser utilizadas para obtener los fines conseguidos con el presente diseño; nos limitaremos únicamente a citarlos dando una idea general de ellos.

Como fuente de corriente puede ser utilizado el circuito indicado en la figura 2.1.

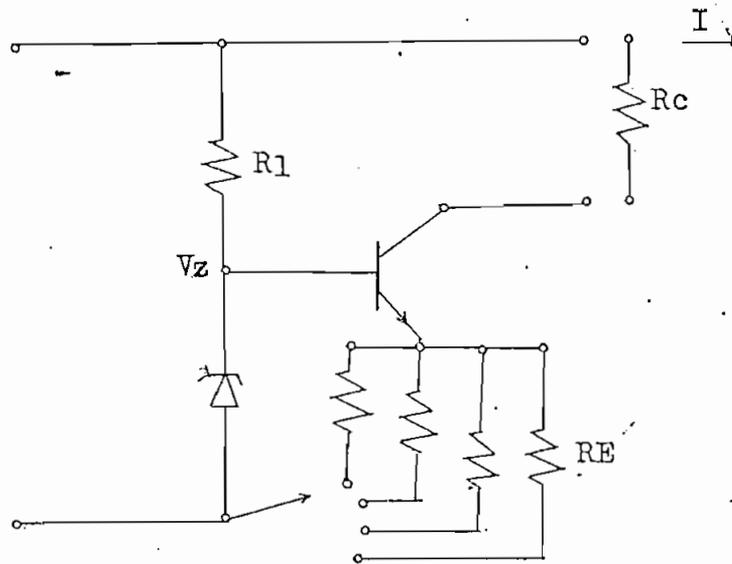


Fig. 2.1

La regulación de corriente se efectúa al fijar el voltaje de base del transistor, fijando éste se tiene un voltaje fijo en el emisor. Intercalando resistencias entre el emisor y el punto común podemos obtener la corriente requerida.

Este circuito se encuentra sujeto a variaciones térmicas de la tensión  $V_{BE}$  entre base y emisor del transistor. Razón por la cual se optó por otro circuito que será indicado posteriormente.

Para amplificar la pequeña señal de voltaje continuo generado por el Hall, cuyo valor está comprendido entre 0 y 0,85 mV.; se necesita de un amplificador de corriente continua con la finalidad de que este voltaje generado pueda ser detectado mediante un voltímetro.

El problema fundamental que presentan estos amplificadores es que la corriente de señal y la corriente de polarización no pueden estar separadas; además la corriente térmica de los transistores es amplificada de tal forma que, es comparable con la señal.

Utilizando un amplificador DARLINGTON como el indicado en la figura 2.2, se obtiene una buena ganancia de corriente y una alta impedancia de entrada; es necesario utilizar un circuito de estabilización lineal, el mismo que tiene como finalidad derivar las corrientes térmicas a través de las resistencias de base de los transistores, para que no sean amplificadas; al utilizar este circuito se disminuye la ganancia de corriente del amplificador.

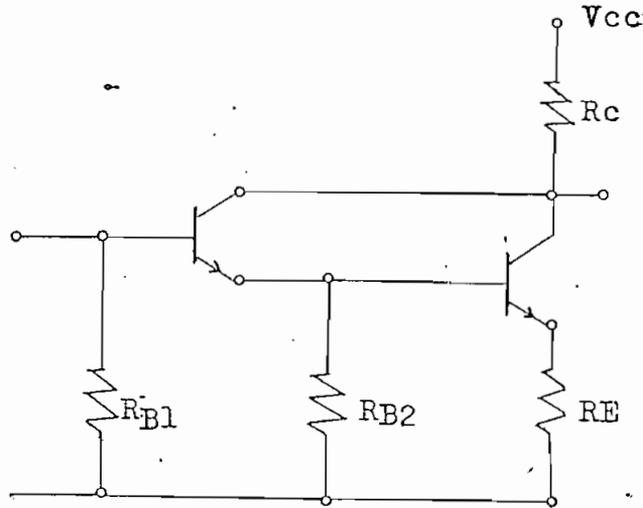


Fig. 2.2

Si se utiliza diodos de compensación térmica por  $R_{B1}$  y  $R_{B2}$ , el amplificador mejora la ganancia de corriente.

Otro amplificador de corriente continua, es aquel que utiliza transistores PNP y NPN como el indicado en la figura (2.3)

En este amplificador la ganancia de corriente es el producto de los  $\beta$  de los transistores y su resistencia de entrada es igual a la de un transistor.

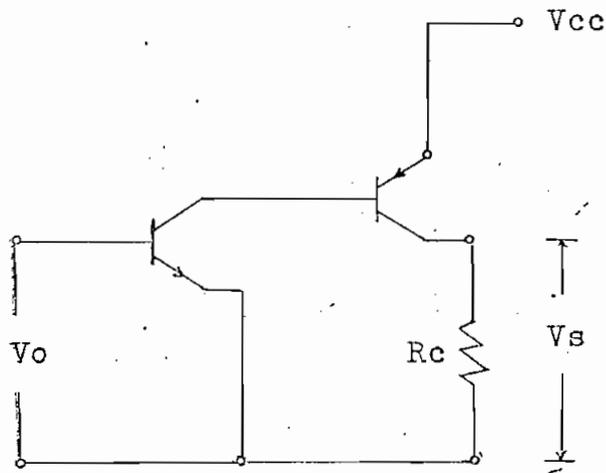


Fig. 2.3

Las corrientes térmicas de esta configuración se las puede disminuir con la utilización de transistores de Silicio; estas corrientes pueden ser derivados o compensados mediante diodos de compensación.

#### PUNTA DE PRUEBA

Como punta de prueba se puede utilizar tam-

bién un generador Hall de Silicio.

## 2.4 DISEÑO DEL GAUSSMETRO

El primer paso, después de tener un generador Hall será disponer de una fuente regulada de corriente, que con la presencia del campo magnético produzca un voltaje lateral en el generador, el cual es necesario amplificarlo.

### 2.4.a DIAGRAMA DE BLOQUES DE LAS DIFERENTES ETAPAS DEL GAUSSMETRO

Representando en forma de diagrama de bloques el gaussmetro queda de la siguiente forma:

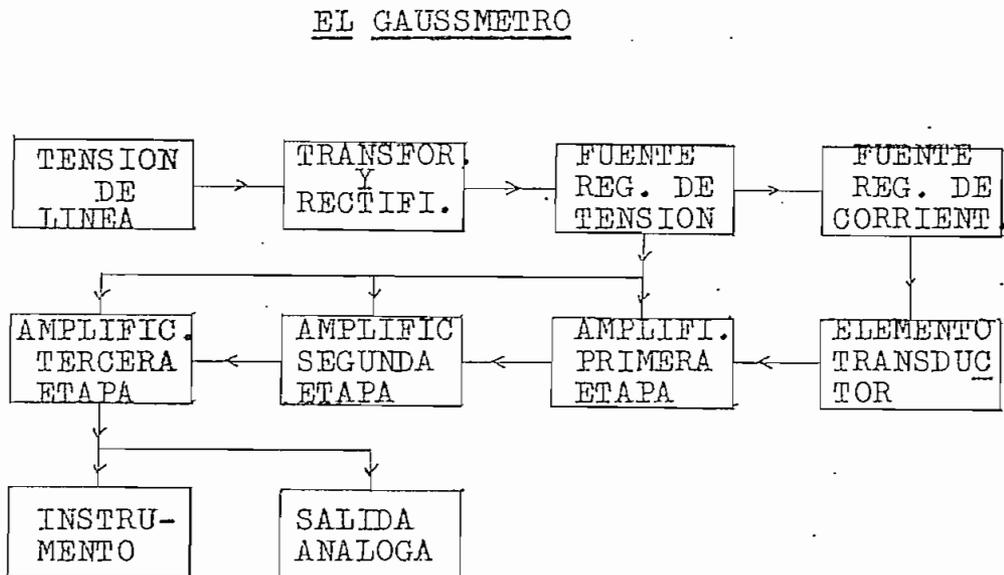


Fig. 2.4

Como se demuestra en la figura 2.4 el gaussmetro consta de:

- a. Tensión de línea.
- b. Rectificador.
- c. Fuente regulada de tensión.
- d. Fuente regulada de corriente.
- e. Elemento transductor.
- f. Amplificador diferencial.
- g. Instrumento de lectura.
- h. Una salida análoga.

Lo referente a tensión de línea, rectificador y fuente regulada de tensión, son tópicos - que serán tratados en el capítulo tercero.

El circuito completo del gaussmetro y los valores de los componentes se muestran en el apéndice; los diagramas de las diferentes etapas se encuentran conforme se explica el diseño.

#### 2.4.b FUENTE DE CORRIENTE

Para mantener la corriente a través del generador Hall, fue necesario diseñar la fuente regulada de corriente, la misma que consta de: carga, referencia, etapas de comparación, amplificación y control.

Como se indica en la figura 2.5 las etapas amplificadora y comparadora están constituidas por los transistores T5 y T6 conectados como amplificador diferencial, el mismo que es empleado para compensar fluctuaciones de corrientes térmicas, y amplificar las variaciones de corriente debidas a los diferentes valores de carga. Compensa cambios de los  $V_{BE}$  de los transistores.

En estos dos transistores, la corriente se reparte de tal modo que la diferencia de potencial entre las dos bases es igual a cero.

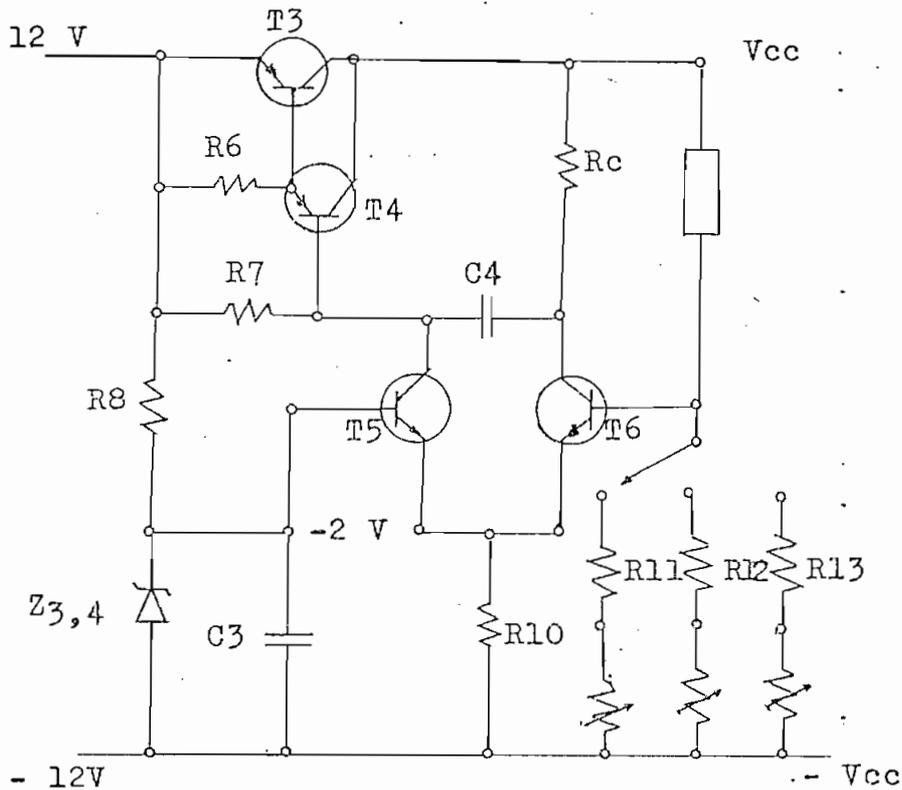


Fig. 2.5

Al fijar el voltaje de base del transistor T5, conectado como amplificador diferencial a  $- 2$  V. respecto a tierra, se fija el voltaje de base del transistor T6 a  $- 2$  V. también, puesto que T6 está en conexión diferencial con T5.

Se ha utilizado dos diodos zener de 5,1 voltios en lugar de uno de 10,2 voltios, ya que el efecto zener y efecto avalancha tienen coeficiente de distinto signo a 5,1 voltios y aproximadamente se cancelan los efectos térmicos.

El voltaje de emisor del amplificador diferencial toma un valor de  $- 2.6$  V. pudiéndose calcular la resistencia de emisor R10, tomando en cuenta que la corriente que circulará por la misma es la suma de las corrientes de colector de los transistores T5 y T6.

Para la selección de los transistores se hicieron las siguientes consideraciones:

Transistor de Silicio NPN.

VCEO = 25 Voltios mínimo.

Ic = 40 mA. mínimo.

VCBO = 25 Voltios mínimo

$\beta$  = 100 mínimo

Estas características cumplen los transistores ECG-123A, marca SYLVANIA o el A5M, marca MOTOROLA.

Al existir un aumento de corriente en la base del transistor T6 del amplificador diferencial, aumenta la corriente del colector de T6, disminuyendo la corriente de colector de T5; perturbación que se aprovecha para excitar la etapa de control.

La etapa de control consiste de dos transistores en conexión Darlington, cuya configuración provee una alta ganancia de corriente.

Un aumento o disminución de la corriente de colector del amplificador diferencial aumenta o disminuye la corriente de base de la conexión Darlington, provocando un aumento o disminución de la corriente de colector del Darlington por variación de la resistencia interna, tan amplia como sea necesaria, para

que la diferencia de tensión en las bases del amplificador diferencial vuelva a ser prácticamente igual a cero.

El problema que presenta la conexión Darling<sup>ton</sup> es el incremento de la corriente térmica  $I_{co}$ . El  $I_{co}$  del transistor T4 se multiplica por el factor de estabilidad y se alimenta a la base del transistor T3.

Este efecto se puede reducir mediante la utilización de transistores de Silicio y la utilización de un circuito de estabilización lineal, ya que las corrientes térmicas son derivadas a través de las resistencias de base y no son amplificadas.

La incorporación de resistencias de estabilización reducen la ganancia del amplificador. Sin embargo seleccionando valores adecuados se puede obtener buenos factores de amplificación.

La conexión Darlington que está constituida

por los transistores T3 y T4, proveen una alta ganancia de corriente.

En el transistor T3:

$$I_{c_3} = \alpha_3 \cdot I_{e_3} \quad (2-1)$$

$$I_{b_3} = I_{e_3} - I_{c_3} = I_{e_3} - \alpha_3 I_{e_3} \quad (2-2)$$

$$I_{b_3} = I_{e_3} (1 - \alpha_3) \quad (2-3)$$

En el transistor T4:

$$I_{c_4} = \alpha_4 I_{e_4} \text{ pero } I_{b_3} = I_{e_4} \quad (2-4)$$

$$I_{c_4} = \alpha_4 I_{b_3} = \alpha_4 I_{e_3} (1 - \alpha_3) \quad (2-5)$$

$$I_{ct} = I_{c_4} + I_{c_3} \quad (2-6)$$

$$I_{ct} = \alpha_3 I_{e_3} + \alpha_4 I_{e_3} (1 - \alpha_3) \quad (2-7)$$

$$I_{ct} = I_{e_3} (\alpha_3 + \alpha_4 - \alpha_3 \alpha_4) \quad (2-8)$$

Por ejemplo para un  $\alpha = 0,98$ ;  $\alpha_3 = \alpha_4$

$$3 : \alpha \text{ eff.} = \frac{I_{ct}}{I_{e_3}} = 0.9996 \quad (2-9)$$

tengo un B.f.f = 2.500

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} = \frac{0.9996}{0.0004} = 2.500 \text{ y } \beta = \frac{I_c}{I_b} \quad (2-10)$$

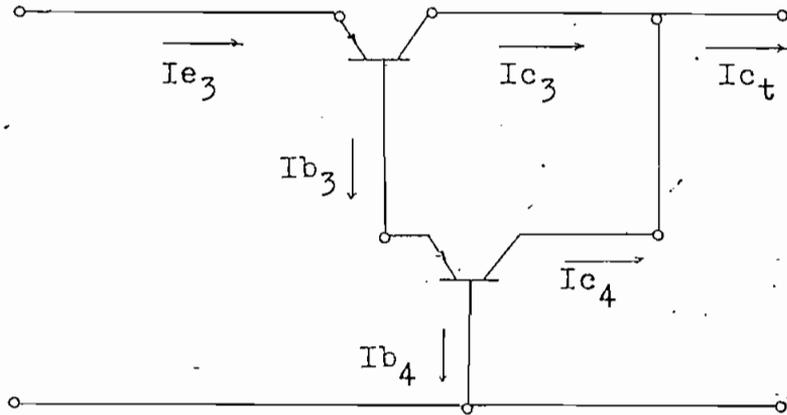


Fig. 2.6

La conexión Darlington, con el circuito de esta bilización quedará de la siguiente forma:

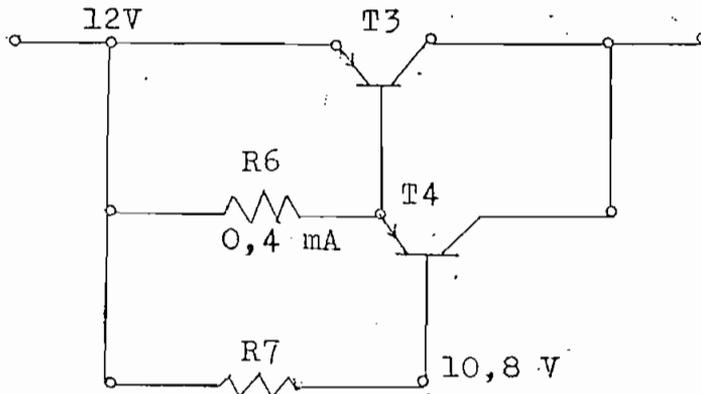


Fig. 2.7

$$R_6 = \frac{0,6 \text{ V.}}{0,4 \text{ mA.}} = 1,5 \text{ K.}$$

$$R_7 = \frac{1,2 \text{ V.}}{0,036 \text{ mA.}} = 33 \text{ K}$$

Los transistores para esta etapa deben cum  
plir las siguientes características:

Transistores de Silicio:

$$V_{CE0} = 25 \text{ Voltios mínimo}$$

$$I_c = 500 \text{ mA.}$$

$$V_{CB0} = 25 \text{ mínimo}$$

$$\beta = 90$$

$$P = 500 \text{ mW.}$$

$$\text{Tipo} = \text{PNP}$$

Estas características cumplen los transisto  
res ECG-129 marca SYLVANIA o el 2N2904 marca MO-  
TOROLA.

Lo importante de las etapas anteriores es

haber logrado mantener un voltaje fijo en las bases del amplificador diferencial y cualquier perturbación se compensa. Luego estamos en posibilidad de poder variar la carga y con ésta variar la corriente; pero una variación controlada.

Los valores de carga a intercalarse entre una de las bases del amplificador diferencial y la fuente -  $V_{cc}$ . son los siguientes:

a. Para  $100 \Omega$

- Voltaje existente = 10 V.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{10 \text{ V}}{100} = 100 \text{ mA.} \quad (2-11)$$

$$P = IV = 100 \text{ mA. } 10 \text{ V.} = 1 \text{ W.} \quad (2-12)$$

b. Para  $1 \text{ K}\Omega$ .

- Voltaje existente = 10 V.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{10 \text{ V.}}{1 \text{ K}} = 10 \text{ mA.}$$

$$P = IV = 10 \text{ mA. } 10 \text{ V.} = 100 \text{ mW.}$$

c. Para  $10 \text{ K}\Omega$

- Voltaje existente = 10 V.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{10 \text{ V.}}{10 \text{ K.}} = 1 \text{ mA.}$$

$$P = IV = 1 \text{ mA.} \cdot 10 \text{ V.} = 10 \text{ mW.}$$

Los valores de corriente obtenidos de 100 mA., 10 mA., 1 mA., son los que excitarán al generador Hall.

## 2.5 AMPLIFICADOR

Nos ocuparemos en esta ocasión del amplificador, puesto que el voltaje continuo generado por el dispositivo Hall en este circuito es de 0 a 8,5 mV.; el cual es necesario amplificarlo para que sea detectado mediante un voltímetro de una sensibilidad de 1 voltio.

El amplificador de acoplamiento directo a ser utilizado es un amplificador diferencial.

### 2.5.a Amplificador Diferencial

Es una clase especial de circuito, cuya función es amplificar la diferencia entre dos señales prescindiendo de sus valores individuales.

El amplificador diferencial diseñado es un amplificador diferencial balanceado de entrada flotante.

Uno de los principales problemas que presenta la amplificación de señales continuas radica en el hecho de que el amplificador es incapaz de distinguir entre el efecto de una señal de entrada y el de una variación de las características de los transistores, tales como ICBO o VBE.

Al utilizar un amplificador diferencial balanceado, las variaciones de este tipo presentes en uno de los transistores se equilibran con los que simultáneamente se producen en el otro.

Basicamente el amplificador utilizado se demuestra en la figura 2.8.

Los transistores son idénticos e igualmente polarizados, los cuales tienen acoplamiento por emisor.

El amplificador posee tres pares de terminales.

les; para la señal de entrada terminales (a - b), para la señal de salida terminales (c - d) y terminales a los cuales se aplica la fuente de poder.

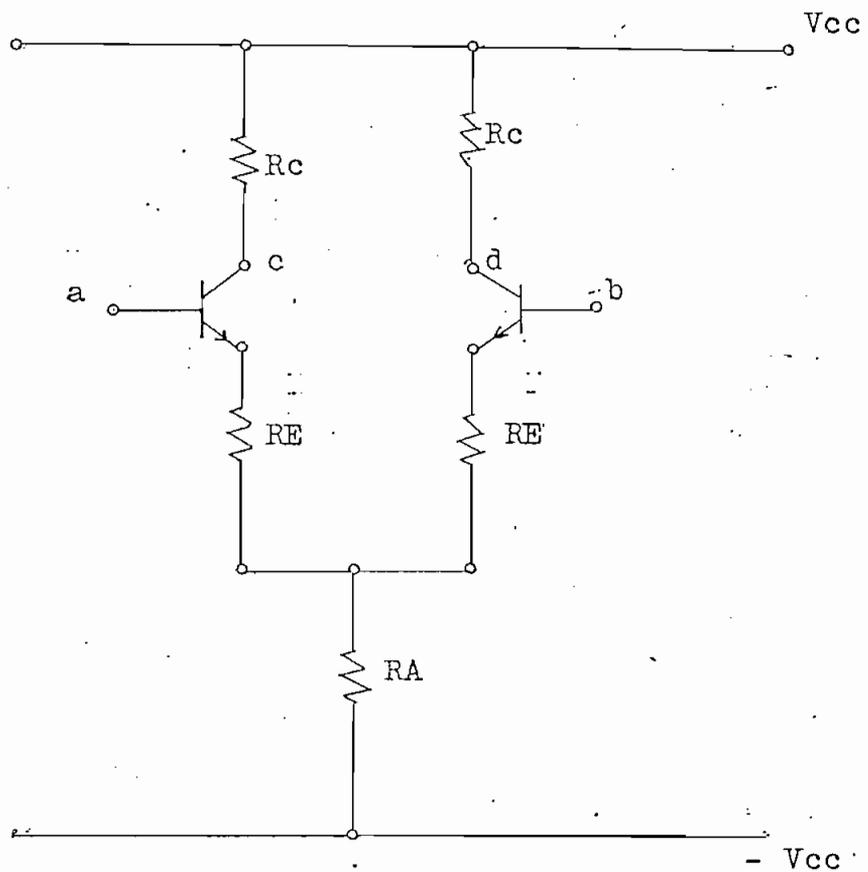


Fig. 2.8

En un amplificador de entrada y salida flotantes, la señal a ser amplificada se la considera - como la diferencia de dos señales individuales  $V_a$  y  $V_b$ ; señales en fase y señales en antifase, que se le denominará señales de modo común y señales de modo diferencial.

Objetivamente, al amplificar señales en fase, la señal resultante es pequeña o nula, cuando en la señal  $V_a$  sea igual a la señal  $V_b$ .

El circuito en consideración puede amplificar indistintamente el modo común y el modo diferencial, por lo tanto debemos procurar reducir al máximo la ganancia de modo común en favor de la ganancia del modo diferencial.

Con la finalidad de reducir la ganancia del amplificador de señales de modo común, se realiza el siguiente análisis:

- a. Aplicando una señal diferencial a los terminales  $V_a$  y  $V_b$  del amplificador, las corrientes de emisor en los transistores, la una corrien

te crece y la otra decrece en cantidades iguales que precisamente se cancelan en la resistencia de acoplamiento  $R_A$ ; puesto que estas corrientes se encuentran en antifase,

b. Aplicando una señal de modo común a los terminales  $V_a$  y  $V_b$  del amplificador, las corrientes de emisor en los transistores crecen, produciéndose cambios aditivos en la resistencia de acoplamiento  $R_A$ , ya que son corrientes en fase; una realimentación negativa de voltaje se desarrolla a través de ella. La resistencia  $R_A$  opera en el circuito como  $2R_A$ , para el modo común.

c. Si  $V_s = (V_{c1} - V_{c2})$ , variación de voltaje entre colectores y del amplificador diferencial. Las ganancias de modo común y modo diferencial se encuentran definidas por las siguientes expresiones:

$$G_D = \frac{V_s}{V_o} = \frac{V_{c1} - V_{c2}}{V_a - V_b} \simeq \frac{R_e}{R_E} \quad (2-13)$$

$$G_C = \frac{V_s}{V_o} = \frac{R_e}{R_E + 2R_A} \quad (2-14)$$

De las expresiones anteriores se puede con-

cluir que para reducir la ganancia de modo común en favor del modo diferencial se debe incrementar la resistencia RA de acoplamiento.

Un incremento de la resistencia RA de acoplamiento se reduce las corrientes de operación de los transistores ya que con una alta resistencia de emisor, tenemos una baja ganancia de corrientes. Este efecto se puede eliminar incrementando la fuente de poder - Vcc al incrementar RA, de tal forma que las corrientes de operación de los transistores permanecen constantes, es decir que el problema se puede resolver disponiendo de un generador de corriente constante. La utilización de un transistor como fuente de corriente constante, provee una alta resistencia dinámica de acoplamiento.

#### 2.5.b Etapas del Amplificador Diferencial

En el cuadro Nº 2-1 se resumió los requerimientos del instrumento en cuanto a ganancia del amplificador.

Con la finalidad de aprovechar al máximo el

generador como elemento transductor, y con ello ampliar el rango del instrumento motivo del presente trabajo, se ha diseñado un amplificador que provea las ganancias de 1.176 y 11.760 que son conseguidos de la siguiente forma:

- a. Las dos primeras etapas del amplificador diferencial proveen una ganancia fija de 470 (etapa con transistores).
- b. La etapa final de amplificación, la cual utiliza un amplificador operacional, provee las ganancias de 2.5 y .25.

En las dos primeras etapas incluyen 6 transistores, dos se encuentran en conexión diferencial para la primera etapa, dos en conexión diferencial para la segunda etapa y los dos restantes se utilizan como generadores de corriente constante en cada una de las etapas.

En la figura ( 2-9 ) se indica estas dos etapas; procurando en cada una de ellas disponer de transistores y elementos de polarización iguales.

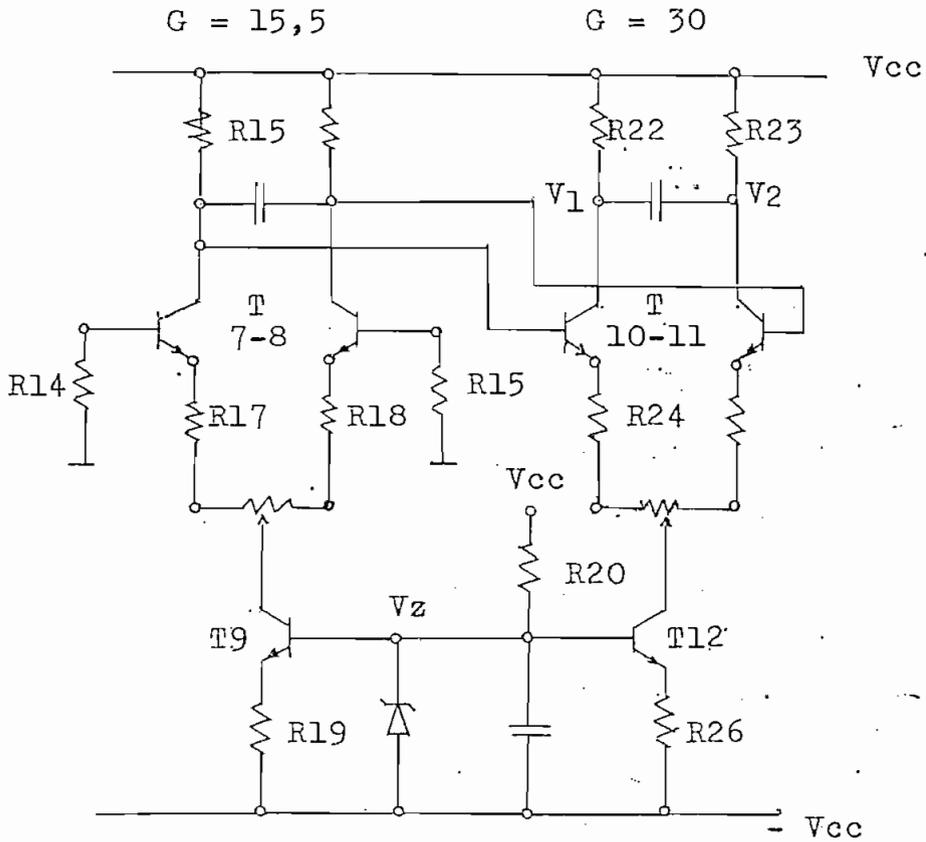


Fig. 2.9

Los transistores utilizados tienen las siguientes características.

Transistores de Silicio

- V<sub>CB</sub> - 50 Vol.
- V<sub>CE</sub> - 40 Vol.
- V<sub>EB</sub> - 5 Vol.

$$I_c = 50 \text{ mA.}$$

$$\beta = 150$$

Estas características cumple el transistor ECG-123A marca SYLVANIA o el M91B marca MOTOROLA.

Con la finalidad de disponer de una buena estabilidad, especialmente en la primera etapa, se ha colocado un par diferencial el MD-8002, transistores T7 y T8, con radiador común y características como las antes descritas, cuyas ganancias son:

$$G_v = \frac{R_e}{(R_E + \frac{1}{2} V_4) + \Delta R} ; R_e = R_{15} \parallel Z_{in}$$

$$Z_{in} = \beta \times R_{24} = 150 \times 22 = 3.3 \text{ K}$$

$$G_v = \frac{656}{(33\Omega + 4\Omega) + 4\Omega} = 15,5$$

### 2.5.c Fuente de Corriente Constante

El transistor T9 es utilizado como fuente de corriente constante, en el cual se ha fijado el voltaje de base por medio de un diodo zener, al fijar el voltaje de base se fija el voltaje de emisor del transistor.

La función de la fuente de corriente constante es proveer una alta impedancia para el acoplamiento de emisores del amplificador y de esta forma proveer un rechazo del modo común.

Se ha colocado una resistencia variable de  $8 \Omega$  en el acoplamiento de emisores de la primera y segunda etapa, con la finalidad de compensar el voltaje entre los terminales Hall, cuando no hay campo magnético y compensar otros desequilibrios del circuito.

Entre los colectores del amplificador va un condensador para reducir la ganancia en alta frecuencia y así evitar posibles oscilaciones.

Para la segunda etapa se realizó consideraciones similares, diseñándose esta etapa para una ganancia de 30.

La ganancia para esta etapa está dada por la expresión:

$$G \approx \frac{R_c}{R_e + \frac{1}{2} V_6} \approx 30 \quad (2-16)$$

\* Nota 1

Para calcular los diferentes componentes en estas etapas se ha procedido de la siguiente forma:

1. Fijando el voltaje de colectores en los transistores T7 y T8 a 4 voltios, se tiene una corriente de colector de 10 mA.

$$\text{Entonces: } R_{15} = \frac{12-4 \text{ V.}}{10 \text{ mA.}} = 800 \Omega$$

En la fuente de corriente constante hemos fijado el voltaje de base del transistor T9, por medio de un diodo zener de 5.1 V., el mismo que se encuentra polarizado por medio de una resistencia de 2.2 K.

$$V_E \text{ en T9} = - 7.6 \text{ V.}$$

$$I_c = 2 I_e \text{ en el transistor T7.}$$

$$R_{19} = \frac{12 - 7.6}{20 \text{ mA.}} = 270 \Omega$$

Los valores de los diferentes componentes se justifican a lo largo del diseño; y sus valores numéricos se detallan en el diagrama adjunto del apéndice; diagrama D-3.

\* Nota 2

Para calcular el valor del capacitor entre los colectores de las diferentes etapas del amplificador diferencial, se ha procedido de la siguiente manera:

$$\text{Ganancia} \approx \frac{820}{22}$$

$$G \approx \frac{820 + \frac{1}{j2\omega c}}{22}$$

Cuando  $G = 1$

$$G = \frac{\frac{1}{2\omega c}}{22}$$

$$\frac{1}{2\omega c} = 22$$

$$c = \frac{22}{2\omega c} = \frac{22}{2.2 \pi \cdot 15 \cdot 10^6}$$

Siendo  $15 \cdot 10^6$  la frecuencia de corte del transistor

$$c = \mu 0,01 \text{ F}$$

Al encontrarse estas dos etapas en cascada la ganancia total es el producto de sus ganancias individuales.

$$G_{T12} = 30,3 \times 15.5 = 470$$

$G_{T12}$  Ganancia total de la primera y segunda etapa.

2.5.d La etapa final del amplificador diferencial se consigue por medio de un amplificador operacional, el cual se conecta como amplificador diferencial.

Los problemas presentes en este circuito, como es el equilibrio de las señales de entrada, se resuelve por medio de la resistencia variable V4 presente en la primera etapa.

La precisión y flexibilidad de esta etapa del amplificador, es el uso de realimentación negativa. Los elementos de realimentación son las resistencias; la precisión de la ganancia está dada por estas resistencias.

El circuito utilizado en esta etapa se demuestra en la figura 2-10.

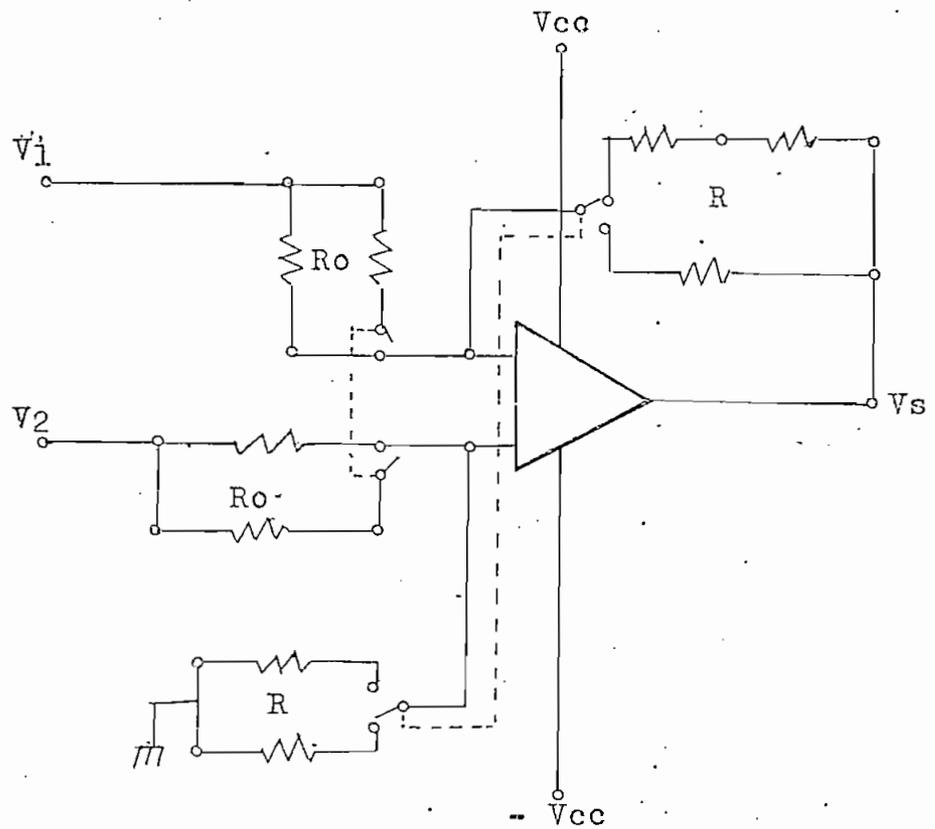


Fig. 2.10

La ganancia para esta etapa esta dada por la expresi3n:

$$G = \frac{R}{R_0} = \frac{V_s}{(V_1 - V_2)} \quad (2-17)$$

$(V_1 - V_2)$  es la señal de salida de las 2 etapas anteriores.

Los valores numéricos de la expresión 2 se demuestran en la tabla Nº 2.2.

TABLA Nº 2.2

GANANCIA DE LA TERCERA ETAPA

<u>GANANCIA</u>	<u>R<sub>0</sub> en K</u>	<u>R en K</u>
2.5	5.6	15
7.5	1.87	15
25	5.6	150
75	1.87	150

Observando la segunda y cuarta fila de la tabla Nº 2.2, se puede concluir que en todas las escalas del gaussmetro se puede incrementar la ganancia del amplificador en un factor de tres, cuya finalidad es dotar de mayor flexibilidad en la utilización del instrumento.

CAPITULO TERCERO

REGULADOR DE TENSION

Y

DISEÑO MECANICO DEL GAUSSMETRO

### 3.1 FUENTE REGULADA DE TENSION

Para tener una fuente de alimentación para las diferentes etapas del gaussmetro tipo de -- efecto Hall, se necesita corriente continua, - procedente de una etapa rectificadora.

La corriente alterna comercial existente en nuestro medio es de 110 voltios aproximada - mente, por consiguiente se necesita un transformador para bajar el voltaje a unos 32 voltios - para que una vez rectificad<sup>os</sup> tener unos 40 vol - tios.

### 3.2 EL TRANSFORMADOR

El transformador es un dispositivo destinado a convertir una corriente alterna en otra alterna, también; de voltaje diferente. Está compuesto de Núcleo, el mismo que está formado de placas de hierro silicoso cuyo papel es concentrar el flujo magnético y dos arrollamientos.

### 3.2.a CALCULO DEL TRANSFORMADOR

Disponiendo de:

- Dimensiones de las chapas de hierro, indicados en la figura 3.1.
- Tensión comercial 110 voltios 60 ciclos.
- Tensión requerida para el secundario 32 voltios.
- Corriente requerida en el secundario 250 mA.
- Densidad de flujo 10 KG.

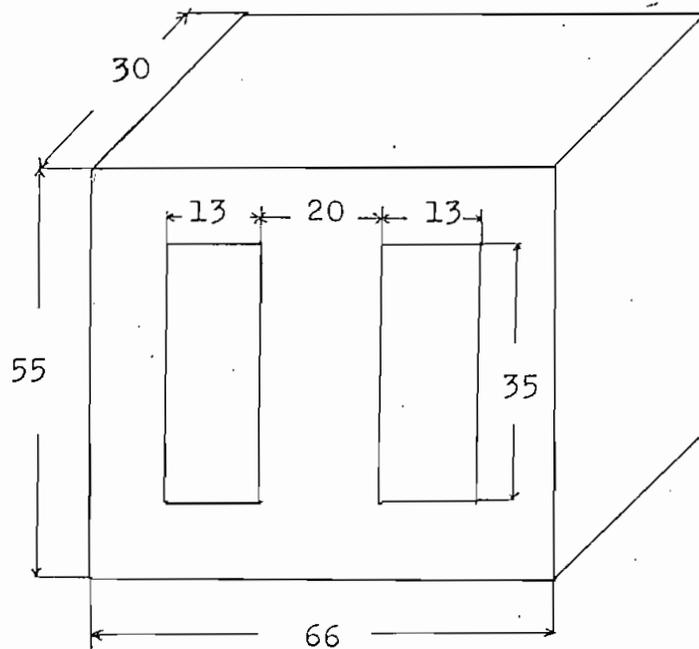


Fig. 3.1

\* Dimensiones en milímetros.

4. Para el diseño del transformador lo primero que debemos determinar es la corriente r.m.s en el secundario y Vdc; ya que depende del valor del capacitor utilizado, porque utilizamos un filtro de entrada capacitiva.

Como datos tenemos:

- Corriente de carga Idc = 250 mA.
- Voltaje de carga 44 voltios; y 22 voltios referido a la toma central del transformador.

$$R \text{ de carga} = \frac{V}{I} = \frac{22}{0,25} = 88$$

Capacitor de 1.000  $\mu$ F.

f = 60 ciclos

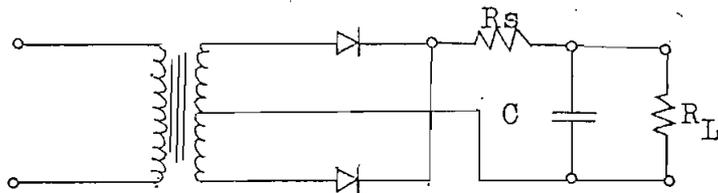


Fig. 3.1 A

$$W.C.R_L = 31$$

\* Las curvas han sido tomadas de Radiotron; curvas 30.5, 30.6, 30.7, 30.8, 30.9; pág. 1.170-80.

$$\frac{R_s}{R_L} = \frac{2}{88} = 0,2 \%$$

\*  $\frac{E_{dc}}{E_p} = 91 \%$  (Curvas Radiotron)

$$V_s = \frac{22}{2 (91\%)} = 16 \text{ V.}$$

\*\* Factor para I r m s es 3 (Curvas Radiotron)

Corriente para el secundario = 375 mA.

2. La potencia del transformador.

$$P = \frac{1}{\eta} V_s I_{r m s}$$

$$P = \frac{1}{0,75} \times 32 \times 375 \text{ mA.}$$

$$P = 16 \text{ Watt.}$$

3. Número de espiras del primario.

$$N_p = \frac{E_p}{4,44 \times f \times A_c \times B \times 10^{-8}}$$

$$N_p = 690$$

$$P = E_p \cdot I_p \times 0,9 \quad I_p = \frac{17}{110 \times 0,9} = 171 \text{ mA.}$$

Se ha escogido alambre # 29 que soporta dicha corriente.

4. Número de espiras del secundario.

$$N_s = 1,05 \frac{E_s}{E_p} \times N_p = 210 \text{ vueltas}$$

$$I_s = 370 \text{ mA.}$$

Se ha escogido alambre # 24 que soporta dicha corriente.

### 3.3 ETAPA RECTIFICADORA

El circuito rectificador doble de onda completa, como el indicado en la Fig. 3.2 está compuesto por 4 diodos; cuya función es convertir la corriente alterna en corriente continua.

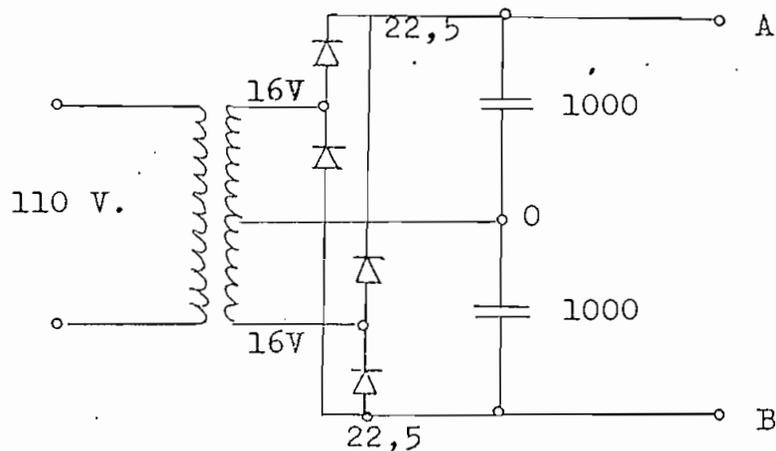


Fig. 3.2

### 3.4 FILTRO

Está compuesto de condensadores cuyos valores utilizados con 1.000 uF para sacar una tensión continua de bajo rizado.

El valor del voltaje rectificado es 22 voltios.

Para determinar el rizado hemos tomado en cuenta los siguientes factores:

$$\frac{R_s}{R_L} = 2 \%$$

$$W.C.R_L = 31$$

Recurriendo a las curvas se obtiene un valor de rizado de 2,3 %.

### 3.5 CIRCUITO DE REGULACION

De los puntos AOB se sacó la alimentación para las etapas del instrumento.

Para tener una regulación de voltaje se requiere de esta etapa, puesto que las fluctuaciones de la fuente primaria de voltaje puede cau-

sar variaciones en el voltaje de salida y una variación del voltaje de salida causaría inestabilidad de operación de los elementos semiconductores de los diferentes circuitos del gaussmetro. Se requiere <sup>+</sup> 12 voltios regulados.

La regulación se la efectúa mediante una regulación controlada de un transistor en serie - que se conoce también como regulador de seguidor de emisor.

El control se efectúa por fijación del voltaje de base del transistor; por medio de un diodo zener de referencia. El voltaje de salida es igual al voltaje de referencia menos el voltaje de base emisor del transistor.

La corriente de base fluye y el transistor conduce lo suficiente permitiendo que el voltaje  $V_{DC} \cdot R_L = V_R$  elevarse a un valor  $V_d$  menos el - voltaje base emisor.

La impedancia interna del regulador sería la impedancia del diodo emisor base.

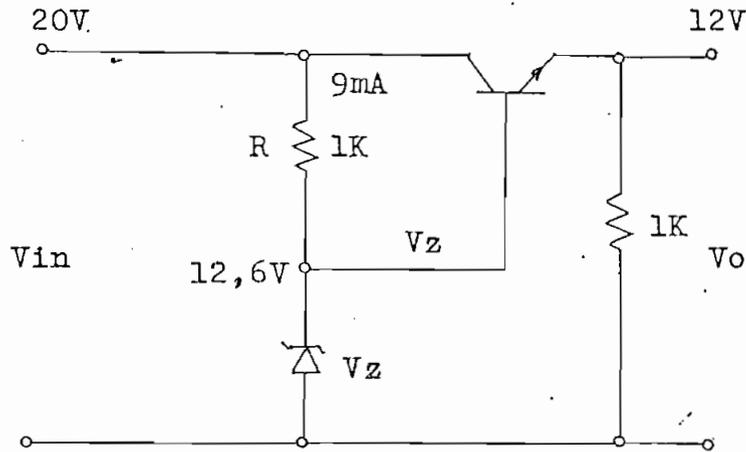


Fig. 3.3

$$V_o = V_z - V_{ce} \quad V_z = 12,6 \text{ Voltios}$$

$$I_B = \frac{I_c}{\beta} \quad V_z - \text{Voltaje zener}$$

$$I_B = \frac{200 \text{ mA}}{55} = 3,5 \text{ mA.}$$

$$I_z = 5 \text{ mA.}$$

$$I_T = 9 \text{ mA}$$

$$R_l = \frac{V_R - V_z}{I_T} = \frac{20 - 12}{9} = \frac{7,8}{9} = 0,8 \text{ K}$$

Ponemos 1 K como R de polarización. Tam-

bién se ha puesto una resistencia R3 entre colector y tierra, cuya finalidad es derivar la corriente del colector del transistor, al faltar la resistencia de carga; y tiene un valor de  $1\text{ K}\Omega$

El circuito completo se indica en el apéndice, gráfico D-1.

### 3.6 DISEÑO MECANICO DEL GAUSSMETRO

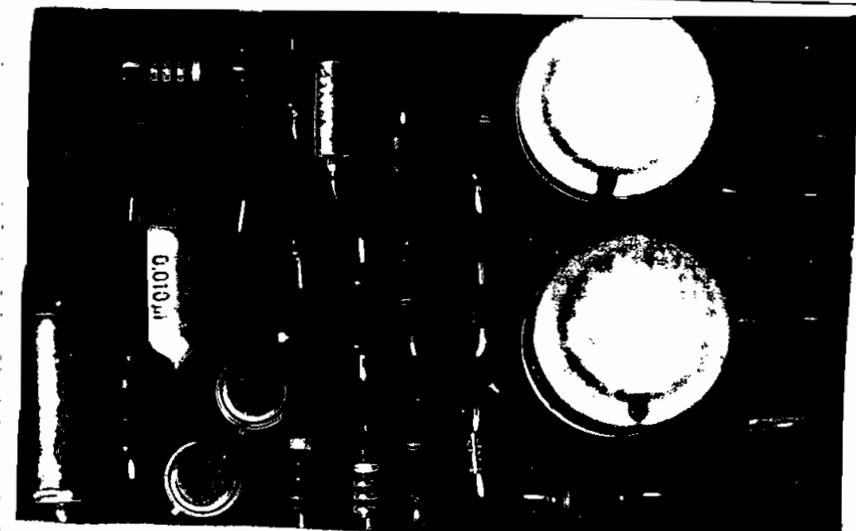
El gaussmetro ha sido proyectado y construído en tres tarjetas, un instrumento de lectura y una punta de prueba.

### 3.7 LAS TARJETAS

#### a. De Potencia:

En esta tarjeta se encuentra todo lo referente a fuente regulada de tensión y fuente regulada de corriente.

La fotografía muestra esta tarjeta con sus diferentes componentes del circuito.



Vista superior de la tarjeta de Potencia.

Los circuitos correspondientes a esta tarjeta se encuentran en el apéndice adjunto.

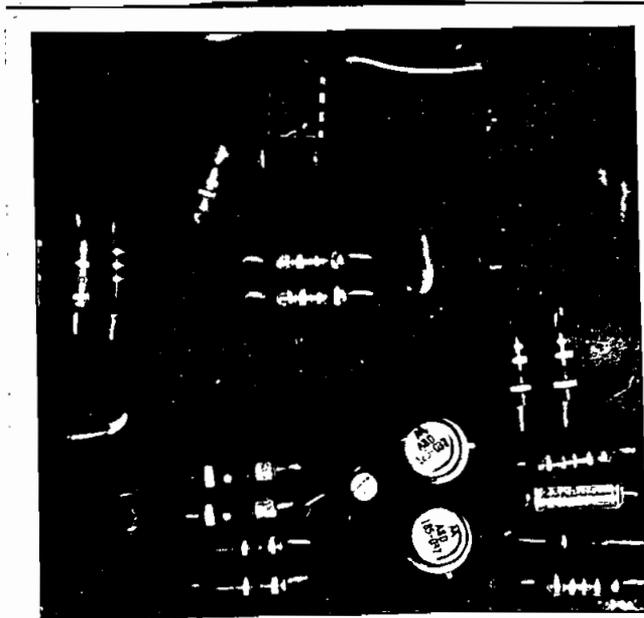
La construcción de ésta, para el montaje de elementos se realizó mediante circuitos impresos.

La figura 3.4 demuestra la disposición de los elementos en la tarjeta.



pas del amplificador diferencial y la tercera etapa que se obtiene a través de un operacional.

La fotografía muestra las diferentes etapas de amplificación.



Vista superior de la tarjeta de amplificación.

La construcción de esta tarjeta, para el montaje de elementos se realizó mediante circuitos impresos.

La figura 3.5 demuestra la disposición de los elementos en esta tarjeta.

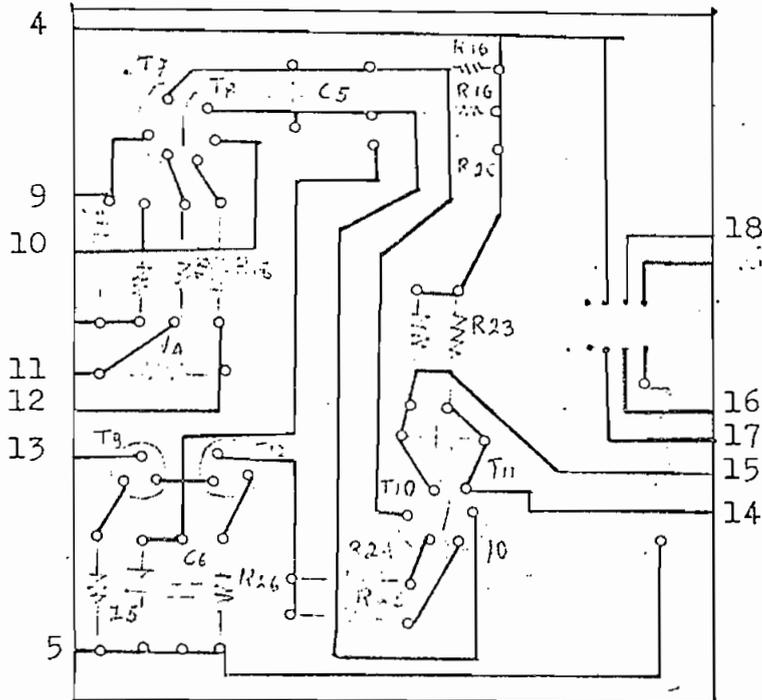


Fig. 3.5

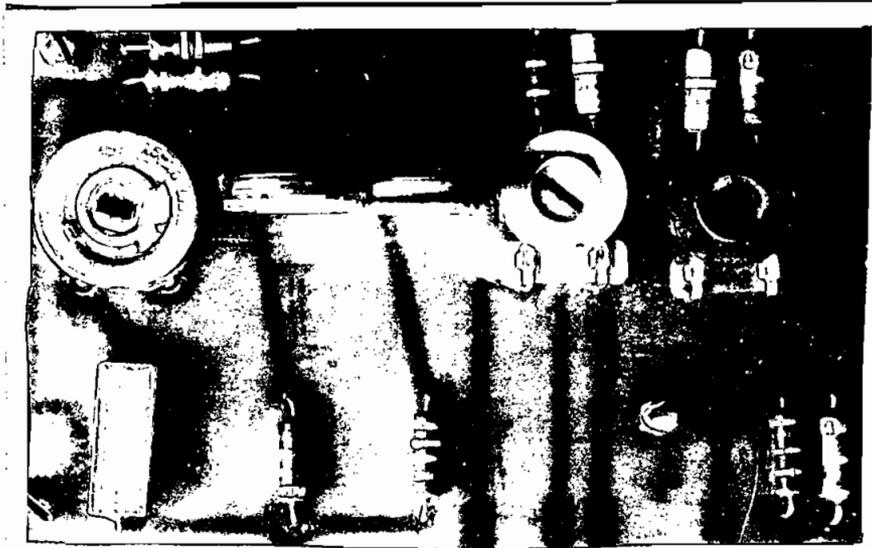
Los puntos 9-10 corresponden al voltaje a ser amplificado; 11-12 salida de las resistencias de emisor para ser equilibrados, por medio de dos potenciómetros, localizados en el panel frontal\* del instrumento; el punto 13 está conectado entre el punto central del potenciómetro y el colector del transistor, que se encuentra formando la fuente de corriente constante. Los puntos 14 - 15, salidas de las 2 primeras etapas del amplificador diferencial; 16-17 puntos de entrada de señal para el amplificador operacional; el punto 18 constituye la salida del amplificador.

\* y posterior

c. De Control

Su finalidad es mantener el nivel de corriente a través del generador Hall, de acuerdo a la escala seleccionada y de igual forma el nivel de ganancia requerida; por la combinación de resistencias y potenciómetros.

La fotografía muestra los diferentes componentes de esta etapa.



Vista superior de la etapa de control.

La figura 3.6 demuestra la disposición de los elementos en la tarjeta.

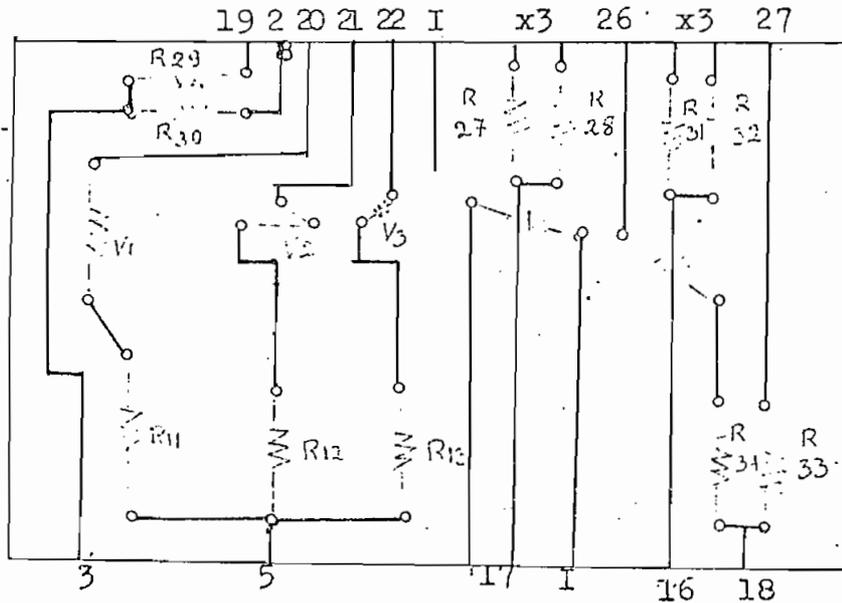


Fig. 3.6

El punto de entrada 3 en esta tarjeta conecta las resistencias de  $15\text{ K}\Omega$  y  $150\text{ K}\Omega$ . cuyas salidas son los puntos 19 y 28, que son conmutados por medio de S5 a la entrada 16 de la etapa operacional.

El punto 18 salida del amplificador operacional alimenta a las resistencias de  $15\text{ K}\Omega$  y  $150\text{ K}\Omega$ , cuyas salidas son los puntos 26 y 27, las mismas que

son conmutadas por medio de S6 a la entrada 17 del amplificador operacional. Estas resistencias son las resistencias de realimentación del amplificador operacional.

Los puntos 16 y 17 conectan a las resistencias de  $5.6\text{ K}\Omega$ , conectadas en serie entre el amplificador diferencial y la entrada del operacional; junto a cada una de estas resistencias de  $5.6\text{ K}\Omega$ , existe una resistencia de  $3.3\text{ K}\Omega$  (puntos x3) que pueden ser conectadas en paralelo a las de  $5.6$ , por medio de los conmutadores S3 y S4 en forma simultánea. Su finalidad es reducir la resistencia de entrada del amplificador operacional, para mejorar la ganancia.

La entrada 5 alimenta a tres resistencias:

- Una resistencia de  $68\Omega$  más una variable de  $20\Omega$  con la finalidad de proveer  $100\text{ mA}$ . en la escala de corriente.
- La resistencia de  $680\Omega$  más una variable de  $1\text{ K}\Omega$  punto 21; su finalidad es proveer  $10\text{ mA}$ . de corriente.
- Finalmente en el punto 22 existe la resistencia

de 8.2 K $\Omega$  más una variable de 10 K $\Omega$ , su finalidad es proveer 1 mA.

Estas resistencias son conmutadas al punto 8 por medio de S2.

Con la finalidad de obtener una relación lógica entre corriente y ganancia del amplificador se ha programado un conmutador de 4 posiciones y 3 rangos; cuya programación se detalla en el cuadro 3.7.

### 3.8 PROGRAMACION DEL CONMUTADOR PRINCIPAL.

La figura 3.7 indica que el conmutador principal consta de 3 secciones con 4 posiciones, los mismos que se mueven simultáneamente con el movimiento de la barra principal.

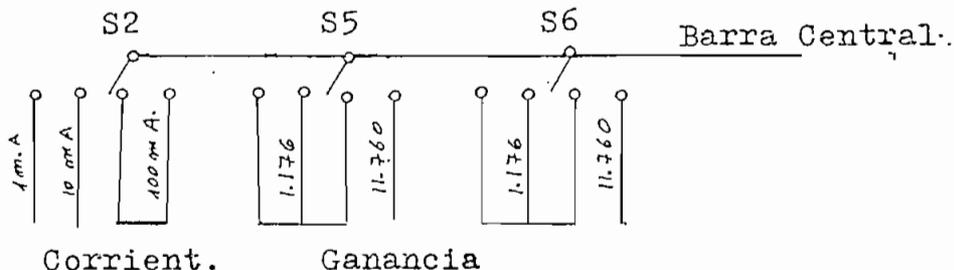


Fig. 3.7

TABLA Nº 3.1

PROGRAMACION DEL CONMUTADOR PRINCIPAL

TOPICO CONMUTADOR	POSICION	CORRIENTE	GANANCIA
S2	1	1 mA	
	2	10 mA	
	3	100 mA	
	4	100 mA	
S5	1	- -	1.176
	2	- -	1.176
	3	- -	1.176
	4	- -	11.760
S6	1	- -	1.176
	2	- -	1.176
	3	- -	1.176
	4	- -	11.760

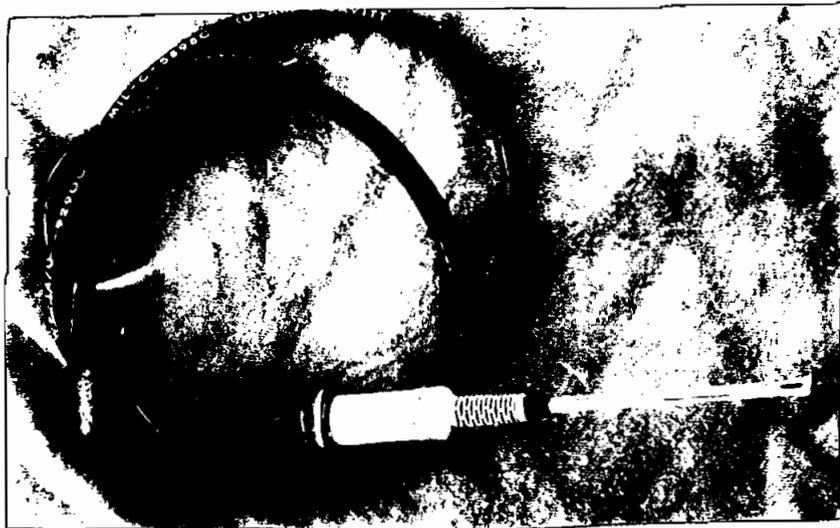
\* S3 y S4 en la posición xl, proporciona la ganancia

cia antes indicada. Los conmutadores S3 y S4 en la posición x3, tiene la ganancia anterior multiplicada por tres.

En el punto I de la tarjeta de control existe el potenciómetro de 1 K $\Omega$ ; R39, cuya finalidad es proteger al instrumento de lectura.

### 3.9 Punta de Prueba

Ha sido construída, disponiendo del genera-  
dor de InAs, el mismo que es protegido por una en  
voltura de cristal.



La fotografía muestra la punta de prueba construída.

DIAGRAMA DE INTERCONEXION DE LAS ETAPAS DEL GAUSSMETRO

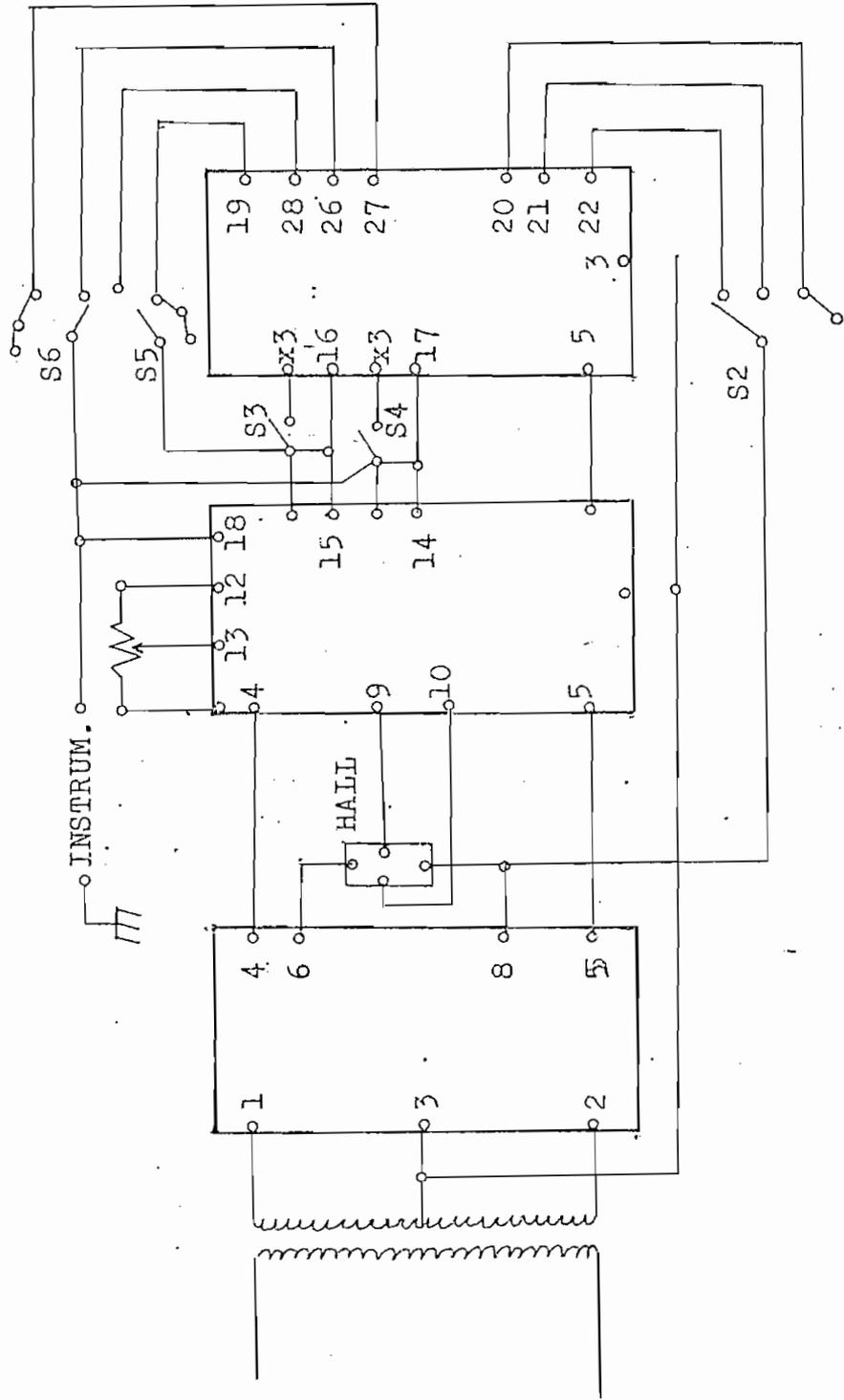
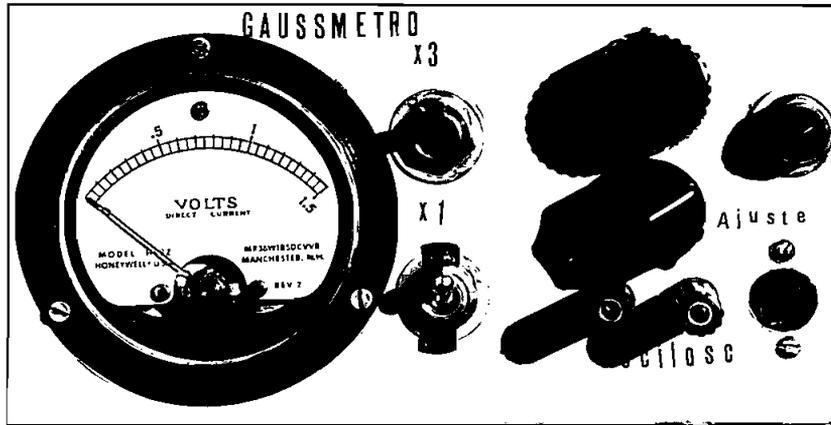


Fig. 3.8



La fotografía muestra el gaussmetro construido.

CAPITULO CUARTO

CALIBRACION DEL GAUSSMETRO

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y CONCLUSIONES

#### 4.1 CALIBRACION DEL GAUSSMETRO

Para calibrar este instrumento es necesario disponer de un patrón de calibración; el mismo que se encuentra representado en la figura 4.1.

El patrón de calibración consta de una fuente regulada de corriente y un transformador grande con entrehierro.

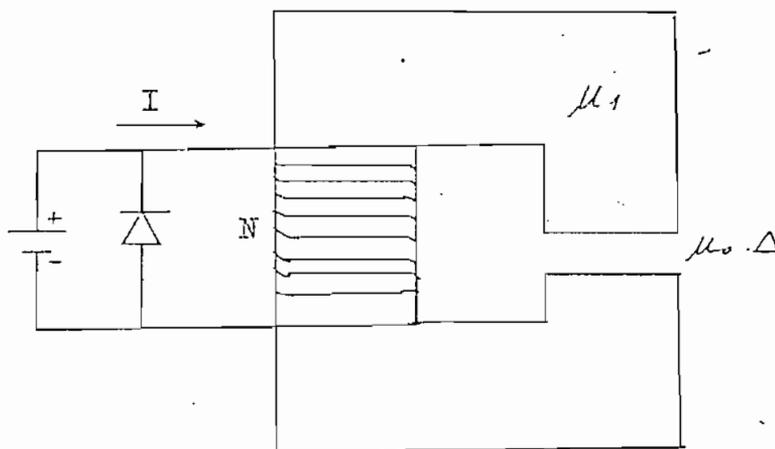


Fig. 4.1

Como datos disponibles del patrón de calibración tenemos:

1. Número de vueltas -  $N$

2. La inducción magnética.
3. Permeabilidad del hierro  $\mu_1$
4. Permeabilidad del aire  $\mu_0$
5. Longitud del entrehierro

$$NI = \oint H dL = H_i L + H_{\Delta} \Delta$$

$$NI = H_i L + H_{\Delta} \Delta$$

$$NI = \frac{BL}{\mu_1} + \frac{B \Delta}{\mu_0}$$

$$NI = B \left( \frac{L}{\mu_1} + \frac{\Delta}{\mu_0} \right)$$

$$B = NI \left( \frac{L}{\frac{1}{\mu_1} + \frac{\Delta}{\mu_0}} \right)$$

Las características del transformador son:

Tipo = 56215

Marca = LEY BOLD

N = 1.000 vueltas

Imax = 1.25 Amperios

Longitud del transformador = 60 cm.

Area del transformador =  $5 \times 5 = 25 \text{ cm}^2$ .

Largo del entrehierro  $\Delta = 4 \text{ mm}$ .

El circuito empleado para la calibración se encuentra indicando en la figura 4.1.

Los equipos utilizados en la calibración se demuestran en el diagrama de bloques.

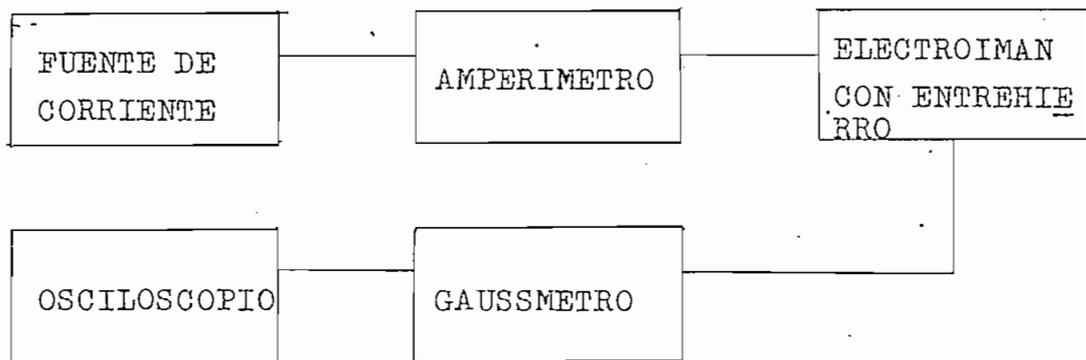


Fig. 4.2

Para su calibración se tuvo que realizar los siguientes cálculos:

$$\Delta = 4 \text{ mm.}$$

$$\mu_0 = \frac{4\pi}{10^7} \frac{\text{Weber}}{\text{Amp.m.}}$$

$$I = \frac{B \left( \frac{L}{\mu_1} + 2 \frac{\Delta}{\mu_0} \right)}{N}$$

Se coloca 2  $\frac{\Delta}{\mu_0}$  puesto que al efectuar la medida se crea 2 entrehierros de longitud  $\Delta$  en el electroimán.

Justificación matemática para 1 KG.

$$\left( \frac{L}{\mu_1} + 2 \frac{\Delta}{\mu_0} \right) = \frac{0,6}{6000\mu_0} + 2 \frac{4 \cdot 10^{-3}}{\mu_0} =$$

$$I = \frac{10^{-1} 8.15 \times 10^4}{4 \pi \times 10^3} = 648 \text{ mA.}$$

Como 2  $\frac{\Delta}{\mu_0} \gg \frac{L}{\mu_1}$ , la calibración no depende significativamente de  $\mu_1$ .

Para 1 KG se requiere una corriente de 648 mA.

Para 10 KG se requiere una corriente de 6,48 A.

Para 100 Gauss se requiere una corriente de 64,8 mA.

Para 10 Gauss se requiere una corriente de 6,48 mA.

$$10 \text{ KG} = 10.000 \text{ gauss} = 1 \text{ weber/m}^2$$

$$1 \text{ KG} = 1.000 \text{ gauss} = 10^{-1} \text{ weber/m}^2$$

$$0,1 \text{ KG} = 100 \text{ gauss} = 10^{-2} \text{ weber/m}^2$$

$$0,01 \text{ KG} = 10 \text{ gauss} = 10^{-3} \text{ weber/m}^2$$

La calibración del instrumento se realizó de la siguiente manera:

1. Al tener  $B = 0$  se buscó el cero del gaussmetro con el potenciómetro de ajuste y con el potenciómetro de ajuste fino.
2. Según la escala que se desea calibrar se coloca la corriente antes calculada en el transformador y observamos el voltaje generado y amplificado en la salida del gaussmetro; si el valor del voltaje difiere de 1 voltio, se ajusta la corriente por medio del potenciómetro localizado en la tarjeta de control hasta conseguir el valor deseado; o sea 1 voltio.

En la tarjeta de control se encuentran localizados el ajuste para 100, 10 y 1 mA. corresponden

diendo estas corrientes a las escalas de 10, 1 y 0,1 KG, la corriente de 100 mA. también corresponde a la escala 0,01 KG; esta etapa se calibra por medio del ajuste de ganancia, potenciómetro ubicado en la tarjeta de control.

En la presente calibración nos hemos visto limitados por lo siguiente:

No se pudo calibrar en forma directa la escala de 10 KG puesto que el transformador utilizado para este fin, no soporta dicha corriente; y por no disponer también en el laboratorio una fuente que genere la corriente de 6.48 Amp. necesarios para la calibración en este rango. Razón por la cual se tuvo que calibrar en forma aproximada con la escala de 1 KG.

#### 4.2 RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las tablas que a continuación se detallan han sido elaboradas con diferentes valores de corriente, suministradas al transformador de calibración.

Los valores de corriente y voltajes calculados para el circuito completo se demuestran en el gráfico adjunto D-2; mientras que los valores medidos teniendo encendido el instrumento (voltaje de salida 0 con  $B = 0$ ) se indican en el gráfico D-3; adjunto - también se encontrará el gráfico D-4, en el cual se muestran todos los valores de corrientes y voltajes del gaussmetro a escala completa (1 voltio de salida).

El funcionamiento del instrumento se puede resumir en las siguientes tablas:

a. Corriente

TABLA Nº 4.1

VALORES DE CORRIENTE DEL GAUSSMETRO

ESCALA	1 mA.	10 mA.	100 mA.
TOPICO			
CORRIENTE CALCULADA EN mA.	0,68 - 1.6	6.8 - 16	85 - 100
CORRIENTE MEDIDA EN mA.	0.85 - 1.5	8.5 - 16	85 - 100

b. Campo Magnético

1. Para 0,01 KG.

TABLA Nº 4.2

VALORES OBTENIDOS EN LA CALIBRACION DE LA ESCALA DE 0,01 KG.

TOPICO	VALORES CALCULADOS	VALORES MEDIDOS
Corriente en el elemento	100 mA.	100 mA.
Corriente en el Transformador para 0,01 KG.	6,48 mA.	6,5 mA.
Ganancia del Amplificador	11.760	11.780
Voltaje de salida en el instrumento	1 V.	1 V.
Voltaje en la salida analoga	1 V.	1 V.
Voltaje de salida conmutador posición X 3	3 V.	3 V.

\* La corriente en el transformador mencionada, se refiere al transformador de calibración.

TABLA Nº 4.3

VOLTAJES OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES DE 1 GAUSS A  
10 GAUSS

<u>CORRIENTE EN EL TRANS</u> <u>FORMADOR DE CALIBRAC.</u>	<u>VOLTAJE DE SALIDA</u> <u>EN EL INSTRUMENTO</u>
0	0
0,6 mA. (1 g)	0,1 V.
1,2 mA. (2 g)	0,2 V.
1,8 mA. (3 g)	0,3 V.
2,4 mA. (4 g)	0,4 V.
3,0 mA. (5 g)	0,5 V.
3,6 mA. (6 g)	0,6 V.
4,2 mA. (7 g)	0,7 V.
4,8 mA. (8 g)	0,8 V.
5,5 mA. (9 g)	0,9 V.

2. Para 0,1 KG

TABLA Nº 4.4

VALORES OBTENIDOS EN LA CALIBRACION DE LA ESCALA DE  
0,1 KG.

TOPICO	VALORES CALCULADOS	VALORES MEDIDOS
Corriente en el elemento	100 mA.	100 mA.
Corriente en el Transformador para 0, 1 KG.	64,8 mA.	65 mA.
Ganancia del Am plificador	1.176	1.180
Voltaje de Sali da en el instrü mento	1 V.	1 V.
Voltaje en la sa lida análoga	1 V.	1 V.
Voltaje de sali da con el conmu tador en la posi ción X 3	3 V.	3 V.

TABLA Nº 4.5

VOLTAJES OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES DE 10 GAUSS A  
100 GAUSS

<u>CORRIENTE EN EL TRANS</u> <u>FORMADOR DE CALIBRAC.</u>	<u>VOLTAJE DE SALIDA</u> <u>EN EL INSTRUMENTO</u>
6.5 mA. (10 g)	0,1 V.
12 mA. (20 g)	0,2 V.
18 mA. (30 g)	0,3 V.
24 mA. (40 g)	0,4 V.
31 mA. (50 g)	0,5 V.
37 mA. (60 g)	0,6 V.
45 mA. (70 g)	0,7 V.
50 mA. (80 g)	0,8 V.
57 mA. (90 g)	0,9 V.

3. Para 1 KG

TABLA Nº 4.6

VALORES OBTENIDOS EN LA CALIBRACION DE LA ESCALA DE  
1 KG

<u>TOPICO</u>	<u>VALORES CALCULADOS</u>	<u>VALORES MEDIDOS</u>
Corriente en el elemento	10 mA.	10,8 mA.
Corriente en el Transformador para 1 KG.	648 mA.	650 mA.
Ganancia del <u>Amplificador</u>	1.176	1.180
Voltaje de <u>Sali</u> da en el <u>instru</u> mento	1 V.	1 V.
Voltaje en la salida análoga	1 V.	1 V.
Voltaje de <u>Sali</u> da con el <u>commu</u> tador X 3	3 V.	3 V.

TABLA Nº 4.7

VOLTAJES OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES DE 0,1 A 1 KG.

<u>CORRIENTE EN EL TRANS</u> <u>FORMADOR DE CALIBRAC.</u>	<u>VOLTAJE DE SALIDA</u> <u>EN EL INSTRUMENTO</u>
65 mA. (0,1 KG)	0,1 V.
125 mA. (0,2 KG)	0,2 V.
190 mA. (0,3 KG)	0,3 V.
255 mA. (0,4 KG)	0,4 V.
315 mA. (0,5 KG)	0,5 V.
380 mA. (0,6 KG)	0,6 V.
430 mA. (0,7 KG)	0,7 V.
500 mA. (0,8 KG)	0,8 V.
575 mA. (0,9 KG)	0,9 V.

4. Para 10 KG.

TABLA N° 4.8

VALORES OBTENIDOS EN LA ESCALA DE 10 KG.

<u>TOPICO</u>	<u>VALORES CALCULADOS</u>	<u>VALORES MEDIDOS</u>
Corriente en el elemento	1 mA.	1 mA.
Corriente en el Transformador para 10 KG.	6,4 A.	
Ganancia del <u>Amplificador</u>	1.176	1.180
Voltaje de <u>Salida</u> en el <u>instru</u> mento	1 V.	
Voltaje de <u>Salida</u> analoga	1 V.	
Voltaje de <u>Salida</u> con el <u>conmu</u> tador en X 3	3 V.	

TABLA Nº 4.9

VOLTAJES OBTENIDOS EN LAS MEDICIONES DE 1 KG A 10 KG

<u>CORRIENTE EN EL TRANS</u> <u>FORMADOR DE CALIBRAC.</u>	<u>VOLTAJE DE SALIDA</u> <u>EN EL INSTRUMENTO</u>
--	--

1 Amp. (2 KG)	0,2 V.
-----	-----
-----	-----

No se pudo calibrar totalmente la escala de 10 KG.  
por no disponer de equipo.

4.3 OPERACION Y MANEJO

1. Colocar la punta de prueba en conector de 4 contactos.
2. Colocar el interruptor de línea en la posición "encendido".
3. Colocar el conmutador en la escala de 10 KG.
4. Luego buscar el rango adecuado; conmutador de KG.
5. Buscar el punto cero del instrumento con  $B = 0$ , con el ajuste.
6. Encontrar la máxima deflexión del instrumento por orientación de la punta en el entrehierro.
7. Leer la inducción magnética en el instrumento de medida.
8. Si se desea puede utilizarse la salida análoga que está calibrada de tal manera que - 1 Voltio corresponde a escala completa.

#### 4.4 APLICACIONES

Las principales aplicaciones del gaussmetro son:

1. En el laboratorio como instrumento de medida de intensidades de campo magnético en los entrehierros de los electroimanes.
2. Puede servir para medir intensidades de campo en lugares inaccesibles.

#### 4.5 CONCLUSIONES

1. Se logró el objetivo de diseñar y construir un gaussmetro con 7 escalas calibradas de: 0,01 KG, 0,1 KG, 1 KG, y 10 KG... 0,03 KG, 0,3 KG, 3 KG.
2. El haber logrado conocimientos más claros en electrónica y haber obtenido mayor experiencia.
3. Suministrar un equipo nuevo para el laboratorio de Electrónica y Telecomunicaciones de la Escuela Politécnica Nacional.

A P E N D I C E

A-1 INDUCCION MAGNETICA B

La inducción magnética y la carga eléctrica se definen por la ecuación de fuerza de Lorentz.

$$F = e (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Si la velocidad de la carga móvil es perpendicular a la vez al campo magnético y a la velocidad.

$$B = \frac{F}{ev}$$

Si F se expresa en Newtons, e en Culombios y v en m/s., entonces B se mide en tesla (T) - que equivale a un weber por metro cuadrado -- (W/m<sup>2</sup>).

Se dice que se tiene una inducción magnética

ca de un  $W/m^2$ , cuando una carga de un Culombio que se mueve con una velocidad perpendicular al campo de un m/s. está sometida a la fuerza de 1 N.

$$1 \text{ Weber}/m^2 = \frac{\text{Newton}}{\text{Culombio} \cdot m/s.}$$

$$\frac{1 \text{ Culombio}}{s} = 1 \text{ Amperio}$$

$$1 \text{ Weber}/m^2 = \frac{\text{Newton}}{\text{Amp.} \cdot m.}$$

Un weber por  $m^2$  equivale a 10 KG.

## A - 2 MOVILIDAD DE LOS PORTADORES

El efecto del campo eléctrico E, sobre una partícula de carga eléctrica e y masa m es el de producir aceleración y está dada por:

$$a = \frac{eE}{m}$$

Su velocidad media  $v = \frac{eEt}{2m}$  (aproximado) -

donde  $t$  es el tiempo medio entre choques.

Esta velocidad se superpone a la de agitación térmica (cuyo valor medio es nulo) y viene a ser así la velocidad de corrimiento con que la partícula se desplaza a través del cristal.

Los factores  $e$ ,  $2 m$ . y  $t$  permanecen cons-tantes excepto  $v$  que es proporcional a  $E$ .

$$v_d = \mu E \quad \mu = \frac{v_d}{E}$$

Según esta ecuación la movilidad de corrimiento es definida como la velocidad por unidad de campo eléctrico  $m^2/v./s$ .

La movilidad depende del material y la temperatura.

### A - 3 CONDUCTIVIDAD ELECTRICA

$$\sigma = \frac{J}{E}$$

La concentración de portadores en los semi

conductores, es la cantidad de carga móvil por unidad de volumen.

$I_n$  = Corriente debida al flujo de electrones.

$$I_n = \frac{Qt}{T} = neAvd$$

$$J = \frac{I}{A} = nev_d$$

$$J = ne\mu E$$

$$J_{Tot.} = eE(N\mu_n + p\mu_p)$$

Entonces la conductividad en los semiconductores viene dada por:

$$\sigma = e(N\mu_n + p\mu_p)$$

donde  $\mu_n$  es la movilidad de los electrones y  $\mu_p$  es la movilidad de los huecos.

A - 4 RELACIONES MAGNETICAS

H	<u>Campo Magnético</u>
Oerstedes	2.0213 Amp.vueltas/pulg.
Oerstedes	0.79577 Amp.vueltas/cm.
Oerstedes	79.577 Amp.vueltas/mt.
Amp.vueltas/cms.	1.2566 Oerstedes
Amp.vueltas/cms.	2.54 Amp.vueltas/pulg.
Amp.vueltas/cms.	100 Amp.vueltas/m.
Amp.vueltas/pulg.	0.49474 Oerstedes
Amp.vueltas/pulg.	0.39370 Amp.vueltas/cm.
Amp.vueltas/pulg.	39.370 Amp.vueltas/m.
Amp.vueltas/m.	$10^{-2}$ Amp.vueltas/cm.
Amp.vueltas/m.	0.0254 Amp.vueltas/pulg.

B Inducción Magnética

Gausses	6.4516 líneas/pulg <sup>2</sup>
---------	---------------------------------

Gausses	$6.4516 \times 10^{-8}$ Webers/pulg. <sup>2</sup>
Gausses	$10^{-4}$ Webers/m <sup>2</sup> - $10^5$
líneas/pulg.	0.15500 gaussess.
líneas/pulg.	$1.55 \times 10^{-5}$ Webers/m <sup>2</sup>
líneas/pulg.	$10^{-8}$ Webers/pulg. <sup>2</sup>
Webers/pulg. <sup>2</sup>	$1.55 \times 10^7$ gaussess.
Webers/pulg. <sup>2</sup>	$10^8$ líneas/pulg. <sup>2</sup>
Webers/pulg. <sup>2</sup>	1.550 Webers/m <sup>2</sup>
Gauss	maxwells/cm. 6.452 líneas/pulg.
Gauss	$10^{-4}$ Webers/m <sup>2</sup>
Maxwells/pulg. <sup>2</sup>	0.1550 gauss.
Maxwells/pulg. <sup>2</sup>	$0.1550 \times 10^{-4}$ Webers/m <sup>2</sup>
Webers/m <sup>2</sup>	$10^4$ gaussess.
Webers/m <sup>2</sup>	$6.452 \times 10$ líneas/pulg.

Flujo magnético

Webers  $10^8$  Maxwells.

BIBLIOGRAFIA

1. Ankrum, P. Electrónica de los Semiconductores.  
Prentice Hall Internacional 1.976.
2. Alley, Ch. y Kenneth, W. Electronic Engeniering.  
Willey New York 1.963.
3. Texas Instruments Incorporated., Transistores Cir-  
cuitos Diseños. CECSA 1,965.
4. Carroll, Tunel Diode and Semiconductor Circuits.  
pág. 178-200.
5. Kraus, J., Electromagnetismo, Dimarco, Argentina  
1.960.
6. Corcorán George., Fundamentos de Ingeniería Eléc-  
trica, 1962.
7. Santoro, Mario., Diodos Transistores y Circuitos  
Integrados., Madrid 1.973.
8. Falconí, Leopoldo., Estructura Electrónica de los

Sólidos, 1.972

9. Loadím, Hams y Klems., Revista Electrónica, Edición A 84 año, Abril 1.963 8vo. folleto, página - 252 a 256. SIEMENS AG.
10. Günther Van, Karl G. Nuevos Generadores Hall con Capas Semicondutoras. SIEMENS, Octubre 1.963.
11. Ejemplos de Diseños con Circuitos Semiconductores SIEMENS, 1.966, página 64-67.
12. Oppenheimer, M. IC form. Hall Effect Devices can take many new Applications, Electronics 1.971.
13. Hall Effect Magnetic Sensor Electronics., Febrero 1.973. página 91-96.
14. Schulz, R. Fuentes de Alimentación Reguladas, Kapelusz, 1.971.
15. R. D. Middlebrook, Differential Amplifiers: John Wily and Sons. Inc. 1.964.

16. Leger, R. Otros Circuitos con Transistores. Buenos Aires, 1.970. página 76.
17. Howard W. Sams ITT., Reference Data for Radio Engineers, 1.972.
18. Tomassini Maurizio, Characterization of Epitaxial Gallium Arsenide for Microwave Device Application, Revista Técnica Selenia. 1.977, páginas 1 a 3.

R<sub>12</sub> - 6.8 K  $\Omega$

R<sub>13</sub> - 6.8 K  $\Omega$

R<sub>14</sub> - 10 K  $\Omega$

R<sub>15</sub> - 820  $\Omega$

R<sub>16</sub> - 820  $\Omega$

R<sub>17</sub> - 37  $\Omega$

R<sub>18</sub> - 37  $\Omega$

R<sub>19</sub> - 220 K  $\Omega$

R<sub>20</sub> - 22 K  $\Omega$

R<sub>21</sub> - 10 K  $\Omega$

R<sub>22</sub> - 820  $\Omega$

R<sub>23</sub> - 820  $\Omega$

R<sub>24</sub> - 27  $\Omega$

R<sub>25</sub> - 27  $\Omega$

R<sub>26</sub> - 220 K  $\Omega$

R<sub>27</sub> - 5.6 K  $\Omega$

R<sub>28</sub> - 3.3 K  $\Omega$

R<sub>29</sub> - 150 K  $\Omega$

R<sub>30</sub> - 5.6 K  $\Omega$

R<sub>31</sub> - 5.6 K  $\Omega$

R<sub>32</sub> - 3.3 K  $\Omega$

R<sub>33</sub> - 100 K  $\Omega$

R<sub>34</sub> - 15 K  $\Omega$

R<sub>35</sub> - 330  $\Omega$

R<sub>36</sub> - 2.7  $\Omega$

R<sub>37</sub> - 2.7  $\Omega$

T<sub>1</sub> - ECG 188

T<sub>2</sub> - ECG 189

T<sub>3</sub> - 2N2904

T<sub>4</sub> - 2N2904

T<sub>5</sub> - M612

T<sub>6</sub> - M612

T<sub>7</sub> {  
T<sub>8</sub> { MD8002

T<sub>9</sub> - ASD

T<sub>10</sub> - M612

T<sub>11</sub> - M612

T<sub>12</sub> - ASD

MATERIALES UTILIZADOS

TR <sub>1</sub> - Transformadores 110/32	V <sub>5</sub> - 50 K $\Omega$
D <sub>1</sub> } D <sub>2</sub> } 1.000 V. pico inverso D <sub>3</sub> } 2,5 Amperios D <sub>4</sub> } 1N4250	Z <sub>1</sub> - 1N4743 Z <sub>2</sub> - 1N4743 Z <sub>3</sub> - 1N4689 Z <sub>4</sub> - 1N4689 Z <sub>5</sub> - 1N4689
C <sub>1</sub> - 1.000 $\mu$ f	R <sub>1</sub> - 57 K $\Omega$
C <sub>2</sub> - 1.000 $\mu$ f	R <sub>2</sub> - 1 K $\Omega$
C <sub>3</sub> - 10 $\mu$ f	R <sub>3</sub> - 1 K $\Omega$
C <sub>4</sub> - 0,1 $\mu$ f	R <sub>4</sub> - 1 K $\Omega$
C <sub>5</sub> - 0,01 pf	R <sub>5</sub> - 1 K $\Omega$
C <sub>6</sub> - 10 $\mu$ f	R <sub>6</sub> - 1,5 K $\Omega$
C <sub>7</sub> - 0,1 $\mu$ f	R <sub>7</sub> - 33 K $\Omega$
C <sub>8</sub> - 0,001 pf.	R <sub>8</sub> - 3.9 K $\Omega$
V <sub>1</sub> - 20 $\Omega$	R <sub>9</sub> - 15 K $\Omega$
V <sub>2</sub> - 1 K $\Omega$	R <sub>10</sub> - 133 K $\Omega$
V <sub>3</sub> - 10 K $\Omega$	R <sub>11</sub> - 92 $\Omega$
V <sub>4</sub> - 5 K $\Omega$	

D I A G R A M S