

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA

Facultad de Ingeniería Eléctrica y  
Electrónica



**Diseño de una Máquina de Soldar  
Semiautomática por Arco Eléctrico  
con metal de aportación bajo atmósfera  
protectora de Gas Inerte (MIG-MAG)**

**TESIS**

**Para Optar el Título Profesional de:**

**INGENIERO ELECTRICISTA**

**Jorge Washington Botetano León**

***Promoción 1982 - 2***

**LIMA - PERU - 1995**

*A mis padres.*

## SUMARIO

La máquina de soldar semi-automática M.I.G. (de las siglas en inglés Metal Inert Gas), a pesar de su amplia difusión en la industria de la soldadura, no tiene en nuestro medio una formulación teórica-matemática para ejecutar su diseño.

Se propone tal formulación para el diseño en este tipo de máquina, mostrando el análisis del comportamiento de sus principales elementos y de los fenómenos físicos y químicos que ocurren en el arco de soldar, a los cuales estos elementos deben responder satisfactoriamente.

Se presenta una aplicación práctica del diseño de una máquina de soldar de rango 50-300 amperios de corriente de soldadura. Se dan las especificaciones técnicas para la construcción de la máquina, lo cual puede realizarse utilizando materiales que se encuentren en el mercado nacional.

Se hace el análisis económico comparativo de costos unitarios por metro lineal de soldadura utilizando una máquina de soldar por arco manual clásica y una máquina MIG, demostrándose que con esta última se obtiene una soldadura de mejor calidad y económicamente más rentable.

DISEÑO DE UNA MAQUINA DE SOLDAR  
SEMIAUTOMATICA POR ARCO ELECTRICO  
CON METAL DE APORTACION BAJO  
ATMOSFERA PROTECTORA DE GAS INERTE  
(MIG-MAG)

## EXTRACTO

**TITULO:** DISEÑO DE UNA MAQUINA DE SOLDAR SEMIAUTOMATICA POR ARCO  
ELECTRICO CON METAL DE APORTACION BAJO ATMOSFERA  
PROTECTORA DE GAS INERTE (MIG-MAG)

**AUTOR:** JORGE WASHINGTON BOTETANO LEON

**PROMOCION:** 82-II

TESIS PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRICISTA  
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA  
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA  
LIMA-PERU 1995

Los capítulos del presente trabajo han sido desarrollados en forma independiente y luego interconectados de acuerdo a la siguiente secuencia:

En el Capítulo I, se hace el estudio de los fenómenos físicos y químicos que se producen en el arco de soldadura utilizando los principios de la física cuántica y aplicando las leyes de la conservación de la energía.

Dadas las condiciones de trabajo en el arco de soldar, en el Capítulo II se definen los parámetros de diseño de la máquina que satisfaga los requerimientos necesarios para producir un cordón de soldadura de buena calidad. Estos dispositivos son:

El transformador trifásico de soldadura para 300 amperios, que será desarrollado en el Capítulo III.

El rectificador trifásico de potencia, que permite obtener corriente continua de soldadura. Esto se desarrolla en el Capítulo IV.

El filtro de potencia por inductancia, que además de filtrar la corriente, determina el tiempo de respuesta del arco de soldar, y la curva característica de voltaje y corriente de soldadura. Esto será visto en el Capítulo V.

La unidad de alimentación del alambre-electrodo, donde se incluye el diseño de un sistema de control automático de velocidad, que mantiene constante la velocidad de alimentación del alambre-electrodo frente a cargas variables. Además se incluye el diseño del frenado dinámico instantáneo del motor de arranque del alambre-electrodo. Esto se desarrolla en el Capítulo VI.

El circuito de control, que gobierna todo el sistema en su conjunto mediante un juego de contactores accionados desde un interruptor incorporado en la pistola o soplete de soldadura. Esto será visto en el Capítulo VII.

Al final de este capítulo se presenta todos los dispositivos interconectados, formando en su conjunto a la máquina de soldar diseñada, lo cual era el objetivo de este trabajo.

Finalmente, se presenta la máquina diseñada formando en su conjunto un módulo fácilmente movible y manejable.

En el Capítulo VIII se hará un análisis económico comparativo de costos para demostrar que la aplicación de este tipo de máquinas es económicamente más rentable en comparación con otros tipos de máquinas de soldar convencionales.

## INDICE

	Pág.
INTRODUCCION	1
CAPITULO I	
EL ARCO DE SOLDAR	3
1.1 Soldadura	3
1.2 Procedimientos de soldadura	5
1.2.1 Soldadura por arco manual	6
1.2.2 Proceso MIG (Metal Inert Gas)	7
1.2.3 Proceso TIG (Tungsten Inert Gas)	8
1.2.4 Soldadura eléctrica por arco sumergido	8
1.3 Descripción del arco eléctrico	10
1.4 Procesos físicos en el arco de soldar	13
1.4.1 Campo eléctrico en el arco de soldar	13
1.4.2 Aplicación de la ley de distribución de Maxwell-Boltzmann al estudio de los gases	15
1.4.3 Aplicación de la ley de distribución de Fermi-Dirac al estudio de los electrones libres de un metal	17
1.4.4 Cambio de la energía cinética de un electrón por impacto con un blanco ( $\Delta E_K$ )	24
1.4.5 Emisión termoiónica	29
1.4.6 Fotoionización	30
1.5 Ionización de un gas	33

	Pág.
1.6 Efectos nocivos del aire en la soldadura	38
1.7 Gas inerte de protección	40
1.7.1 Argón como gas protector	41
1.7.2 Helio como gas protector	42
1.7.3 Anhídrido carbónico (CO <sub>2</sub> ) como gas protector	43
1.8 Curva característica del arco de soldar	44
1.9 Fuerzas que intervienen en la transferencia de metal	47
1.9.1 Tensión superficial (Fs)	47
1.9.2 Fuerza gravitacional (Fg)	48
1.9.3 Fuerza electromagnética (Fm)	48
1.9.4 Fuerza hidrodinámica (F <sub>z</sub> )	51
1.10 Transferencia de metal en el arco de soldar	52
1.10.1 Transferencia por pulverización	52
1.10.2 Transferencia globular	53
1.10.3 Transferencia por cortocircuito	56
CAPITULO II	
PARAMETROS DE DISEÑO	58
2.1 Fuente de alimentación de corriente continua y voltaje constante	58
2.2 Curva eléctrica del arco de soldar	60
2.3 Punto de operación del arco de soldar	61
2.4 Longitud del arco eléctrico	62
2.5 Control de la longitud del arco	63
2.6 Velocidad de alimentación del alambre-electrodo	65



	Pág.
2.7 Influencia de la inductancia del circuito L-R en la transferencia de metal	66
<b>CAPITULO III</b>	
<b>TRANSFORMADOR TRIFASICO</b>	70
3.1 Características del transformador	70
3.2 Diseño del núcleo	71
3.2.1 Cálculos justificativos	71
3.2.2 Dimensiones y peso del núcleo	76
3.3 Diseño de los devanados	78
3.3.1 Cálculo del número de espiras	78
3.3.2 Cálculo de la sección de los conductores	80
3.3.3 Cálculo del aislamiento	80
3.3.4 Altura de los devanados	82
3.3.5 Ancho de los devanados	84
3.3.6 Cálculo de las reactancias de dispersión	86
3.3.7 Cálculo de la resistencia de los bobinados	89
3.3.8 Volumen y peso del cobre	98
3.4 Características de comportamiento	99
3.4.1 Circuito equivalente del sistema	99
3.4.2 Pérdidas en el cobre	102
3.4.3 Pérdidas en el hierro	103
3.4.4 Cálculo de la potencia del transformador	103
3.5 Cálculo del calentamiento	107
3.6 Disposición de espacio del transformador trifásico	110

	Pág.
CAPITULO IV	
RECTIFICADOR TRIFASICO	117
4.1 Ecuación de la tensión resultante a la salida del rectificador	117
4.2 Cálculo de la corriente continua del rectificador	120
4.3 Especificaciones técnicas de los diodos rectificadores	121
4.4 Característica tensión-corriente de los diodos	122
4.5 Circuito equivalente del diodo	124
4.6 Factor de rizado	125
4.7 Radiadores para la evacuación del calor de los diodos	125
CAPITULO V	
FILTRO POR INDUCTANCIA	135
5.1 Filtro por inductancia	135
5.2 Inductancia crítica " $L_{crít}$ "	137
5.3 Resistencia de drenaje " $R_D$ "	140
5.4 Regulación de la tensión	141
5.5 Cálculo de la inductancia óptima " $L_F$ "	144
5.6 Factor de rizado	146
5.7 Diseño de la bobina de inductancia " $L_F$ "	147
5.7.1 Cálculos justificativos	147
5.7.2 Dimensiones y peso del núcleo	159
5.8 Diseño del devanado	160
5.8.1 Cálculo de la sección del conductor	160

	Pág.
5.8.2 Cálculo de la altura del devanado	161
5.8.3 Cálculo del ancho del devanado	162
5.8.4 Cálculo de la resistencia del bobinado	162
5.8.5 Volumen y peso del cobre	163
5.9 Pérdidas en el cobre	164
5.10 Disposición de espacio de la inductancia	164
5.11 Análisis de la corriente de soldadura (circuito L-R)	165
CAPITULO VI	
UNIDAD DE ALIMENTACION DEL ALAMBRE-ELECTRODO	178
6.1 Motor de arrastre	180
6.2 Ecuaciones del sistema en estado dinámico	182
6.3 Especificaciones técnicas del motor de arrastre	185
6.4 Cálculo del momento de inercia total del sistema ( $J_{m\bullet}$ )	188
6.5 Cálculo del coeficiente de rozamiento viscoso ( $B_{m\bullet}$ )	193
6.6 Control de velocidad	194
6.7 Funciones de transferencia del regulador de velocidad de alimentación del alambre- electrodo	198
6.7.1 Primera etapa: controlador de velocidad PI	202
6.7.2 Segunda etapa: filtro de ruidos de alta frecuencia	204

	Pág.
6.7.3 Amplificador de potencia a tiristor (voltaje de control)	205
6.7.4 Función de transferencia del motor	210
6.7.5 Función de transferencia del control automático de velocidad	211
6.7.6 Limitador de corriente	221
6.8 Circuito de disparo de los tiristores	222
6.9 Frenado dinámico del motor de arrastre	226
6.10 Peso y dimensiones de la unidad de alimentación del alambre-electrodo	233
CAPITULO VII	
CONTROL Y MANDO DE LA MAQUINA DISEÑADA	239
7.1 Sistema manguera-soplete de soldar	239
7.2 Circuito de control y mando	242
7.3 Dimensiones y acomodamiento de la máquina diseñada	245
CAPITULO VIII	
ANALISIS ECONOMICO	259
8.1 Costos	259
8.1.1 Costos fijos	260
8.1.2 Costos variables	260
8.1.3 Costos unitarios	260
8.2 Análisis de costos	261
8.2.1 Costo de máquina	261
8.2.2 Costo de materiales	266
8.2.3 Costo de mano de obra	267

	Pág.
8.2.4 Costo de energía	268
8.3 Análisis comparativo de costos en un proceso de soldadura entre un sistema por arco manual y otro semiautomático MIG	268
8.3.1 Sistema MIG	269
8.3.2 Sistema por arco manual	273
8.3.3 Cuadro comparativo de costos	276
8.3.4 Punto de equilibrio ( $P_{\epsilon}$ )	277
8.3.5 Ejemplos de ahorro de costos	278
CONCLUSIONES	282
BIBLIOGRAFIA	284

## INTRODUCCION

La soldadura es un proceso dentro de la fabricación y reparación de piezas metálicas, que ha alcanzado un desarrollo considerable, especialmente desde años previos a la segunda guerra mundial, cuando se empezó a reemplazar navios de construcción remachada por los de construcción soldada. El desarrollo de nuevos procedimientos de soldadura (semi-automática y automática) y la aplicación de la robótica y los microprocesadores electrónicos, ha traído como consecuencia llegar a niveles de calidad excelentes y a un alto rendimiento económico del producto terminado (Ejemplo: producción en serie de carrocerías de automóviles).

La rapidez de fabricación y la gran economía, que representa la aplicación de la soldadura, le abre un amplio campo de aplicación en la industria naval, metal-mecánica, minería, agricultura y en el transporte.

La soldadura como proceso de fabricación y reparación de piezas metálicas, requiere de una eficiente aplicación, lo que supone una adecuada selección y utilización de los productos que intervienen en la soldadura, así como el correcto empleo de las máquinas de soldar; además, del conocimiento de las técnicas de trabajo y de los métodos de soldadura más eficaces y seguros.

Existen diversos procedimientos de soldadura, siendo uno de ellos el procedimiento de "soldadura por arco eléctrico con metal de

aportación bajo atmósfera de protección de gas inerte", conocido como procedimiento MIG de los siglas en Inglés "Metal Inerte Gas".

El objetivo del presente trabajo es el diseño de una máquina de soldar semi-automática para el procedimiento MIG. En nuestro país, este procedimiento es conocido y aplicado por los especialistas en soldadura; pero, no existe una formulación teórica desde la óptica de las máquinas eléctricas para la construcción de este tipo de máquinas de soldar.

El trabajo se inicia desarrollando la formulación teórica completa para la construcción de la máquina y luego se presenta una aplicación práctica del diseño de una máquina por el procedimiento MIG para corriente de soldadura de hasta 300 amperios.

## CAPITULO I EL ARCO DE SOLDAR

### **1.1 Soldadura**

Las normas internacionales definen la soldadura como un proceso de unión de piezas metálicas que se funden bajo los efectos del calor, con o sin adición de materiales de aportación, de tal manera que el lugar de unión debe manifestarse metalúrgicamente como un enlace metálico continuo, con propiedades físicas y mecánicas similares a las partes unidas.

Las características de la soldadura son:

- a. La localización de la fusión
- b. El calentamiento del metal a temperaturas elevadas
- c. La velocidad de enfriamiento del metal depositado y del metal base

En el área de la soldadura se presenta un ciclo térmico heterogéneo, como consecuencia de la localización de la fusión, presentándose una zona fundida y una zona adyacente que se ve afectada por el calentamiento. En la zona de fusión el metal se funde hasta llegar al estado líquido reaccionando y disociándose en sus componentes debido a la alta temperatura de fusión (3,600°C), seguido de un proceso de rápido enfriamiento que solidifica rápidamente el metal, de tal forma que los procesos químicos que transcurren en el metal fundido no tienen tiempo



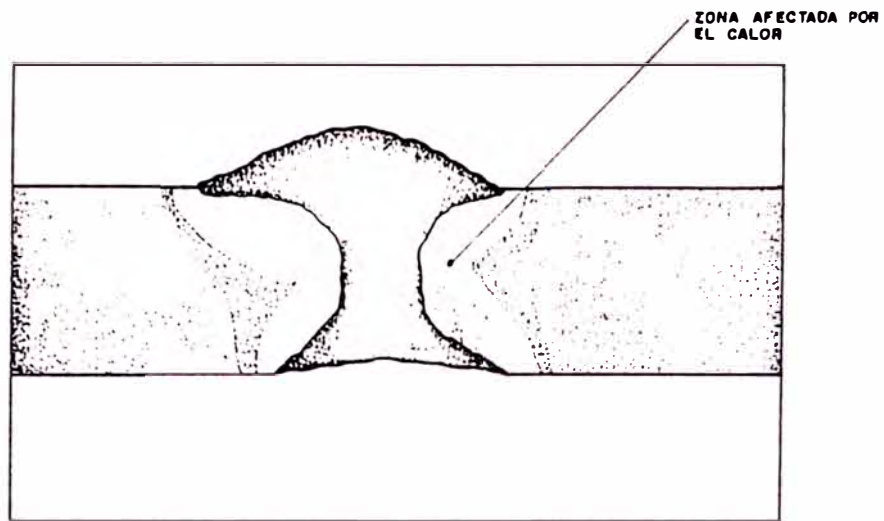


Fig. 1.1. a .— Sección transversal de la soldadura a tope, en la cual se observa las diferentes regiones con sus zonas típicas.

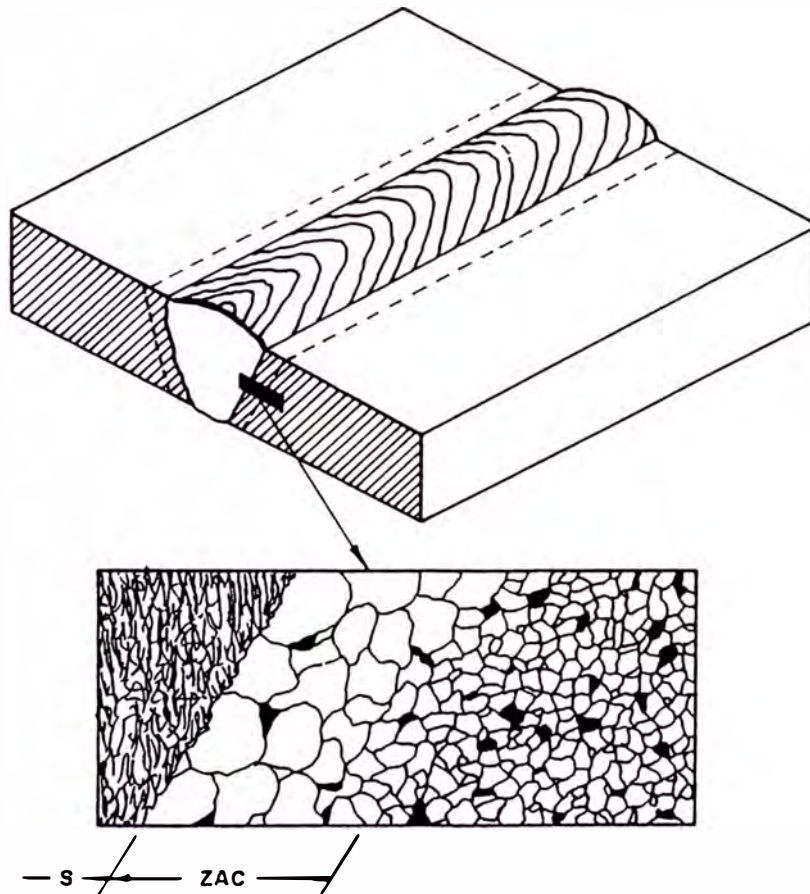


Fig. 1.1. b .— Diagrama ilustrativo de una soldadura en una plancha de acero, mostrando la zona de fusión (S) y la zona afectada por el calor (ZAC). El metal base no está afectado.

para concluir. La zona contigua a la fusión queda sometida a un calentamiento sin pasar al estado líquido, seguido de un enfriamiento, con la característica de que la temperatura alcanzada y la velocidad de enfriamiento varían dentro de amplios límites, de acuerdo a la posición del punto calentado. El enfriamiento del área de la soldadura alterará la estructura del grano, tanto en la zona de fusión como en el metal base.

Se presentan los siguientes fenómenos:

a. En la zona fundida:

Modificaciones químicas, por ejemplo: pérdida por oxidación de elementos útiles.

Absorción de gases, por ejemplo: oxígeno, nitrógeno, oclusiones de hidrógeno.

Precipitación de compuestos definidos, por ejemplo: precipitación de carburo de cromo en aceros inoxidable.

Modificaciones estructurales (agrandamiento del grano).

b. En el metal base, que sufre un tratamiento térmico variable en cada punto, produciéndose transformaciones del tipo estructural, como por ejemplo un agrandamiento exagerado del grano.

## 1.2 Procedimientos de soldadura

La soldadura por arco eléctrico es el procedimiento de soldadura, en el cual el arco eléctrico es empleado como fuente de calor. Este procedimiento se caracteriza por concentrar una gran cantidad de calor en un pequeño espacio, alcanzando elevadas temperaturas (3,600°C) que puede fundir cualquier tipo del metal.

Se distinguen los siguientes procedimientos de soldadura por arco eléctrico:

- Soldadura por arco eléctrico manual.
- Proceso MIG (Metal Inert Gas).
- Proceso TIG (Tungsten Inert Gas).
- Soldadura eléctrica por arco sumergido.

### 1.2.1 Soldadura por arco eléctrico manual

Es un proceso en el que la unión de las piezas se produce por calentamiento originado por un arco eléctrico entre un electrodo metálico revestido y las piezas a soldar. Al calentarse el revestimiento genera una protección gaseosa.

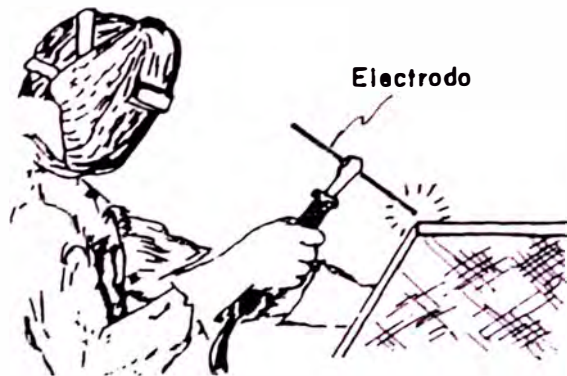


Fig. 1.2.a. Soldadura por arco eléctrico manual con electrodo metálico revestido.

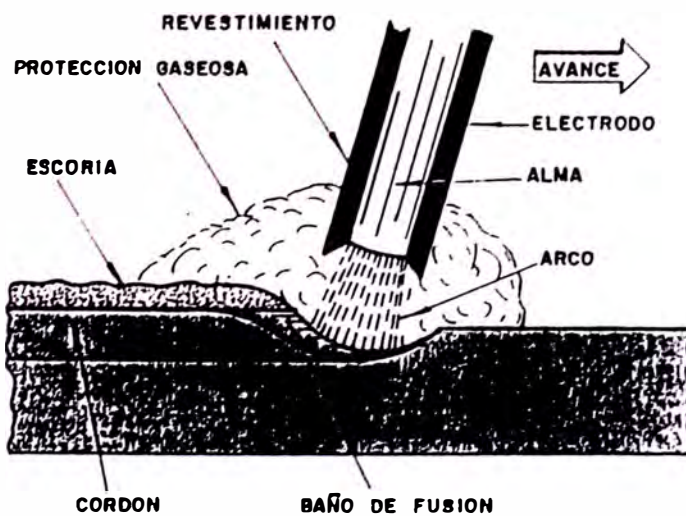


Fig. 1.2.b Sección longitudinal de un electrodo revestido durante el proceso de soldadura.

### 1.2.2 Proceso MIG (Metal Inert Gas)

Es un proceso en el que la unión de las piezas es producida por el calentamiento, originado por un arco eléctrico entre un electrodo consumible de metal desnudo y las piezas a soldar. La zona de soldadura es protegida por una atmósfera protectora de un gas inerte (gas argón). El electrodo es un alambre, de una aleación metálica especial, que va enrollado en un carrete y se alimenta automáticamente a medida que se va produciendo la soldadura. Las siglas en inglés de este proceso es M.I.G. de Metal Inert Gas.

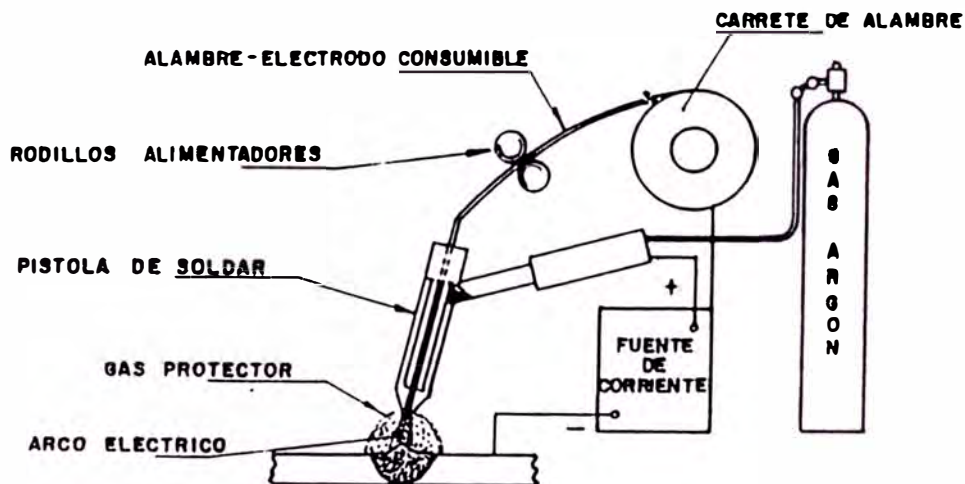


Fig. 1.3.a Proceso MIG (Metal Inert Gas)

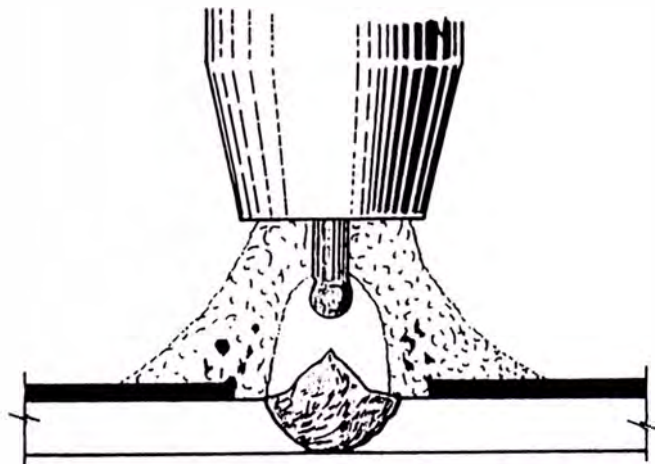


Fig. 1.3.b Transferencia de metal a través del arco de soldar en el proceso MIG.

### 1.2.3 Proceso TIG (Tungsten Inert Gas)

Es un proceso en el que la unión de las piezas se consigue por calentamiento de un arco eléctrico entre un electrodo de tungsteno (no consumible) y las piezas a soldar, bajo una atmósfera protectora de gas inerte (Gas Argón o Helio), puede añadirse metal de aportación (varilla metálica) en una forma similar que en la soldadura oxiacetilénica. Las siglas en inglés de este proceso es T.I.G. de Tungsten Inert Gas.

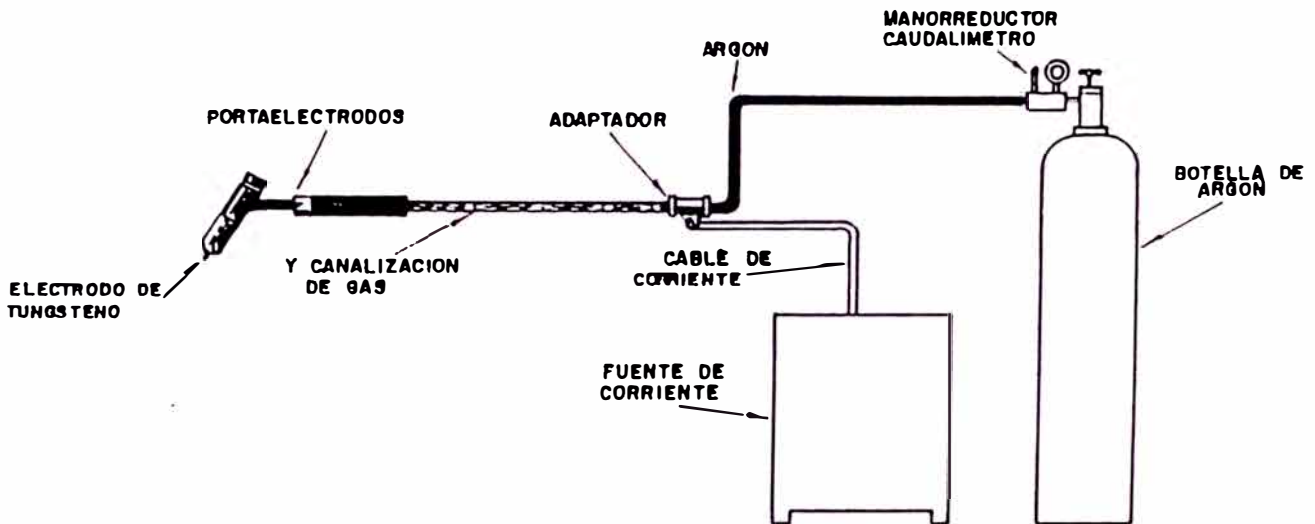


Fig. 1.4.a Proceso TIG (Tungsten Inert Gas)

### 1.2.4 Soldadura eléctrica por arco sumergido

Es un proceso en el que la unión de las piezas se produce por calentamiento originado por un electrodo de metal y las piezas a soldar. La zona de soldadura es protegida por una capa de material granuloso, fundible, que la cubre totalmente y se aplica manual o automáticamente a lo largo de la separación de las piezas a soldar.

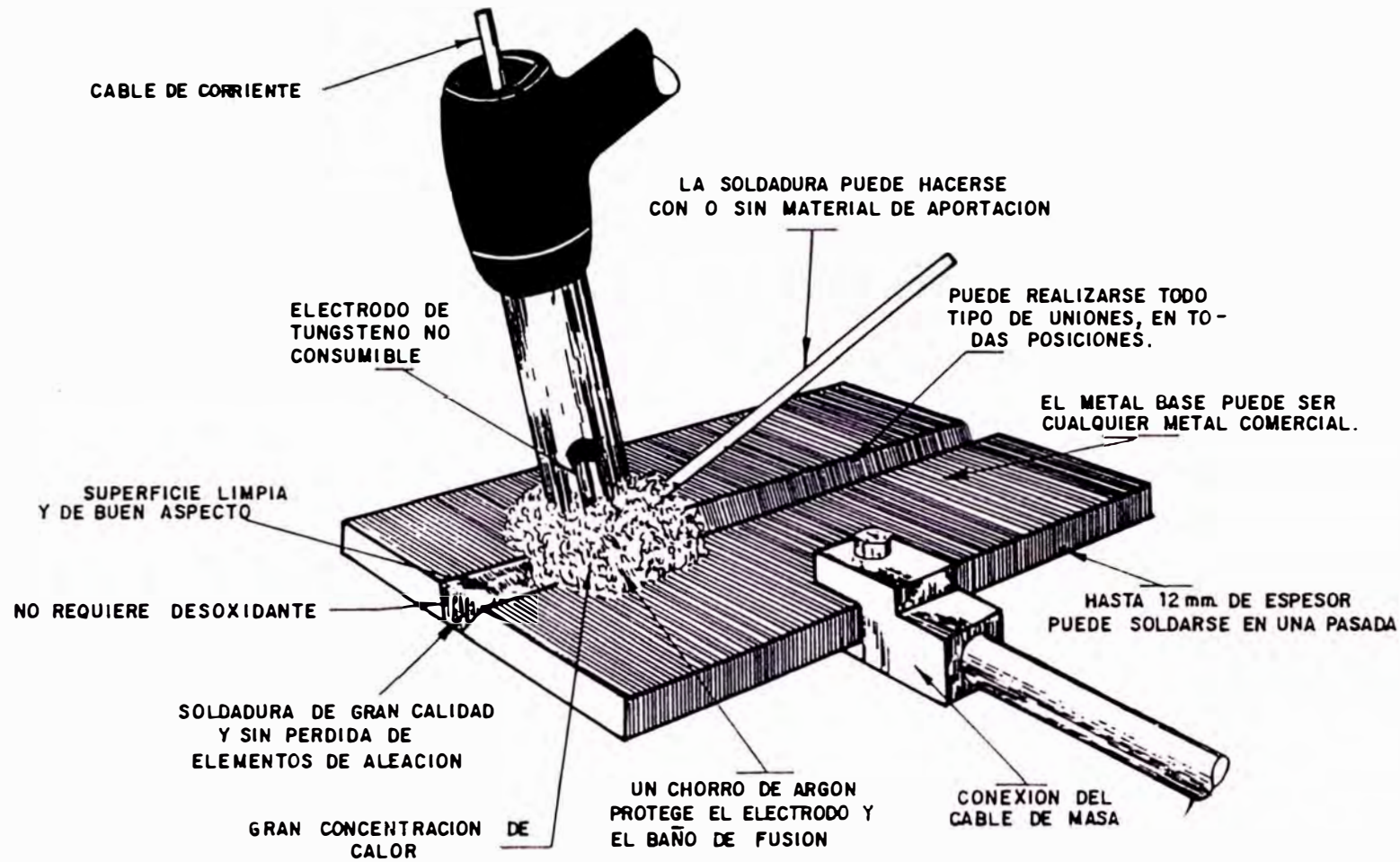


Fig. 1.4.b Proceso TIG (Tungsten Inerte Gas).

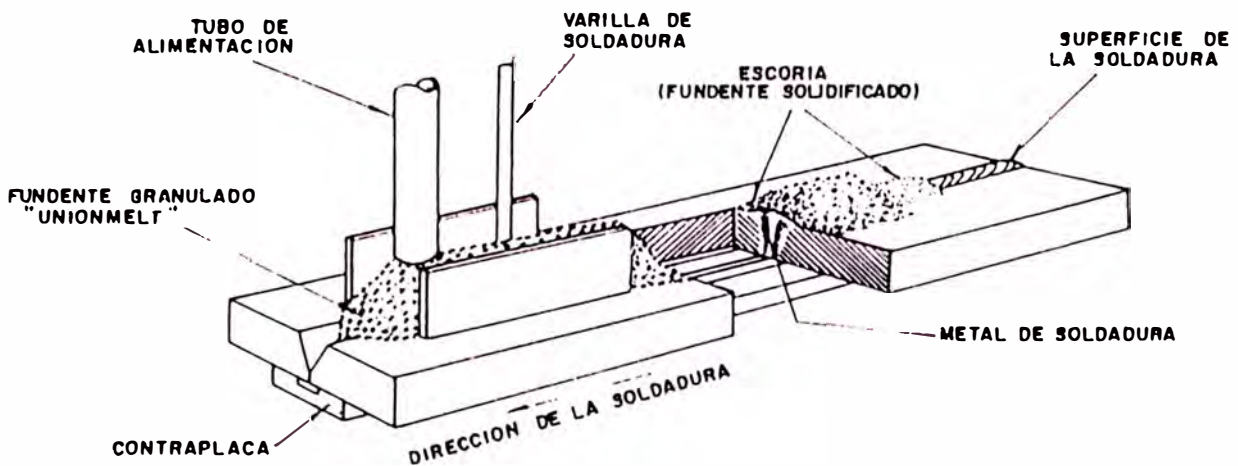


Fig. 1.5a Soldadura eléctrica por arco sumergido.

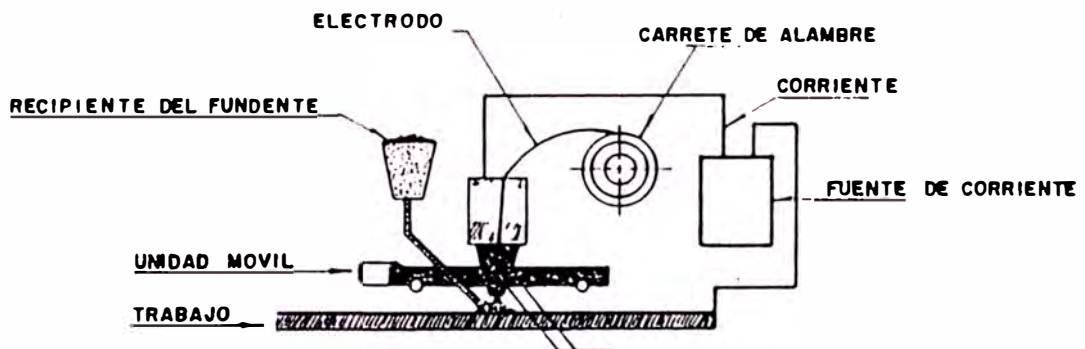


Fig. 1.5b Soldadura eléctrica por arco sumergido.

### 1.3 Descripción del arco eléctrico

El calor generado por el arco eléctrico, se produce al saltar la corriente eléctrica a través de una columna de gas o de aire, desde el extremo del electrodo hasta la pieza a soldar. En condiciones normales de presión y temperatura, los gases y vapores no conducen corriente eléctrica. El aire en estado normal contiene una cantidad insignificante de iones y electrones libres. Estos elementos presentan una gran resistencia al paso de la corriente y no siguen la ley de Ohm.

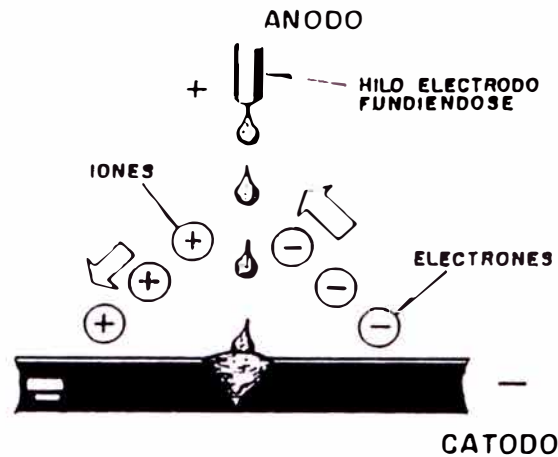


Fig. 1.6 Corriente de soldadura

Para que se produzca la descarga eléctrica, es necesario ionizar el espacio gaseoso entre el electrodo y la pieza a soldar. En el arco eléctrico, el metal que se suelda contiene electrones libres de carga negativa y el electrodo iones de carga positiva. Bajo efecto del calor los electrones se precipitan desde la pieza de trabajo hacia el electrodo. En el espacio intermedio estos electrones al chocar con los átomos del gas de protección expulsan de ellos electrones, creando iones positivos y electrones libres. El gas entre el electrodo y la pieza de soldar se ioniza y se vuelve conductor.

Cuando se conecta el electrodo al polo positivo (+) y la pieza de trabajo al polo negativo (-), el electrodo se calienta más que la pieza de trabajo, ya que desde la pieza de trabajo se bombardea electrones hacia el electrodo, el cual a su vez libera energía térmica que calienta el electrodo, cumpliendo así con el principio de conservación de la energía ( $\Delta E_k = \Delta E_{\text{térmica}}$ ). Al calentarse el electrodo, este se derrite en pequeñas gotas que van a depositarse en la pieza a soldar (Fig.1.6).



Cuando se invierten las polaridades, la pieza de trabajo se calienta más que el electrodo. Generalmente, se usa este tipo de conexión de polaridad para cortar metales, ya que el electrodo de corte está mucho más frío ( $3,200^{\circ}\text{C}$ ) que la pieza de trabajo que está caliente ( $3,400^{\circ}\text{C}$ ), ver fig. 1.7.

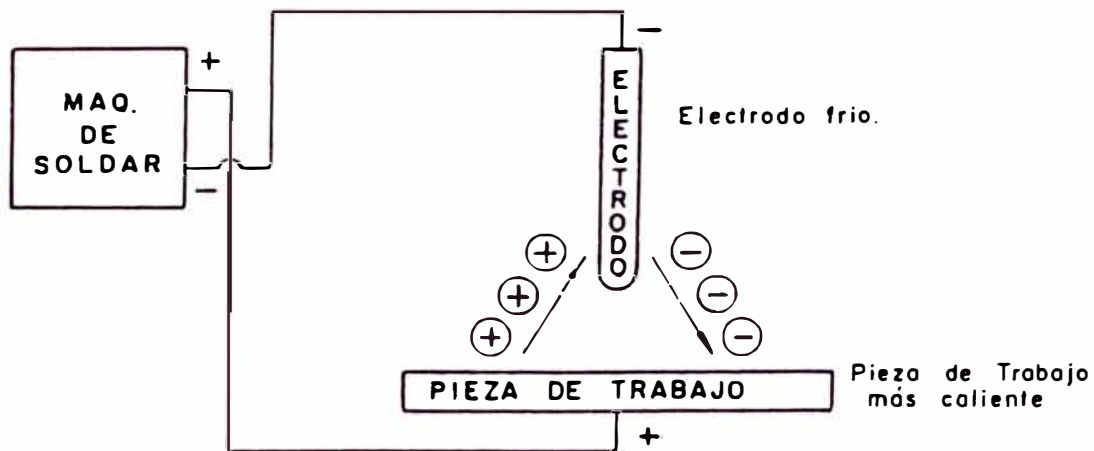


Fig. 1.7 Corriente de soldadura invertida.

Estos sentidos de corriente corresponden a la corriente electrónica, por lo que al usar la corriente eléctrica convencional debemos invertir el sentido de corriente en ambos casos.

El arco de soldadura se divide en tres zonas:

La zona catódica, situada alrededor del cátodo (polo -) desde donde se emiten los electrones que ionizan el espacio del arco. La temperatura en la zona catódica alcanza los  $3,200^{\circ}\text{C}$ .

La columna del arco, compuesto por gas ionizado que es eléctricamente conductor. La temperatura en esta zona oscila entre los  $5,000^{\circ}\text{C}$  y  $8,000^{\circ}\text{C}$ .

- **La zona anódica**, situada alrededor del ánodo (polo +) donde se concentran los electrones. La temperatura en la zona anódica alcanza los 3,400°C.

La longitud del arco eléctrico es igual a la distancia entre la punta del electrodo y la superficie del metal fundido. Un arco eléctrico con una longitud entre 3 a 5 mm se considera arco corto. El arco superior a los 5 mm se considera arco eléctrico largo.

La densidad de corriente en los electrodos manuales con revestimiento químico varía entre 12 a 20 amp/mm<sup>2</sup>, mientras que los alambres que se sueldan bajo gas protector alcanzan densidades de corriente de 50 a 170 amp/mm<sup>2</sup>. Luego el rendimiento de fusión es mayor en la soldadura bajo gas protector.

$$j = 50 \text{ a } 170 \text{ amp/mm}^2$$

#### **1.4 Procesos físicos en el arco de soldar**

Haremos un estudio de los fenómenos físicos que se producen en el arco de soldar, utilizando los principios de la física cuántica, estadística y termodinámica, aplicando las leyes de la conservación de la energía, la interacción entre partículas y campos, y la descripción de la materia.

##### **1.4.1 Campo eléctrico en el arco de soldar**

El campo eléctrico se define como el gradiente de potencial:

$$E = - \frac{dV}{dx} \quad (1.1)$$

Para hallar el orden de magnitud del campo eléctrico en el arco de soldar, tomaremos valores promedio de la tensión de arco y de la longitud del arco.

$$V = 27 \text{ Voltios}$$

$$X = 3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$E = \frac{27}{3 \times 10^{-3}} = 9 \times 10^3 \text{ Volt/m}$$

Debido a este elevado campo eléctrico los electrones se mueven a velocidades muy altas proporcionales a la velocidad de la luz, por lo que no se pueden aplicar las teorías clásicas de movimiento.

**Clásicamente:**

$$qV + \frac{mv^2}{2} = \text{cte} \quad (1.2)$$

$$\frac{mV^2}{2} = \Delta E_k = \Delta \text{Energía cinética electrones}$$

$$qV = \Delta \text{Energía cinética electrones}$$

$$V = \text{potencial eléctrico}$$

$$m = \text{masa de la partícula}$$

$$v = \text{velocidad de la partícula}$$

$$q = \text{carga eléctrica de la partícula}$$

**Relativísticamente:**

$$eV = \Delta \text{Energía eléctrica}$$

$$e = \text{carga eléctrica en electron-voltio de la partícula en movimiento}$$

$$V = \text{potencial eléctrico}$$

$$eV = \Delta E_{\kappa} = mc^2 - m_0c^2 = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad (1.3)$$

$m_0$  = masa en reposo de la partícula

$m$  = masa efectiva de la partícula en movimiento

$v$  = velocidad de la partícula

$c$  = velocidad de la luz

#### **1.4.2 Aplicación de la ley de distribución de Maxwell Boltzmann al estudio de los gases**

Se puede describir el comportamiento de la mayoría de los gases con la estadística clásica de Maxwell-Boltzmann en un intervalo de temperatura muy amplio. Para simplificar vamos a considerar los gases como compuestos de moléculas monoatómicas, de este modo no tenemos que incluir ni la energía potencial de las fuerzas intermoleculares ni la energía asociada con los movimientos de rotación o vibración de las moléculas; por lo tanto, toda la energía molecular es traslacional o cinética.

$$\Delta E_{\kappa} = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} \quad (1.4)$$

De acuerdo con la teoría cinética de los gases, las moléculas de un gas desarrollan una violenta temperatura al chocar constantemente con otras moléculas; variando a cada paso su dirección, por lo que no existe una dirección definida para el movimiento de ellas. Por lo tanto, la energía cinética media de las moléculas de un gas ideal es proporcional a la temperatura absoluta del gas y está definida según su movimiento en cada uno de los ejes coordenados como:

$$E_k = \frac{1}{2} KT$$

$E_k$  = energía cinética media de una molécula de gas, por cada grado de libertad.

$K$  = cte. de Boltzmann.

$T$  = temperatura absoluta en °K.

Como en el espacio tridimensional existen tres grados de libertad, la energía cinética media de las moléculas de un gas ideal, debido a su movimiento de traslación es:

$$\overline{\Delta E_k} = \frac{3}{2} KT = \Delta E_{\text{térmica}} \quad (1.5)$$

Como ambas expresiones se refieren a la energía cinética o de traslación, entonces:

$$\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{3}{2} KT \quad (1.6)$$

Luego se puede concluir lo siguiente:

- a. Parte de la energía interna de un gas es potencial, la cual depende de la separación de sus moléculas, o sea del volumen que ocupa el gas.
- b. Generalmente, la energía potencial de un gas es mucho menor que la existente en los sólidos, debido a la fuerza de atracción coulombiana.
- c. Para nuestro caso, consideraremos que la energía potencial de los gases, es despreciable, debido a que la distancia intermolecular es relativamente grande.

$$\Delta E_{\text{energía potencial}} = 0$$

d. Por lo tanto, podemos asumir con bastante aproximación, que la energía interna de un gas ideal monoatómico sólo depende de su temperatura y corresponde a un incremento de la energía cinética de sus electrones.

#### **1.4.3 Aplicación de la ley de distribución de Fermi-Dirac al estudio de los electrones libres de un metal**

Consideraremos algunos efectos físicos en los metales, efectos que son explicables en términos de la estadística de Fermi-Dirac aplicada a los electrones libres de los metales.

Haremos las siguientes consideraciones:

- a. La energía de un sistema de cargas (un átomo, una molécula o un núcleo), sólo puede tener ciertos valores  $E_1, E_2, E_3 \dots$ , ésto es: La energía está cuantizada. Los valores correspondientes a estas energías se denominan estados estacionarios y los valores posibles de la energía se denominan niveles de energía.
- b. **Principio de exclusión de Pauli:** "Dos electrones en un átomo no pueden tener el mismo estado dinámico de energía, ni los mismos números cuánticos".
- c. Cada electrón se mueve en el campo eléctrico atractivo producido por el núcleo más el promedio del campo eléctrico de repulsión debido a los otros electrones.
- d. **Energía de Fermi ( $E_F$ ):** "Si un sistema en estudio, está inicialmente en el estado más estable o de energía mínima, llamado estado fundamental, entonces todos los electrones ocupan los niveles más bajos posibles compatibles con el principio de exclusión."

Si el número total de electrones por unidad de volumen " $N_0$ " es menor que el número de niveles de energía disponibles en la banda, los electrones ocuparán todos los estados de energía hasta un máximo, designado por " $E_F$ " llamado "energía de Fermi".

$$E_F = \frac{h^2}{8m_e} \left( \frac{3N_0}{\pi} \right)^{2/3} \quad (1.7)$$

$E_F$  = energía de Fermi

$h$  = cte de Planck

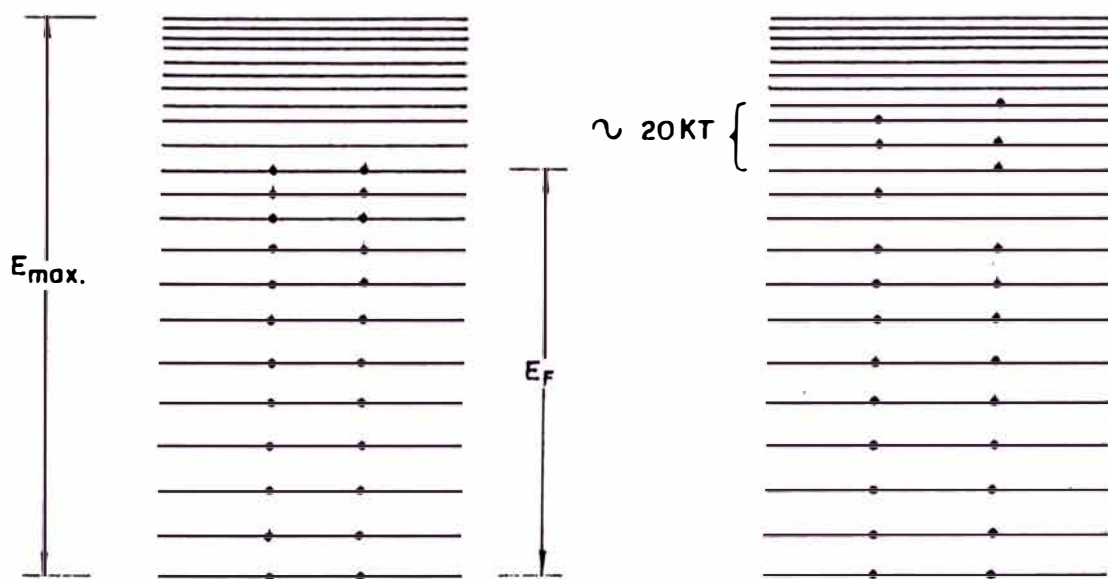
$m_e$  = masa de electrón

$N_0$  = número total de electrones por unidad de volumen.

Cuando la energía de Fermi es igual al ancho de la banda de energía, ésta está ocupada completamente.

Tabla N°1.1 Energía de Fermi de algunos metales

METAL	Cu	Ag	Mg	Al
$E_F$ (eV)	4.07	5.51	7.3	11.9



(a) ESTADO FUNDAMENTAL

(b) ESTADO EXCITADO

Fig. 1.8 Distribución de los electrones libres entre los estados de energía en la banda de conducción

Cuando una banda no está completamente llena, basta una pequeña cantidad de energía para excitar los electrones más altos hasta los niveles de energía más cercanos (fig.1.8.b). Sin embargo, sólo los electrones más altos pueden ser excitados térmicamente, ya que " $kT$ " a temperatura ambiente, es de unos 0.25 eV, la cual es muy pequeña comparada con " $E_F$ ", y el principio de exclusión hace que sea imposible excitar los electrones de baja energía a los estados vecinos ocupados. Los electrones que han sido excitados térmicamente son aquellos cuya energía es mayor que " $E_F$ ". Los estados ocupados por los electrones excitados caen en una región de energía del orden de " $20 kT$ " por encima de " $E_F$ ".

#### 1.4.3.1 Energía de arranque de un metal

La energía de arranque de un metal es la energía necesaria para extraer un electrón del nivel ocupado más alto.

Los electrones de conducción no escapan del metal a temperatura normal, porque si uno llega a escapar, se destruye el balance eléctrico del metal, el cual se carga positivamente atrayendo nuevamente al electrón; volviendo éste a penetrar al metal a no ser que tenga suficiente energía para sobreponerse a la atracción Coulombiana. En la fig. 1.9 está representada la energía potencial de un electrón dentro de un metal y en su superficie. Cerca de la superficie la energía potencial está dada por " $E_0$ ". A temperatura normal la banda de conducción está esencialmente llena de electrones sólo hasta la energía de Fermi " $E_F$ ". Para extraer un electrón del metal es por lo tanto necesario darle



por lo menos la energía designada como " $\phi$ " en la fig. 1.9. La cantidad " $\phi$ " es la energía de arranque del metal o función trabajo.

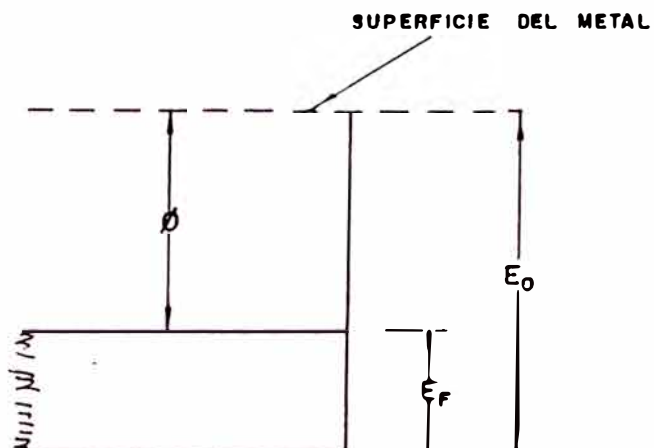


Fig. 1.9 Banda de conducción de un metal a temperatura ambiente.

Supongamos que " $E_0$ " es el trabajo necesario para alejar hasta el infinito un electrón desde el nivel más bajo, de los electrones libres de un metal. Si el electrón se toma sobre el nivel de Fermi, el trabajo será:

$$\phi = E_0 - E_F \quad (1.8)$$

Tabla 1.2.- Valores de energía de arranque  $\phi$  de algunos metales, obtenidos experimentalmente.

Metal	$\phi$ (eVoltios)
Cs	1.8
Cr	4.6
W	4.5
Pt	5.3
Ta	4.1
Ni	4.6
Ca	3.2
Th	3.4
Mo	4.3
Ag	4.8
Al	4.0
Ba	2.1
Cu	4.3
Fe	4.5
K	2.2
Na	2.3

### 1.4.3.2 Diferencia de potencial de contacto entre dos metales

Supongamos que tenemos dos metales "A" y "B" que no están conectados eléctricamente. En ausencia de cualquier campo eléctrico externo, la energía potencial de un electrón es cero fuera de los metales y los respectivos niveles de Fermi están a las energías " $\phi_A$ " y " $\phi_B$ " por debajo de la energía potencial fuera de los metales.

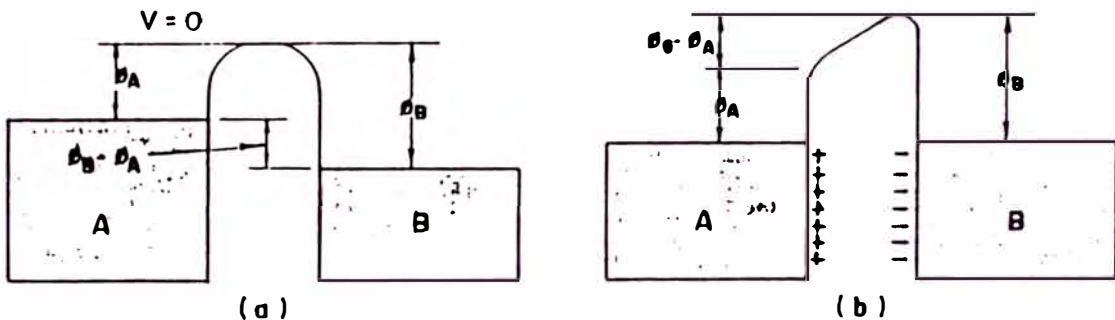


Fig. 1.10 Diferencia de potencial de contacto entre dos metales

Supongamos que " $\phi_B$ " es mayor que " $\phi_A$ ". Luego, cuando los metales no están conectados, el nivel de Fermi de "A" está más alto que el de "B" (fig.1.10.a). Cuando se conecta eléctricamente los dos metales (fig. 1.10.b), los electrones más energéticos de "A" fluirán hacia "B", llenando los niveles que están por encima del nivel de Fermi original de "B" y vaciando los niveles superiores de la banda de conducción de "A". Se alcanza el equilibrio cuando se igualan los niveles ocupados superiores de las bandas de conducción de "A" y "B". El metal "A", que tiene menor energía de arranque se carga positivamente y el metal "B", que tiene mayor energía de arranque, se carga negativamente. Esto da

lugar a una diferencia de potencial entre los dos metales igual a " $\phi_B$ " - " $\phi_A$ ". La línea llena de la fig. 1.10.b. indica la energía potencial de un electrón cuando se mueve de un metal al otro, a través del espacio entre ellos, después de alcanzado el equilibrio.

#### 1.4.3.3 Elementos conductores y aislantes

La energía de un sistema de cargas, un átomo, una molécula, o un núcleo, sólo puede tener ciertos valores  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ ,..., ésto es: La energía está cuantizada. Los valores correspondientes a estas energías se denominan estados estacionarios y los valores posibles de la energía se denominan niveles de energía. Consideremos también que cada electrón se mueve en el campo eléctrico atractivo producido por el núcleo más el promedio del campo eléctrico de repulsión debido a los otros electrones.

Supongamos además que el sistema en estudio está inicialmente en el estado más estable o de energía mínima, llamada estado fundamental (Energía de Fermi  $E_F$ ).

**Elementos conductores.**- Son aquellos que se caracterizan por su elevada conductividad eléctrica y por consiguiente, una porción de sus electrones poseen libertad de movimiento para moverse libremente a través de la red cristalina. Estos electrones responsables de la conductividad se denominan electrones de conducción. Los buenos conductores de la electricidad, llamados también metales, son aquellos elementos en los cuales la última banda ocupada no está completamente llena. Los electrones de conducción no pueden

escapar del metal porque no tiene energía suficiente para sobrepasar la energía potencial coulombiana en la superficie del metal. Cuando al sistema se le somete a un campo eléctrico o absorbe radiación electromagnética (efecto fotoeléctrico) o es excitado térmicamente (efecto termoiónico), éste pasa de su estado fundamental ( $E_F$ ) a otro estado de energía más alta llamado excitado. Sólo los electrones más altos pueden ser excitados.

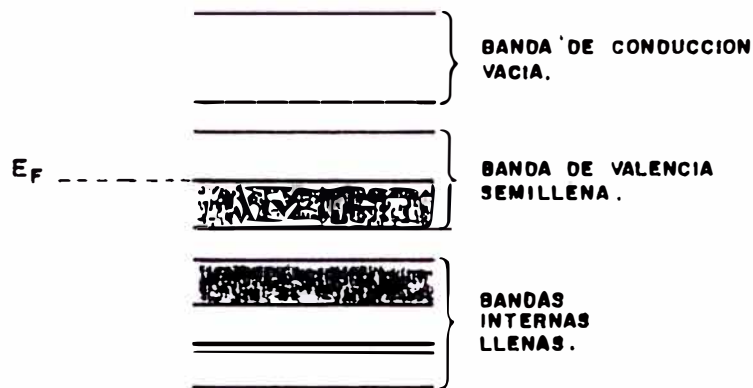


Fig. 1.11 Bandas de energía de un conductor.

**Elementos aislantes.-** Consideremos ahora el caso de una sustancia en la cual la banda más alta o de valencia está completamente llena y no se superpone con la siguiente, que está completamente vacía. Como todos los estados de la banda de valencia están ocupados, la energía del electrón está "congelada", esto es los electrones no pueden cambiar su estado dentro de la banda sin violar el principio de exclusión. La única posibilidad para excitar un electrón es transferirlo a la banda de conducción vacía. En consecuencia, un campo eléctrico aplicado no puede acelerar los electrones de la banda de valencia; y, por lo tanto, no puede producir

una corriente eléctrica. Esta sustancia es un "Aislador". Solamente a una temperatura suficientemente alta o un campo eléctrico muy intenso, algunos electrones pueden ser excitados y pasar de la banda de valencia a la banda de conducción. Sólo así es posible una corriente eléctrica. Este es el caso de los elementos que tienen enlace iónico que se caracterizan por una débil conductividad eléctrica a bajas temperaturas y buena conductividad eléctrica a altas temperaturas.

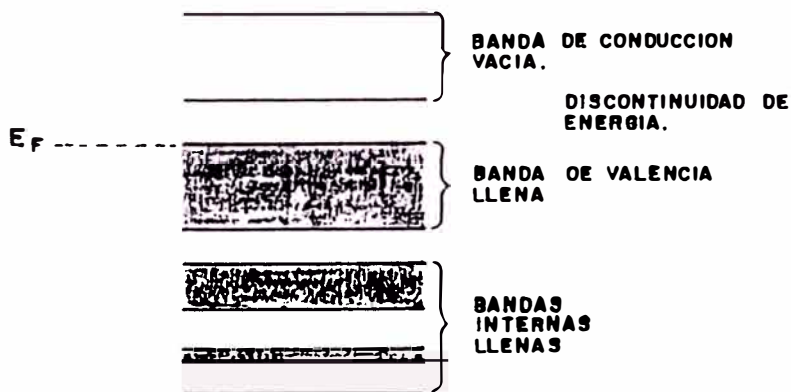


Fig. 1.12 Bandas de energía de un aislador

#### 1.4.4 Cambio de la energía cinética de un electrón por impacto con un blanco ( $\Delta E_K$ )

Consideramos la influencia de un campo eléctrico  $E$  sobre un gas de electrones libres. Supongamos que existen "N" electrones por unidad de volumen desplazándose al azar con una distribución de velocidad apropiada a la condición de equilibrio térmico a la temperatura "T". En ausencia de un campo eléctrico exterior, la velocidad media o de traslación será nula, ya que en el equilibrio, el mismo número de electrones se mueven en una dirección como en la opuesta.

$$v_D = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n v_i \quad (1.9)$$

Introduzcamos el concepto de "tiempo de relajación  $\tau$ ". Este tiempo viene íntimamente relacionado con el tiempo medio de vuelo entre dos colisiones, así como con el recorrido libre medio de los electrones de conducción.

El tiempo de relajación, puede definirse como la duración necesaria para que se establezca el equilibrio (mediante colisiones) a partir de una situación inicial perturbada en la cual  $v_D = 0$ . La ecuación del movimiento de traslación será:

$$m \left( \frac{d\bar{v}_D}{dt} + \frac{\bar{v}_D}{\tau} \right) = \bar{F} \quad (1.10)$$

donde  $F$  es la fuerza exterior media que actúa sobre un electrón. En ausencia de fuerzas externas el movimiento libre satisface la ecuación:

$$\frac{d\bar{v}_D}{dt} + \frac{\bar{v}_D}{\tau} = 0 \quad (1.11)$$

Si  $\bar{v}_D(0)$ , es la velocidad inicial de traslación en la distribución perturbada, el restablecimiento del equilibrio se verifica mediante la solución apropiada de la ecuación anterior.

$$\bar{v}_D(t) = \bar{v}_D(0) e^{-t/\tau} \quad (1.12)$$

En estas condiciones una perturbación del equilibrio decae exponencialmente en el tiempo característico " $\tau$ ". Observemos además que el término  $m \bar{v}_D/\tau$  posee la forma familiar de una fuerza de fricción o de amortiguamiento, en donde  $m/\tau$  juega el

papel de un coeficiente de fricción. Si no existiera fricción en el sistema electrónico (es decir, si el tiempo de relajación fuera infinitamente largo), los electrones de conducción se acelerarían sin límites en un campo eléctrico constante.

Con un tiempo de relajación finito la ecuación del movimiento en un campo eléctrico constante es:

$$m \left( \frac{d\bar{V}_D}{dt} + \frac{V_D}{t} \right) = e \bar{E} \quad (1.13)$$

una de cuyas soluciones particulares es:

$$\bar{V}_D = \frac{et\bar{E}}{m} \quad (1.14)$$

Esta solución representa una situación en la cual la velocidad de traslación no varía con el tiempo y se obtiene a partir de la ecuación (1.13) con la condición  $dV_D/dt = 0$ . Esta es la velocidad media con que se mueven los electrones en el gas ionizado. Este valor debe reemplazarse en la ec. (1.6)

$$\frac{m_0 c^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} = \frac{3}{2} KT \quad (1.6)$$

También de (1.6) obtenemos:

$$v = c \sqrt{1 - \frac{4m_0^2 c^4}{9K^2 T^2}} \quad (1.15)$$

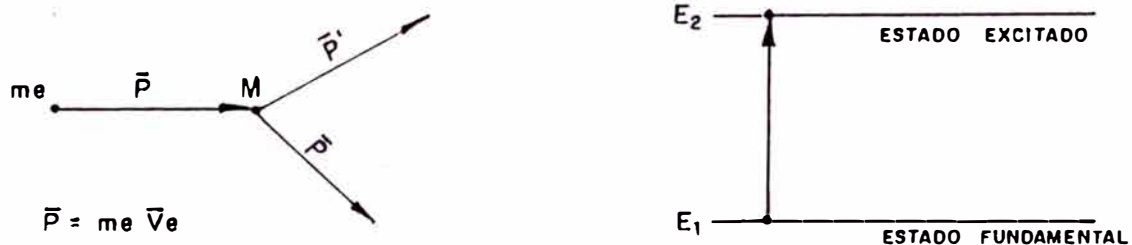
De ambas ec. (1.14) y (1.15) podemos hallar el tiempo de relajación " $\tau$ ":

$$\tau = \frac{mc}{eE} \sqrt{1 - \frac{4m_0^2 c^4}{9K^2 T^2}} \quad (1.16)$$

Supongamos que una partícula rápida "q" choca con un sistema "A" (que puede ser un átomo, una molécula o un núcleo), que se encuentra en su estado fundamental de energía "E<sub>1</sub>". Como resultado de la interacción proyectil-sistema, hay un intercambio de energía. Sea "E<sub>2</sub>" la energía del primer estado excitado del sistema (fig.1.13). La colisión será elástica (es decir, se conservará la energía cinética) a no ser que el proyectil tenga energía cinética suficiente para transferir al blanco la energía de excitación "E<sub>2</sub>-E<sub>1</sub>". Cuando ocurre ésto, la colisión es inelástica y podemos representarla por:



Cuando la masa del proyectil "q" es muy pequeña respecto a la del blanco "A", como ocurre en el caso de un electrón que choca con un átomo, la condición para que haya colisión inelástica es:



- a) Relación entre los momentum del sistema antes y después de una colisión.      b) Los electrones o átomos que están en el nivel E<sub>1</sub> pasan al nivel E<sub>2</sub>.

Fig. 1.13  $\Delta E$  de energía cinética de un electrón (m<sub>e</sub>) cuando choca con un blanco (M)

$$E_k \geq E_2 - E_1$$

$$E_k = \frac{1}{2} m_e v_e^2 = \frac{1}{2m_e} p^2$$

E<sub>k</sub> = Energía cinética del proyectil antes de la colisión.



La energía cinética del proyectil después de la colisión será:

$$E_{\kappa}' = E_{\kappa} - (E_2 - E_1)$$

La energía cinética que debe tener el proyectil para llevar a su blanco al primer nivel excitado es:

$$E_{\kappa} = \frac{1}{2m} p^2 = \left(1 + \frac{m}{M}\right) \Delta E$$

Si el proyectil es mucho más liviano que el blanco, entonces  $m \ll M$ , luego

$$E_{\kappa} = \Delta E = E_2 - E_1 \quad (1.18)$$

Esta es la condición para que haya colisión inelástica entre un electrón y un átomo o molécula.

Por ejemplo, supongamos que un electrón de energía cinética  $E_{\kappa}$  se mueve a través de una sustancia, digamos vapor de mercurio. Si  $E_{\kappa}$  es menor que la primera energía de excitación de mercurio ( $E_2 - E_1$ ), todas las colisiones son elásticas y el electrón se mueve a través del vapor de mercurio perdiendo energía muy lentamente, ya que la máxima energía cinética pérdida en cada colisión es aproximadamente:

$$\Delta E_{\kappa} = -4\left(\frac{m_e}{M}\right) E_{\kappa} = 5 \times 10^{-6} E_{\kappa} \quad (1.19)$$

Por el contrario, si  $E_{\kappa}$  es mayor que " $E_2 - E_1$ ", la colisión puede ser inelástica y el electrón puede perder la energía " $E_2 - E_1$ " en un sólo choque. Si la energía cinética inicial del electrón no es mucho mayor que " $E_2 - E_1$ ", la energía del electrón después de la colisión inelástica es insuficiente para excitar otros átomos; las siguientes colisiones del electrón serán

elásticas. Pero si la energía del electrón inicialmente es muy grande, el electrón puede experimentar otras colisiones inelásticas más, perdiendo una energía " $E_2 - E_1$ " en cada una y produciendo más átomos excitados antes de reducir su velocidad por debajo del umbral para colisiones inelásticas.

#### 1.4.5 Emisión termoiónica

La energía necesaria para extraer un electrón del nivel ocupado más alto de un metal se le denomina energía de arranque del metal ( $\phi$ ). A temperatura relativamente altas, la ocupación de los estados electrónicos se extiende a niveles de energía por encima de " $E_F$ ". Si la temperatura es suficientemente alta, algunos electrones adquieren energías mayores que " $E_F + \phi$ " y escapan del metal. Una forma de obtener altas temperaturas es calentar el metal. Los electrones "evaporados" se denominan termoelectrones. Este proceso se denomina "emisión termoiónica".

Utilizando la ley de distribución de Fermi-Dirac para calcular el número de electrones, que llegan a la superficie del metal con energía suficiente y con una dirección de movimiento apropiada para escapar de él, se puede obtener la densidad de corriente termoeléctrica " $j$ " que sale de la superficie del metal en función de la temperatura del mismo. El resultado obtenido se conoce como la ecuación de Richardson-Dushman:

$$j = \frac{4\pi m_e}{h^3} (KT)^2 e^{-\phi/KT} = AT^2 e^{-\phi/KT} \quad (1.20)$$

$m_e$  = masa del electrón

$h$  = cte. de Planck

$K$  = cte. de Boltzmann

T = temperatura °K

$\phi$  = energía de arranque del metal (eVoltios).

Esta ecuación no se sigue rigurosamente por varias razones:

- a. En primer lugar la emisión electrónica es muy sensible a las condiciones de la superficie y a la orientación de ésta respecto a la red cristalina de metal.
- b. Además, a medida que la temperatura aumenta la energía de arranque varía debido al aumento del número de electrones que tienen una energía más alta que el nivel de Fermi ( $E_F$ ).

Tabla N°1.3 Valores de la cte. termoiónica "A"

obtenidas experimentalmente usando (1.20)

<u>Metal</u>	<u>"A" cm<sup>2</sup> °K<sup>2</sup></u>
Cs	160
Cr	48
W	75
Pt	32
Ta	55
Ni	30
Ca	60

#### 1.4.6 Fotoionización

Para explicar el fenómeno de fotoionización, haremos las siguientes suposiciones:

- a. La dispersión de la radiación electromagnética por un electrón libre se puede considerar como un choque entre un electrón y una partícula de masa en reposo nula.
- b. La radiación electromagnética hace las veces de una partícula de masa en reposo nula, llamada "Fotón".

c. La energía y el momentum de la partícula de masa en reposo nula (Fotón) están relacionados con la frecuencia y la longitud de onda de la radiación electromagnética por:

$$E = h\gamma \quad (1.21)$$

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (1.22)$$

E = energía del Fotón

h = cte de Planck

$\gamma$  = frecuencia de la radiación electromagnética emitida.

p = momentum del Fotón

$\lambda$  = longitud de onda del Fotón

Si un átomo (o molécula) está inicialmente en el estado más estable o de energía mínima (estado fundamental) y absorbe radiación electromagnética (Fotón), entonces el átomo (o molécula) pasa a otro estado de energía más alto llamado excitado y puede dar lugar a la emisión de un electrón. Lo que queda es un átomo (o molécula) ionizado. Este proceso se llama fotoionización:



A = partícula neutra

$h\gamma$  = energía del fotón

$A^+$  = partícula ionizada positivamente

$e^-$  = electrón libre negativo

Como el sistema (átomo o molécula) sólo puede tener ciertos valores permitidos de energía  $E_1, E_2, E_3, \dots$ , llamados "niveles de energía", entonces cuando se produce la fotoionización, se observarán sólo ciertos valores de frecuencia  $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots$ ,

correspondientes a transiciones entre dos niveles de energía permitidos. Esto es debido a que la energía está cuantizada.

El cambio en la energía del átomo (o molécula) es " $E_2 - E_1$ " y la energía absorbida por la radiación electromagnética es la de un fotón igual a " $h\gamma_0$ ". Luego, por conservación de la energía tenemos:

$$E_2 - E_1 = h\gamma_0 \quad (1.24)$$

y el valor de la frecuencia de la radiación electromagnética absorbida es:

$$\gamma_0 = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

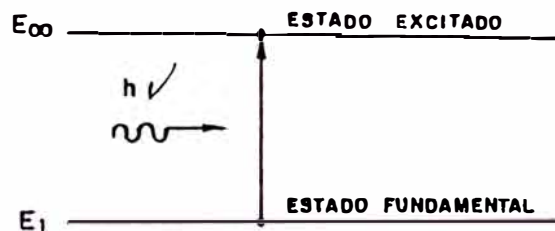


Fig. 1.14 Cuando se absorbe un fotón se libera un electrón (absorción)

Llamamos "I" a la energía de ionización necesaria para extraer un electrón de un átomo (o molécula).

$$I = E_{\infty} - E_1 \quad (1.25)$$

La energía cinética del electrón emitido será:

$$E_k = h\gamma - (E_{\infty} - E_1) \quad (1.26)$$

$$E_k = h\gamma - I \quad (1.27)$$

Para que se produzca la fotoionización la energía del fotón debe ser igual o mayor que "I". El valor de "I" depende del estado estacionario inicialmente ocupado por los electrones desalojados.

La captura radioactiva es un proceso inverso a la fotoionización. Un átomo (o molécula) que está excitado puede liberar energía en forma de radiación electromagnética (fotón) cuando pasa a su estado estable o fundamental.

En la captura radioactiva un ión captura un electrón libre con energía cinética " $E_k$ " formando un estado ligado y emitiendo un fotón:



La energía del fotón emitido es:

$$h\nu = E_k + I$$

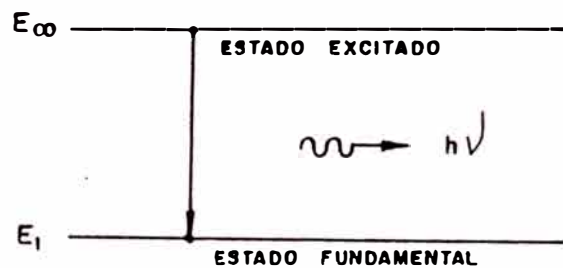


Fig. 1.15 Cuando se emite un fotón se captura un electrón (emisión).

### 1.5 Ionización de un gas

La energía de ionización es la energía necesaria para romper la energía de enlace de los elementos y dissociarlos en átomos, moléculas o iones separados.

El enlace iónico es el enlace resultante de la interacción electrostática de iones con carga opuesta. Los iones se disponen de tal modo que la atracción coulumbiana entre iones de signo opuesto es superior a la repulsión coulumbiana entre iones de igual signo. El enlace iónico se caracteriza por tener una débil conductividad eléctrica a bajas temperaturas. En la fig. 1.16 se observa la ionización de un gas en función de la temperatura.

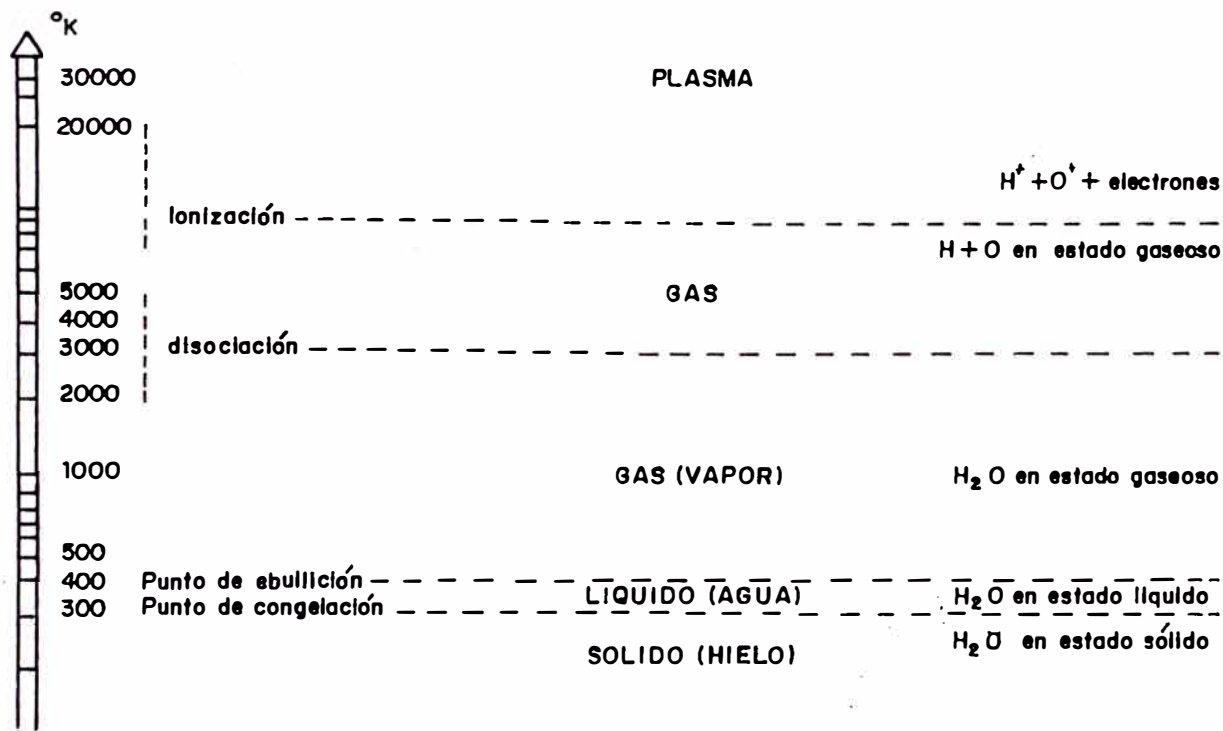
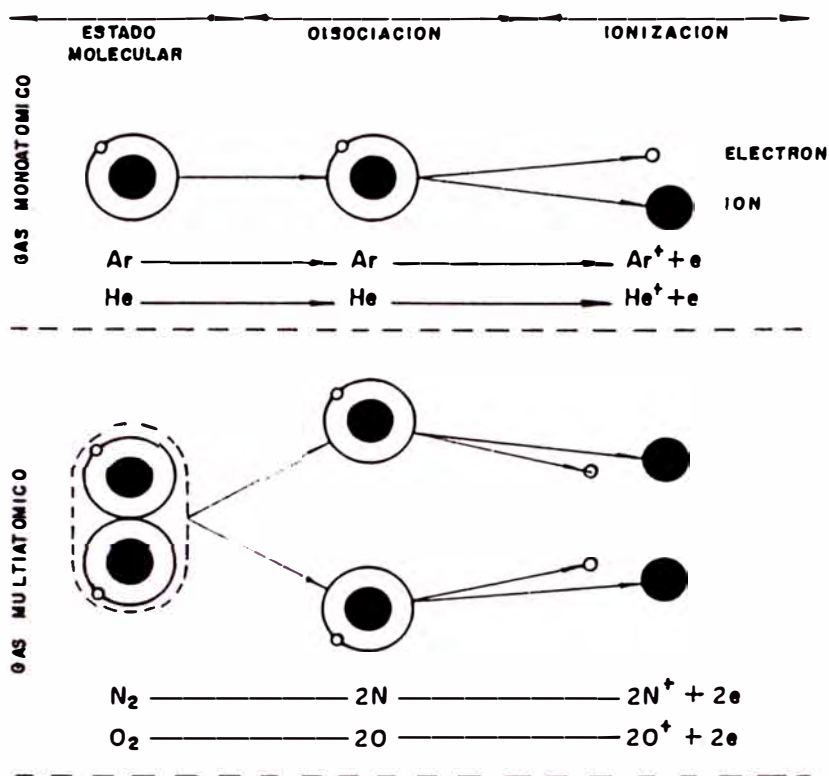


Fig. 1.16 .— Ionización de un gas en función de la temperatura.

Cada par de iones está formado por un ión positivo y un electrón. La masa del electrón es 1/1,000 veces la masa del ión positivo más liviano, luego su movilidad es mucho mayor y consecuentemente la mayoría de la corriente es llevada por los electrones.

Los electrones liberados en la ionización primaria, adquieren antes de llegar al ánodo, energía suficiente como para poder producir una ionización adicional al chocar con las moléculas del gas de protección. Cada electrón que impacta en el gas produce una pequeña "avalancha" de electrones, que se liberan cerca del ánodo. Estos electrones secundarios se originan cuando un ion positivo de argón; por ejemplo, se neutraliza en la superficie metálica del cátodo, liberando una cantidad considerable de energía que se puede utilizar para expulsar un electrón de la superficie del cátodo. Estos electrones secundarios, cuando se mueven hacia el ánodo producen nuevas ionizaciones, perpetuándose de este modo la descarga eléctrica.

El grado de ionización de los átomos que constituyen un elemento iónico es tal que la configuración electrónica de todos los iones corresponden a capas electrónicas cerradas como en los átomos de los gases inertes.

La figura 1.17 muestra la energía de ionización de todos los elementos de la tabla periódica en función del número atómico, cuando el estado inicial de los electrones es el estado fundamental y es llevado hasta el estado  $E_{\infty}$  de energía cero (a una distancia muy grande).



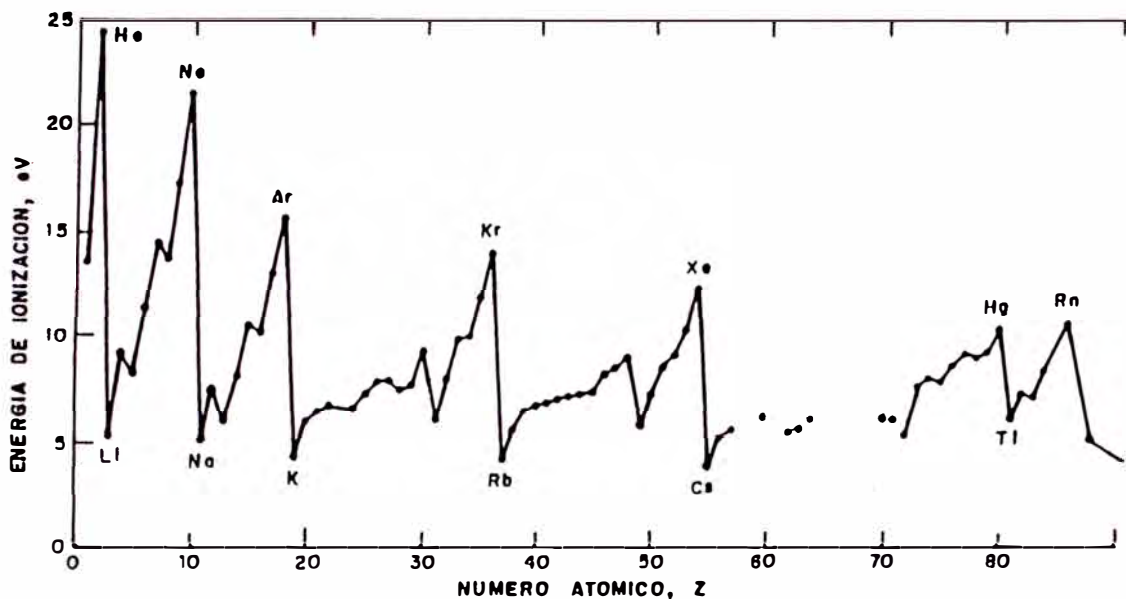


Fig. 1.17 Energía de ionización de los elementos en función del número atómico o trabajo necesario para la separación del primer electrón de un átomo.

Por ejemplo, si se quiere desalojar un electrón del estado fundamental de un átomo de hidrógeno, la energía de ionización necesaria debe ser de 13.6 eVoltios. Para un átomo de helio la energía de ionización necesaria para sacar un electrón del estado fundamental es de 24.6 voltios.

La temperatura necesaria para ionizar un gas depende de la energía de ionización "E" del gas. Para aquellos gases que tienen mayor energía de ionización "E", la temperatura para su disociación e ionización es mayor.

De acuerdo con la fig. 1.17 la energía de ionización del argón es  $E_{Ar} = 15.76$  eVoltios y la formación de vehículos de carga empiezan a formarse a temperaturas de  $8,000^{\circ}K$  aproximadamente. De acuerdo al gas utilizado en la columna del arco, la temperatura oscila entre  $5,000^{\circ}K$  y  $8,000^{\circ}K$ . En la tabla

1.4 se muestra la energía y temperatura para la disociación e ionización de diferentes gases.

TABLA 1.4

GAS	ENERGIA DE IONIZACION	TEMPERATURA PARA EL 90% DE DISOCIACION
CO <sub>2</sub>	14.4 eV	3800°K
H	13.5 eV	4575°K
O	13.6 eV	5100°K
N	14.5 eV	8300°K
Ar	15.7 eV	8950°K

Luego de visto los fenómenos físicos que se producen en el arco de soldar, podemos concluir lo siguiente:

- a. En el arco de soldar se cumplen los principios de conservación de la energía.

$$\Delta E_{\text{eléctrica}} = \Delta E_{\text{cinética electrones}} = \Delta E_{\text{térmica}}$$

- b. Este intercambio de energía es reversible, perpetuándose de este modo el arco eléctrico.



- c. Se produce al mismo tiempo la ionización del gas de protección y el arranque de los electrones libres del metal que se suelda, los cuales impactan en el electrodo.
- d. La ionización del gas de protección y el arranque de los electrones libres del metal, se produce por:

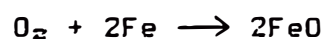
- La aplicación de un campo eléctrico elevado que origina la separación y recolección de iones debido al pasaje de una partícula cargada en el gas ( $\Delta E_{cinética}$ ).
- Por la generación de altas temperaturas que aumentan la energía cinética de las moléculas del gas separándolo en iones.
- Por emisión termoiónica.
- Por fotoionización.

### 1.6 Efectos nocivos del aire en la soldadura

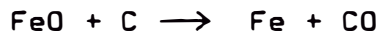
El aire de la atmósfera contiene un 21% de oxígeno, 78% de nitrógeno, 0.94% de argón y 0.04% de otros gases (principalmente dióxido de carbono). La atmósfera también contiene una gran cantidad de agua, dependiendo de la humedad del ambiente. Entre los elementos que contiene el aire, el oxígeno, nitrógeno e hidrógeno son los que causan más dificultades en la soldadura.

**Oxígeno.**- Es un elemento altamente reactivo y se combina con otros elementos en el metal o aleaciones para formar gases y oxígenos indeseables. Las dificultades ocasionadas por el oxígeno son:

- a. **En el Acero:** El oxígeno se combina con el hierro y forma composiciones que pueden tener inclusiones en el metal de soldadura, reduciendo sus propiedades mecánicas. A la temperatura del arco el oxígeno reacciona con el metal fundido formando óxido de fierro:



El óxido de fierro reacciona con el carbono disuelto en el metal fundido, produciéndose óxido de carbono (gas) y hierro libre (metal).



A la temperatura de solidificación, esta reacción se produce violentamente en el metal que aún permanece fundido, por lo que es difícil que la burbuja de "CO" pueda escapar ya que queda atrapada por el metal solidificado alrededor de ella, por lo que pueden aparecer numerosas porosidades en la soldadura de aceros al carbono (fig.1.18).

b. **En el Aluminio:** Al calentar el aluminio, se combina instantáneamente con el oxígeno, formándose una capa de óxido de aluminio que se extiende por la superficie del metal en forma de película. El punto de fusión del aluminio es 658°C y del óxido de aluminio es 2100°C, por lo que se puede calentar mucho tiempo el metal base con su soplete sin conseguir fundir su superficie, mientras que el núcleo está líquido en estado de ebullición.

**Nitrógeno.-** El hierro fundido tiene la propiedad de tomar una cantidad relativamente grande de nitrógeno en su solución. Sin embargo, a la temperatura normal la solubilidad del nitrógeno en el hierro es muy baja. Al enfriar el arco, el nitrógeno se precipita o sale de los nitratos de hierro. Estos nitratos causan alta fuerza de elasticidad, fuerza tensil, durezas y un descenso pronunciado en la ductibilidad y resistencia al impacto de los materiales de acero. La pérdida de ductibilidad debida a la presencia de nitratos de hierro, producen por lo general

rajaduras en las áreas adyacentes al metal soldado. En grandes cantidades, el nitrógeno puede producir muchas porosidades en el material depositado (fig. 1.18).

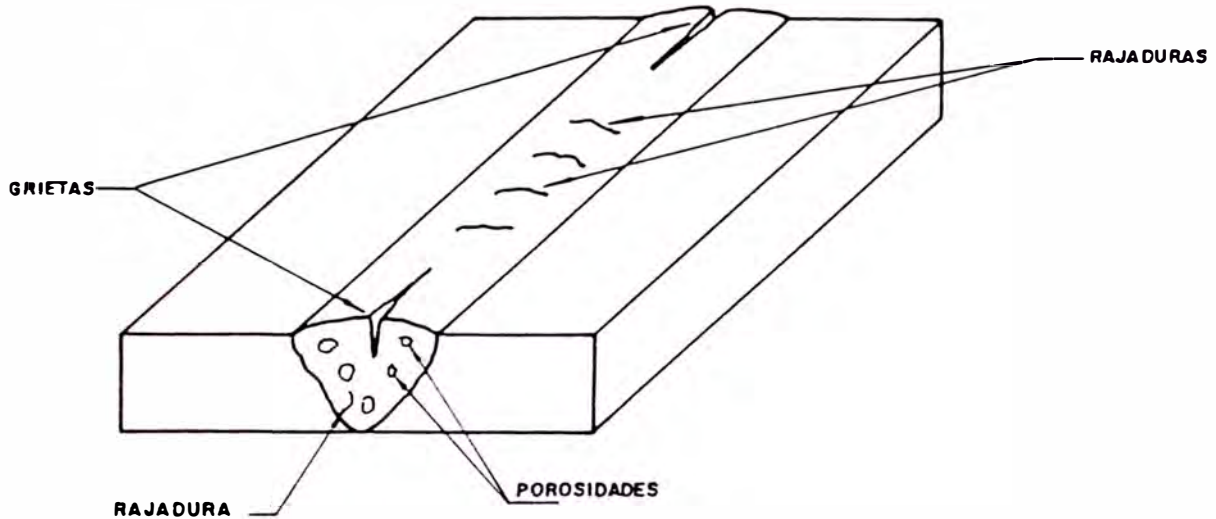


Fig. 1.18 Efectos nocivos de los elementos ajenos a la soldadura.

**Hidrógeno.-** El hierro puede retener una cantidad relativamente grande de hidrógeno cuando se funde, pero cuando comienza a solidificarse, el hidrógeno es rechazado. El hidrógeno atrapado en el metal solidificado se reúne en ciertos puntos y causa grandes presiones o relajamientos. Las presiones originan rajaduras pequeñas en el metal de soldadura, los cuales pueden agrandarse posteriormente. El hidrógeno también causa los efectos conocidos como ojos de pescado y rajaduras interiores (fig. 1.18).

### 1.7 Gas de protección

Los efectos nocivos del oxígeno, nitrógeno e hidrógeno hacen necesario la exclusión de los mismos del área de soldadura. Esto se consigue mediante la protección con un gas inerte. Los gases inertes son elementos simples muy estables y no reaccionan con

otras sustancias. El metal que se va fundiendo no sufre ninguna variación en su composición química. Se les llama gases inertes, por que tienen la última capa de su configuración electrónica totalmente llena. Su número atómico es  $Z = 2, 10, 18, 36, 54$  y  $86$  correspondientes al: Helio, Neón, Argón, Criptón, Xenón y Radón. Esto se puede observar en la figura 1.17. En la industria de la soldadura se utiliza el helio y el argón, por ser los únicos que pueden obtenerse en cantidades industriales a un precio razonable. No es muy recomendable usar el helio, ya que su energía de ionización es muy alta, lo cual sería peligroso para el soldador, ya que se tendría que usar tensiones de salida en el rectificador del orden de los 90 á 100 voltios. Las tensiones del arco del argón varían entre 16 y 40 voltios.

Aunque no es un gas inerte, también puede utilizarse como protección el anhídrido carbónico ( $\text{CO}_2$ ). Para ello hay que compensar su tendencia oxidante utilizando alambres-electrodos ricos en elementos desoxidantes.

La elección del gas de protección (argón,  $\text{CO}_2$ , Helio), dependerá de la economía del gas, del tipo de material a soldar (aceros al carbono, aceros aleados, aluminio, etc.) y de la calidad del trabajo que se quiere obtener.

#### **1.7.1 Argón como gas protector**

El Argón es 1.4 veces más pesado que el aire y es insoluble en el material fundido (acero, cobre, aluminio, etc.) por lo que se protege mejor el baño de soldadura contra las entradas de aire. El bajo potencial de ionización del argón (14.5 eV) permite arcos suaves, muy tranquilos, más estables y con pocas proyecciones (sin chisporroteo). Debido a que la atmósfera de argón tiene una baja tensión de arco, hay menos peligro de perforar las piezas cuando se sueldan espesores delgados. La

atmósfera de argón es bastante clara, lo que permite un mejor control del baño de fusión y del propio arco. El inconveniente de la atmósfera de argón, es la formación de un cordón ancho y poco penetrado en los costados, y estrecho y profundo en el centro, lo que puede provocar faltas de fusión en la raíz de la junta. En el caso de aluminio y cobre necesariamente tiene que usarse argón puro.

### 1.7.2 Helio como gas protector

El Helio es un gas inerte, que tiene un alto potencial de ionización (24.5 eV), es más ligero que el aire y tiene una elevada conductividad térmica. A elevadas temperaturas de soldadura, el plasma de helio se expande (ionización térmica), reduciendo la densidad de la atmósfera del arco. En la soldadura con helio y debido a las grandes pérdidas de calor por corrientes gaseosas, el gradiente de potencial a lo largo de la columna del arco es mayor que en otras atmósferas. Esto supone que gran parte de la energía se pierde a través del propio arco y no se transmite a la pieza. Como consecuencia, se obtienen cordones más anchos y con una penetración relativamente más baja que cuando se suelda con argón (fig. 1.19).

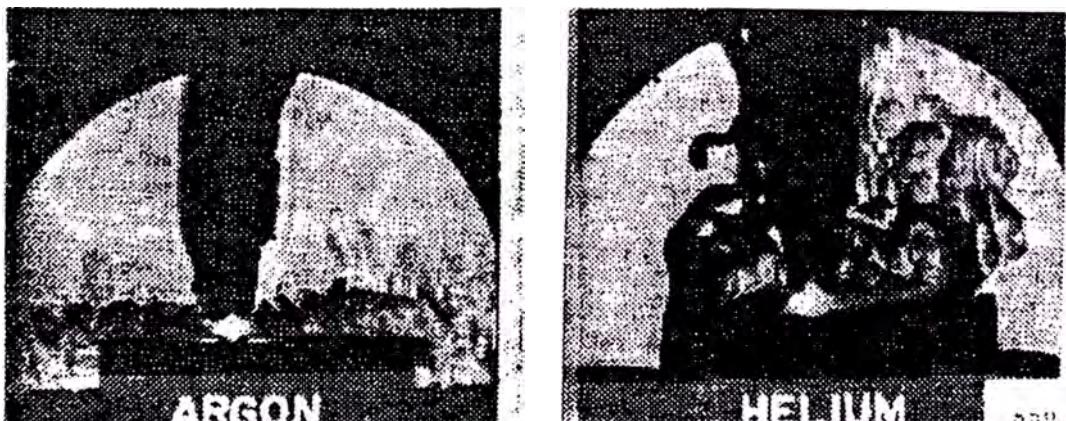


Fig. 1.19 Las fotografías muestran cómo la mayor densidad del argón hace que este gas se extienda sobre la superficie a soldar en lugar de elevarse rápidamente como sucede con el helio.

### 1.7.3 Anhidrido carbónico (CO<sub>2</sub>) como gas protector

A diferencia del argón y el helio, que están constituidos por átomos simples, el anhídrido carbónico es un gas pluriatómico compuesto de moléculas. Cada molécula contiene un átomo de carbono y dos de oxígeno. A temperaturas normales el CO<sub>2</sub> se comporta como un gas inerte, pero cuando se le somete a elevadas temperaturas se disocia en monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O<sub>2</sub>). Se produce esta disociación hasta que la concentración del oxígeno en la atmósfera del arco alcance valores de un 20 a un 30%. Esta tendencia oxidante de la atmósfera de CO<sub>2</sub> obliga a utilizar electrodos de aportación ricos en elementos desoxidantes; los cuales tienen una gran afinidad con el oxígeno, reaccionando inmediatamente con él, evitando que se combine con el carbono y el hierro del metal base. Los desoxidantes más utilizados en los hilos de aportación son el manganeso y el silicio. Los productos resultantes SiO<sub>2</sub>, MnO, aparecen en la superficie de la junta soldada en forma de escoria liviana.

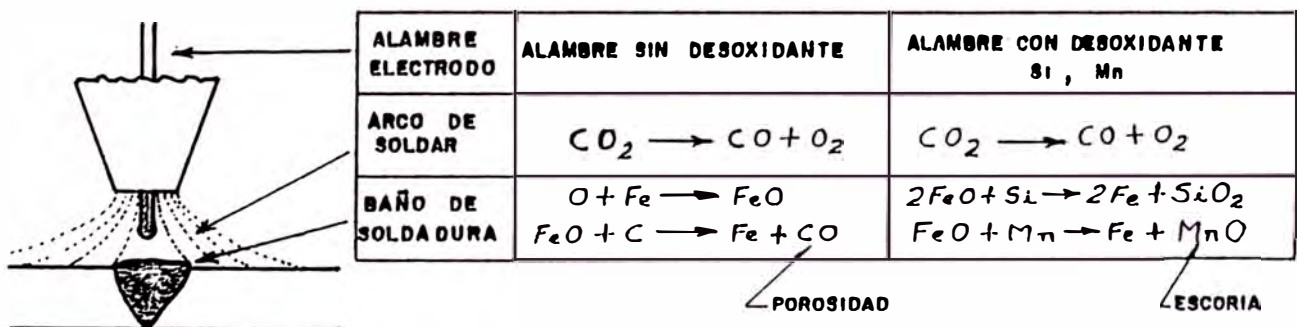


Fig. 1.20 Acción de los desoxidantes en el baño de soldadura.

La soldadura con CO<sub>2</sub> como gas de protección, permite obtener penetraciones más profundas y anchas en el fondo del cordón de



soldadura, lo que facilita la labor del soldador y disminuye el riesgo de defectos tales como la falta de penetración y fusión. Además resulta más barato que el argón y otros gases protectores. El principal inconveniente del  $\text{CO}_2$  es su tendencia a producir arcos violentos que pueden presentar proyecciones y salpicaduras, principalmente cuando se sueldan materiales delgados donde la apariencia es de importancia primordial.

Además de proteger el arco contra los efectos nocivos del aire, los gases de protección cumplen con:

- Proveer una fuente de transferencia de calor para crear y mantener el arco de soldadura.
- Determinar la forma de transferencia del metal y la cantidad de proyecciones (chisporroteo).
- Determinar la penetración del material aportado.
- Determinar la velocidad del soldeo
- Determinar las irregularidades o imperfecciones del cordón.

### **1.8 Curva característica del arco de soldar**

El arco de soldar es una descarga eléctrica entre el electrodo y la pieza a soldar que se produce a través de un gas ionizado conocido como plasma. (fig.1.21). La ley de Ohm no es aplicable al arco eléctrico, por no comportarse como un conductor convencional. (La longitud de la columna del arco depende de la longitud del arco). La tensión de arco es directamente proporcional a la longitud del arco.

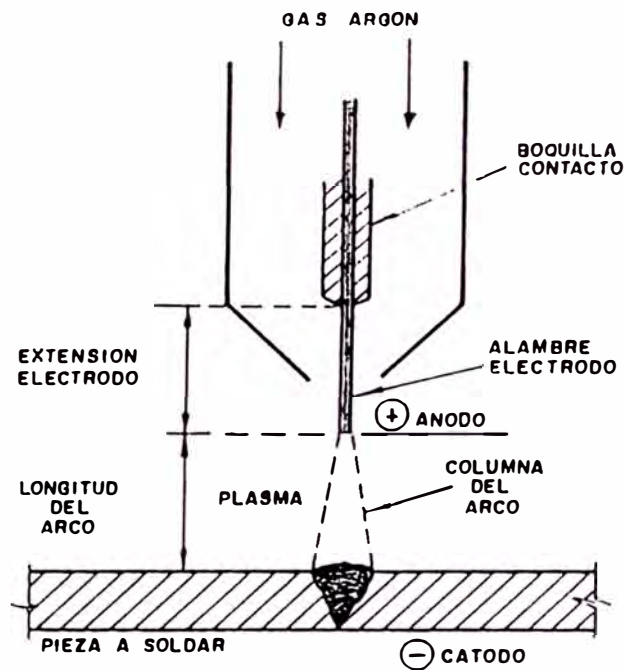


Fig. 1.21 Longitud del arco y de la columna del arco.

La temperatura y el diámetro de la columna del arco dependen de la intensidad de corriente que pasa por el arco. Si se aumenta la corriente a partir de un valor bajo, se provoca un brusco aumento del área de la sección de la columna del arco y un aumento de la temperatura, de manera que la tensión cae a un mínimo. En esta parte de la curva se dice que el arco tiene una característica decreciente (pendiente negativa). Aumentando luego la corriente hasta valores elevados, la curva asciende proporcionalmente a la corriente. Esto se debe a que el aumento de la densidad de corriente por encima de un valor determinado ya no puede aumentar la sección de la columna del arco. Por eso la tensión en el arco crece. En esta parte de la curva se dice que el arco tiene una característica creciente (pendiente positiva) (fig. 1.22).

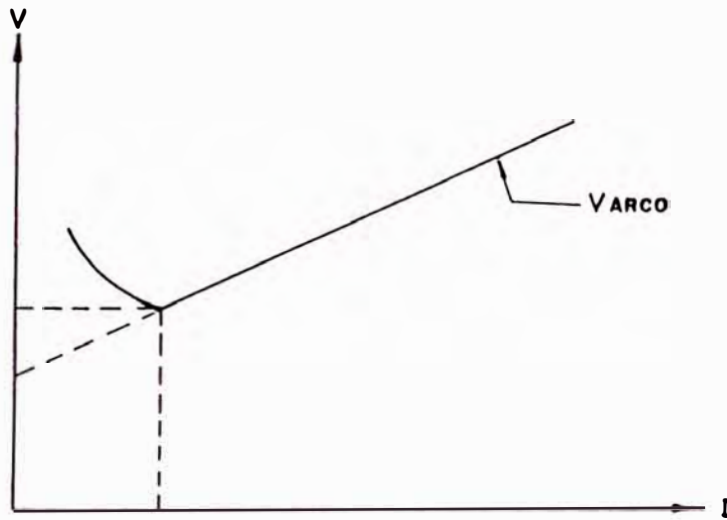


Fig. 1.22 Curva característica del arco eléctrico

Las normas VDE 0542 tienen normalizada la tensión del arco según la expresión:

$$\text{Gas argón} : \text{Varco} = 14 + 0.05 \text{ Isol} \quad (1.29)$$

$$\text{Gas CO}_2 : \text{Varco} = 16 + 0.05 \text{ Isol} \quad (1.30)$$

$$\text{Gas Helio} : \text{Varco} = 20 + 0.05 \text{ Isol} \quad (1.31)$$

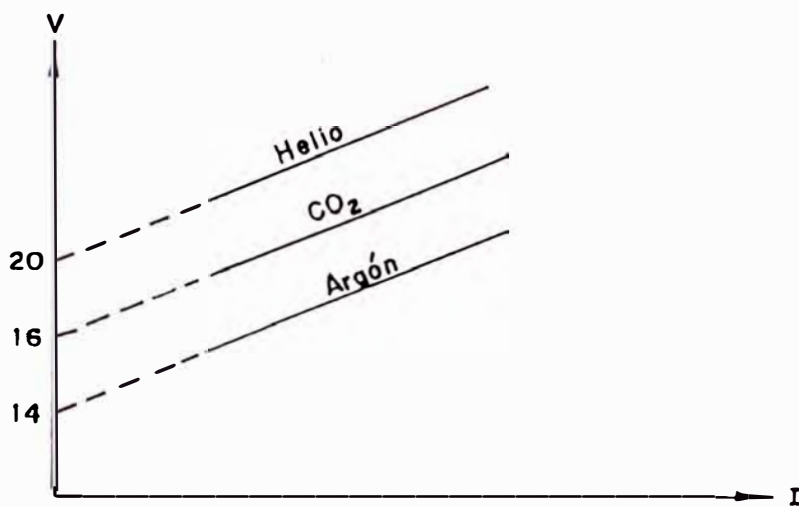


Fig. 1.23 Curva característica normalizada

En la figura 1.23 se observa que mientras más grande sea el potencial de ionización del elemento, mayor será la tensión de arco necesaria para su ionización.

En este trabajo solamente tomaremos en cuenta el argón y el CO<sub>2</sub>, por ser los más usados industrialmente.

## 1.9 Fuerzas que intervienen en la transferencia del metal

Las más importantes son:

- a. Tensión superficial (Fs).
- b. Fuerza gravitacional (Fg).
- c. Fuerza electromagnética (Fm).
- d. Fuerza hidrodinámica debido al flujo de gas (Fε).

### 1.9.1 Tensión superficial (Fs)

La tensión superficial tiende a retener en su posición la gota líquida del metal que se forma en la punta del electrodo. La fuerza de retención (Fs) se presenta cuando la gota está a punto de separarse del electrodo por efecto de su propio peso.

$$F_s = 2\pi \gamma a \psi(a/c) \quad (1.32)$$

a = radio del electrodo

$\gamma$  = tensión superficial

c<sup>2</sup> = cte de capilaridad del metal

$$c^2 = \frac{\gamma}{g \rho}$$

g = aceleración de la gravedad

$\rho$  = densidad

$\psi(a/c)$  = es una función compleja que varía generalmente entre 0.6 y 1.0 dependiendo de la relación entre "a" y "c".

Para metales comunes se tiene un valor aproximado de:

$$\sigma(a/c) = (1.0 - 2.5) a \quad [a < 0.15]$$

$$\sigma(a/c) = 0.625 a \quad [0.15 < a < 1.0]$$

donde "a" está en cm.

La tensión superficial varía con la atmósfera del arco por el contenido de gas en la fusión. Disminuyendo el contenido de gas se produce un aumento de la tensión superficial. Con un contenido de gas muy pequeño la tensión superficial impide la separación de las gotas y con ello el paso del material. Esta dificultad puede vencerse aumentando la corriente de soldadura, ya que elevando la temperatura disminuye la tensión superficial.

### 1.9.2 Fuerza gravitacional (Fg)

La aceleración de la gravedad produce una fuerza (Fg) de desprendimiento, cuando la punta del electrodo está orientada hacia abajo y una fuerza de retención cuando está orientada hacia arriba.

$$F_g = g \rho V \quad (1.33)$$

g = aceleración de la gravedad

$\rho$  = densidad

V = volumen de la gota líquida

### 1.9.3 Fuerza electromagnética (Fm)

La fuerza electromagnética es debida a la interacción de la corriente eléctrica con su propio campo electromagnético auto-inducido. Todo campo magnético ejerce sobre un elemento de volumen con una densidad de corriente  $j$  una fuerza (Fm):

$$\vec{F}_m = [ \vec{j} \times \vec{\beta} ] Vol \quad (1.34)$$

$\vec{j}$  = densidad de corriente

$\vec{\beta}$  = densidad de flujo magnética

$\bar{F}_m$  es perpendicular a  $\bar{j}$  y  $\bar{\beta}$

En un arco cilíndrico esta fuerza está dirigida al eje, puesto que  $j$  es axial y  $\beta$  está colocada en círculo concéntricos alrededor del eje del arco. La consecuencia de esto es que la columna del arco se contrae hasta que la sobrepresión que se origina, compensa la fuerza magnética actuante hacia adentro. Se sabe que dos corrientes paralelas en el mismo sentido se atraen con fuerzas iguales como resultante de su interacción magnética.

Luego, en una columna de arco puede ocurrir, que se suponga la columna del arco descompuesta en interminables hilos de corriente paralelos, que ejercen fuerzas de atracción entre sí, y la suma de estas fuerzas conduce a una fuerza total sobre la columna del arco que tiene como consecuencia una compresión radial. Esta fuerza de compresión se incrementa desde cero en la superficie del conductor hacia un valor máximo en el centro del mismo.

Su expresión es:

$$\bar{f} = \frac{I j}{100} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (1.35)$$

$\bar{j}$  = densidad de corriente (amp/cm<sup>2</sup>).

$I$  = corriente (amp.)

$\bar{f}$  = fuerza (dinas/cm<sup>2</sup>)

$r$  = radio en cualquier punto de la columna

$R$  = radio del conductor

La fuerza de sobrepresión que contrarresta la fuerza magnética es:

$$\bar{P} = \frac{I \bar{j}}{100} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right)$$

Esta presión actúa sobre la raíz del arco en la punta del electrodo, donde se inicia la gota y se conoce como efecto "Spinch" o de constricción.

Si el conductor no es cilíndrico y aumenta su diámetro al crecer la longitud de arco, se presentará entonces una componente radial de flujo de corriente que al interactuar con el campo magnético produce un componente longitudinal de fuerza magnética que tiende a expulsar la gota hacia la pieza a soldar. Su expresión será:

$$\bar{F}_m = \frac{I^2}{100} \quad (1.36)$$

Luego, el flujo de gas conductor tomará una forma cónica, comprimiéndose en las zonas de alta densidad de corriente y ensanchándose en la zona de baja densidad de corriente.

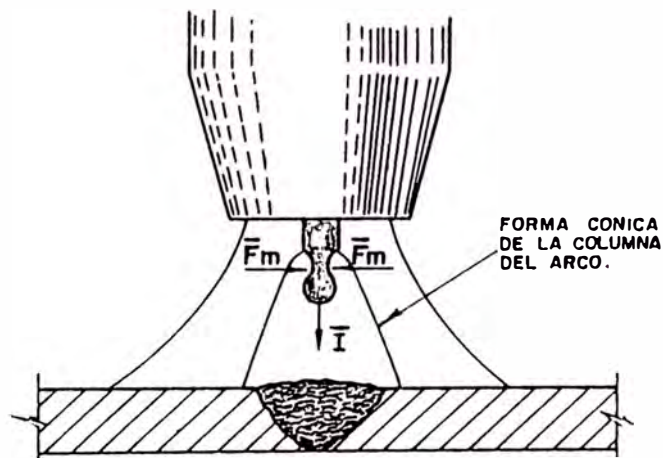


Fig. 1.24 Fuerza magnética de compresión sobre el cuello de la gota.

#### 1.9.4 Fuerza hidrodinámica ( $F_E$ )

La rápida evaporación en la superficie de una gota crea una fuerza en dirección opuesta. Si la densidad de corriente en el electrodo es suficientemente alta, una cantidad proporcional de calor del ánodo o cátodo se disipa mediante evaporación del metal. La cantidad volumétrica que se evapora está dada por:

$$q = \frac{V_E I}{H_E \rho} \quad (1.37)$$

$q$  = volumen de metal evaporado

$V_E$  = calor disipado por evaporación del ánodo del cátodo

$I$  = corriente

$H_E$  = calor de evaporación

$\rho$  = densidad del vapor evaporado

La velocidad de emisión del calor es:

$$V = \frac{q}{A}$$

donde  $A$  es el área del punto anódico o catódico y la presión desarrollada sobre la superficie correspondiente a la velocidad " $v$ ", es:

$$P = \frac{V^2 \rho}{2g} = \frac{V_E^2 j^2}{2g H_E \rho} \quad (1.38)$$

donde " $j$ " es la densidad de corriente del ánodo o cátodo y la fuerza correspondiente es:

$$F_E = AP = \frac{V_E^2 I j}{2g H_E^2 \rho} \quad (1.39)$$



## **1.10 Transferencia de metal en el arco de soldar**

La forma de transferencia del metal a través del arco de soldar depende: del diámetro del electrodo, de la naturaleza del gas protector, de la tensión de arco y de la corriente de soldadura. Al aumentar la densidad de corriente, disminuye el tamaño de las gotas y aumenta la frecuencia de transferencia.

Se presentan tres formas de transferencia de metal:

- a. Transferencia por pulverización
- b. Transferencia globular
- c. Transferencia por corto circuito

### **1.10.1 Transferencia por pulverización**

El material de aportación pasa desde el extremo del alambre-electrodo a la pieza, a través del plasma del arco, en forma de gotas muy pequeñas que se proyectan rápidamente en la dirección del electrodo. El diámetro de las gotas es igual o menor, que el diámetro del electrodo. Las partículas metálicas que se desplazan a través del arco no interrumpen la circulación de la corriente, siendo el arco muy estable y la pulverización es prácticamente ininterrumpida. Solamente sucede este tipo de transferencia cuando se usa argón mezclado con oxígeno. El argón produce un efecto de estricción sobre el extremo fundido del alambre-electrodo, lo que provoca la formación de gotas muy pequeñas. La columna del arco se distingue por tener un núcleo estrecho brillante y de forma cónica, por el interior del cual se verifica el transporte del material de aportación (fig. 1.25).

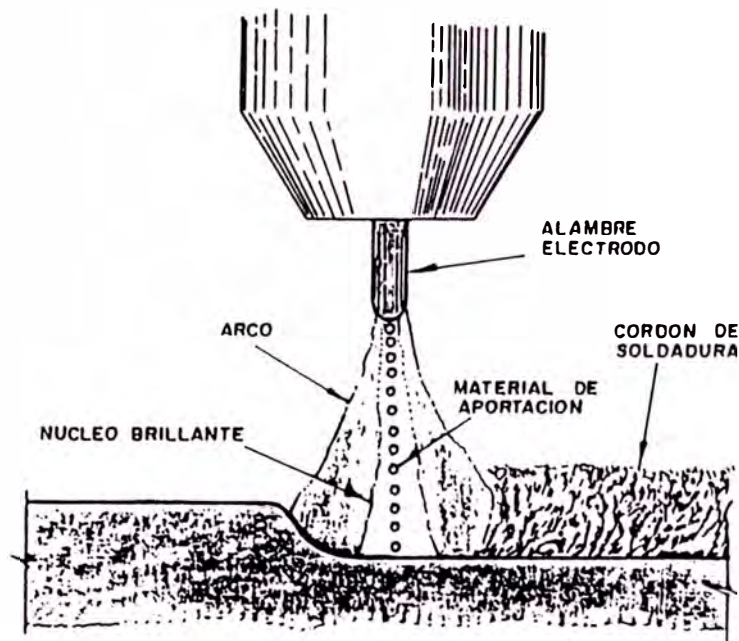


Fig. 1.25 Transporte de pulverización

Para este tipo de transferencia se requiere trabajar con grandes corrientes, por lo que es indicado para la soldadura de espesores gruesos, debido a su gran poder de penetración. No es recomendable para el soldeo de espesores finos, por el peligro de perforación de las piezas.

#### 1.10.2 Transferencia globular

La gota de metal fundido que se forma en el extremo del electrodo, va creciendo hasta alcanzar un diámetro dos o tres veces mayor que el del alambre-electrodo antes de desprenderse y pasar a la pieza del arco. En su recorrido a lo largo del arco y debido a distintos tipo de fuerzas ejercidas por éste, la gota adopta formas irregulares y adquiere un movimiento de rotación. Esto produce frecuentes cortocircuitos y como consecuencia el arco resulta inestable, la penetración es débil y se producen numerosas proyecciones.

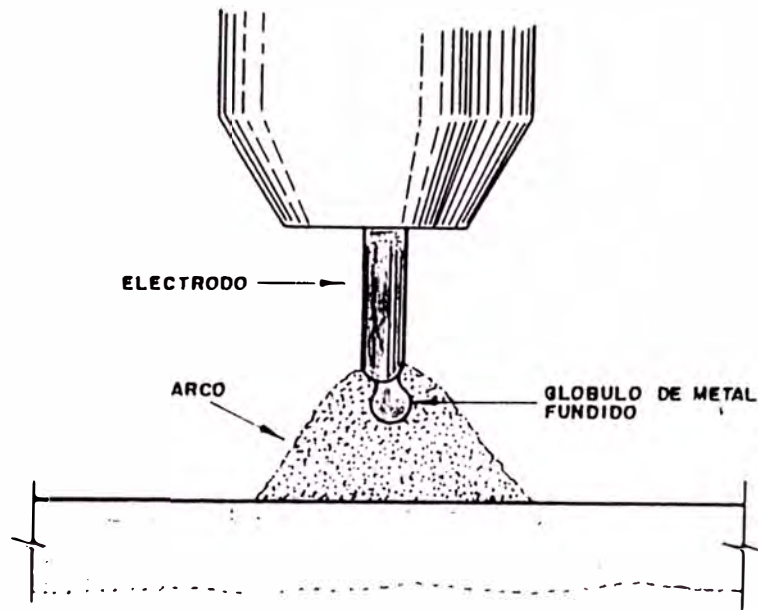


Fig. 1.26 Transporte globular.

Se presentan tres casos típicos:

**Transferencia gravitacional:** Que ocurre cuando la corriente de soldadura es bastante baja, por lo que se pueden despreciar las fuerzas de origen magnético ( $F_m$ ). El metal fundido en el extremo del alambre está influenciado sólo por la fuerza gravitacional " $F_g$ " y la fuerza de tensión superficial " $F_s$ " la cual balancea la fuerza gravitacional mientras la gota penda del extremo. A medida que se crea mayor metal fundido, el tamaño de la gota aumenta y cuando se peso excede a la fuerza de tensión superficial, la gota se desprende y cae en el baño de fusión por acción de la gravedad " $F_g$ ". El diámetro de las gotas es mayor que el diámetro del alambre-electrodo.

**Transferencia por proyección:** Ocurre cuando se incrementa la corriente, y la fuerza magnética " $F_m$ " comienza a ser

significante y como consecuencia la fuerza de expulsión es mayor. La columna del arco de forma esférica y de poca luminosidad comienza a estrecharse y se vuelve más cónica presentando una alta luminosidad en el núcleo central. Las gotas que se forman en la punta del electrodo comienzan a elongarse por acción de la presión magnética y la fuerza de expulsión aumenta cuando las gotas son expulsadas; éstas lo hacen con una aceleración inicial y durante su proyección sobre el arco, éstas son fuertemente aceleradas por el plasma.

**Transferencia por repulsión:** Cuando el área anódica en la parte inferior de la gota es pequeña ocurre una contracción de corriente que resulta en una alta presión de gas o plasma contra la parte inferior de la gota, y en fuerzas electromagnéticas dirigidas hacia arriba en el metal, en el interior de la gota. Estas fuerzas se contraponen a la fuerza de gravedad y el tamaño de la gota aumenta. Debido al sistema de fuerzas inestable la gota tiende a inclinarse hacia un lado y cuando finalmente se desprende cae con un movimiento de rotación hacia la pieza de trabajo. Esto sucede si se usa dióxido de carbono " $\text{CO}_2$ " como gas de protección. Las fuerzas que interactúan en el sistema son la tensión superficial " $F_s$ ", la fuerza hidrodinámica " $F_{\text{H}}$ ", electromagnética " $F_m$ " y gravitacional " $F_g$ ".

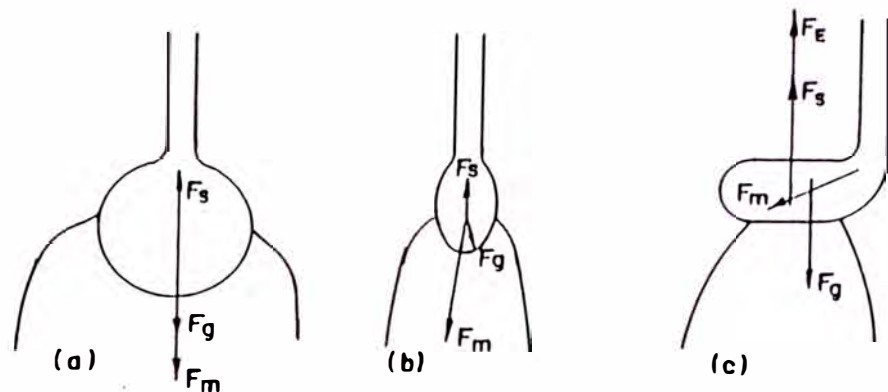


Fig. 1.27 a) Fuerza predominantemente gravitacional, baja corriente, soldadura de aluminio.  
b) Fuerza predominantemente electromagnética, alta corriente, soldadura de aluminio.  
c) Fuerza predominantemente de evaporación, soldadura con  $CO_2$ , baja corriente, transferencia por vuelo libre.

### 1.10.3 Transferencia por cortocircuito

La transferencia por cortocircuito se produce según la siguiente secuencia:

La gota de metal fundido que se forma en el extremo del alambre-electrodo va aumentando de tamaño y llega a ponerse en contacto con el baño de fusión antes de desprenderse del alambre-electrodo. En este momento se produce un cortocircuito y el arco se extingue como consecuencia de la elevada corriente de cortocircuito que circula durante unos instantes, las fuerzas magnéticas axiales rompen el cuello de la gota y ésta se separa del alambre-electrodo pasando al baño de fusión. Al romperse el cortocircuito se restablece el arco y comienza un nuevo ciclo. El transporte por cortocircuito permite la soldadura de espesores finos, por su reducido poder de penetración; además permite la soldadura en todas las posiciones (fig.1.28).

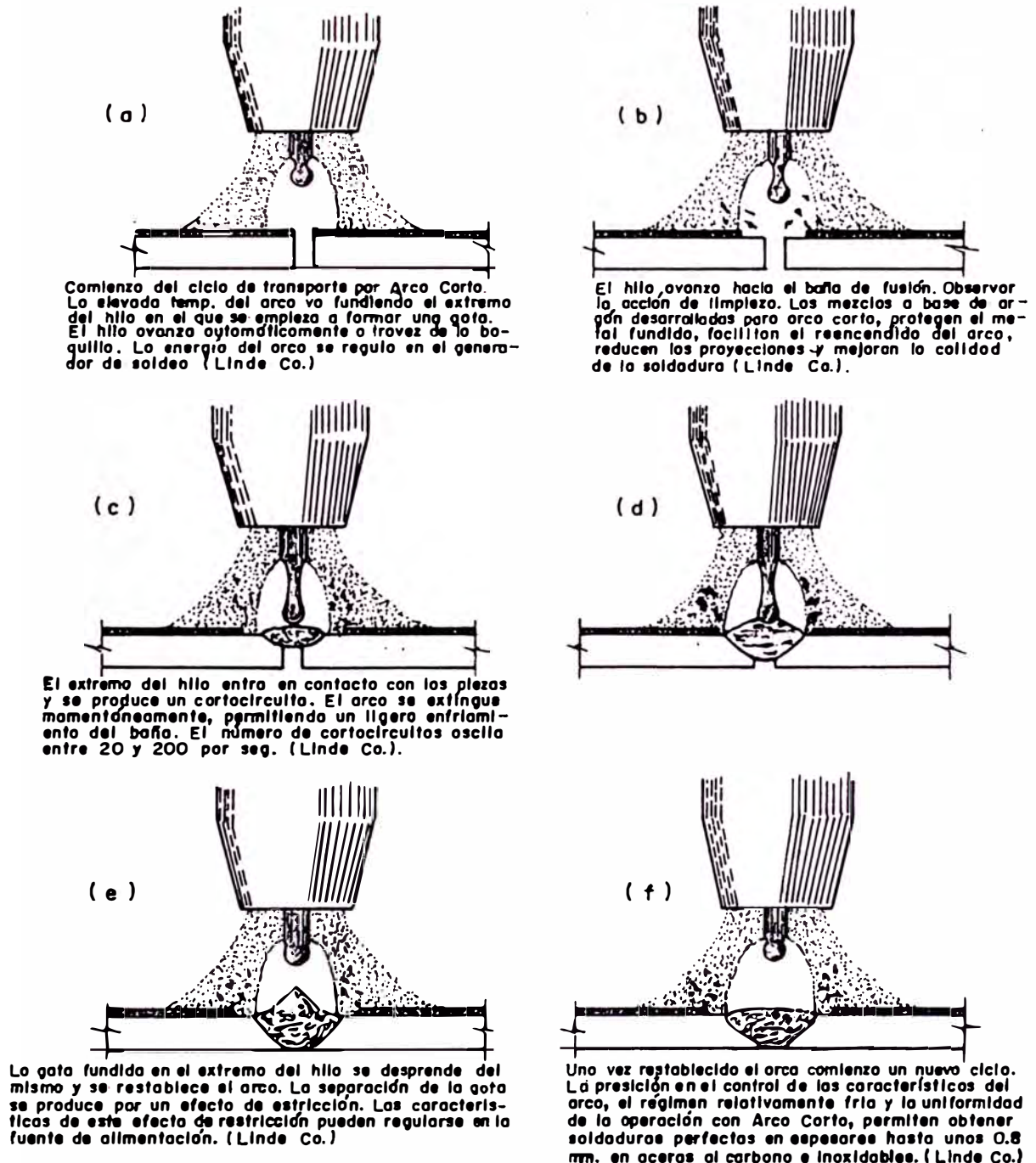


Fig. 1.28 .- Transferencia por cortocircuito.

## CAPITULO II PARAMETROS DE DISEÑO

Luego de haber estudiado los fenómenos físicos que ocurren en el arco de soldar, podemos definir los dispositivos que se deben diseñar para construir la máquina de soldar que satisfaga las condiciones establecidas para obtener una buena soldadura.

Pasaremos a definir los siguientes parámetros:

- a. Fuente de alimentación de corriente continua y voltaje constante
- b. Curva eléctrica del arco de soldar
- c. Punto de operación del arco de soldar
- d. Longitud del arco de soldar
- e. Control de la longitud del arco de soldar
- f. Velocidad de alimentación del alambre-electrodo
- g. Influencia de la inductancia del circuito R-L en la transferencia de metal

### **2.1 Fuente de alimentación de corriente continua y voltaje constante**

Como se sabe, no es posible el funcionamiento de un arco eléctrico conectando directamente los cables de soldadura a la red general de corriente eléctrica, pues conduciría a un cortocircuito. El voltaje de soldadura se obtiene a la salida del secundario de un transformador que transforma la tensión de 220 voltios a un bajo voltaje que debe variar entre 14 y 40 voltios.

Para aplicar el procedimiento de soldadura MIG, es necesario contar con una fuente de corriente continua y voltaje constante, de la forma que se muestra en la fig. 2.1.

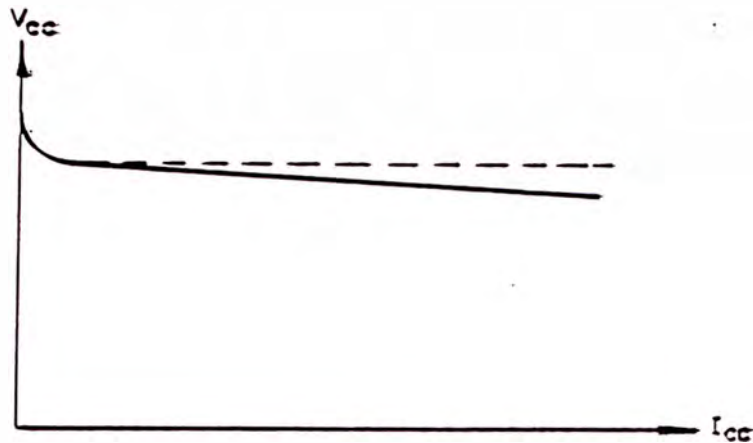


Fig. 2.1 Curva característica de la fuente de corriente continua

Para obtener esta fuente de corriente continua de voltaje constante, es necesario usar un transformador trifásico que reduzca la tensión de salida, un rectificador trifásico de potencia que rectifique la corriente y un filtro de inductancia en serie, de tal forma que se obtenga una onda de salida libre de armónicas (fig.2.2).

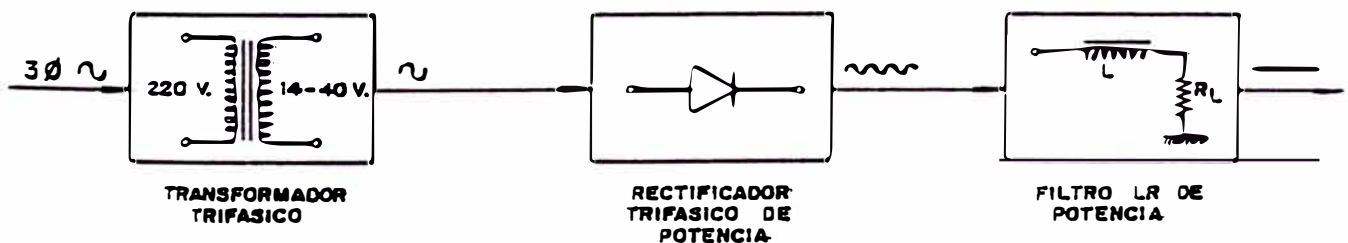


Fig. 2.2 Diagrama de bloques para obtener la fuente de corriente continua.

El filtro de inductancia es del tipo "LR" y está conformado por una inductancia "L" (inductancia de choque) en serie con la



resistencia de carga (resistencia del arco). La configuración "LR" da la curva característica de voltaje constante a la fuente de alimentación.

## 2.2 Curva eléctrica del arco de soldar

La ley de Ohm no es aplicable al arco eléctrico, por no comportarse como un conductor convencional. Si representamos gráficamente la variación de tensión-corriente para un conductor óhmico, obtendremos una recta, cuya pendiente es la resistencia del conductor. Para un arco eléctrico, la representación gráfica tensión-corriente a la presión atmosférica muestra una pendiente negativa para bajas intensidades y después se hace positiva al llegar a cierto valor de intensidad (fig.2.3).

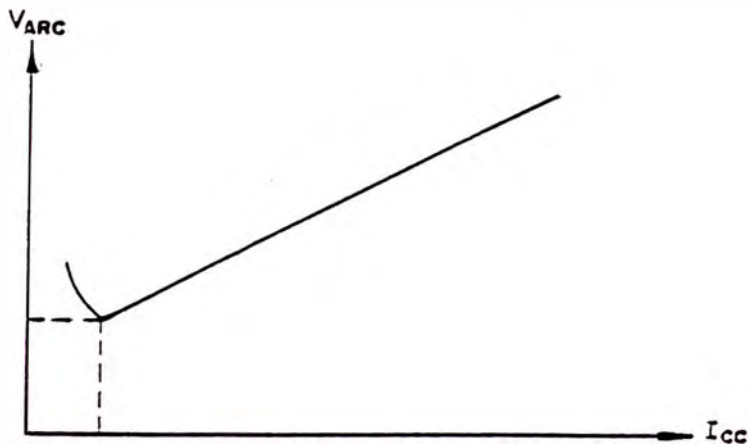


Fig. 2.3 Curva característica de arco eléctrico

De acuerdo a las normas VDE 0542 la tensión del arco es:

$$\text{Gas Argón : } V = 14 + 0.05I_{cc} \quad (2.1)$$

$$\text{Gas CO}_2 \quad : V = 16 + 0.05I_{cc} \quad (2.2)$$

$$\text{Gas Helio : } V = 20 + 0.05I_{cc} \quad (2.3)$$

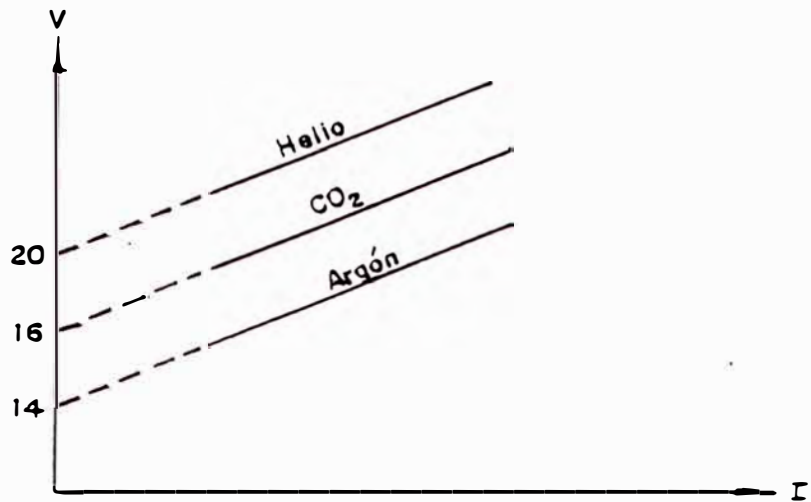


Fig. 2.4 Curva eléctrica del arco.

Podemos definir la resistencia del arco:

$$R_{\text{arco}} = \frac{V_{\text{arco}}}{I_{\text{solda}}}$$

$$\text{Gas Argón : } R_{\text{arco}} = 0.05 + \frac{14}{I_{\text{solda}}} \quad (2.4)$$

$$\text{Gas CO}_2 \quad : R_{\text{arco}} = 0.05 + \frac{16}{I_{\text{solda}}} \quad (2.5)$$

$$\text{Gas Helio : } R_{\text{arco}} = 0.05 + \frac{20}{I_{\text{solda}}} \quad (2.6)$$

### 2.3 Punto de operación del arco de soldar.

El punto de operación del arco de soldar, se consigue traslapando la curva característica de la fuente y la curva eléctrica del arco de soldar. El punto de operación será la intersección de ambas curvas (fig. 2.5).

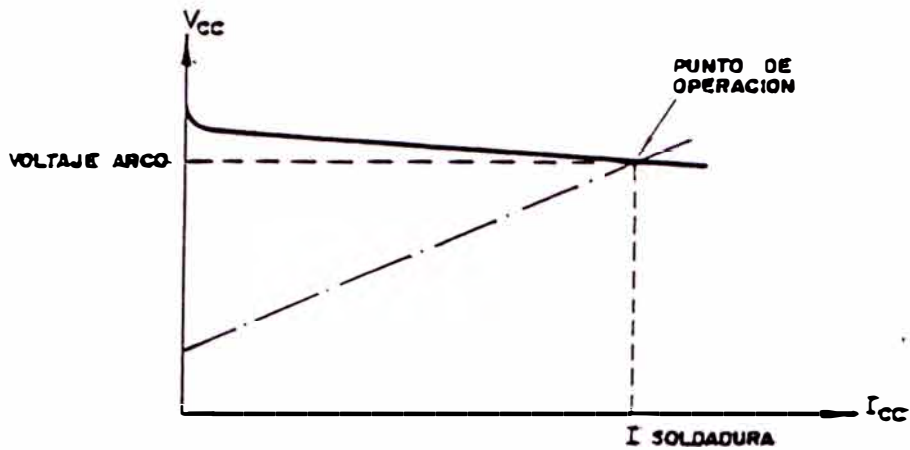


Fig. 2.5 Punto de operación del arco de soldar

#### 2.4 Longitud del arco eléctrico

Se define la longitud del arco eléctrico como la distancia entre la punta del electrodo y la pieza a soldar.

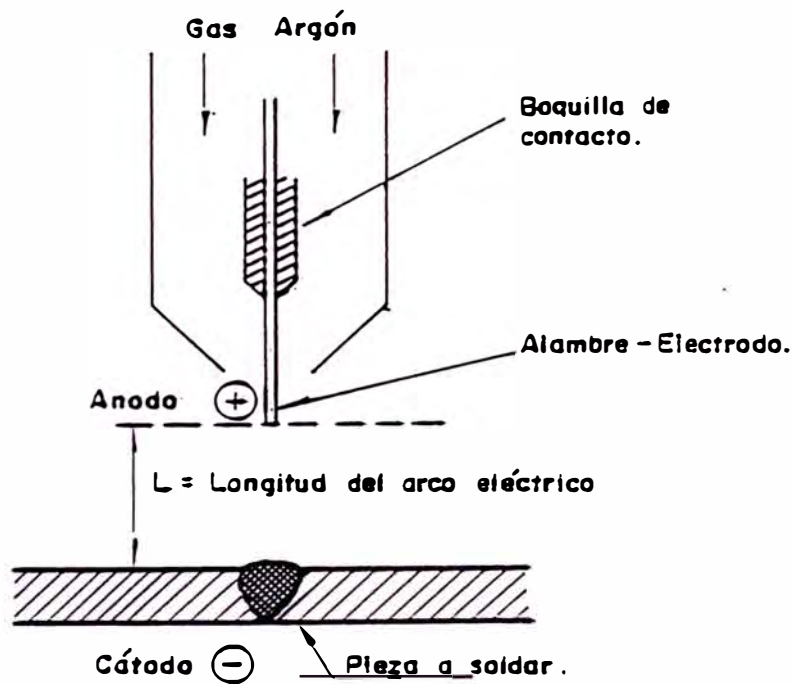


Fig. 2.6 Longitud del arco eléctrico

A medida que aumenta la longitud del arco eléctrico, la curva característica del arco eléctrico se desplaza hacia arriba, de una forma parecida a la indicada en la fig. 2.7.

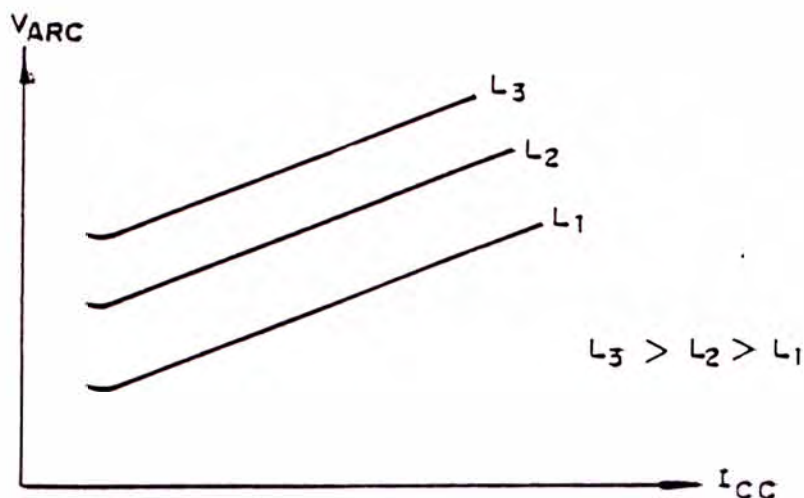


Fig. 2.7 Curvas características del arco eléctrico para diferentes longitudes del arco.

## 2.5 Control de la longitud del arco

En la práctica, la longitud del arco varía continuamente, ya que el soldador es incapaz de mantener el soplete sin variar la distancia a la pieza de trabajo. Sin embargo, el sistema tiene la propiedad de tener una propia autorregulación de la altura del arco. La autorregulación se produce por las variaciones de la corriente durante las fluctuaciones de la altura del arco.

Al aumentar la corriente, aumenta la velocidad de fusión del alambre y viceversa. Si por ejemplo, se está soldando con una corriente  $I_1$  para una altura de arco  $L_1$  (Ver fig.2.8) y por algún motivo, el soldador alarga el arco hasta una altura  $L_2$  ( $L_2 > L_1$ ), observaremos que la corriente disminuye hasta un valor  $I_2$ .

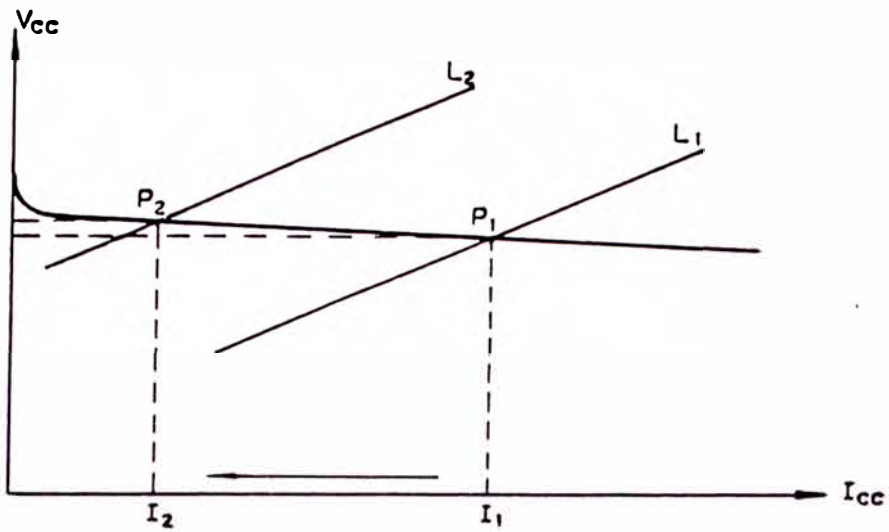


Fig. 2.8 Puntos de operación para longitudes diferentes de arco

La disminución de corriente es muy sensible y repercute en la reducción de la velocidad de fusión del alambre ( $V_{\rightarrow 2}$ ), ya que como la velocidad de alimentación del alambre-electrodo no es alterada ( $V = cte$ ), el consumo del electrodo se hace más lento, ocasionando que el arco regrese a su longitud primitiva  $L$  (Ver fig. 2.9).

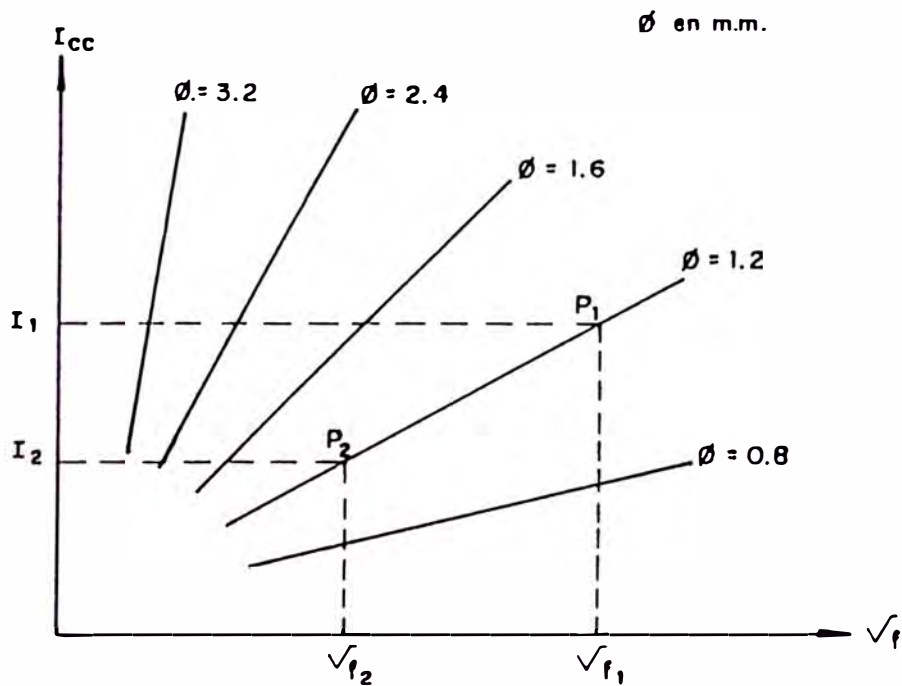


Fig. 2.9 Velocidad de fusión del alambre-electrodo ( $V_{\rightarrow}$ )

## 2.6 Velocidad de alimentación del alambre-electrodo

La alimentación del alambre-electrodo se consigue mediante un motor-reductor de corriente continua que acciona dos rodillos de arrastre que empujan el alambre-electrodo a una velocidad constante. El arrastre del alambre-electrodo debe realizarse sin deformaciones del alambre y sin deslizamientos en los rodillos. Para que esto suceda es necesario que la velocidad de alimentación del alambre-electrodo se mantenga constante frente a cambios bruscos de carga; lo que se consigue usando un control automático de velocidad mediante tiristores.

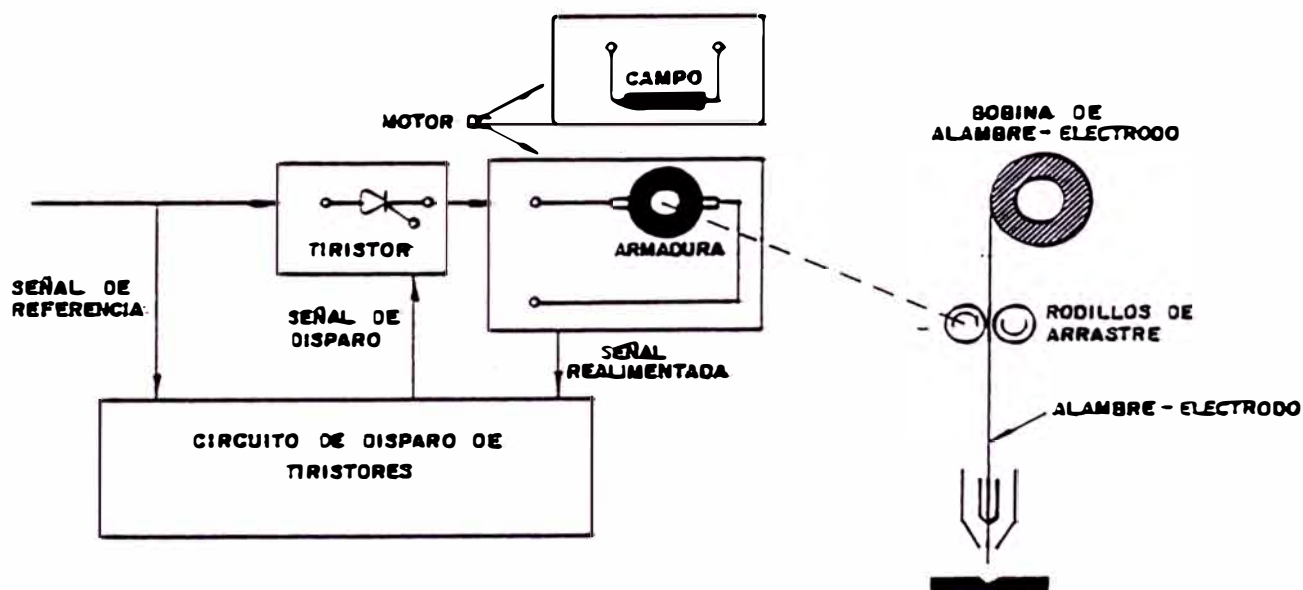


Fig. 2.10 Control automático de velocidad de alimentación del alambre-electrodo.

Además el sistema debe tener un dispositivo de frenado instantáneo, que bloquee el arrastre del alambre en el momento que el soldador interrumpe la corriente de soldeo. De esta forma se evitará la formación de dobleces en el alambre, que se

producirían debido a la inercia del sistema, que hace que el carrete tienda a seguir girando, dejando algunas espiras sueltas (fig.2.10).

## 2.7 Influencia de la inductancia del circuito L-R en la transferencia de metal

El arco de soldar se comporta como un circuito L-R produciéndose una carga y descarga en función de las variables L (inductancia) y R (resistencia del arco eléctrico).

Un ciclo de transferencia de metal se desarrolla de la siguiente forma (fig. 2.11).

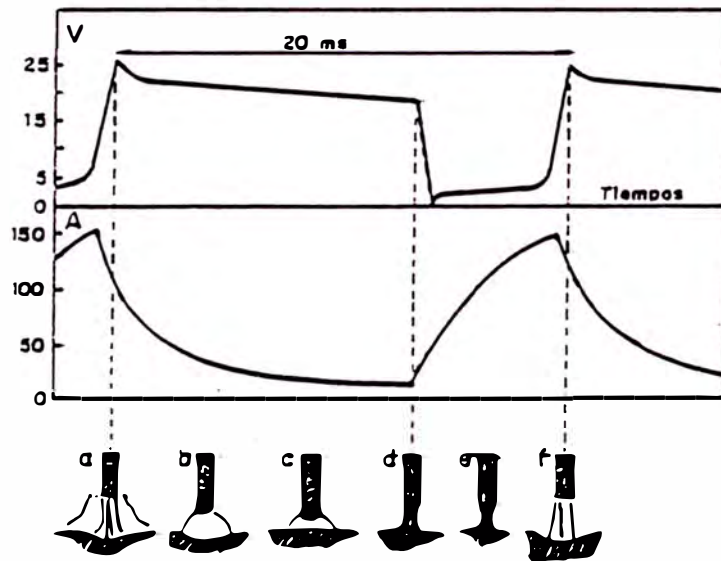


Fig. 2.11 Ciclo de transferencia de metal por cortocircuito.

Al establecerse el arco, la gota de metal fundido va aumentando de tamaño y llega a ponerse en contacto con el baño de fusión (mientras esto sucede la corriente va disminuyendo). Cuando se forma el puente de metal fundido, el arco se apaga momentáneamente, y a causa de la disminución de la resistencia en este momento, la corriente comienza a crecer y el voltaje cae a un valor muy bajo, teniendo lugar un calentamiento por

resistencia en el alambre. Como consecuencia de las elevadas corrientes de cortocircuito, las fuerzas magnéticas axiales rompen el cuello de la gota, desprendiéndola y pasando al baño de fusión. Al romperse el cortocircuito, se restablece el arco y comienza un nuevo ciclo.

Si la inductancia es muy pequeña, originará un aumento muy rápido de la corriente, por lo que la gota se desprenderá muy rápidamente de la varilla, provocando abundante proyecciones y un baño de metal de soldadura bastante frío. El número de cortocircuitos por segundo aumentará disminuyendo la duración del arco en ese mismo tiempo.

Por el contrario, si el valor de la inductancia es muy grande, se tiende a impedir el recebado del arco, pues el puente de metal formado se solidificará y no se romperá, extinguiéndose el arco (fig.2.12).

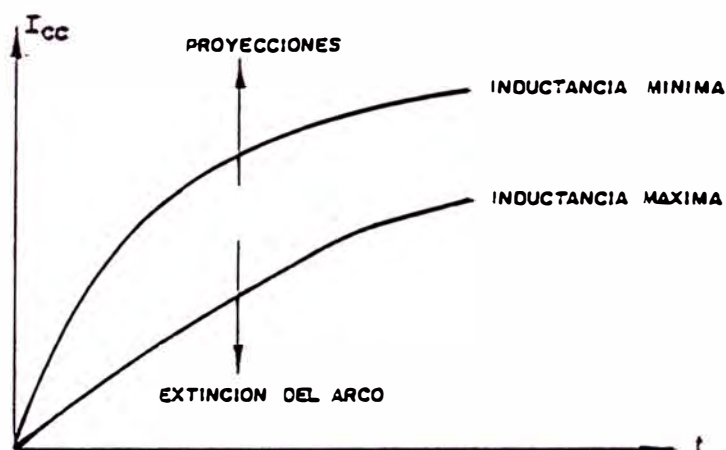


Fig. 2.12 Influencia de la inductancia.

Procederemos a diseñar los siguientes dispositivos:

- a. Transformador  $3\phi$  voltaje primario 220  $V_{ac}$ , voltaje secundario variable 4.89 - 15.02  $V_{ac}$ , 10.5 KVA, 60 Hz.



- b. Rectificador 3 $\phi$ , voltaje continuo de 14V<sub>cc</sub> hasta 40 V<sub>cc</sub>, 300 Amp c.c.
- c. Filtro de inductancia en serie de 300 Amp. c.c.
- d. Unidad de alimentación del alambre-electrodo desde 0.8 mm $\phi$  hasta 2 mm  $\phi$ .
- e. Sistema de control y mando de la máquina diseñada.

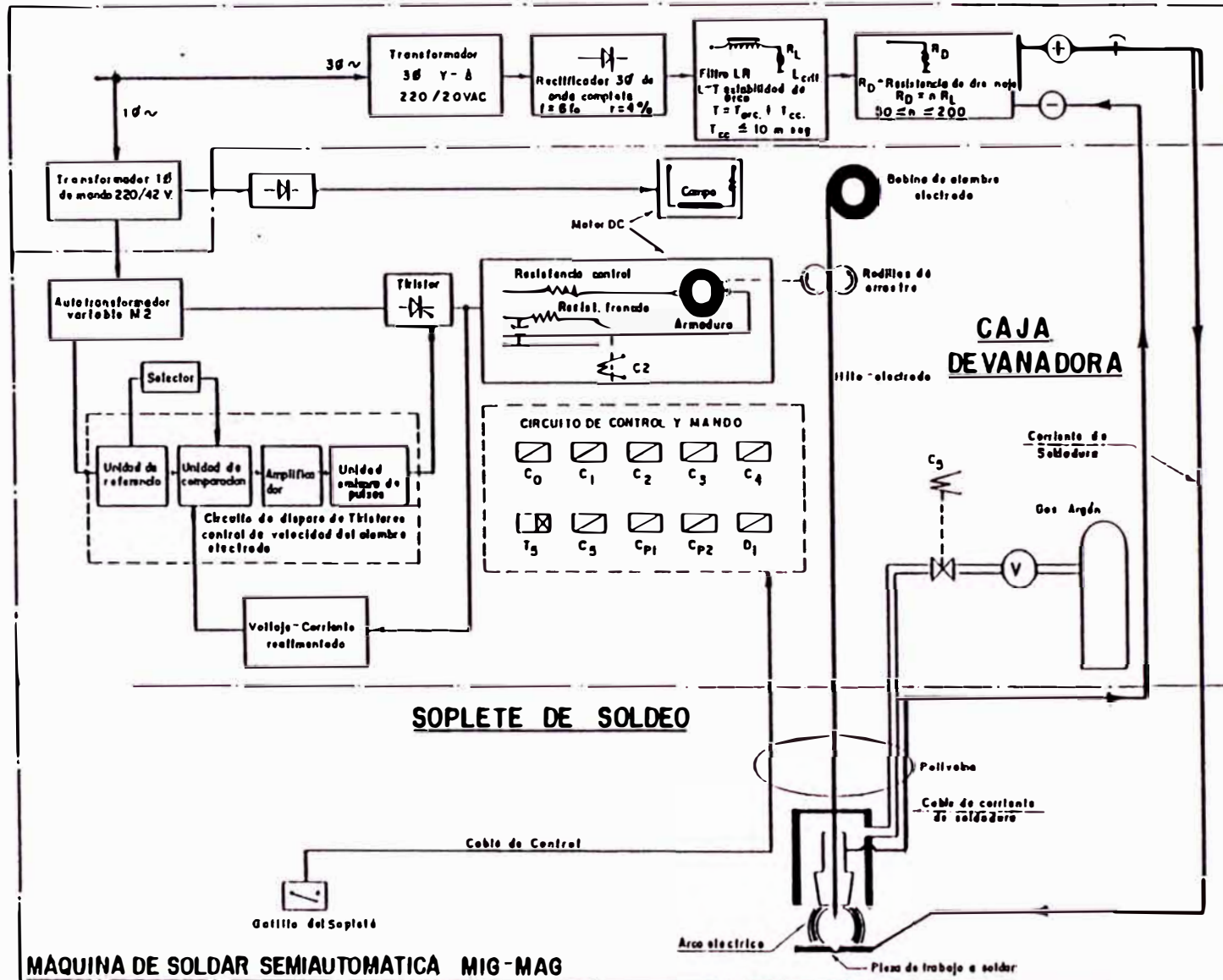
Estos dispositivos interconectados se muestran en el diagrama de bloques adjunto.

Luego de diseñada la máquina de soldar MIG, se hará un análisis económico comparativo de costos versus una máquina de soldar por arco manual con electrodo revestido.

# DIAGRAMA DE BLOQUES

## RECTIFICADOR

Fuente de Voltaje Rectificada VDC



MAQUINA DE SOLDAR SEMIAUTOMATICA MIG-MAG

**CAPITULO III**  
**TRANSFORMADOR TRIFASICO**

**3.1 Características del transformador**

- Transformador : tipo seco
- Servicio : Intermitente, para interperie
- Tipo de refrigeración : Natural al aire
- Potencia nominal :  $S_{3\phi} = 10.5 \text{ KVA}$
- Número de fases :  $m = 3$
- Frecuencia :  $f = 60 \text{ Hz}$
- Tensión primaria de fase:  $E_p = 220 \text{ Voltios}$
- Tensión secundaria compuesta  
por fase :  $E_s$ : (Voltios)

Escala I			Escala II		
Pos	$E_s$	$V_{oc}$	Pos	$E_s$	$V_{oc}$
1	4.90	12.00	1	8.57	21.00
2	5.30	13.00	2	9.29	22.75
3	5.72	14.00	3	10.00	24.50
4	6.12	15.00	4	10.72	26.25
5	6.53	16.00	5	11.43	28.00
6	6.94	17.00	6	12.14	29.75
7	7.35	18.00	7	12.86	31.50
8	7.76	19.00	8	13.57	33.25
9	8.17	20.00	9	14.29	35.00
10	8.57	21.00	10	15.00	36.75

$V_{oc}$  = Tensión en vacío a la salida del rectificador.

(Ver ec.4.5):  $V_{oc} = \sqrt{6}E_s$

Escalas de regulación de la tensión en vacío:

- Regulación gruesa, escala I
  - Regulación fina pos. 1 :  $V_{oe} = 12.00$  Voltios
  - Regulación fina pos. 10 :  $V_{oe} = 21.00$  Voltios
  - Escalonamiento de la tensión: aprox. 1.0 Voltios
- Regulación gruesa, escala II
  - Regulación fina pos. 1 :  $V_{oe} = 21.00$  Voltios
  - Regulación fina pos. 10 :  $V_{oe} = 36.75$  Voltios
  - Escalonamiento de la tensión: aprox. 1.75 Voltios
- Corriente primaria por fase máxima :  $I_{pmax} = \frac{10500/3}{220} = 15.91$  Amp
- Corriente secundaria por fase máxima :  $I_{smax} = 240$  Amp
- Tipo de conexión : Triángulo/Estrella ( $\Delta/Y$ )
- Tipo de plancha : RM14 KAWASAKI
- Espesor de plancha :  $W = 0.35$  mm.

### 3.2 Diseño del núcleo

#### 3.2.1 Cálculos justificativos

Tensión por espira

Para este tipo de transformadores se recomienda:

- Densidad de flujo máximo :  $\beta_{max} = 1.4$  Wb/m<sup>2</sup>
- Densidad de corriente:  $j^* = \frac{I}{A_{cu}} = 2$  Amp/mm<sup>2</sup>

Tensión eficaz por fase:

$$E = 4.44 f N \beta_{max} A_{Fe} \tag{3.1}$$

Tensión por espira por fase:

$$E_{esp} = \frac{E}{N} = 4.44 f \beta_{max} A_{Fe} \tag{3.2}$$

La potencia del transformador trifásico es:

$$S_{3\phi} = 3EI = 3 \times 4.44 f \beta_{max} A_{Fe} NI \quad (3.3)$$

$$S_{3\phi} = 3 \times 4.44 f \beta_{max} A_{Fe} N j A_{Cu} \text{ (Volt-Amp)} \quad (3.4)$$

E = tensión eficaz por fase

I = corriente eficaz por fase

En el transformador se cumple que:

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$\frac{A_{CuS} I_p}{A_{CuS} I_s} = \frac{N_s A_{CuS}}{N_p A_{CuS}} = \frac{j_p}{j_s}$$

Pero si  $j_p = j_s$  tendremos que:

$$N_p A_{CuP} = N_s A_{CuS} = N A_{Cu} \quad (3.5)$$

El área total ocupada por el cobre será: (ver fig.3.2)

$$A_{Cu} = 8 N A_{Cu} \quad (3.6)$$

reemplazando (3.6) en (3.4)

$$S_{3\phi} = 1.665 f \beta_{max} j A_{CuT} A_{Fe} \quad (3.7)$$

considerando una variable de optimización:

$$\alpha = A_{Fe} / A_{CuT}$$

De acuerdo al criterio que prime en el diseño, tenemos:

$$S_{3\phi} = 1.665 f j \beta_{max} \frac{A_{Fe}^2}{\alpha}$$

$$A_{Fe} = \sqrt{\frac{\alpha \times S_{3\phi} \text{ (KVA)}}{1.665 f j \beta_{max} \times 1000}}$$

Si todas las constantes las involucramos en una constante K:

$$A_{Fe} = K \sqrt{S_{3\phi} \text{ (KVA)}} \quad (3.8)$$

reemplazando (3.8) en (3.2):

$$E_{\text{esp}} = 4.44 f \beta_{\text{max}} K \sqrt{S_{\text{S}\phi}} \text{ (KVA) Volts/esp}$$

Si nuevamente volvemos a involucrar las constantes en una nueva constante, a la que llamaremos constante de diseño:  $K_{\text{dise}}$

$$E_{\text{esp}} = K_{\text{dise}} \sqrt{S_{\text{S}\phi}} \text{ (KVA)} \quad (3.9)$$

Para transformadores trifásicos se recomienda una

$$K_{\text{dise}} = 0.35.$$

Luego la tensión por espira para nuestro transformador será:

$$E_{\text{esp}} = 0.35 \sqrt{10.5} = 1.13413 \text{ Volt./esp} \quad (3.10)$$

**Area del Fierro ( $A_{\text{Fe}}$ )**

$$A_{\text{Fe}} = \frac{E_{\text{esp}}}{4.44 f \beta_{\text{max}}} = \frac{1.13413}{4.44 \times 60 \times 1.4} = 0.003041 \text{ m}^2$$

considerando un factor de apilamiento  $K = 0.93$ , el área de la sección recta  $A_s$  será:

$$A_s = \frac{A_{\text{Fe}}}{K} = \frac{0.003041}{0.93} = 0.00327 \text{ m}^2$$

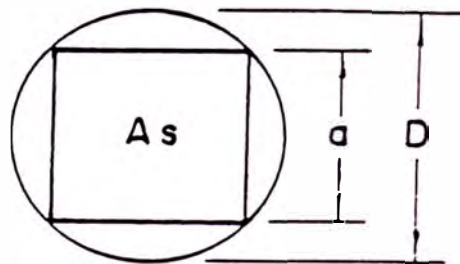


Fig. 3.1 Círculo que circunscribe el área de fierro.

$$a = \sqrt{A_s} = \sqrt{0.00327} = 0.0571 \text{ m} \approx 57 \text{ mm}$$

El diámetro que circunscribe al área del fierro será:

$$D = \sqrt{2} a = \sqrt{2} \times 0.057 = 0.0806 \text{ m} = 80.6 \text{ mm}$$

El número de planchas será:

$$N_p = \frac{a \times K}{W} = \frac{57 \times 0.93}{0.35} = 151.45$$

facilitando el factor de apilamiento, tomaremos:

$$N_p = 151 \text{ planchas}$$

Luego el área real del fierro será:

$$A_{Fe} = a \times W \times N_p = 57 \times 0.35 \times 151 = 3012.45 \text{ mm}^2$$

$$A_{Fe} = 0.00301245 \text{ m}^2$$

Si consideramos que se debe mantener el flujo, la densidad de flujo máximo será:

$$\beta_{max} = \frac{\beta_{max}^* A_{Fe}^*}{A_{Fe}} = \frac{1.4 \times 0.003041}{0.00301245} = 1.413 \text{ wb/m}^2$$

$$\phi_{max} = 4.2574 \times 10^{-3} \text{ wb}$$

#### Area de la ventana ( $A_w$ )

Se denomina ventana del transformador al área ocupada por los bobinados, es decir, el cobre y los aislamientos requeridos, como se muestra en la figura 3.2.

**El factor de espacio ( $K_{esp}$ ):** Se define como la relación entre el área ocupada por el cobre y el área disponible de la ventana. Como se observa en la figura 3.2 nuestro transformador tiene dos (2) ventanas.

$$K_{esp} = \frac{4N_p A_{cup} + 4N_s A_{cus}}{2A_w} = \frac{8N A_{cu}}{2A_w} = \frac{4N A_{cu}}{A_w}$$

$$A_{cut} = 8N A_{cu}$$

$$A_w = \frac{A_{cut}}{2 \times K_{esp}} \quad (3.11)$$

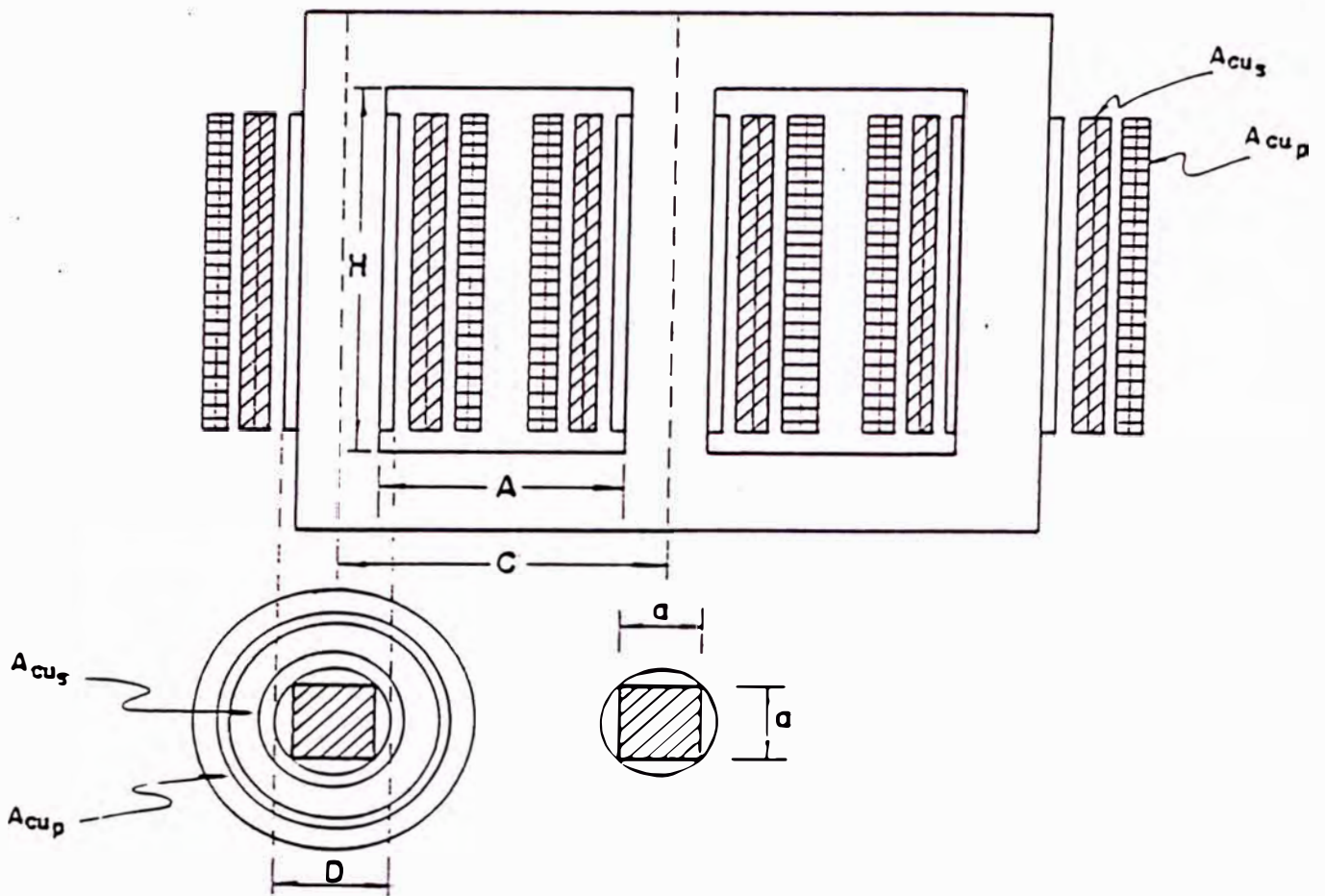


Fig. 3.2 Corte longitudinal del transformador trifásico de soldadura.

Un valor aproximado del factor de espacio, para este tipo de transformador, es:

$$K_{esp} = 0.8 \times \frac{10}{30 + KV} \quad (3.12)$$

donde: KV = Voltaje del devanado de alta tensión en Kilovoltios

$$K_{esp} = 0.8 \times \frac{10}{30 + 0.22} = 0.2647 \quad (3.13)$$

reemplazando (3.11) y (3.13) en (3.7) tendremos:

$$A_w = \frac{S_{\phi}}{1.655 \times f \times \beta_{max} \times A_{fe} \times j \times (2 \times K_{esp})}$$



$$A_w = \frac{10,500}{1.665 \times 60 \times 1.395 \times 0.00301245 \times 2 \times 10^4 \times 2 \times 0.2647}$$

$$A_w = 0.023622 \text{ m}^2$$

#### Altura de la ventana (H)

Si mantenemos una relación entre la altura (H) y el ancho (A) de la ventana de:

$$\frac{H}{A} = 2.5$$

$$\text{tendremos: } A_w = H \times A = H \times \frac{H}{2.5}$$

$$H = \sqrt{2.5} \times A_w = \sqrt{2.5} \times 0.023622 = 0.243 \text{ m}$$

$$\text{hacemos: } H = 0.250 \text{ m} = 250 \text{ mm}$$

#### Ancho de la ventana (A)

$$A = \frac{H}{2.5} = \frac{0.250}{2.5} = 0.100 \text{ m}$$

$$\text{hacemos: } A = 0.100 \text{ m} = 100 \text{ mm}$$

### 3.2.2 Dimensiones y peso del núcleo

Las dimensiones del núcleo serán:

$$a = 57 \text{ mm}$$

$$H = 250 \text{ mm}$$

$$A = 100 \text{ mm}$$

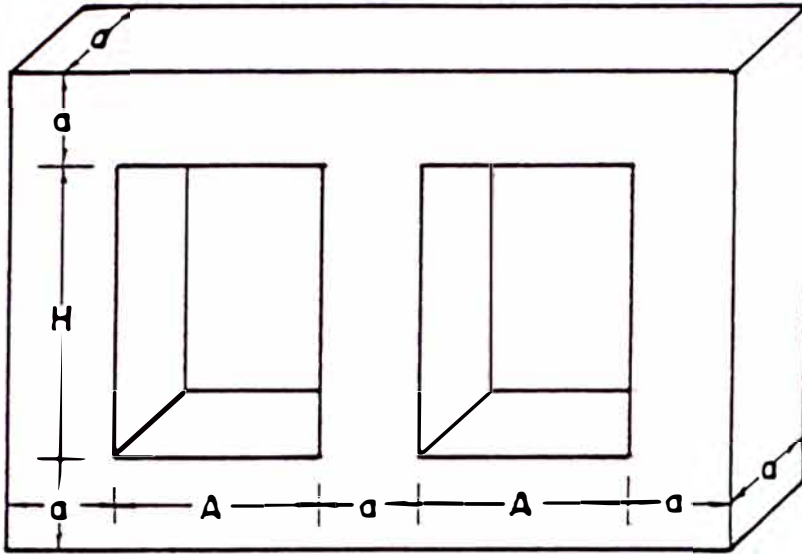


Fig. 3.3 Dimensiones del núcleo.

Se consigue las siguientes disposiciones de planchas indicado en la figura 3.4.

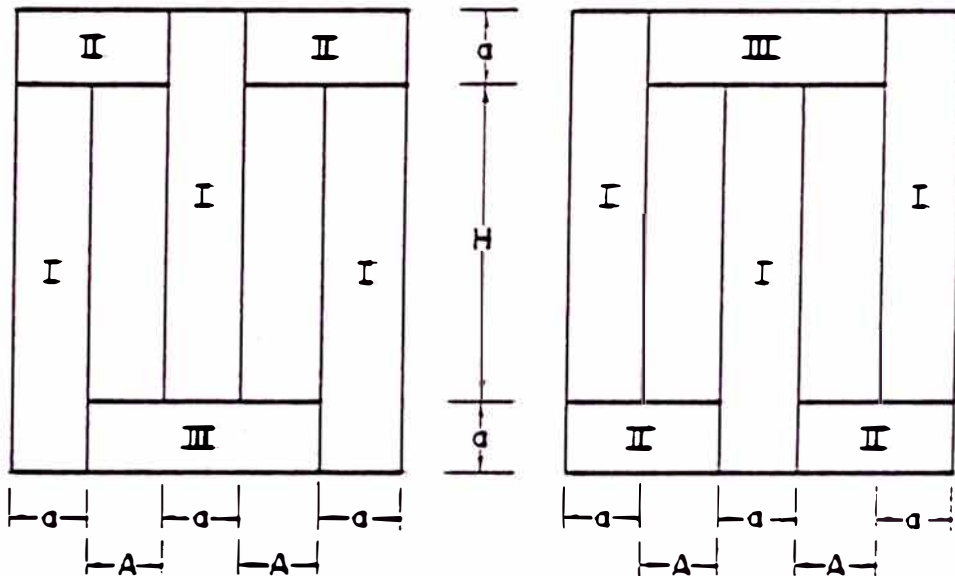


Fig. 3.4 Disposición de las planchas del circuito magnético

$$\rho_{Fe} = 7,650 \text{ kg/m}^3$$

PLANCHA	DIMENSIONES	DIMENSIONES MM	Nº DE PLANCHAS	PESO KG
I	$a \times (H+a)$	57 x 307	453	21.22
II	$a \times (A+a)$	57 x 157	302	7.24
III	$a \times (2A+a)$	57 x 257	151	5.92
Peso del núcleo				34.38

### 3.3 Diseño de los devanados

#### 3.3.1 Cálculo del número de espiras

Se empezará por calcular el número de espiras del devanado secundario (baja tensión), ya que su redondeo posterior a un número entero, produce mayor alteración que en el devanado primario (alta tensión) y se evitan de esta forma nuevos retoques por esta razón.

##### **Número de espiras por fase del devanado secundario**

$$N_s = \frac{E_{smax}}{4.44 \times f \times \phi_{max}}$$

Escala I:

$$N_{sI} = \frac{8.57}{4.44 \times 60 \times 4.2574 \times 10^{-3}} = 7.56 \approx 8 \text{ espiras/fase}$$

Escala II:

$$N_{sII} = \frac{15.00}{4.44 \times 60 \times 4.2574 \times 10^{-3}} = 13.22 \approx 14 \text{ espiras/fase}$$

##### **Número de espiras por fase del devanado primario**

$$N_p = N_s \frac{E_p}{E_s}$$

Escala I:

$$\text{Toma máxima : } N_{pImin} = 8 \times \frac{220}{8.57} = 205.36 \approx 205 \text{ esp/fase}$$

$$\text{Toma mínima : } N_{pImax} = 8 \times \frac{220}{4.90} = 359.18 \approx 360 \text{ esp/fase}$$

Escala II:

$$\text{Toma máxima : } N_{pImin} = 14 \times \frac{220}{15.00} = 205.33 \approx 205 \text{ esp/fase}$$

$$\text{Toma m\u00ednima: } N_{\text{p\u00edximax}} = 14 \times \frac{220}{8.57} = 359.39 \approx 360 \text{ esp/fase}$$

Tabla 3.1 Valores Adoptados

Escala I				Escala II			
$N_{\text{ex}} = 8$		$E_p = 220V$		$N_{\text{ex}} = 14$		$E_p = 220V$	
Pos	$N_p$	$E_s$	$V_{oc}$	Pos	$N_p$	$E_s$	$V_{oc}$
1	360	4.89	12.00	1	360	8.56	21.00
2	332	5.30	13.00	2	332	9.28	22.73
3	308	5.71	14.00	3	308	10.00	24.50
4	287	6.13	15.00	4	287	10.73	26.28
5	269	6.54	16.00	5	269	11.45	28.00
6	253	6.96	17.00	6	253	12.13	29.81
7	239	7.36	18.00	7	239	12.89	31.57
8	227	7.75	19.00	8	227	13.57	33.25
9	217	8.11	20.00	9	217	14.19	34.77
10	205	8.59	21.00	10	205	15.02	36.80

$E_s$  y  $V_{oc}$  est\u00e1n dados en voltios

$V_{oc}$  = tensi\u00f3n en vac\u00edo a la salida del rectificador

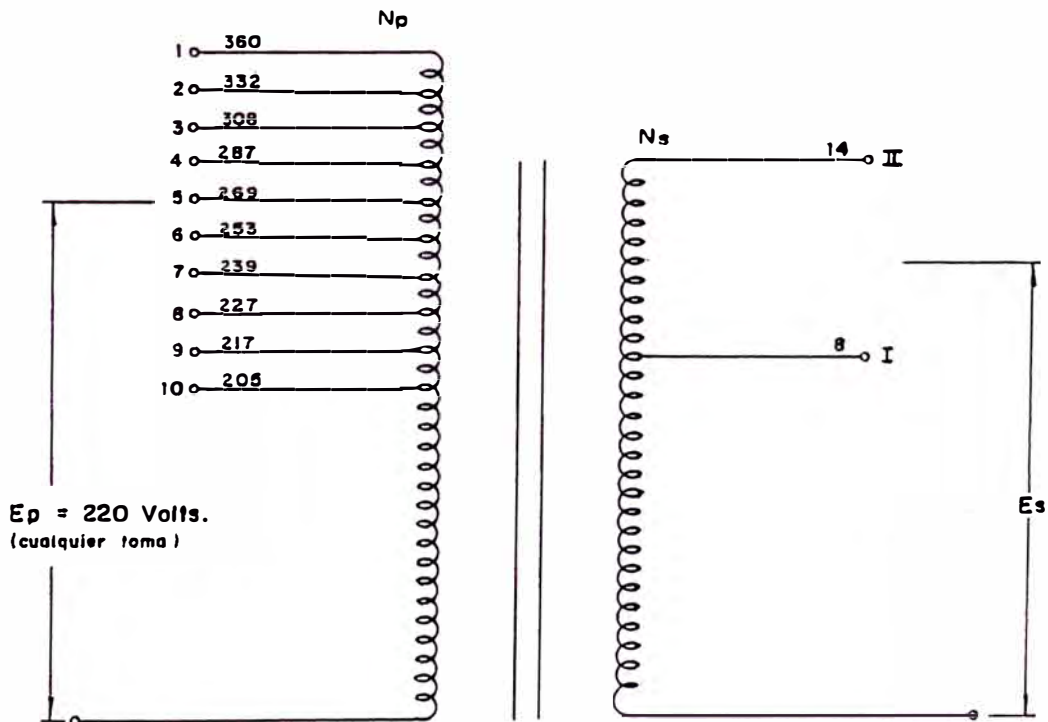


Fig. 3.5 Arreglo de las espiras por fase.

### 3.3.2 Cálculo de la sección de los conductores

Densidad de corriente:  $j^* = 2 \text{ Amp/mm}^2$

La corriente de fase máxima en el devanado secundario es:

$$I_{s\max} = 240 \text{ Amp.}$$

Luego, la sección del conductor del devanado será:

$$A_{cus} = \frac{I_{s\max}}{j^*} = \frac{240}{2} = 120 \text{ mm}^2$$

La corriente de fase máxima en el devanado primario es:

$$I_{p\max} = \frac{S_{\phi} / m}{E_p} = \frac{10.500/3}{220} = 15.91 \text{ Amp}$$

La sección del conductor del devanado primario será:

$$A_{cup} = \frac{I_{p\max}}{j^*} = \frac{15.91}{2} = 7.95 \text{ mm}^2$$

Luego escogeremos una sección de barra de cobre para el devanado secundario de:

$$A_{cus} = 2 (12 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}) = 120 \text{ mm}^2$$

Y una sección de cable para el devanado primario de:

$$A_{cup} = 2 (4 \text{ mm}^2) = 8 \text{ mm}^2$$

es decir, dos cables en paralelo de 4 mm<sup>2</sup> de sección cada uno.

Y las densidades de corriente máxima de los devanados será:

$$j_p = \frac{I_{p\max}}{A_{cup}} = \frac{15.91}{8} = 1.99 \text{ Amp/mm}^2$$

$$j_s = \frac{I_{s\max}}{A_{cus}} = \frac{240}{120} = 2.00 \text{ Amp/mm}^2$$

### 3.3.3 Cálculo del aislamiento

Para el cálculo del aislamiento se tomarán las consideraciones prácticas dadas por Juan Corrales Martín en su

obra "Teoría, Cálculo y Construcción de Transformadores" que sigue las normas establecidas por la Comisión Electrotécnica Internacional.

- **Incremento del grosor de los conductores por efecto de aislamiento**

- Para cables conductores desnudos:

Esmalte y una capa de algodón: aumento de diámetro:  
0.25 mm

- Para barras de cobre:

Dos capas de algodón en hélice: Aumento de lado:  
0.4 mm.

Devanado primario:  $A_{cu0} = 2 (4 \text{ mm}^2) = 8 \text{ mm}^2$

$$d = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{A_{cu0}}{2}\right)} = \sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot \left(\frac{8}{2}\right)} = 2.26 \text{ mm}$$

$$d + e = 2.26 + 0.25 = 2.51 \text{ mm.}$$

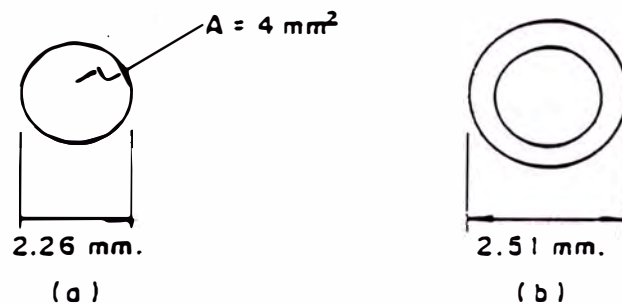


Fig. 3.6 Diámetro del conductor del devanado primario  
a. Conductor de cobre desnudo  
b. Conductor de cobre con aislamiento de esmalte y una capa de algodón

Devanado Secundario:  $A_{cu} = 2 (12 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}) = 120 \text{ mm}^2$

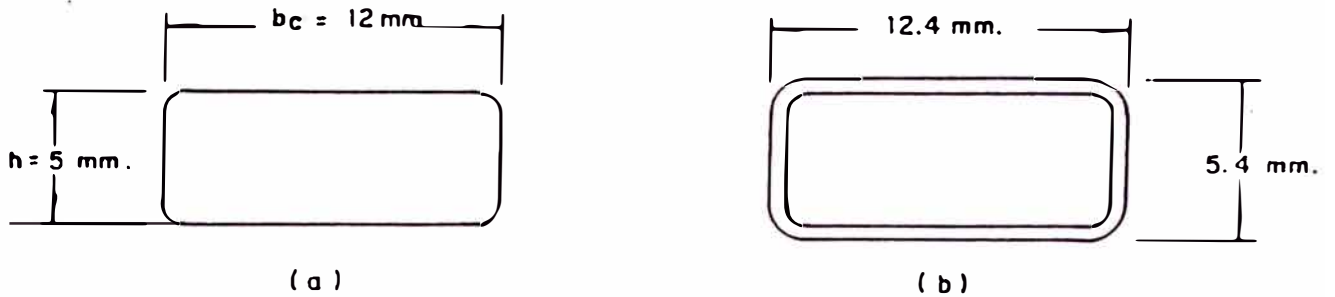


Fig. 3.7 Sección de barra de cobre del devanado secundario  
 a. Barra de cobre desnudo  
 b. Barra de cobre con aislamiento de dos capas de algodón (en hélice)

- **Aislamiento entre los devanados y el núcleo**

Papel prespan y forro de cinta de algodón:

$$\delta_1 = 3 \text{ mm}$$

- **Aislamiento entre devanados primario y secundario**

Papel prespan y forro de cinta de algodón:

$$\delta_6 = 3 \text{ mm}$$

- **Aislamiento entre capas**

El aislamiento entre capas debe soportar la tensión de prueba que viene a ser el doble de la tensión entre capas:

$$E_p = 2 \times N_{\text{esp/capa}} \times E_{\text{esp}} \quad (3.14)$$

- **Distancia mínima de aislamiento entre los devanados y el yugo**  
 (ver Fig. 3.8)

$$\delta_2 = 20 \text{ mm.}$$

**3.3.4 Altura de los devanados**

Altura de cada capa del devanado secundario ( $H_{CS}$ )

$$H_{CS}^* = H - 2 \delta_2^* = 250 - 2 \times 20 = 210 \text{ mm}$$

- Número de espiras por capa del devanado secundario, considerando un factor de bobinado:  $F_b = 0.9$

$$N_{cs} = \frac{H_{cs}^* \times 0.9}{12.4} = \frac{210 \times 0.9}{12.4} = 15.24$$

Considerando una espira más por capa por el tipo de arrollamiento tubular en hélice y mejorar la distribución de los mismos, el número de espiras por capa será:

$$N_{cs} = 14 \text{ espiras/capa}$$

- Número de capas del devanado secundario:

$$N_{cs} = \frac{N_s}{N_{cs}} = \frac{14 \text{ espiras}}{14 \text{ espiras/capa}} = 1 \text{ capa}$$

Considerando una espira más por capa, tendremos que la altura de la capa del devanado secundario será:

$$H_{cs} = \frac{(N_{cs} + 1) \times 12.4}{0.9} = \frac{(14 + 1) \times 12.4}{0.9} = 206.67 \text{ mm}$$

Luego, la distancia de aislamiento entre el devanado secundario y el yugo, será:

$$\delta_z = \frac{H - H_{cs}}{2} = \frac{250 - 206.67}{2} = 21.67 \text{ mm}$$

#### Altura de cada capa del devanado primario ( $H_{cp}$ )

$$H_{cp}^* = H - 2 \delta_z^* = 250 - 2 \times 20 = 210 \text{ mm}$$

- Número de espiras por capa del devanado primario, considerando un factor de bobinado  $F_b = 0.9$ :

$$N_{cp}^* = \frac{H_{cp}^* \times 0.9}{d+e} = \frac{210 \times 0.9}{2.51} = 75.3$$

Considerando las tomas de taps variable, hacemos:

$$N_{cp} = 72 \text{ esp/capa}$$



- Número de capas del devanado primario:

$$N_{CP} = \frac{N_{pmax}}{Nec_p} = \frac{360}{72} = 5 \text{ capas}$$

Considerando una espira más por capa, tendremos que la altura de cada capa del devanado primario es:

$$H_{CP} = \frac{(N_{CP} + 1) \times 2.51}{F_b} = \frac{(72 + 1) \times 2.51}{0.9} = 203.59 \text{ mm}$$

La distancia de aislamiento entre el devanado primario y el yugo será:

$$\delta_2 = \frac{H - H_{CP}}{2} = \frac{250 - 203.59}{2} = 23.2 \text{ mm}$$

- Aislamiento entre capas:

$$e_p = 2 \times Nec_p \times E_{esp \text{ max}}$$

$$e_p = 2 \times 72 \times 1.13413 \approx 163$$

La rigidez dieléctrica del algodón sin impregnar al aire es:

$$E_D = 3 \text{ KV/mm}$$

El espesor necesario será:

$$\delta_g^* = \frac{163}{3000} = 0.054 \text{ mm}$$

con un factor de seguridad de 4.

$$\delta_g = 0.054 \times 4 = 0.216 \text{ mm}$$

Espesor que es inferior al aislamiento entre conductores que es de 0.25 mm. de algodón, luego no es necesario considerar más aislamiento entre capas.

### 3.3.5 Ancho de los devanados

#### **Ancho del devanado secundario**

Con un factor de bobinado  $F_b = 0.9$

$$a_{ds} = \frac{2 \times N_{cs} \times 5.4}{F_b} = \frac{2 \times 1 \times 5.4}{0.9} = 12 \text{ mm}$$

Aislamiento entre la bobina y el núcleo

$$\delta_1 = 3 \text{ mm}$$

**Ancho del devanado primario**

Con un factor de bobinado  $F_b = 0.9$

$$a_{dp} = \frac{2 \times N_{cp} \times 2.51}{F_b} = \frac{2 \times 5 \times 2.51}{0.9} = 27.89 \text{ mm}$$

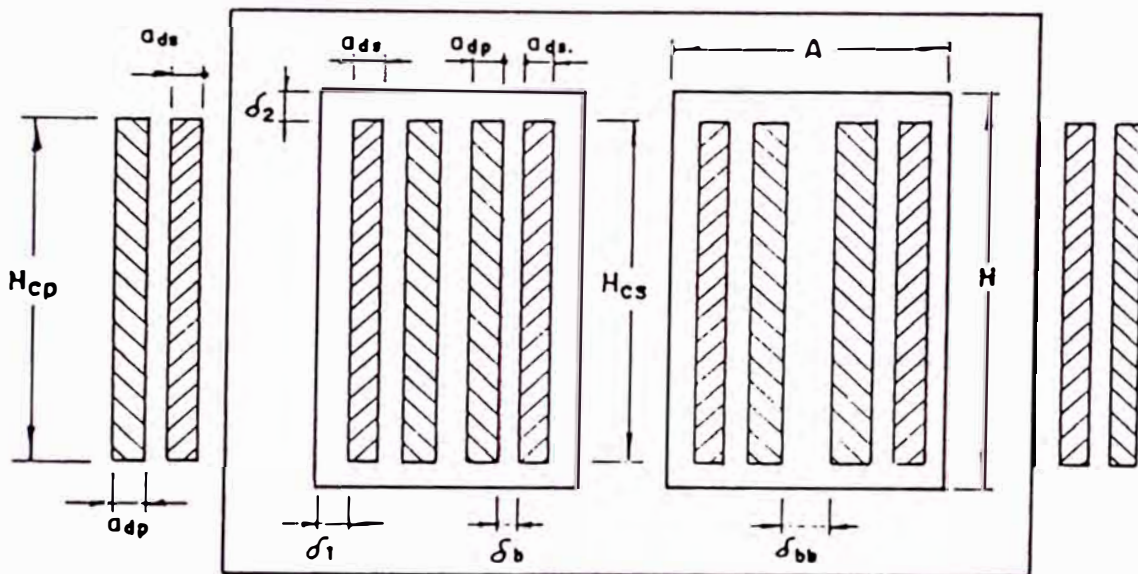


Fig. 3.8

Aislamiento entre el devanado secundario y primario:

$$\delta_b = 3 \text{ mm}$$

El ancho total de los devanados es:

$$A_d = 2 \delta_1 + 2 \delta_b + \delta_{bb}^* + 2 a_{ds} + 2 a_{dp}$$

$$A_d = 2 (3) + 2 (3) + 3 + 2(12) + 2 (27.89)$$

$$A_d = 94.78 \text{ mm}$$

conociendo que:  $A = 100 \text{ mm}$

El aislamiento entre paquetes de bobinas por fase será:

$$\delta_{bb} = A - 2 \delta_1 - 2 \delta_b - 2 a_{ds} - 2 a_{dp}$$

$$\delta_{bb} = 100 - 2(3) - 2(3) - 2(12) - 2(27.89)$$

$$\delta_{bb} = 8.22 \text{ mm}$$

### 3.3.6 Cálculo de las reactivancias de dispersión

Considerando un bobinado de "N" vueltas como el que se muestra en la fig. 3.9.

La permeancia del espacio considerado será:

$$dP_x = \frac{2\pi u_0}{H} (r_1 + x) dx$$

y las espiras a las que se debe el flujo de dispersión son:

$$N_x = \frac{N \cdot X}{a_0}$$

Pero como la inductancia de dispersión es:

$$dLe_x = N_x^2 \cdot dP_x$$

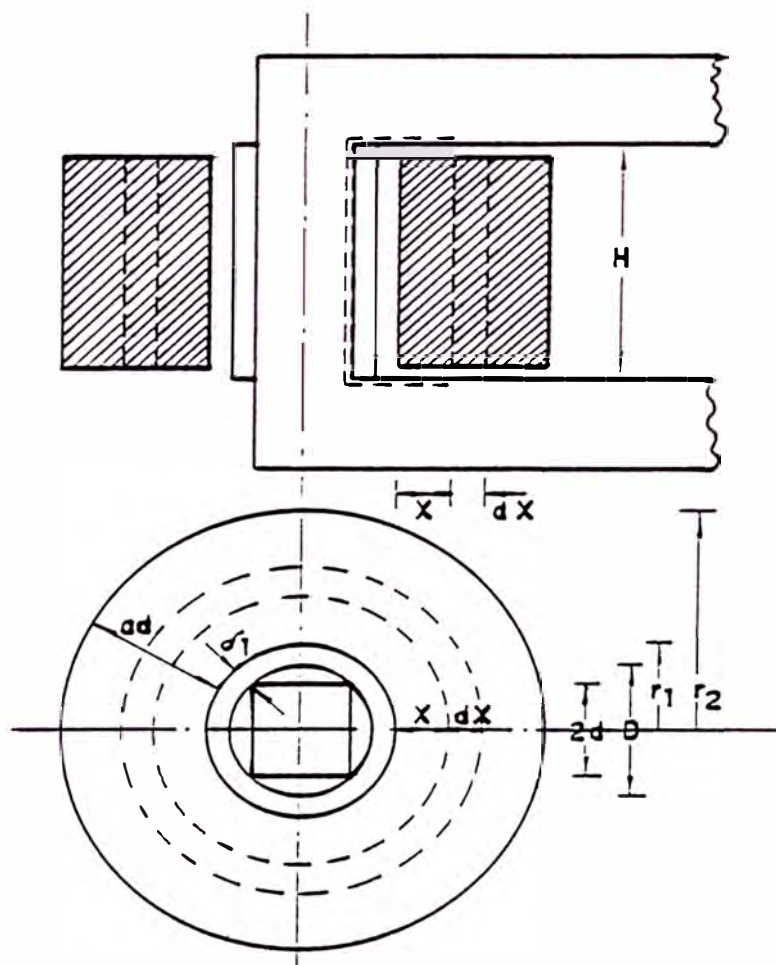


Fig. 3.9 Dispersión en el bobinado de un transformador de columnas.

$$\text{Entonces: } dL_{e_x} = \frac{N^2 \cdot x^2}{(a_d)^2} \cdot \frac{2\pi u_o}{H} (r_1 + x) dx$$

integrando la expresión anterior en el espacio correspondiente al bobinado.

$$L_e = \frac{N^2 2\pi u_o}{(a_d)^2 H} \left[ \frac{1}{3} r_1 \cdot x^3 + \frac{1}{4} x^4 \right]_{r_1}^{a_d}$$

$$L_e = \frac{N^2 2\pi u_o}{(a_d)^2 H} \left[ \frac{1}{3} r_1 \cdot (a_d)^3 + \frac{1}{4} \cdot (a_d)^4 \right]$$

$$L_e = \frac{N^2 2\pi u_o}{(a_d)^2 H} \cdot \frac{1}{3} \cdot (a_d)^3 \left[ r_1 + \frac{3}{4} (a_d) \right]$$

pero podemos aproximar sin cometer mayor error

$$\frac{3}{4} a_d \approx \frac{1}{2} a_d$$

así el radio medio será:

$$r_m = r_1 + \frac{1}{2} \cdot a_d$$

luego:

$$L_e = \frac{N^2 2\pi u_o}{(a_d)^2 H} \cdot \frac{1}{3} \cdot (a_d)^3 \cdot \frac{2\pi \cdot r_m}{2\pi}$$

como la longitud media del bobinado es:

$$L_{cu} = 2\pi r_m$$

$$L_e = \frac{N^2}{3H} u_o \cdot a_d \cdot L_{cu} \quad (3.15)$$

pero como  $X_e = 2\pi f L_e$

$$X_e = \frac{2\pi N^2}{3H} f \cdot u_o \cdot a_d \cdot L_{cu} \quad (3.16)$$

**Reactancia de dispersión del devanado secundario por fase**

$$X_{e2} = \frac{2\pi}{3} \cdot \frac{N_s^2}{H} f \mu_0 a_{ds} L_{cus}$$

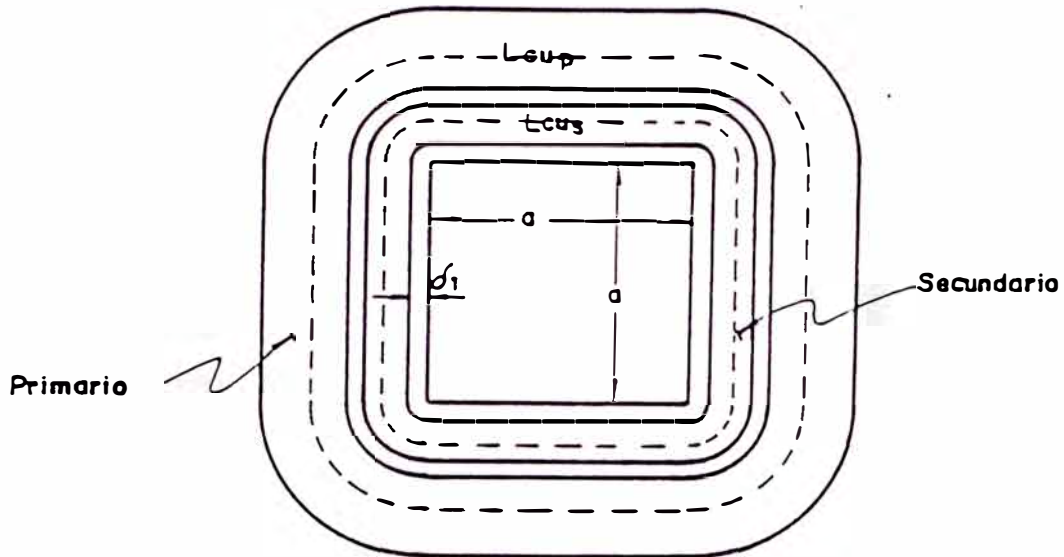


Fig. 3.10 Longitudes medias de los devanados

De la fig. 3.10 la longitud media del cobre del devanado secundario es:

$$L_{cus} = 4(a + 2 \delta_1) + 2\pi \left(\frac{a_{ds}}{2}\right)$$

$$L_{cus} = 4(57 + 2 \times 3) + 2\pi \left(\frac{12}{2}\right) = 289.7 \text{ mm}$$

$$L_{cus} = 289.7 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Luego, la reactancia de dispersión del devanado secundario será:

Escala I:

$$X_{e2I} = \frac{2\pi}{3} \times \frac{8^2 \times 60 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 12 \times 10^{-3} \times 289.7 \times 10^{-3}}{\frac{8}{14} \times 250 \times 10^{-3}}$$

$$X_{e2I} = 0.0002459 \Omega = 0.2459 \times 10^{-3} \Omega$$

Escala II:

$$X_{e_{s11}} = \frac{2\pi}{3} \times \frac{142 \times 60 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 12 \times 10^{-3} \times 289.7 \times 10^{-3}}{250 \times 10^{-3}}$$

$$X_{e_{s11}} = 0.0004304 \Omega = 0.4304 \times 10^{-3} \Omega$$

**Reactancia de dispersión del devanado primario por fase**

$$X_{e_p} = \frac{2\pi}{3} \cdot \frac{N_{p1}^2 f \mu_0}{H} \cdot a_{dp1} \cdot L_{cup1}$$

De la fig. 3.10 la longitud media del cobre del devanado primario es:

$$L_{cup1} = 4 (a + 2\delta_1 + 2a_{ds} + 2\delta_1) + \frac{2\pi a_{dp1}}{2}$$

$$L_{cup1} = 372 + \pi a_{dp1} \quad (\text{mm})$$

Luego, obtenemos la reactancia de dispersión para las diferentes tomas del devanado primario:

$N_p$	$N_{cp}$	$a_{dp}$ (mm)	$L_{cup}$ (mm)	$X_{e_p}$ ( $\Omega$ )
360	5.00	27.89	459.62	1.04938
332	4.61	27.89	459.62	0.89249
308	4.40	27.89	459.62	0.76812
287	4.10	22.31	442.09	0.51316
269	3.84	22.31	442.09	0.45081
253	3.61	22.31	442.09	0.39878
239	3.41	22.31	442.09	0.35587
227	3.24	22.31	442.09	0.32103
217	3.10	16.73	424.56	0.21103
205	2.93	16.73	424.56	0.18834

### 3.3.7 Cálculo de la resistencia de los bobinados

**Resistencia del devanado secundario**

$$R_{20^\circ\text{C}} = \frac{\rho_{Cu} \quad 20^\circ\text{C} \times N_s \times L_{cus}}{A_{cus}} \quad (3.17)$$

Escala I:

$$R_{120^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{56} \times \frac{8 \times 289.70 \times 10^{-3}}{120} = 0.000345\Omega$$

Escala II:

$$R_{120^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{56} \times \frac{14 \times 289.70 \times 10^{-3}}{120} = 0.000603\Omega$$

**Resistencia del devanado primario**

$$R_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{\rho_{\text{Cu } 20^{\circ}\text{C}} \times N_{\text{P1}} \times L_{\text{cup1}}}{A_{\text{CuP}}}$$

La resistencia del devanado primario para las diferentes tomas serán:

$N_p$	$L_{\text{cup}} \text{ (mm)}$	$R_{20^{\circ}\text{C}} \text{ (}\Omega\text{)}$
360	459.62	0.3693
332	459.62	0.3406
308	459.62	0.3160
287	442.09	0.2832
269	442.09	0.2654
253	442.09	0.2497
239	442.09	0.2358
227	442.09	0.2240
217	424.56	0.2056
205	424.56	0.2943

**Corrección de la resistencia por temperatura**

Calcularemos las resistencias de los bobinados a la temperatura de 75°C. El cobre utilizado tiene una resistencia a 20°C de:

$$\rho_{20^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{56} \frac{\Omega - \text{mm}^2}{\text{m}}$$

La resistividad aparente de este conductor a 75°C vale:

$$\rho_{75^{\circ}\text{C}} = \frac{1}{56} \frac{235 + 75}{235 + 20} = \frac{1}{46.1} \frac{\Omega - \text{mm}^2}{\text{m}} \quad (3.18)$$

La resistencia del devanado secundario a 75°C será:

Escala I:

$$R_{\text{S } 75^{\circ}\text{C}} = \frac{0.000345 \times 56}{46.1} = 0.000419 \Omega$$

Escala II:

$$R_{\text{II } 75^{\circ}\text{C}} = \frac{0.000603 \times 56}{46.1} = 0.000733 \Omega$$

La resistencia del devanado primario a 75°C para las diferentes tomas será:

$$R_{\text{P } 75^{\circ}\text{C}} = R_{\text{P } 20^{\circ}\text{C}} \times \frac{56}{46.1}$$

$N_{\text{P}}$	$R_{\text{P } 75^{\circ}\text{C}} (\Omega)$
360	0.4486
332	0.4137
308	0.3839
287	0.3440
269	0.3224
253	0.3033
239	0.2864
227	0.2721
217	0.2497
205	0.2360



### Incremento de la resistencia en corriente alterna

La corriente alterna que circula por un conductor tiende a concentrarse por autoinducción en las capas superficiales del mismo, incrementándose de esta forma, aparentemente, el efecto resistivo del conductor.

Representando  $K$  la relación del valor de la resistencia aparente  $R$  en corriente alterna de la frecuencia "f", al valor  $R$  de la resistencia óhmica en corriente continua.

$$K = \frac{R}{R} \quad (3.19)$$

siendo el incremento relativo:

$$K_1 = K - 1 = \frac{R - R}{R} \quad (3.20)$$

La altura ficticia o equivalente:

$$\delta_1 = \alpha_1 h_1 \quad \text{cm}^0$$

siendo

$$\alpha_1 = 0.2\pi \sqrt{\frac{L_{e1} \cdot \sigma_{e1} \cdot f}{L_1 \cdot a_{d1} \cdot \rho \cdot 10^3}} \quad \text{cm}^{-1}$$

donde:

$\delta_1$  = Parámetro sin dimensión (geométricamente, ángulo en radianes) no obstante lo cual suele llamarse "Altura equivalente".

$L_{e1}$  = Longitud total neta de conductores medida paralelamente a las líneas de dispersión.

$$L_{e1} = \sum b_{e1} \quad (\text{cm})$$

$b_{e1}$  = Altura individual de las barras conductoras según la dirección de las líneas mencionadas en cm.

$L_1$  = Longitud equivalente del circuito de dispersión en el aire.

$$L_1 \approx H_{e1} + 2 a_{d1} \quad (\text{cm})$$

tomando como máximo  $L_1 = H$

(H es la altura de la ventana paralelamente a las líneas de dispersión).

$H_{e1}$  = Longitud de bobina entre caras extremas siempre paralelamente a las líneas de dispersión (cm).

$a_{d1}$  = Grosor de la bobina por entrecara (cm).

$\sigma_{e1}$  = Altura neta de conductores por entrecara

$$\sigma_{e1} = \sum h_1 \quad (\text{cm})$$

$h_1$  = Altura individual de los conductores perpendicularmente a las líneas de flujo de dispersión (cm).

$f$  = Frecuencia de la corriente (Hz).

$\rho$  = Resistividad del material a la temperatura considerada ( $\Omega$  mm<sup>2</sup>/m)

El incremento relativo de resistencia  $K_1$  viene dado en nuestro caso, por:

$$K_1 = \gamma(\delta_1) + \frac{N_{e1}^2 - 1}{3} \psi(\delta_1)$$

para valores de  $\delta \leq 1$

$$\gamma(\delta_1) = 1 + \frac{4}{45} \delta_1^4$$

$$\delta_1 = \frac{\delta_1^4}{3}$$

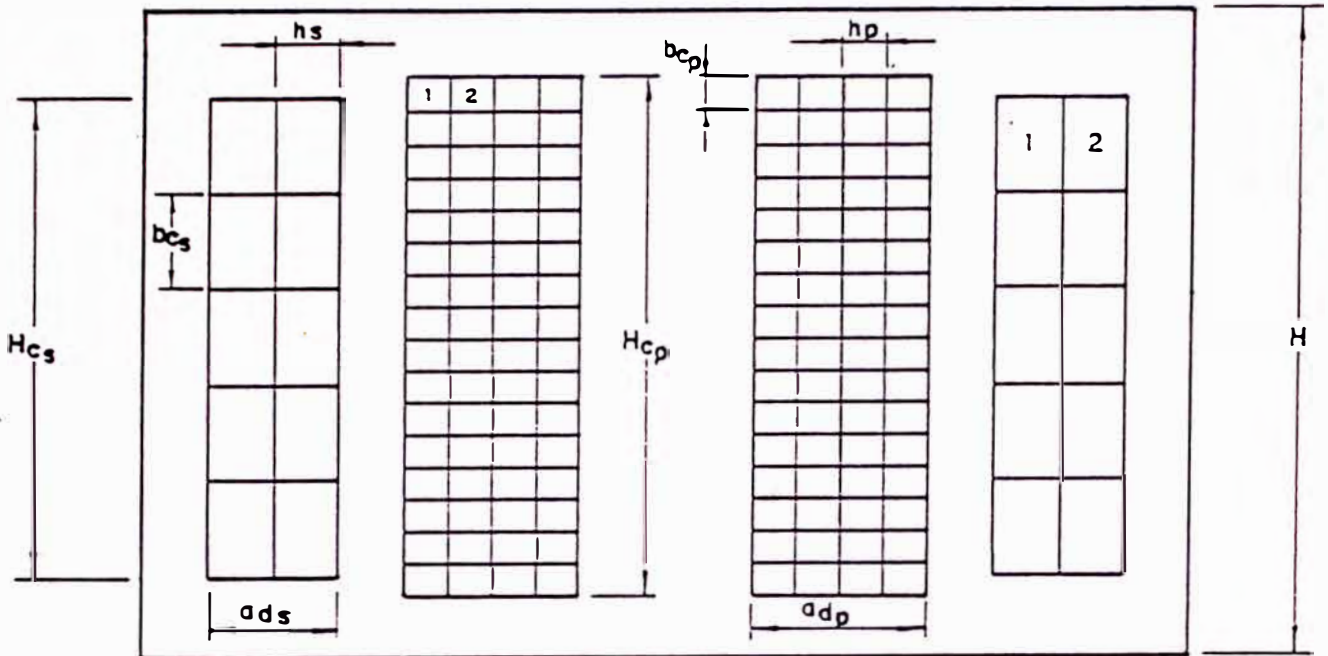


Fig. 3.11.- Dimensiones para el cálculo de la resistencia adicional

- Sub índice "s" : devanado secundario
- Sub índice "p" : devanado primario

donde:

$N_{ce_1}$  = número de capas de altura  $h_1$  por entre cara

luego:

$$K_1 \approx K-1 = \left( \frac{4}{45} + \frac{N^2 ce_1 - 1}{9} \right) \delta_1^4 = \left( \frac{N^2 ce_1 - 0.2}{9} \right) \delta_1^4 \quad (3.21)$$

Todas las relaciones sobre este aspecto han sido obtenidas del párrafo 1.10.42 del libro "Cálculo Industrial de Máquinas Eléctricas" tomo I de Juan Corrales Martín.

- Incremento de la resistencia en corriente alterna del devanado secundario

$$\alpha_s = 0.2 \pi \sqrt{\frac{L_{cs} \cdot \sigma_{cs} \cdot f}{L_s \cdot a_{ds} \cdot \rho_{75^\circ C} \cdot 10^3}} \quad \text{cm}^{-1}$$

El devanado secundario consta de:

Escala I:

Una bobina de ocho (8) espiras por capa, de una capa, en la que cada espira consta de dos (2) barras de cobre en paralelo de 9 mm. x 6 mm. de sección cada una.

Escala II:

Una bobina de catorce (14) espiras por capa, de una capa, en la que cada espira consta de dos (2) barras de cobre en paralelo de 9 mm. x 6 mm. de sección cada una.

Luego, calcularemos el incremento de la resistencia para las dos escalas.

Escala I

Longitud axial del cobre:

$$L_{cs} = N_{cs} \times b_{cs} = 8 \times 12 \times 10^{-1} = 9.6 \text{ cm}$$

Grueso radial de la bobina:  $a_{ds} = 1.2 \text{ cm}$

Longitud axial del circuito de dispersión:

$$L_s = H = 25 \text{ cm.}$$

Grueso del cobre en sentido transversal al flujo de dispersión:

$$\sigma_{cs} = N_{cs} \times 2 \times h_s = 1 \times 2 \times 5 \times 10^{-1} = 1.0 \text{ cm}$$

Resistividad del cobre a 75°C:

$$\rho_{75^\circ C} = \frac{1}{46.1} = 0.0217 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Frecuencia:  $f = 60 \text{ Hz}$

$$\alpha_{\text{e}} = 0.2\pi \sqrt{\frac{9.6 \times 1.0 \times 60}{25 \times 1.2 \times 0.0217 \times 10^{-3}}} = 0.59102$$

$$\delta_{\text{e}} = \alpha_{\text{e}} \times h_{\text{e}} = 0.59102 \times 0.5 = 0.29551.$$

Número de capas por entre cara:

$$N_{\text{ce}} = N_{\text{c}} \times 2 \text{ barras} = 1 \times 2 = 2$$

Luego, el incremento relativo de la resistencia es:

$$K_{\text{e}} = \frac{N_{\text{ce}}^2 - 0.2}{9} \delta_{\text{e}}^4 = \frac{(2)^2 - 0.2}{9} \times (0.29551)^4$$

$$K_{\text{e}} = 0.003$$

o sea 0.3% de incremento de resistencia.

$$R_{\text{e75-c}} = R_{\text{75-c}} (1 + K_{\text{e}}) = 0.000419 (1+0.003)$$

$$R_{\text{e75-c}} = 0.000420 \Omega$$

## Escala II

Se mantienen los mismos datos que la escala I, sólo varía la longitud axial del cobre:

$$L_{\text{ce}} = N_{\text{ce}} \times bc_{\text{e}} = 14 \times 12 \times 10^{-1} = 16.8 \text{ cm}$$

$$\alpha_{\text{e}} = 0.2\pi \sqrt{\frac{16.8 \times 1.0 \times 60}{25 \times 1.2 \times 0.0217 \times 10^{-3}}} = 0.78184$$

$$\delta_{\text{e}} = \alpha_{\text{e}} \times h_{\text{e}} = 0.78184 \times 0.5 = 0.39092$$

El incremento relativo de la resistencia será:

$$K_{\text{e}} = \frac{N_{\text{ce}}^2 - 0.2}{9} \delta_{\text{e}}^4 = \frac{(2)^2 - 0.2}{9} \times (0.39092)^4$$

$$K_{\text{e}} = 0.00986$$

o sea 0.98% del incremento de resistencia.

$$R_{\text{e75-c}} = R_{\text{75-c}} (1+K_{\text{e}}) = 0.000733 (1+0.00986)$$

$$R_{\text{e75-c}} = 0.000740 \Omega$$

**Incremento de la resistencia en corriente alterna de devanado primario**

$$\alpha_p = 0.2\pi \sqrt{\frac{L_{cp} \cdot \sigma_{cp} \cdot f}{L_p \times a_{dp} \times \rho_{75-C} \times 10^3}} \quad \text{cm}^{-1}$$

El devanado primario consta de una bobina de 72 espiras por capa, de un máximo de 5 capas, en la que cada espira consta de dos (2) cables de sección de 4 mm<sup>2</sup> con diámetro de 2.51 mm cada uno. Procederemos a calcular el incremento de la resistencia para cada una de las 10 tomas del devanado primario.

Longitud axial del cobre:

$$L_{cp} = N_{cp} \times b_{cp} = 72 \times 2.51 \times 10^{-1} = 18.07 \text{ cm}$$

Longitud axial del circuito de dispersión:

$$L_p = H = 25 \text{ cm.}$$

Resistividad del cobre a 75°C:

$$\rho_{75-C} = \frac{1}{46.1} = 0.0217 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{m}}$$

Frecuencia:  $f = 60 \text{ Hz}$

Grueso radial de la bobina:

$a_{dp1}$ : será función del número de espiras y/o capas.

Grueso del cobre en sentido transversal al flujo de dispersión:

$$\sigma_{cp} = N_{cp1} \times 2 \times h_p = N_{cp1} \times 2 \times 2.51 \times 10^{-1} \text{ cm}$$

$\sigma_{cp}$ : será función del número de capas.

$$\delta_{p1} = \alpha_{p1} \times h_{p1} = \alpha_{p1} \times 0.251$$

Número de capas por entrecara:

$$N_{cp1} = N_{cp} \times 2 \text{ cables conductores}$$

$N_{ce_{p\pm}} = 2 N_{cp\pm} \Rightarrow$  función del número de capas.

El incremento relativo de la resistencia será:

$$K_{p\pm} \sim = \frac{N_{ce_{p\pm}}^2 - 0.2}{9} \delta_{p\pm}^4$$

$$R_{p\pm 75^\circ C} \sim = R_{p\pm 75^\circ C} \sim \times (1 + K_{p\pm} \sim)$$

$N_{p\pm}$	$N_{cp\pm}$	$a_{dp\pm}$ (cm)	$\sigma_{cp\pm}$ (cm)	$\alpha_{p\pm}$	$\delta_{p\pm}$	$N_{ce_{p\pm}}$	$K_{p\pm}$ ~	$R_{p\pm 75^\circ C}$ ( $\Omega$ )	$R_{p\pm 75^\circ C}$ ~ ( $\Omega$ )
360	5.00	2.789	2.51	0.84265	0.21150	10	0.02219	0.4486	0.4585
332	4.61	2.789	2.51	0.84265	0.21150	10	0.02219	0.4137	0.4229
308	4.40	2.789	2.51	0.84265	0.21150	10	0.02219	0.3839	0.3924
287	4.10	2.231	2.01	0.84269	0.21152	8	0.01419	0.3440	0.3489
269	3.84	2.231	2.01	0.84269	0.21152	8	0.01419	0.3224	0.3270
253	3.61	2.231	2.01	0.84269	0.21152	8	0.01419	0.3033	0.3076
239	3.41	2.231	2.01	0.84269	0.21152	8	0.01419	0.2864	0.2905
227	3.24	2.231	2.01	0.84269	0.21152	8	0.01419	0.2721	0.2760
217	3.10	1.673	1.51	0.84275	0.21133	6	0.00796	0.2497	0.2517
205	2.93	1.673	1.51	0.84275	0.21153	6	0.00796	0.2360	0.2379

### 3.3.8 Volumen y peso del cobre

El volumen total del cobre es: (Ver fig. 3.2)

$$Vol_{Cu} = 3 (N_s A_{cus} L_{cus} + N_p A_{cup} L_{cup \max})$$

$$Vol_{Cu} = 3 (14 \times 120 \times 289.7 + 360 \times 8 \times 459.62)$$

$$Vol_{Cu} = 5.4312 \times 10^6 \text{ mm}^3 = 5,431.2 \text{ cm}^3$$

El peso específico del cobre es:

$$C_{Cu} = 8.9 \text{ gr/cm}^3$$

El peso del cobre es:

$$Peso_{Cu} = Vol_{Cu} \times C_{Cu} = 5,431.2 \times 8.9 = 48,338 \text{ gr.}$$

$$Peso_{Cu} = 48.34 \text{ Kg.}$$

### 3.4 Características de comportamiento

#### 3.4.1 Circuito equivalente del sistema

Como veremos más adelante en la sección 5.4, el circuito equivalente del sistema transformador trifásico + rectificador trifásico + inductancia de filtro es:

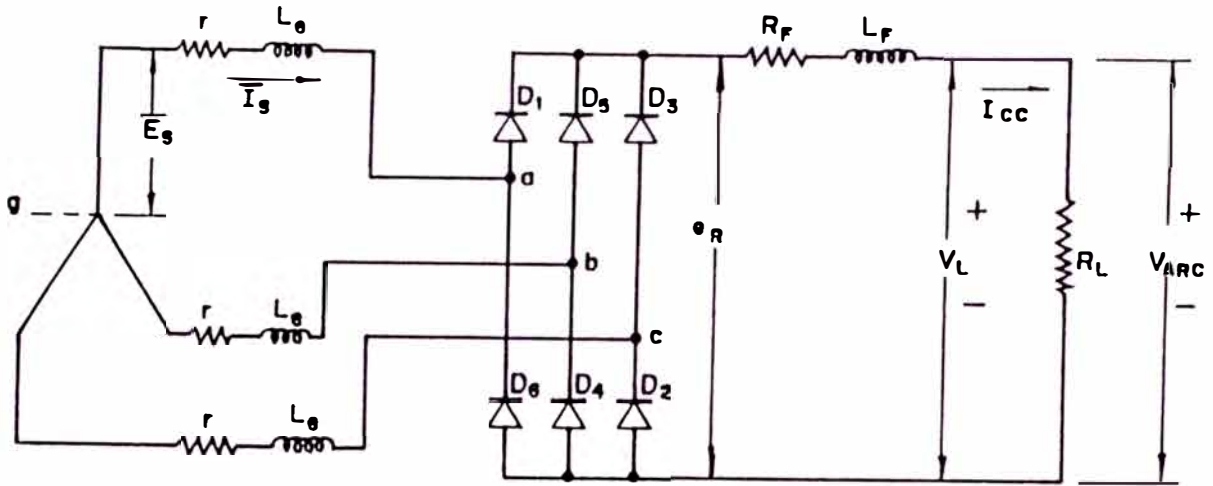


Fig. 3.12 Circuito equivalente del sistema.

$r$  = resistencia equivalente de los devanados del transformador

$L_e$  = inductancia equivalente de los devanados del transformador

$r_d$  = resistencia dinámica de los diodos

$V_{umb}$  = voltaje de umbral de los diodos

$R_F$  = resistencia de la bobina de filtro

$E_s$  = tensión de fase del secundario

$I_s$  = corriente de fase del secundario

$V_L$  = tensión continua en la carga

$R_L$  = resistencia de carga

$$r = \frac{R_p}{n^2} + R_e \quad (3.22)$$

$$X_e = 2 \pi L_e = \frac{X_p}{n^2} + X_e \quad (3.23)$$



Como veremos en la sección 4.1 y 4.2

$$V_{cc} = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} E_s \quad (3.24)$$

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_s \quad (3.25)$$

El voltaje de pérdidas en el transformador es:

$$V_{\text{transform}} = \sqrt{3} (i_s r + L_e \frac{di_s}{dt})$$

$$\text{También: } i_s = \sqrt{2} I_s$$

$$V_{\text{transform}} = \sqrt{3} [ \sqrt{2} I_s r + j \sqrt{2} I_s (2\pi f L_e) ]$$

$$V_{\text{transform}} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_s (2r + j 2X_e)$$

$$V_{\text{transform}} = I_{cc} (2r + j2X_e) \quad (3.26)$$

Como veremos en la sección 4.5 el voltaje de pérdidas en los diodos es:

$$V_{\text{diodos}} = I_{cc} (2r_d) + 2V_{\text{umb}} \quad (3.27)$$

Esto es considerando que la corriente rectificadora cierra el circuito a través de dos diodos.

El voltaje de pérdidas en la resistencia del filtro de inductancia es:

$$V_F = I_{cc} R_F \quad (3.28)$$

La caída de tensión en la carga (arco eléctrico) es:

$$V_L = I_{cc} R_L \quad (3.29)$$

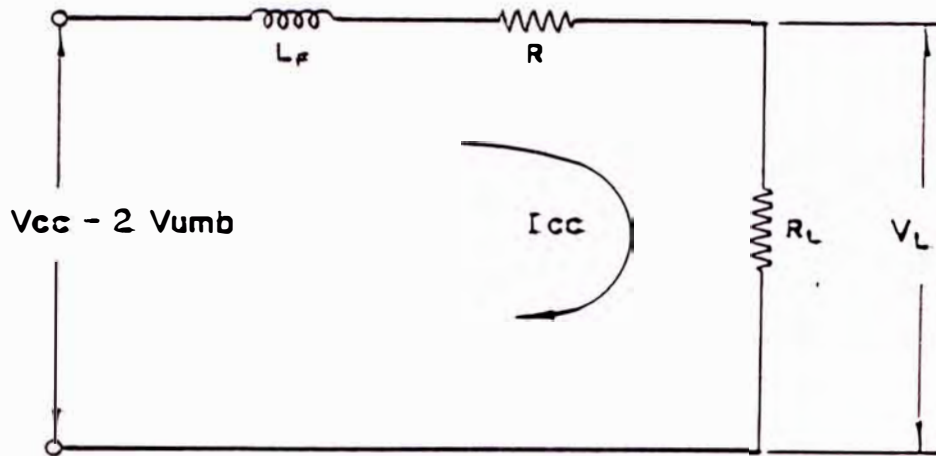


Fig. 3.13 Circuito equivalente final.

Luego, a partir de las ecuaciones (3.24), (3.25), (3.27), (3.28) y (3.29) se puede armar el circuito equivalente de la fig. 3.13.

$$\text{Haciendo: } R = 2r + 2r_s + R_p \quad (3.30)$$

$$V_L = V_{cc} - 2V_{umb} - I_{cc}R - jI_{cc}(2X_e) = I_{cc}R_L \quad (3.31)$$

$$I_{cc} = \left( \frac{3}{\pi} \sqrt{6} E_s - 2 V_{umb} \right) \frac{1}{Z_{eq}} \quad (3.32)$$

$$Z_{eq} = (R + R_L + j2X_e) \quad (3.33)$$

Reemplazando valores para una corriente de soldadura de

$$I_{cc} \approx 300 \text{ Amp.}$$

$$\text{Toma N°9 Escala II: } E_s = 14.19 \underline{/0^\circ}$$

$$\text{relación de transformación: } n = \frac{217}{14} = 15.5$$

$$r = \frac{R_p}{n^2} + R_s = \frac{0.2517}{(15.5)^2} + 0.00074 = 0.001788 \ \Omega$$

$$X_e = \frac{X_p}{n^2} + X_s = \frac{0.21103}{(15.5)^2} + 0.0004304 = j0.001309 \ \Omega$$

$$r_d = 0.001667 \Omega$$

$$V_{umb} = 0.95 \text{ volts}$$

$$\text{De la sección 5.8.14: } R_r = 0.000759 \Omega$$

No se toma en cuenta la inductancia "L<sub>r</sub>" del filtro inductivo por que se anula con los armónicos superiores de la onda de voltaje (ver ec. 5.5).

$$R = 0.007700 \Omega$$

$$\text{Según la ec. (2.1): } V_L = V_{arcc} = 14 + 0.05 I_{cc}$$

$$R_L = \frac{V_L}{I_{cc}} = \frac{14 + 0.05 I_{cc}}{300} = 0.096666 \Omega$$

$$Z_{eq} = 0.007700 + 0.096666 + j2(0.001158)$$

$$Z_{eq} = 0.1013 + j0.002618 = 0.1013 \angle 1.48^\circ$$

$$\overline{I_{cc}} = \left[ \frac{3}{\pi} \sqrt{6} (14.19) - 2(0.95) \right] \cdot \frac{1}{0.1013 \angle 1.48^\circ}$$

$$\overline{I_{cc}} = 300.90 \angle -1.48^\circ = (300.70 + j7.538) \text{ Amp} \quad (3.34)$$

$$I_s = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{cc} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} (300.90) = 245.68 \angle -1.48^\circ$$

La corriente del secundario referida al primario (I'<sub>s</sub>) será:

$$I'_s = \frac{I_s}{n} = \frac{245.68}{15.5} = 15.85 \angle -1.48^\circ \text{ Amp}$$

$$I'_s \cos \theta = 15.85 \text{ Amp.}$$

### 3.4.2 Pérdidas en el cobre a condiciones nominales

Las pérdidas en el cobre por fase serán:

$$Per_{1\phi cu} = (I'_s \cos \theta)^2 (R_p + n^2 R_s)$$

y las pérdidas totales en el cobre serán:

$$Per_{3\phi cu} = 3 Per_{1\phi cu} = 3(I'_s \cos \theta)^2 (R_p + n^2 R_s)$$

En el caso que la corriente de soldadura sea  $I_{cc} \approx 300$  Amp, las pérdidas en el cobre serán:

$$Per_{\phi_{Cu}} = 3(15.85)^2 (0.2517 + (15.5)^2 0.00074)$$

$$Per_{\phi_{Cu}} = (3) (107.90) = 323.70 \text{ w}$$

### 3.4.3 Pérdidas en el hierro

El peso del núcleo es:  $G = 34.38$  Kg.

De la curva característica de pérdidas del material RM-14 KAWASAKI para planchas de 0.35 mm tenemos:

$$\text{Para } \beta_{max} = 1.395 \text{ wb/m}^2 \Rightarrow W = 3.2 \text{ watts/Kg}$$

$$Per_{Fe^*} = G_n \times W_n = 34.38 \times 3.2 = 110 \text{ watts}$$

Considerando un factor de pérdidas (f.p) de 1.8, debido al punzonado y corte de planchas, tendremos que las pérdidas en el hierro son:

$$Per_{Fe} = Per_{Fe^*} \times f_p = 110 \times 1.8 = 198 \text{ w}$$

Pérdidas totales a condiciones nominales:

$$Per_T = Per_{Fe} + Per_{Cu} = 198 + 328.95 = 526.95 \text{ w}$$

### 3.4.4 Cálculo de la potencia del transformador

**Cálculo de la corriente de entrada por fase ( $I_p$ )**

La corriente de entrada  $\bar{I}_p$  es igual a la suma de  $\bar{I}'_s$  (corriente de carga que representa la potencia transferida por vía electromagnética) e  $\bar{I}_\phi$  (corriente de excitación). La corriente de excitación está compuesta a su vez por la corriente de pérdidas en el hierro ( $I_{Fe}$ ) y la corriente de magnetización ( $I_m$ ).

$$\bar{I}_p = \bar{I}'_s + \bar{I}_\phi$$

$$\bar{I}_\phi = \bar{I}_{Fe} + \bar{I}_m$$

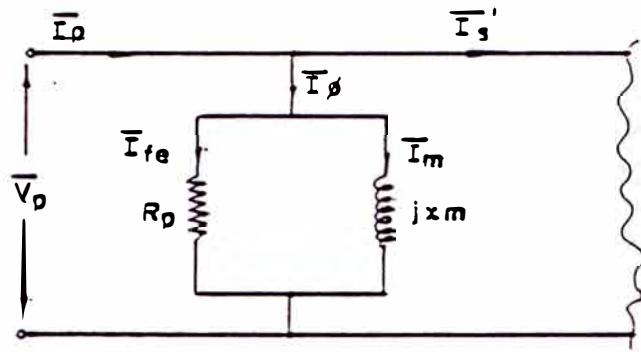


Fig. 3.14 Circuito de corrientes por fase referidas al primario.

**Cálculo de la corriente de pérdidas en el fierro ( $I_{fe}$ )**

$$I_{fe} = \frac{Per_{Fe}/3}{E_o} = \frac{110/3}{220} = 0.30 \text{ Amp}$$

**Cálculo de la corriente de magnetización ( $I_m$ )**

La corriente de magnetización requerida será aquella necesaria par magnetizar al fierro y a su vez poder vencer la reluctancia de los pequeños entrehierros que introduce el desajuste inevitable de las planchas.

$$I_m = I_{mFe} + I_{mJ}$$

$I_{mFe}$  = corriente de magnetización del fierro

$I_{mJ}$  = corriente de magnetización de los entrehierros entre las juntas solapadas.

$I_m$  = corriente de magnetización total

**Cálculo de la corriente de magnetización del fierro ( $I_{mFe}$ )**

Para determinar la corriente necesaria para magnetizar al fierro se debe conocer primero la potencia magnetizante del fierro ( $S_{Fe}$ )

$$S_{Fe} = (va) \phi_{max} \cdot \text{Peso}_{Fe}$$

Para el tipo de plancha utilizado RM14 KAWASAKI de 35 mm tenemos:

$$\beta_{\max} = 1.395 \text{ wb/m}^2 \rightarrow (va)_{\max} = 9.6 \text{ volt - Amp/kg}$$

$$S_{Fe} = 9.6 \times 34.38 = 330 \text{ VA}$$

La potencia reactiva del hierro es:

$$Q_{Fe}^* = \sqrt{S^2 - P_{eFe}^2} = \sqrt{(330)^2 - (110)^2} = 311.13 \text{ VAR}$$

Considerando un factor de pérdidas igual a f.p. = 1.8

$$Q_{Fe} = Q_{Fe}^* \times f.p. = 311.13 \times 1.8 = 560 \text{ VAR}$$

La corriente magnetizante requerida para el hierro será:

$$I_{mFe} = \frac{Q_{Fe}/3}{E_e} = \frac{560/3}{220} = 0.8485 \text{ Amp}$$

### Cálculo de la corriente de magnetización requerida por las juntas

Los entrehierros dependen de la disposición y corte de las planchas y el esmero con que se siga el montaje. Según Arnold, basado en las experiencias de Ewing y Bohle, cada junta de chapas que se encuentra en el trayecto de las líneas de fuerza, equivale por término medio a un entrehierro de 3.5 centésimos de milímetro, si las chapas se montan solapadas cubriéndose mutuamente las juntas.

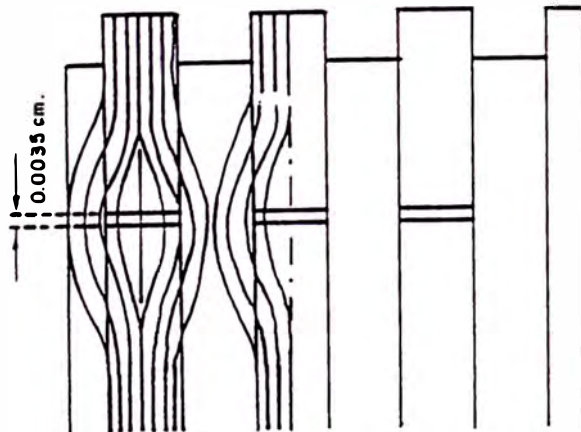


Fig. 3.15 Juntas solapadas.

Designándose por  $\delta e$  la longitud total en el recorrido de una línea de inducción cerrada, de los entrehierros así evaluados; la f.m.m. precisada para establecer en ellos la inducción máxima  $B_{max}$  será:

$$(AV) = \frac{B_{max} \times \delta e}{\sqrt{2} \times \mu_0} \text{ Amp - vueltas eficaces}$$

y la corriente magnetizante será:

$$I^*_{m\phi} = \frac{B_{max} \times \delta e}{N_{p217} \sqrt{2} \times \mu_0}$$

La longitud equivalente de entrehierro debido a las seis juntas solapadas, por flujo de fase, será:

$$E = 6 \times 0.035 = 0.21 \text{ mm} = 2.1 \times 10^{-4} \text{ m.}$$

$$I^*_{m\phi} = \frac{1.395 \times 2.1 \times 10^{-4}}{217 \times \sqrt{2} \times 4\pi \times 10^{-7}} = 0.7596 \text{ Amp}$$

El error que se comete al hacer este cálculo de esta forma es aproximadamente de un 50%.

$$I_{m\phi} = 1.5 I^*_{m\phi} = 1.5 \times 0.7596 = 1.1395 \text{ Amp}$$

Luego la corriente de magnetización total es:

$$I_m = I_{mFe} + I_{m\phi} = 0.8485 + 1.1395 = 1.988 \text{ Amp}$$

**Cálculo de la corriente de excitación ( $I_\phi$ )**

$$\bar{I}_\phi = \bar{I}_{pFe} + \bar{I}_m = 0.300 - j 1.988 = 2.010 \angle -81.42^\circ$$

La corriente de entrada ( $\bar{I}_p$ ) será:

$$\bar{I}_p = \bar{I}_\phi + \bar{I}'_s$$

$$\bar{I}'_s = 15.85 \angle -1.48^\circ = 15.842 - j 0.3971$$

$$\bar{I}_p = (0.300 - j 1.988) + (15.842 - j 0.3971)$$

$$\bar{I}_p = 16.142 - j 2.3851 = 16.3117 \angle -8.40^\circ$$

### Cálculo de la potencia

Potencia de entrada aparente

$$S_F = V_{PF} I_{PF} = 220 \times 16.3117 = 3.588 \text{ KVA}$$

$$S_{3\phi} = 3S_F = 3 \times 3.588 = 10.764 \text{ KVA}$$

Potencia de entrada activa

$$P_F = V_{PF} I_{PF} \cos \phi = 220 \times 16.3117 \cos 8.40^\circ$$

$$P_F = 3.55 \text{ KW}$$

$$P_{3\phi} = 3P_F = 10.65 \text{ KW}$$

Factor de potencia:

$$\cos 8.40^\circ = 0.989$$

### 3.5 Cálculo de calentamiento

Lo que limita la capacidad de un transformador es la temperatura máxima admisible en el interior de los devanados. Un valor excesivo de ésta produce la carbonización lenta de los aislamientos en contacto con el cobre.

Para los transformadores con aislamiento clase A la elevación media de temperatura sobre el ambiente no debe de exceder de 45° a 50°C, en los devanados según las normas.

Considerando una bobina que tiene una resistencia "R" en ohmios y por la que circula una corriente de "I" amperios, la pérdida en vatios será:

$$P_{e_{cu}} = R I^2$$

Con una resistividad en caliente, incluido el efecto superficial de  $\rho \frac{\Omega\text{-mm}^2}{m}$ , longitud de la espira media "L<sub>cu</sub>" en metros, número de espiras "N", sección del conductor "A<sub>cu</sub>" en milímetros cuadrados y densidad de corriente "j" en amperios por milímetro cuadrado.



$$Per_{cu} = \rho \frac{N \cdot L_{cu}}{S} (j \cdot s)^2 = \rho L_{cu} (N I) j$$

En estado de equilibrio térmico toda esta energía es disipada a través de la superficie de la bobina. Si el aumento medio de temperatura que experimenta el conductor en °C es  $\theta$ , y la superficie de ventilación ideal en mm<sup>2</sup> es S, a través de la cual, sede la bobina el calor en régimen constante a razón de  $K_T$  W/m<sup>2</sup>/°C, podemos admitir, dados los límites restringidos entre los cuales suele variar  $\theta$ , que el calor disipado por radiación y convección es proporcional al aumento de temperatura, o sea:

$$Per_{cu} = K_T \cdot s \cdot \theta$$

La superficie eficaz "s" puede expresarse en función de la superficie exterior cilíndrica "A<sub>b</sub>" de la bobina, de la siguiente forma:

$$s = K \cdot A_b$$

Donde K es una constante de proporcionalidad, siendo "L<sub>cu<sub>m</sub></sub>" la longitud de la espira máxima, y "H<sub>c</sub>" la altura de la bobina.

$$s = K \cdot L_{cu\ m} \cdot H_c$$

De lo cual podemos expresar

$$\rho \cdot L_{cu} \cdot (N \cdot I) \cdot j = K_T \cdot K \cdot L_{cu\ m} \cdot H_c \cdot \theta$$

haciendo

$$\frac{N \cdot I}{H_c} = q$$

$$q \cdot j = K \cdot \left( \frac{L_{cu\ m}}{L_{cu}} \right) \cdot \left( \frac{K_T}{\rho} \right) \cdot \theta$$

Mediante ensayos se ha podido determinar para el coeficiente combinado de radiación y convección, con circulación natural al aire.

$$K_T = 13.6 \text{ W/m}^2/\text{°C}$$

Suponiendo, con cierto margen de seguridad una elevación de temperatura media admisible de 50°C, la fórmula anterior conduce para el tipo de bobinado utilizado, al siguiente resultado práctico:

$$q \cdot j = 360 \frac{\text{Amper - vuelta} \cdot \text{Amp}}{\text{cm} \cdot \text{mm}^2}$$

Para condiciones de funcionamiento permanente a potencia nominal.

Cuando el transformador trabaja en servicio intermitente debemos determinar la carga lineal por la densidad de corriente equivalente (q . j) eq.

$$(q \cdot j)_{eq} = \sqrt{\frac{\sum (q \cdot j)^2 \cdot \Delta t}{T_o}}$$

Para un ciclo de trabajo del 60%

$$(q \cdot j)_{eq_p} = \sqrt{0.6} \cdot q \cdot j$$

La sobreelevación de temperatura del devanado primario será:

$$\theta_p = \frac{50 (q \cdot j)_{eq_p}}{q \cdot j}$$

$$\theta_p = \frac{50 \sqrt{0.6} N_p I_p / H_{cup} \cdot I_p / A_{cup}}{q \cdot j}$$

$$= \frac{50 \sqrt{0.6} \times 217 \times 15.842 \times 15.842}{360 \times 20.36 \times 8}$$

$$\theta_p = 35.97^\circ\text{C}$$

La sobreelevación de temperatura del devanado secundario será:

$$\theta_s = \frac{50 (q.j)eq_s}{q.j}$$

$$\theta_s = \frac{50 \sqrt{0.6} N_s I_s / H_{cs} \cdot I_s / A_{cus}}{q.j}$$

$$\theta_s = \frac{50 \sqrt{0.6} \times 14 \times 245.53 \times 245.53}{360 \times 20.67 \times 120}$$

$$\theta_s = 36.60^\circ\text{C}$$

### 3.6 Disposición de espacio del transformador trifásico

La disposición isométrica del transformador trifásico se muestra en la figura 3.16. El transformador requiere de una disposición de espacio que lo comprenda comodamente de las siguientes dimensiones:

Largo : 600 mm

Ancho : 450 mm

Altura: 250 mm

Dimensiones del núcleo:

Largo : 371 mm

Ancho : 364 mm

Altura: 57 mm

Peso : 35 Kg.

**Dimensiones del devanado:**

Ancho : 100 mm

Altura: 250 mm

Peso 48 Kg.

Considerando 4 Kgs adicionales de los soportes y accesorios de ferretería, el peso del transformador trifásico será:

$$\text{Peso transformador} = 35 + 48 + 4 = 87 \text{ Kg.}$$

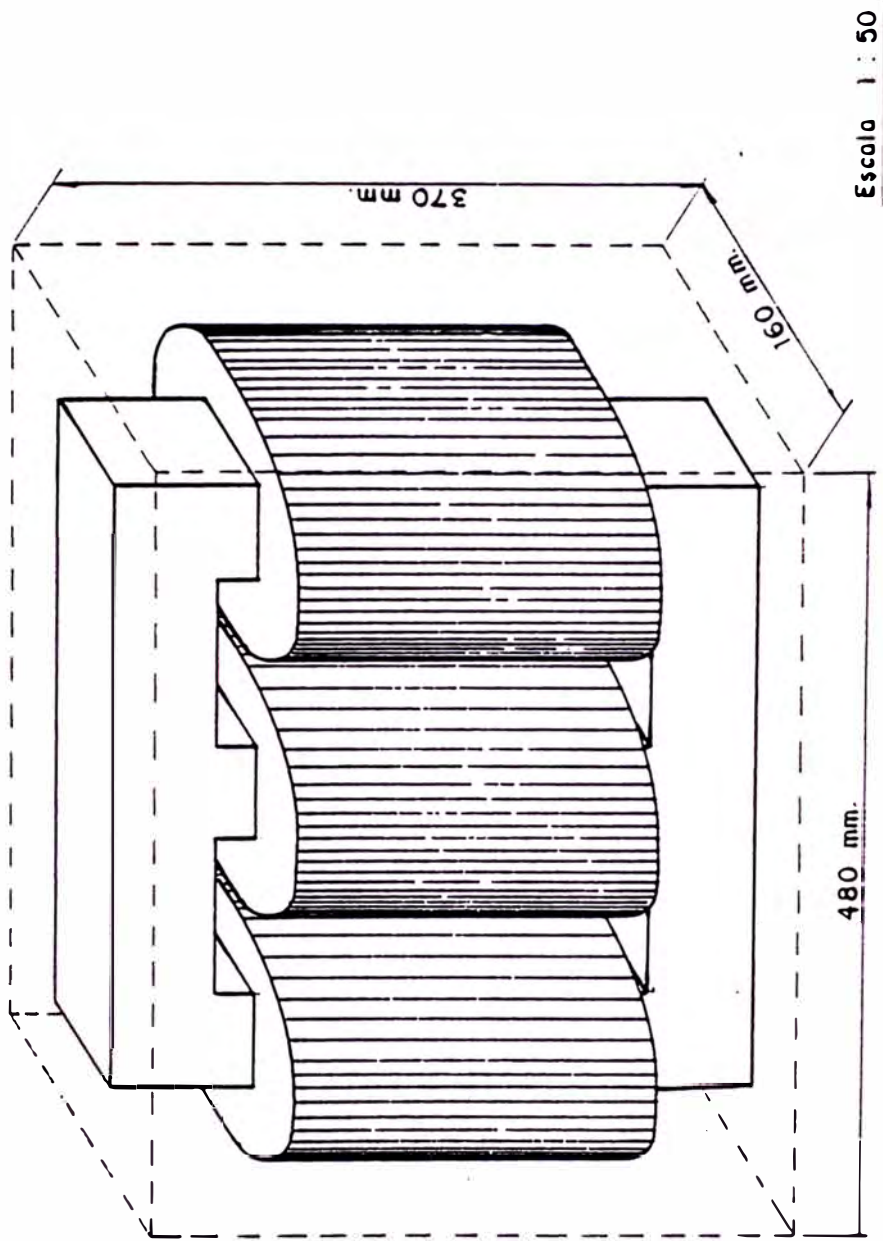
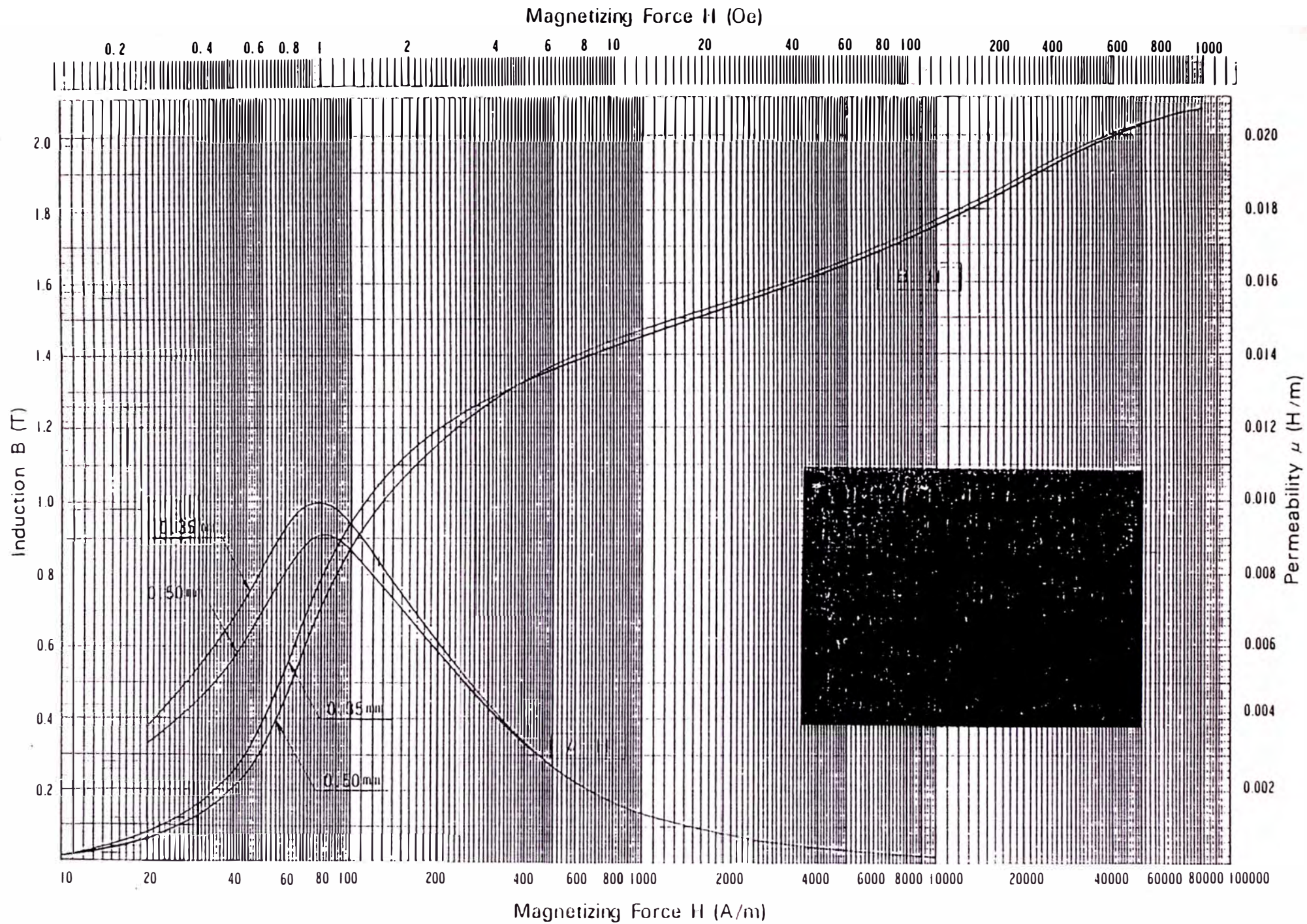
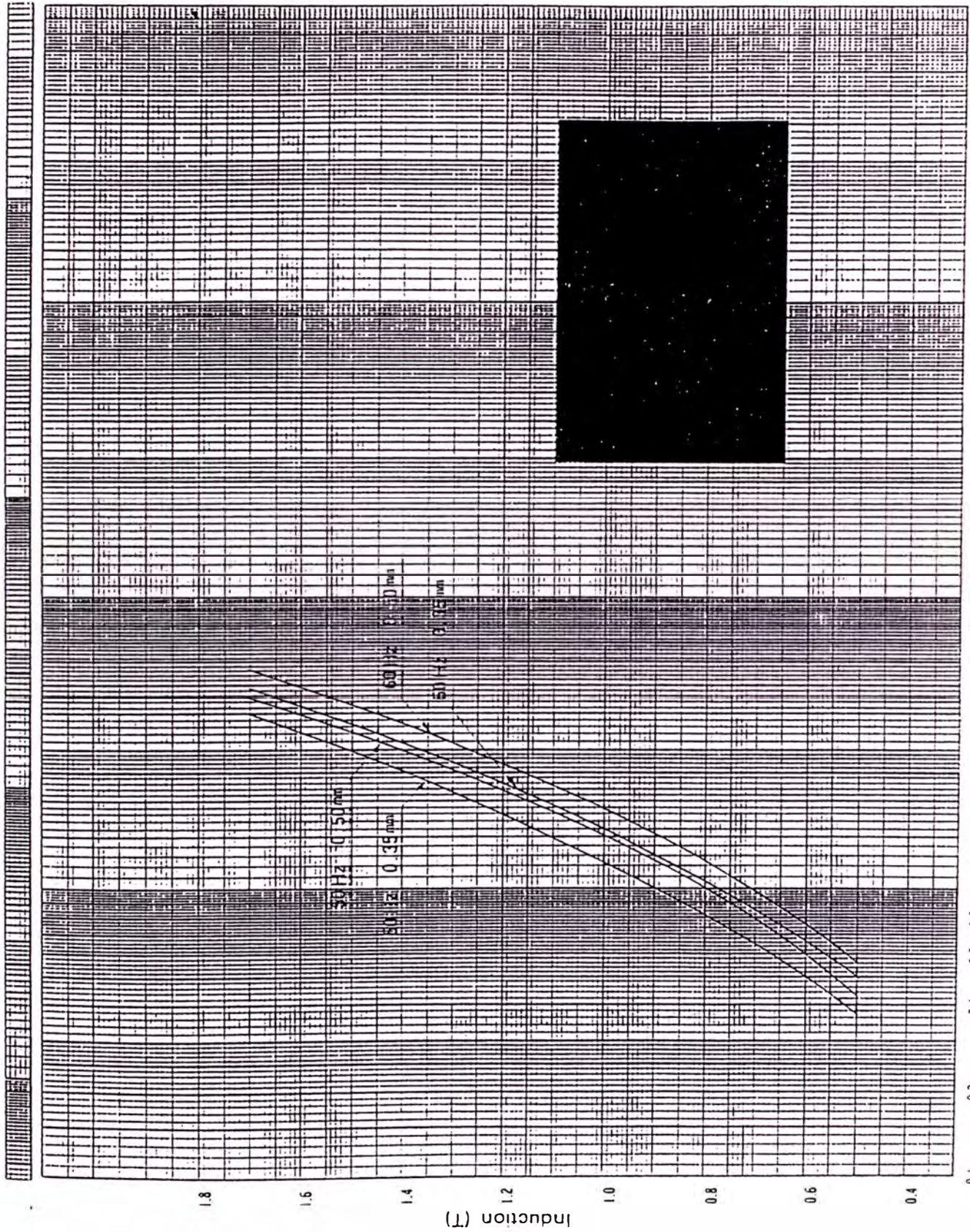


Fig 3.16. — DISPOSICION DE ESPACIO DEL TRANSFORMADOR TRIFASICO

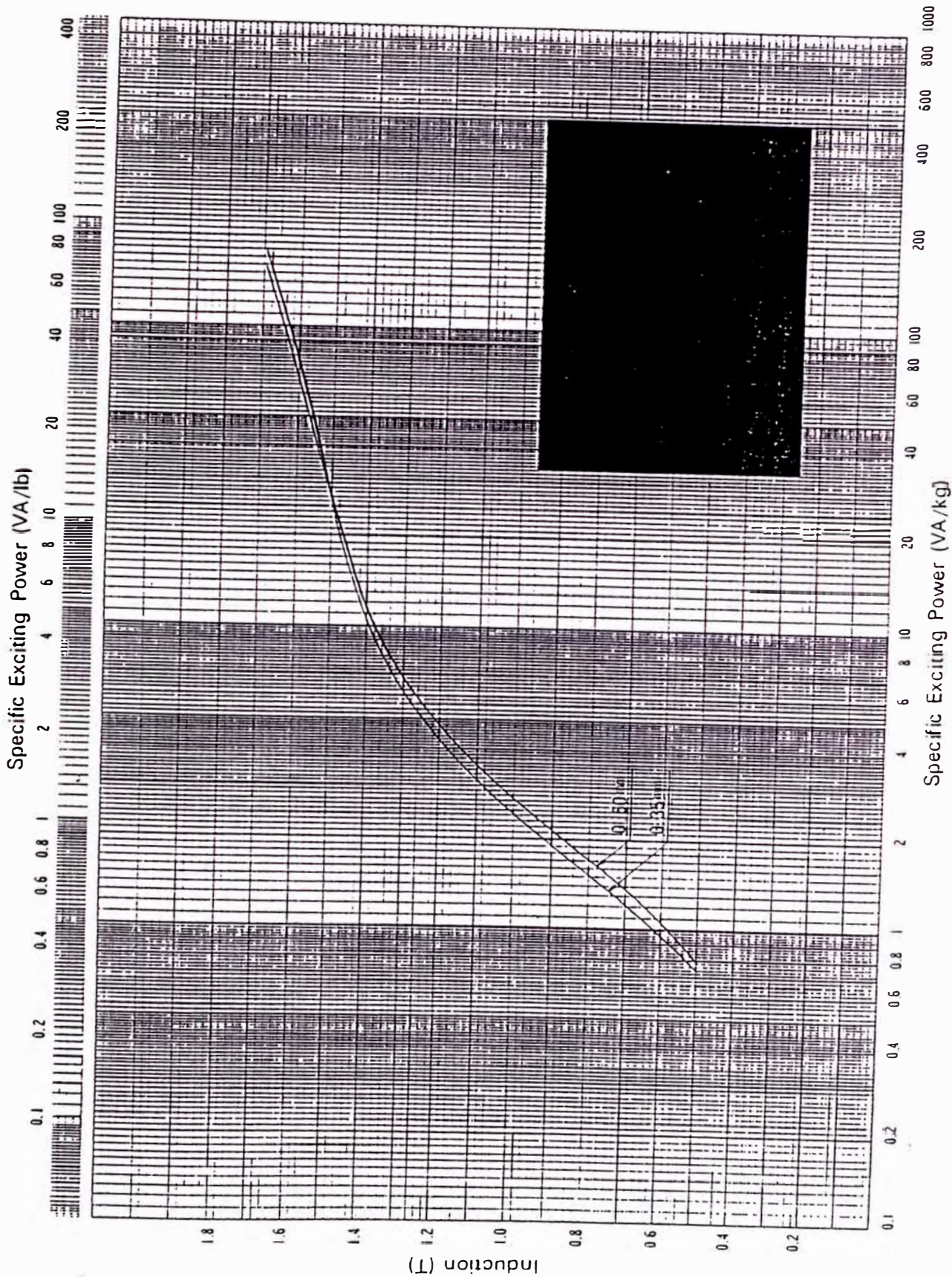


$e$  LUSS vv  $\mu$

0.06 0.08 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8 1 2 4 6 8 10 20 40 60 80 100



Core Loss (W/kg)



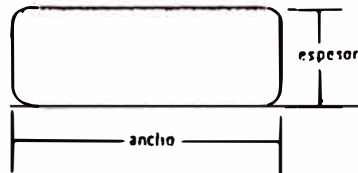




## Tabla de Especificaciones

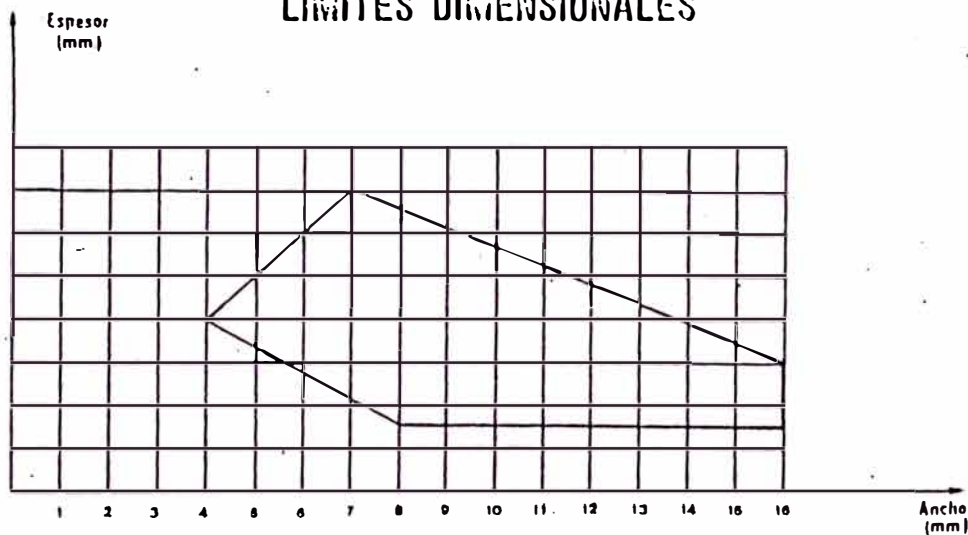
### ALAMBRES RECTANGULARES DE COBRE DESNUDOS

#### TIPO DE FABRICACION



#### CON CANTOS REDONDOS

#### LIMITES DIMENSIONALES



#### NOTAS:

- Cualquier combinación de espesor y ancho que caiga dentro del área encerrada, puede ser suministrado.
- A fin de determinar las posibilidades de fabricación del calibre deseado, sírvase confirmarlo con nuestro Dpto. Comercial.
- Cantidades mínimas de despacho: 500 kilos.

**CAPITULO IV**  
**RECTIFICADOR TRIFASICO**

**4.1 Ecuación de la tensión resultante a la salida del rectificador**

Los voltajes de fase del secundario del transformador son:

$$e_{a\phi} = \sqrt{2} E_{\phi} \text{ sen } \left( \omega t - \frac{\pi}{6} \right) \quad (4.1)$$

$$e_{b\phi} = \sqrt{2} E_{\phi} \text{ sen } \left( \omega t - \frac{5\pi}{6} \right) \quad (4.2)$$

$$e_{c\phi} = \sqrt{2} E_{\phi} \text{ sen } \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (4.3)$$

La tensión resultante en los terminales de salida del rectificador trifásico de onda completa, es en cualquier instante:

$$e_{\pi} = \sqrt{3} (\sqrt{2} E_{\phi}) \text{ sen } \left( \omega t + \frac{\pi}{3} \right)$$

$$e_{\pi} = \sqrt{6} E_{\phi} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{6} - \phi \right) \quad (4.4)$$

$$e_{\pi} = V_{oc} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{6} - \phi \right)$$

$$V_{oc} = \sqrt{6} E_{\phi} \quad (4.5)$$

donde:  $V_{oc}$  = Voltaje rectificado de circuito abierto.

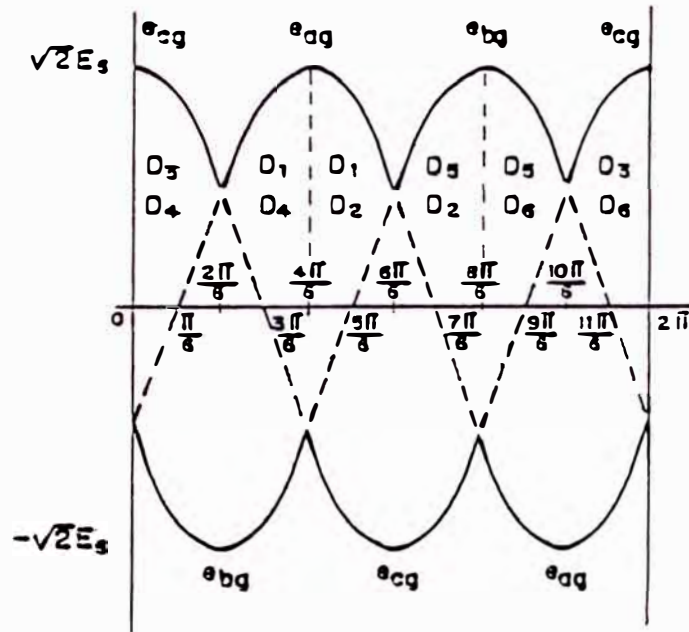


Fig. 4.1 Voltajes de fase de secundario del transformador

Intervalo  $0 < \omega t < 2\pi/6$ :

En  $\omega t = 0$ , la tensión " $e_{cg}$ " es mayor que " $e_{ag}$ ", siendo el ánodo del diodo " $D_1$ " negativo con respecto a " $e_{cg}$ ", no pudiendo conducir. El ánodo del diodo " $D_3$ " es positivo con respecto a " $e_{ag}$ " y " $e_{bg}$ ", siendo la tensión " $e_{bg}$ " más negativa que " $e_{cg}$ " y " $e_{ag}$ ", conducen los diodos " $D_3$ " y " $D_4$ ".

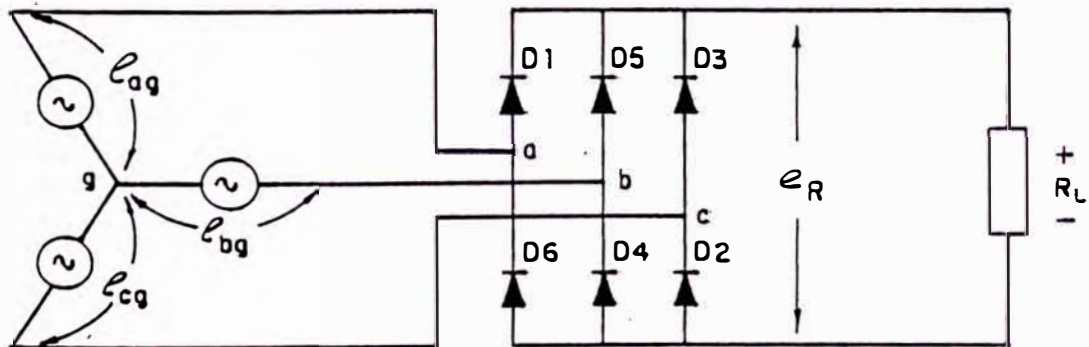


Fig. 4.2 Rectificador trifásico de potencia

La tensión resultante en este intervalo es:

$$e_{\pi} = e_{a\varphi} - e_{b\varphi} = \sqrt{2} E_{\phi} \left[ \text{sen} \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) - \text{sen} \left( \omega t - \frac{5\pi}{6} \right) \right]$$

$$e_{\pi} = e_{a\varphi} - e_{b\varphi} = \sqrt{3} (\sqrt{2} E_{\phi}) \text{sen} \left( \omega t + \frac{\pi}{3} \right)$$

$$e_{\pi} = \sqrt{6} E_{\phi} \cos \left( \omega t - \frac{\pi}{6} \right)$$

Análogamente tendremos:

Intervalo	Diodos que conducen	Tensión resultante $e_{\pi}$
$0 < \omega t < 2\pi/6$	$D_3$ y $D_6$	$e_{a\varphi} - e_{b\varphi} = \sqrt{6} E_{\phi} \cos (\omega t - \pi/6)$
$2\pi/6 < \omega t < 4\pi/6$	$D_1$ y $D_6$	$e_{a\varphi} - e_{b\varphi} = \sqrt{6} E_{\phi} \cos (\omega t - 3\pi/6)$
$4\pi/6 < \omega t < 6\pi/6$	$D_1$ y $D_3$	$e_{a\varphi} - e_{a\varphi} = \sqrt{6} E_{\phi} \cos (\omega t - 5\pi/6)$
$6\pi/6 < \omega t < 8\pi/6$	$D_3$ y $D_2$	$e_{b\varphi} - e_{a\varphi} = \sqrt{6} E_{\phi} \cos (\omega t - 7\pi/6)$
$8\pi/6 < \omega t < 10\pi/6$	$D_5$ y $D_6$	$e_{b\varphi} - e_{a\varphi} = \sqrt{6} E_{\phi} \cos (\omega t - 9\pi/6)$
$10\pi/6 < \omega t < 12\pi/6$	$D_3$ y $D_4$	$e_{a\varphi} - e_{a\varphi} = \sqrt{6} E_{\phi} \cos (\omega t - 11\pi/6)$

La onda resultante tiene una frecuencia de rizado de:

$$f_r = 6 \times f \quad \text{donde } f = 60 \text{ ciclos/seg}$$

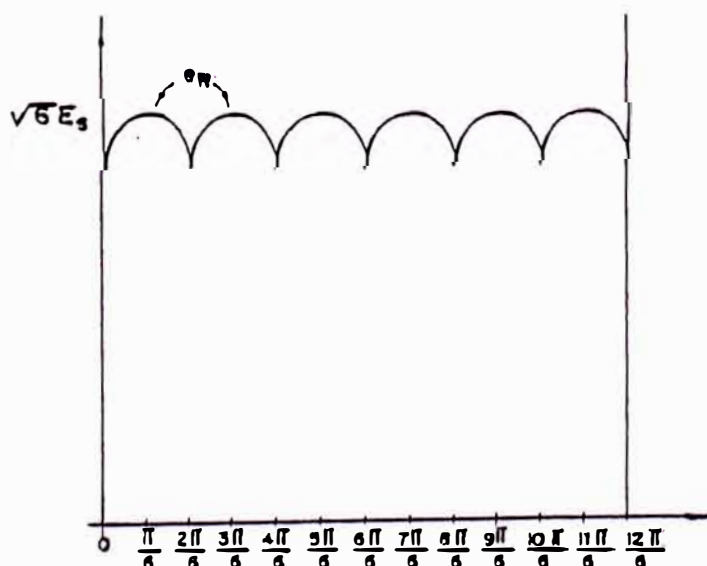


Fig. 4.3 Forma de onda de la tensión rectificadada

Haciendo el desarrollo por la serie de Fourier y considerando sólo los sextos armónicos:

$$e_{\pi} = \frac{3}{\pi} (\sqrt{6} E_s) + \frac{6(\sqrt{6} E_s)}{35\pi} \cos 6 \omega t + \frac{6(\sqrt{6} E_s)}{143\pi} \cos 12 \omega t \quad (4.6)$$

$$e_{\pi} = V_{cc} + A \cos 6 \omega t + B \cos 12 \omega t$$

$$V_{cc} = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} E_s \quad (4.7)$$

Donde:  $V_{cc}$  = Voltaje rectificado continuo

Obtenemos una componente continua y una componente alterna. La amplitud del primer término alterno de la serie es el 5.71% de la componente continua y el segundo término alterno representa el 1.4%.

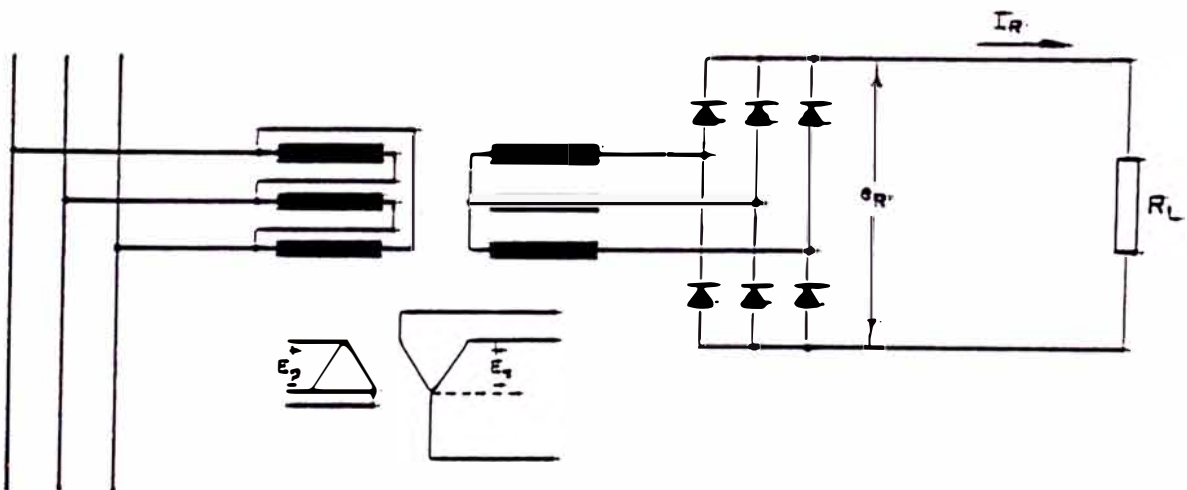


Fig. 4.4 Circuito equivalente del rectificador

#### 4.2 Cálculo de la corriente continua del rectificador

Haciendo un balance de energía eléctrica:

$$P_{ca} = (1.05) P_{cc} \quad (4.8)$$

$$3 E_s I_s = (1.05) V_{cc} I_{cc}$$

$$3 E_s I_s = (1.05) \left( \frac{3}{\pi} \sqrt{6} E_s \right) I_{cc}$$

$$I_s = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{cc} = 0.816 I_{cc} \quad (4.9)$$

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_s = 1.22 I_s \quad (4.10)$$

La corriente máxima del rectificador será:

$$I_{ccmax} = 1.22 I_{smax} = 1.22 \times 245.6 = 300 \text{ Amp} \quad (4.11)$$

#### 4.3 Especificaciones técnicas de los diodos rectificadores

Refiriéndonos al manual de semiconductores:

- Corriente de pico repetitiva por diodo

$$I_{pD} = 1.05 I_{cc} = 1.05 (300) = 315 \text{ Amp.}$$

- Corriente promedio por diodo

$$I_D = 0.33 I_{cc} = 100 \text{ Amp}$$

Es decir, en cada ciclo, el diodo dejará pasar una corriente promedio de 100 Amp. bajo la forma de un impulso de corriente de amplitud máxima instantánea de 315 Amp., de  $\pi/3$  de duración.

- Tensión inversa de Pico (PIV)

$$PIV = 1.045 V_{cc} = 1.045 \times \frac{3}{\pi} (\sqrt{6} E_{smax})$$

$$PIV = 1.045 \times \frac{3}{\pi} (\sqrt{6} \times 15.02) = 36.71 \text{ voltios.}$$

Elegimos del manual de Westinghouse, diodos con las siguientes características:

- Marca : Westinghouse
- Tipo : Diodo de silicio, R600/230
- Temperatura de trabajo: normales, 65°C a 190°C
- Corriente de pico repetitivo: 470 Amp.
- Corriente promedio: 300 Amp.
- Tensión inversa de pico (PIV): 400 voltios
- Frecuencia de funcionamiento: 60 ciclos
- Número de diodos: 6 diodos (2 diodos/fase)

#### 4.4 Características tensión-corriente de los diodos

Los diodos tienen una característica no lineal de tensión-corriente. Para polarización directa, la corriente es elevada y la resistencia que presenta el elemento semiconductor es muy pequeña.

Para polarización inversa, la corriente es muy pequeña (de unos nA a unos  $\mu$ A) y la resistencia que presenta es muy elevada.

Se necesita aplicar una tensión mínima de polarización directa para que el diodo comience a conducir. Esta tensión se conoce como tensión de umbral ( $V_{umbral}$ ).

El valor de I en función de V es:

$$I = I_m \left[ \exp \left( \frac{eV}{KT} \right) - 1 \right]$$

Donde:

I = Corriente de unión (amp)

$I_m$  = Corriente minoritaria (amp)

e = Carga del electrón =  $1.602 \times 10^{-19}$  coulomb

$V_{pm}$  = Diferencia de potencial aplicado (Voltios)

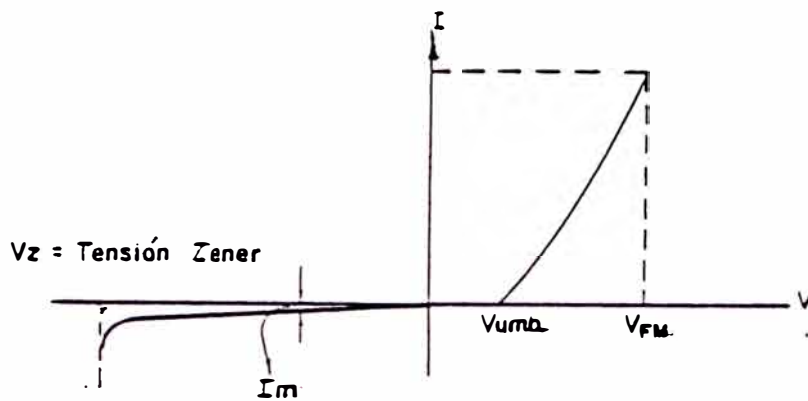


Fig. 4.5 Curva característica del diodo.

Cuando se trabaja con grandes señales (tensiones altas y grandes corrientes), la característica del diodo se vuelve casi lineal.

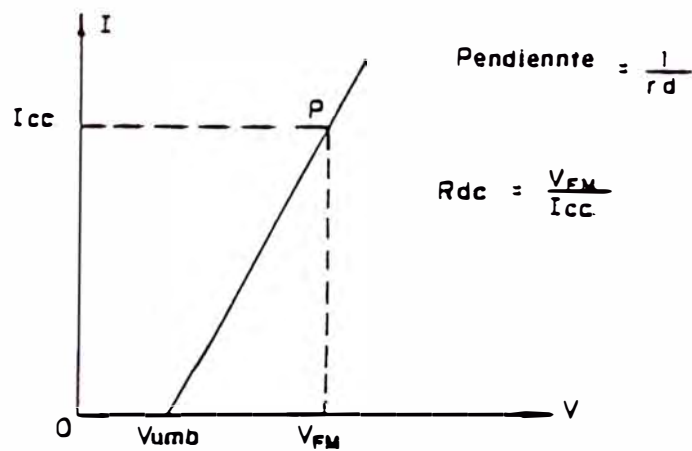


Fig. 4.6 Curva característica del diodo linealizada

El diodo se comporta como un circuito abierto si  $V_{FM} = V_{umb}$ . Cuando  $V_{FM} > V_{umb}$ , el diodo conduce y tiene una resistencia dinámica o incremental constante:  $r_d = dV_{FM} / dI$ . De las hojas del fabricante se observa que la tensión de umbral es aproximadamente:

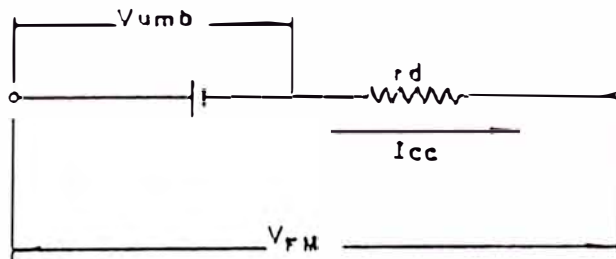


$$V_{umb} = 0.95 \text{ voltios} \quad (4.12)$$

La resistencia estática ( $R_{de}$ ) de un diodo se define como la relación  $V_{FM}/I_{cc}$ . La resistencia estática no es un parámetro útil, debido a que varía enormemente con  $V_{FM}$  e  $I_{cc}$ . Para cualquier punto P de la característica V-I del diodo,  $r_d$  es la inversa de la pendiente de la curva característica del diodo.

#### 4.5 Circuito equivalente del diodo

El diodo en conducción, se puede representar por un circuito equivalente compuesto por una fuente de tensión continua constante igual a la tensión de umbral en serie con la resistencia dinámica  $r_d$ .



Luego, la caída de tensión en el diodo, polarizado directamente será:

$$V_{FM} = V_{umb} + I_{cc} \cdot r_d \quad (4.13)$$

De las hojas del fabricante hallamos el valor de la resistencia dinámica.

$$V_{FM} = P_w / I_{cc}$$
$$r_d = \frac{V_{FM} - V_{umb}}{I_{cc}}$$

$I_{cc}$ (A)	$P_w$ (watts)	$V_{FM}$ (V)	$V_{FM}-V_{umb}$ (V)	$r_d$ ( $\Omega$ )
300	435	1.45	0.50	$1.66 \times 10^{-3}$
250	340	1.36	0.41	$1.64 \times 10^{-3}$
200	255	1.28	0.33	$1.63 \times 10^{-3}$
150	180	1.20	0.25	$1.66 \times 10^{-3}$
100	110	1.12	0.17	$1.70 \times 10^{-3}$
50	50	1.03	0.08	$1.66 \times 10^{-3}$

El valor de la resistencia dinámmica promedio será:

$$r_d = 1.66 \times 10^{-3} \Omega \quad (4.14)$$

Luego, para cualquier valor de corriente, la caída de tensión directa en el diodo será:

$$V_{FM} = 0.95 + 1.66 \times 10^{-3} I_{cc} \quad (4.15)$$

#### 4.6 Factor de rizado (r)

$$r = \frac{\text{Valor eficaz de las componentes alternas de la onda}}{\text{Valor medio de la onda}}$$

$$r = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}} A \cos 6 \omega t}{V_{cc}} = \frac{6 (\sqrt{6} E_s)}{\frac{3}{\pi} (\sqrt{6} E_s)} = \frac{\sqrt{2}}{35} = 0.04$$

$$r\% = 4 \%$$

Frecuencia del rizado:  $6 \times f = 6 \times 60 = 360$  ciclos/seg.

#### 4.7 Radiadores para la evacuación del calor de los diodos

Los diodos disipan durante su funcionamiento una potencia que se traduce en una elevación de la temperatura de la unión. Este aumento de temperatura hace que se incremente la corriente inversa. El aumento de la corriente inversa provoca un nuevo aumento de temperatura de la unión. El efecto es acumulativo y

si la potencia disipa inmediatamente hacia el exterior, la unión se destruye rápidamente. Entonces, es necesario evacuar el calor producido por la unión. Esto se logra añadiendo al diodo un refrigerador exterior de gran conductibilidad (cobre o aluminio).

Aplicando la ley de Ohm al circuito térmico de la figura 4.7:

$$T_J - T_A = P_C \times R_{\theta T}$$

$$T_J - T_A = P_C (R_{\theta JC} + R_{\theta CS} + R_{\theta SA})$$

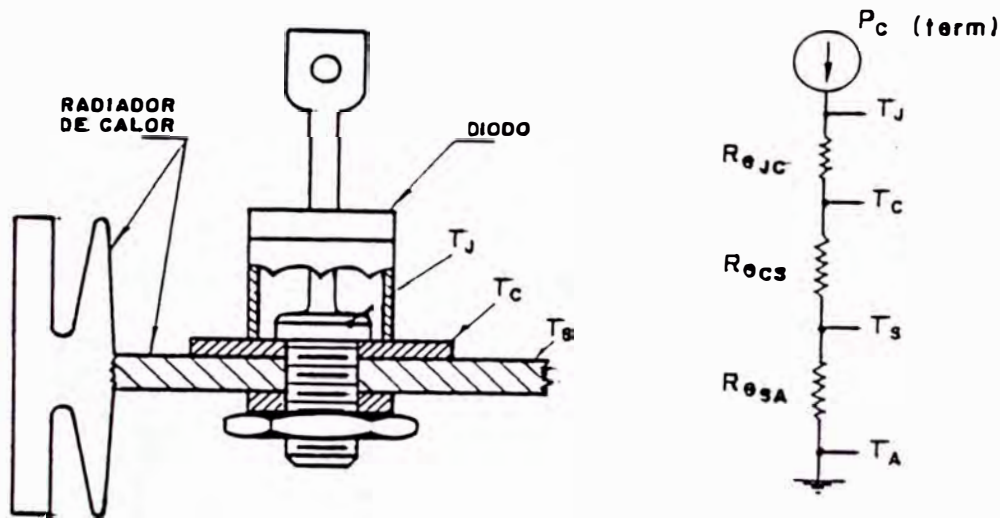


Fig. 4.7 Radiadores de calor.

Donde:

$T_{Jmax}$  = Temperatura máxima de la unión

$T_A$  = Temperatura en el ambiente exterior de disipación

$P_{Cmax}$  = Potencia máxima que puede disipar la unión

$R_{\theta T}$  = Resistencia térmica total

$R_{\theta JC}$  = Resistencia térmica entre la unión y la cápsula del elemento

$R_{\theta CS}$  = Resistencia térmica entre la cápsula y el radiador

$R_{\theta SA}$  = Resistencia térmica entre el radiador y el ambiente

La resistencia térmica del radiador será:

$$R_{\text{osa}} = \frac{T_{\text{Jmax}} - T_{\text{a}}}{P_{\text{cmax}}} = (R_{\text{JC}} + R_{\text{CS}})$$

Aplicando la ley de Ohm al circuito térmico de la figura:

$$T_{\text{J}} - T_{\text{a}} = P_{\text{c}} \times R_{\text{OT}}$$

$$T_{\text{J}} - T_{\text{a}} = P_{\text{c}} (R_{\text{eJC}} + R_{\text{eCS}} + R_{\text{osa}})$$

Donde:

$T_{\text{Jmax}}$  = Temperatura máxima de la unión

$T_{\text{a}}$  = Temperatura en el ambiente exterior de disipación

$P_{\text{cmax}}$  = Potencia máxima que puede disipar la unión

$R_{\text{OT}}$  = Resistencia térmica total

$R_{\text{eJC}}$  = Resistencia térmica entre la unión y la cápsula del elemento

$R_{\text{eCS}}$  = Resistencia térmica entre la cápsula y el radiador

$R_{\text{osa}}$  = Resistencia térmica entre el radiador y el ambiente

La resistencia térmica del radiador será:

$$R_{\text{osa}} = \frac{T_{\text{Jmax}} - T_{\text{a}}}{P_{\text{cmax}}} - (R_{\text{JC}} + R_{\text{CS}})$$

de la hoja de datos técnicos del fabricante tenemos:

$$T_{\text{Jmax}} = 170^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{a}} = 38^{\circ}\text{C}$$

$$P_{\text{cmax}} = 120 \text{ watts}$$

$$R_{\text{CS}} = 0.1^{\circ} \text{ c/w}$$

$$R_{\text{JC}} = 0.17^{\circ} \text{ c/w}$$

$$R_{\text{osa}} = \frac{170 - 38}{120} - (0.17 + 0.1) = 0.83^{\circ} \text{ c/w}$$

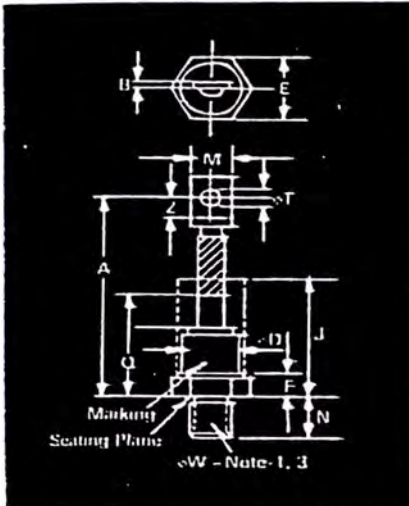
El radiador debe tener una resistencia térmica menor que  $0.8^{\circ}$  c/w.

Elegimos el disipador K 0.55 SEMIKRON, que tiene una resistencia térmica de  $R_{\text{case}} = 0.6^{\circ}$  c/w, cuyas dimensiones se muestran en la hoja de datos adjunta. Necesitamos seis (6) disipadores de calor, uno para cada diodo rectificador.



# General Purpose RECTIFIER R610/R611 And R600/R601

200 — 300 A Avg.  
Up to 3000 Volts



Conforms to DO-9 Outline

### Applications

- Welders
- Battery Chargers
- Electrochemical Refining
- Metal Reduction
- General Industrial High Current Rectification

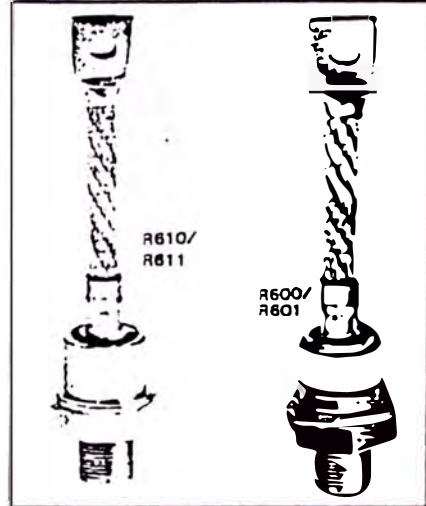
Symbol	Inches		Millimeters	
	Min.	Max.	Min.	Max.
A	5.32	8.00	135.13	152.40
B	.063	.172	1.60	4.37
•O	.980	1.065	24.89	27.05
E	1.212	1.250	30.78	31.75
F	.250	.930	6.35	16.00
J	3.250		82.55	
M	.530	.755	13.48	19.18
N	.580	.749	16.78	19.02
Q		2.250		57.15
•T	.330	.350	8.28	8.89
Z	.440		11.18	
•W	%-.16 UNF-2A			

Creep & Sink Distance:  
R600, R601 — 49 in. min. (12.52 mm).  
R610, R611 — 13 in. min. (3.43 mm).  
(In accordance with NEMA standards.)

- Finish—Nickel Plate.  
Approx. Weight—3 oz. (228g)  
R600—Standard Polarity—White Ceramic  
R601—Reverse Polarity—Pink Ceramic  
R610—Standard Polarity—Grey Glass  
R611—Reverse Polarity—Yellow Glass
1. Complete threads to extend to within 2/4 threads of seating plane.
  2. Angular orientation of terminal is undefined.
  3. Pitch diameter of %-.16 UNF-2A (coated) threads (ASA B1.1-1960).
  4. Dimension "J" denotes seated height with lead bent at right angle.

### Features

- Standard and Reverse Polarities
- Flag Lead and Stud Top Terminals Available
- High Surge Current Ratings
- High Rated Blocking Voltages
- Special Electrical Selection for Parallel and Series Operation



- Glazed Ceramic Seal Gives High Voltage Creepage and Strike Paths
- Compression Bonded Encapsulation
- JAN Types Available
- Lifetime Guarantee

### Ordering Information

Type	Voltage		Current		Recovery Time		Recovery Time Circuit		Leads	
	Code	V <sub>RRM</sub> (V)	Code	I <sub>F(AV)</sub> (A)	Code	t <sub>rr</sub> (μsec)	Code	Circuit	Code	Case
R610 (Standard Polarity)		100	01	200	20	13	X	JEDEC	Y	DO-9
		200	02							
		400	04	250	25	11				
R611 (Reverse Polarity)		800	08	300	30	9 (typical)	X	Y	A	
		300	08							
		1000	10							
R600 (Standard Polarity)		1200	12							
		1400	14							
		1600	16							
R601 (Reverse Polarity)		1800	18							
		2000	20							
		2200	22							
		2400	24							
		2600	26							
		2800	28							
		3000	30							

### Example

Obtain optimum device performance for your application by selecting proper Order Code.

Type R610 rated at 250A average with V<sub>RRM</sub> = 300V, and standard flexible lead — order as:

Type	Voltage	Current	Time	Circuit	Leads
R 6 1 0	0 0	3 2	5	X	X Y A

### Example

Obtain optimum device performance for your application by selecting proper Order Code.

Type R600 rated at 300A average with V<sub>RRM</sub> = 1200 V, and standard flexible lead — order as:

Type	Voltage	Current	t <sub>rr</sub>	Circuit	Leads
R 6 0 0	0 1	2 3	0	X	X Y A

RECTIFIER

200 — 300 A Avg.  
Up to 3000 Volts

General Purpose  
**RECTIFIER**  
R610/R611 And R600/R601



**Voltage**

Blocking State Maximums <sup>Ⓞ</sup> Symbol

Repetitive peak reverse voltage, V ..... VRRM  
Non-repetitive transient peak reverse voltage,  
V ≤ 5.0 msec ..... VRSM

100	200	400	600	300	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000
200	300	500	700	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	2800	3000	3200
← R600__20				← R600__25				← R600__30				← R610 (All types)			

Min., Max. oper. junction temp., °C ..... T<sub>J</sub>  
Min., Max. storage temp., °C ..... T<sub>stg</sub>

← -65 to 190				← -65 to 175				← -65 to 150			
← -65 to 190				← -65 to 190				← -65 to 190			

Typical Reverse Recovery Time  
IFM = 785A, t<sub>p</sub> = 100µs  
diR/dt = 25A/µs, T<sub>C</sub> = 25°C, µs ..... trr  
Reverse leakage current, mA peak ..... IRRM

3				11				13							
← 50															

**Current**

Conducting State Maximums Symbol

R600__20	R600__25	R600__30
R610__20	R610__25	R610__30
R601__20	R601__25	R601__30
R611__20	R611__25	R611__30

RMS forward current, A ..... I<sub>F(RMS)</sub>  
Ave. forward current, A ..... I<sub>F(AV)</sub>  
One-half cycle surge current<sup>Ⓞ</sup>, A ..... I<sub>FSM</sub>  
1 cycle surge current<sup>Ⓞ</sup>, A ..... I<sub>FSM</sub>  
10 cycle surge current<sup>Ⓞ</sup>, A ..... I<sub>FSM</sub>  
I<sup>2</sup>t for fusing (for times > 3.3 ms)  
A<sup>2</sup> sec. .... I<sup>2</sup>t  
Forward voltage drop at IFM =  
300 A and T<sub>J</sub> = 25°C, V ..... V<sub>FM</sub>  
Forward voltage drop at rated single  
phase average current and  
case temperature, V ..... V<sub>FM</sub>

315	400	470
200	250	300
3500	5000	3500
4300	4700	5050
3300	3500	3300
125,000	150,000	175,000
1.7	1.5	1.4
1.45	1.45	1.45

**Thermal and Mechanical**

Symbol

Max. mounting torque, in lb. <sup>Ⓞ</sup> ..... 360  
Thermal resistance <sup>Ⓞ</sup>  
Case to sink, lubricated, °C/Watt ..... R<sub>θCS</sub>

360
.10

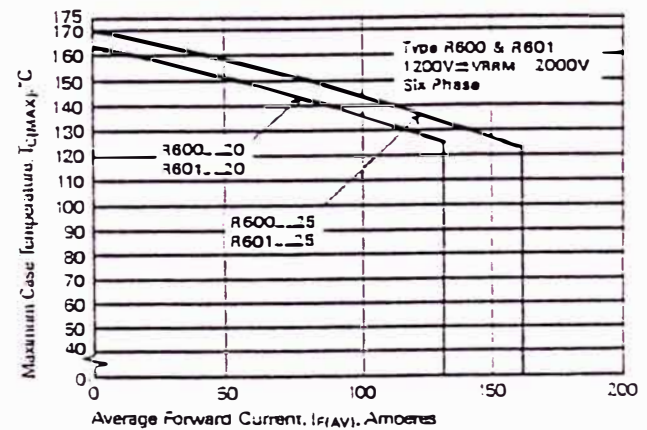
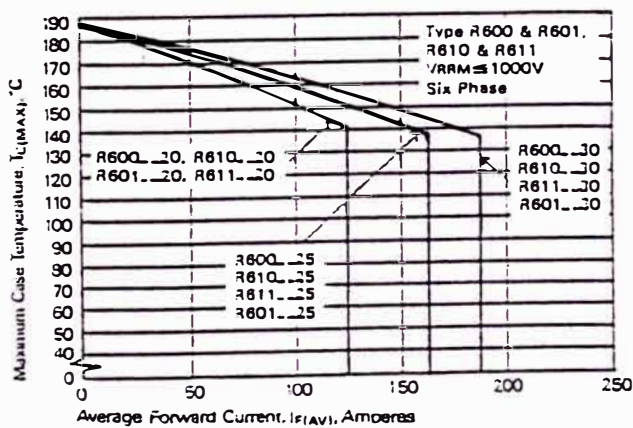
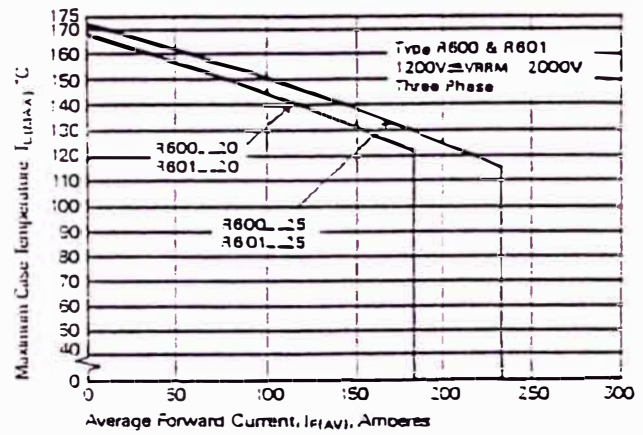
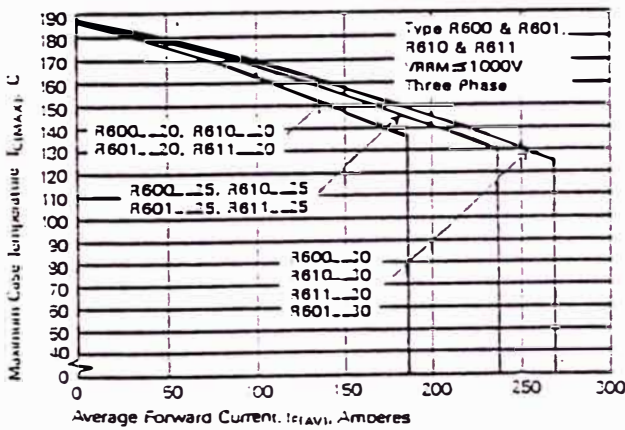
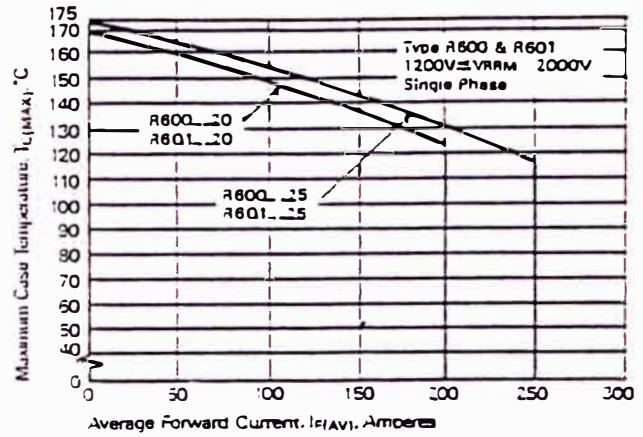
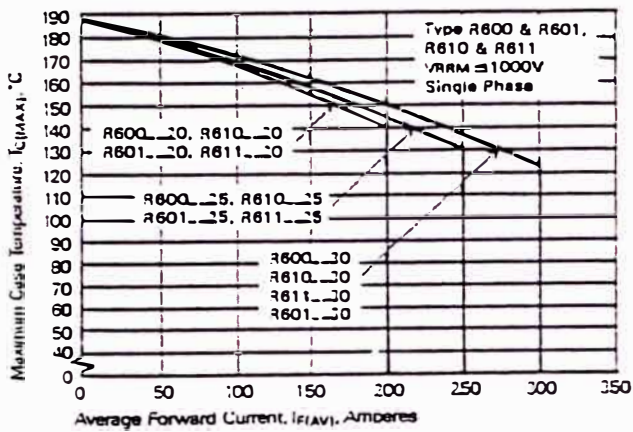
<sup>Ⓞ</sup> At maximum T<sub>J</sub>  
<sup>Ⓞ</sup> Per JEDEC RS-282, 4-01 F.3.  
<sup>Ⓞ</sup> Consult recommended mounting procedures.

RECTIFIER



# General Purpose RECTIFIER R610/R611 And R600/R601

200 — 300 A Avg.  
Up to 3000 Volts

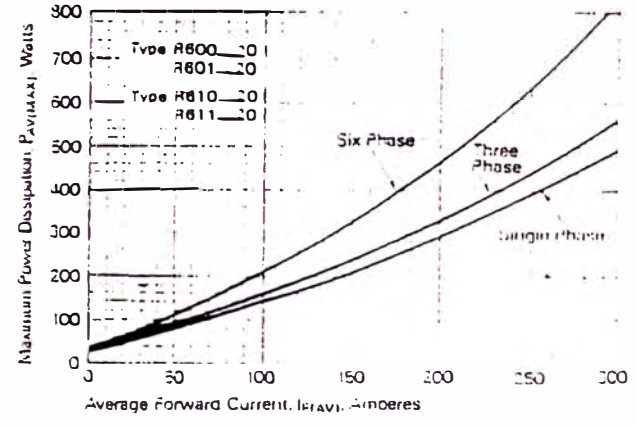
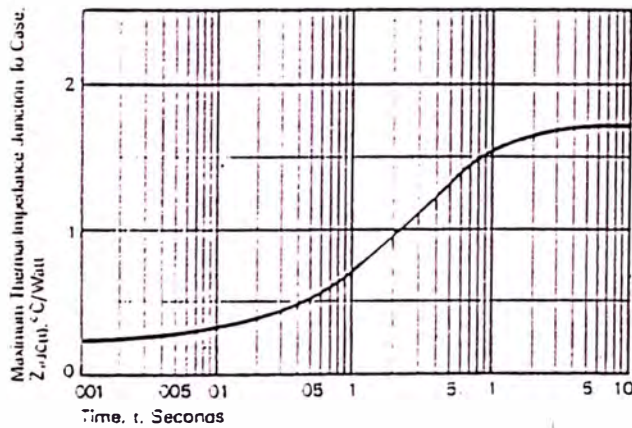
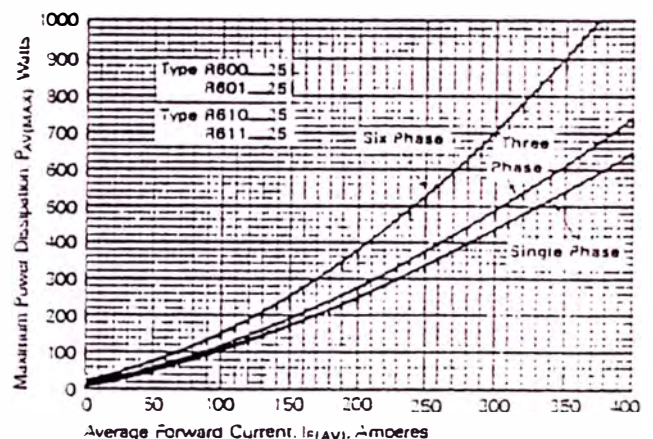
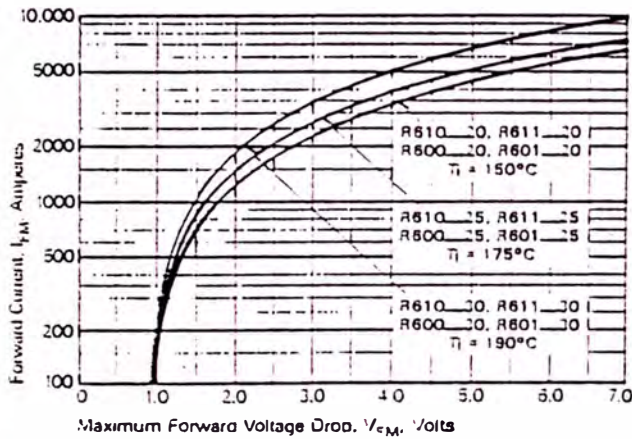
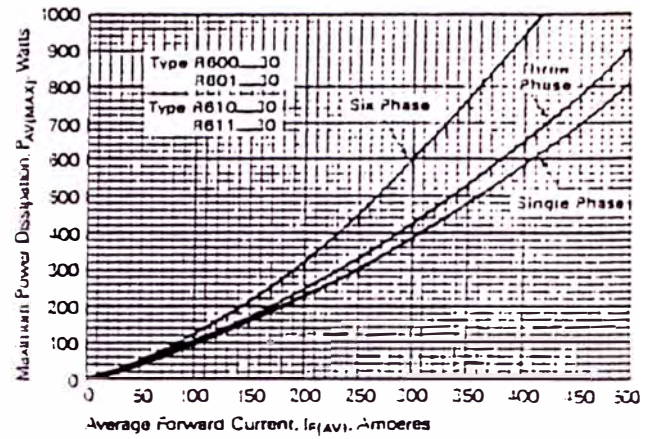
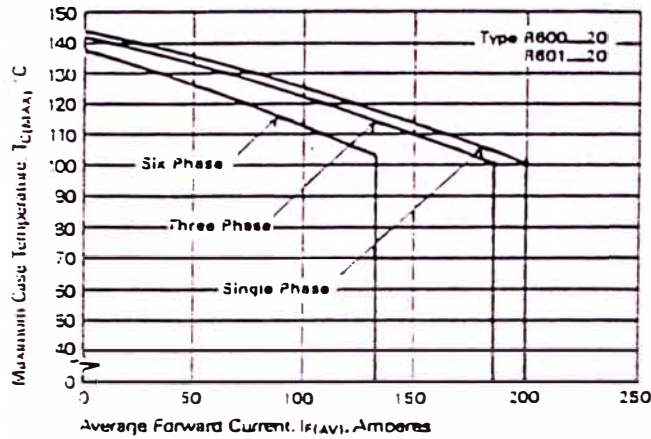


RECTIFIER



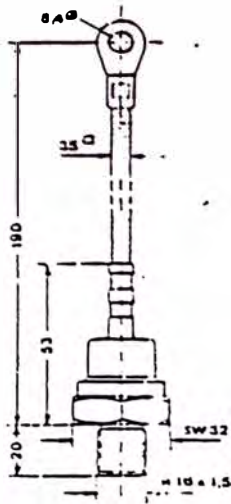
200 — 300 A Avg.  
Up to 3000 Volts

# General Purpose RECTIFIER R610/R611 And R600/R601

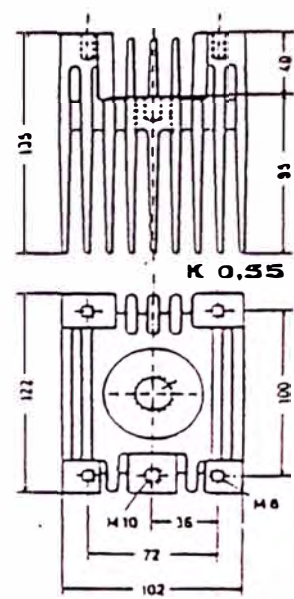
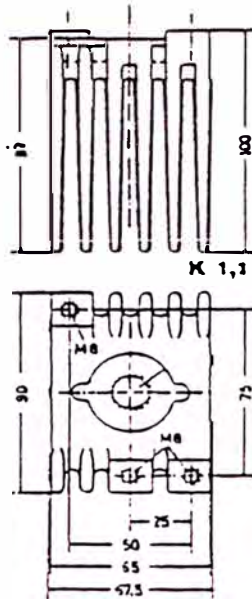


RECTIFIER

**Outline Drawing:** All dimensions in mm



**SKN 240**  
**SKR 240**



Weight (without heatsink)	appr.	0.25 kgm
Maximum mounting torque	appr.	3 m·kgm
Acceleration limit at 50 Hz vibration frequency	appr.	10 g

Standard heatsink	K 1,1	K 0,55
Heatsink weight	0.7	2 kgm
Thermal resistance of the heatsink with natural convection cooling $R_{(th) CA}$	1.2	0.6 °C/W
Thermal resistance of the heatsink with forced air cooling, (6 m/s) $R_{(th) CA}$	0.6	0.2 °C/W

**Protection:**

Against high voltage transients  
a condenser  $C = 1 \mu F$  or  
selenium transient voltage suppressors "SEMITRANS" are recommended. See special data sheet No. A 562 E.

For series connection  
a 6 kOhm 60 W parallel resistor is necessary.

Against short circuits  
a fast speed 200 A (max.) fuse is recommended.

Subject to change without prior notice

SEMITECH S.p.A.  
Via ...  
1002 - TORINO - ARGENTINA

**SEMIKRON**

Gesellschaft für Gleichrichterbau und Elektronik m. b. H.  
85 Nürnberg, Wiesentalstr. 40, Germany Tel. 0911/37781, Telex 06/22155

# Characteristics

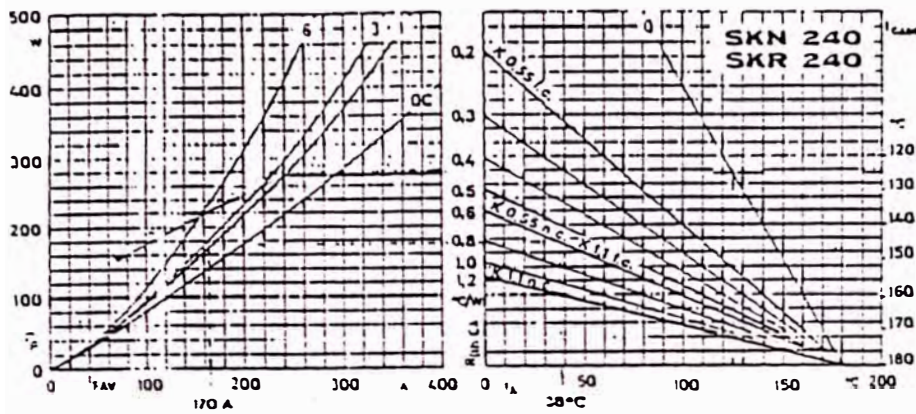


Fig. 1 Absolute maximum ratings for current, temperature and power loss

Example: Ambient temperature is about 38 °C. With standard heatsink K 0.55 n.c. maximum mean forward current is about 170 A in a single phase circuit (180° angle). Recommended current depends on overload conditions.

Power dissipation and case temperature versus maximum mean forward current ( $I_{AV}$ ), and maximum mean forward current versus ambient temperature ( $T_A$ ) and thermal resistance ( $R_{\theta JC}$ ) of different heatsinks. The shaded line shows the power limit.

- DC ... direct current
- 1 ... single phase circuit
- 3 ... three phase circuit
- 6 ... six phase circuit
- K 0.55 n.c. normal cooling
- K 0.55 f.c. forced air cooling (6 m/s)
- K 1.1 n.c. normal cooling
- K 1.1 f.c. forced air cooling (6 m/s)

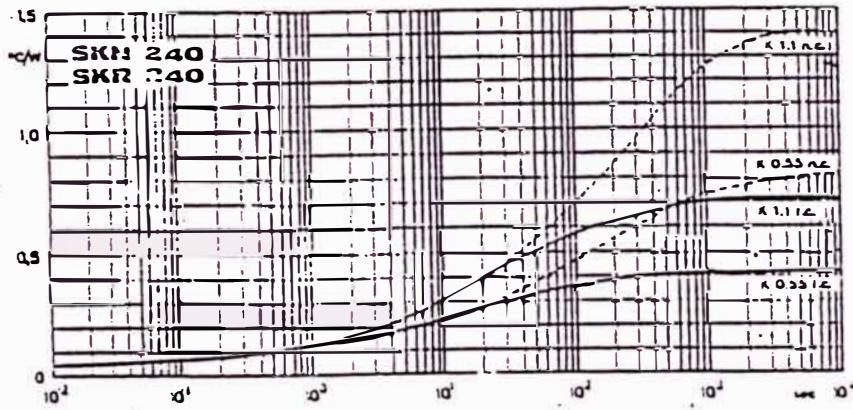


Fig. 2 Transient thermal impedance  $Z_{\theta JC}$

of diode and heatsink

- K 0.55 n.c. natural cooling
- K 0.55 f.c. forced air cooling (6 m/s)
- K 1.1 n.c. natural cooling
- K 1.1 f.c. forced air cooling (6 m/s)

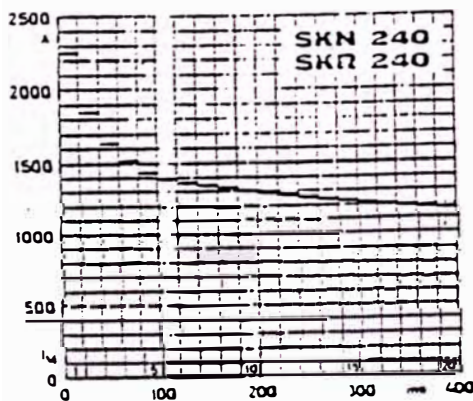


Fig. 3 Rated overload characteristic

1-20 cycles overload peak current rating for 180° sinusoidal pulses (50 Hz) at 125 °C junction temperature (recommended current). Under these conditions the diode still blocks 80% of  $V_{RRM}$  (60 Hz 1-24 cycles).

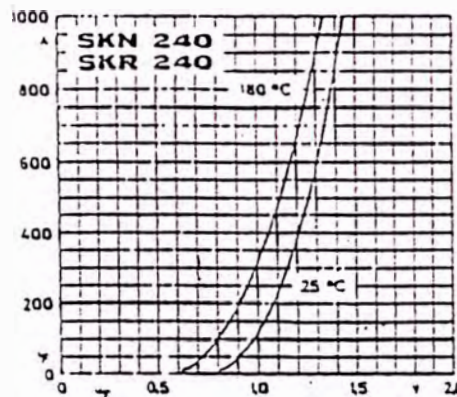


Fig. 4 Forward characteristic

Forward voltage drop at two different junction temperatures.

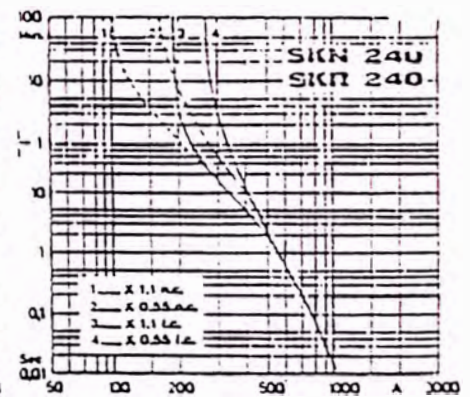


Fig. 5 Maximum current characteristic

Max. mean forward current characteristic at 45 °C ambient temperature and sinusoidal waveform (180° angle). With the given values junction temperature will reach its maximum.

CAPITULO V  
FILTRO DE POTENCIA LR

5.1 Filtro por inductancia

Si al rectificador de la figura 4.2 le agregamos un filtro por inductancia en serie con la carga, tendremos el siguiente circuito:

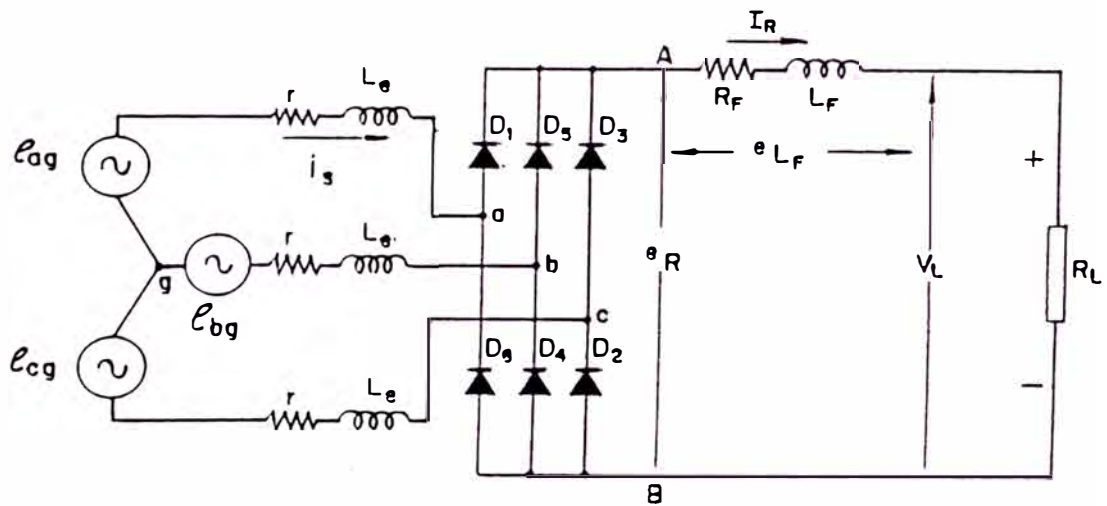


Fig. 5.1 Rectificador con filtro por inductancia " $L_F$ "

- $e_{ag}, e_{bg}, e_{cg}$  = tensión instantánea de fase del transformador
- $i_s$  = corriente instantánea de fase del transformador
- $r$  = resistencia de los devanados del transformador
- $L_e$  = inductancia de los devanados del transformador
- $e_R$  = tensión rectificadora
- $e_{L_F}$  = tensión en el filtro de inductancia
- $V_L$  = tensión continua en la carga
- $R_L$  = resistencia de carga

- $R_r$  = resistencia de los devanados del filtro inductivo
- $L_r$  = inductancia en los devanados del filtro inductivo
- $r_d$  = resistencia dinámica de los diodos
- $V_{umo}$  = tensión umbral de los diodos
- $E_s$  = tensión de fase del transformador
- $I_s$  = corriente de fase del transformador

$$e_r = V_L + e_{Lr} \quad (5.1)$$

$$e_{Lr} = - \frac{d\phi}{dt} = - L_r \frac{di}{dt} \quad (5.2)$$

$$e_r = V_{cc} + A \cos 6\omega t + B \cos 12\omega t$$

$$e_r = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} E_s + \frac{6\sqrt{6}}{35\pi} \cos 6\omega t + \frac{6\sqrt{6}}{143\pi} \cos 12\omega t$$

Considerando el voltaje de pérdidas en los devanados del transformador, de la inductancia y la caída de tensión en los diodos de potencia, tendremos:

$$e_r = V_{cc} - \Delta V_{perra} + A \cos 6\omega t + B \cos 12\omega t - L_r \frac{di}{dt} \quad (5.3)$$

El filtro por inductancia elimina las componentes de corriente alterna, luego debe cumplirse:

$$A \cos 6\omega t + B \cos 12\omega t - L_r \frac{di}{dt} \approx 0 \quad (5.4)$$

$$\text{Luego: } e_r \approx V_{cc} - \Delta V_{perra} = V_L \quad (5.5)$$

$$V_{cc} = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} E_s \quad (5.6)$$

$$I_{cc} = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_s \quad (5.7)$$

La corriente de salida del rectificador tiene una componente continua ( $I_{cc}$ ) y una componente alterna ( $i_{ca}$ )

$$i_R = I_{cc} + i_{ca} \quad (5.8)$$

$$I_{cc} = \frac{V_{cc}}{R_L} = \frac{3 \sqrt{6} E_s}{\pi R_L} \quad (5.9)$$

$$i_{ca} = \sqrt{2} I'_{or} \cos 6\omega t$$

$$I'_{or} = \frac{V'_{or}}{x_r} = \frac{6\sqrt{6} E_s}{\sqrt{2} \times 35 \pi x_r}$$

$$x_r = 2\pi \times 6f \times L_r = 6\omega L_r$$

$$i_{ca} = \frac{6\sqrt{6} E_s}{35\pi \times 6\omega L_r} \cos 6\omega t \quad (5.10)$$

Se ha considerado sólo el primer término de la componente alterna.

## 5.2 Inductancia crítica ( $L_{cr1e}$ )

Para obtener una buena regulación de la tensión, la corriente de carga ( $I_{cc}$ ) debe circular por el circuito en todo instante por lo que debe cumplirse que  $I_{cc} > 0$ . El instante en el que la corriente vale cero se denomina "punto de corte", es decir el punto donde los diodos dejan de conducir.

Si no existiera la inductancia, la corriente circularía por el circuito de cada par de diodos, sólo una pequeña parte del ciclo, ocurriendo después el corte.

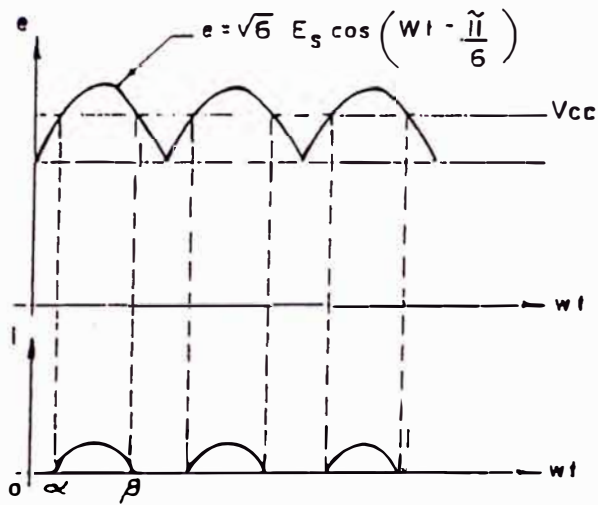


Fig. 5.2 Circuito sin inductancia.

Si se conecta una inductancia pequeña el tiempo que circula la corriente es algo mayor, pero aún puede ocurrirle corte.

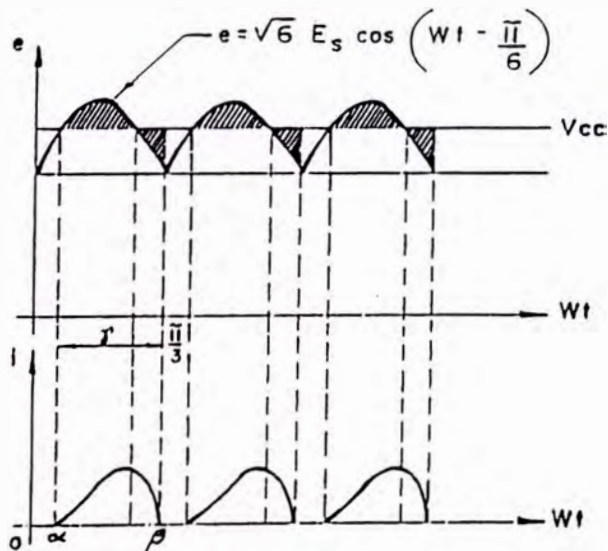


Fig. 5.3 Circuito con inductancia pequeña.

Conforme aumenta el valor de la inductancia, se llegará a un valor para el cual el circuito suministre en forma permanente corriente a la carga, desapareciendo el punto de corte.

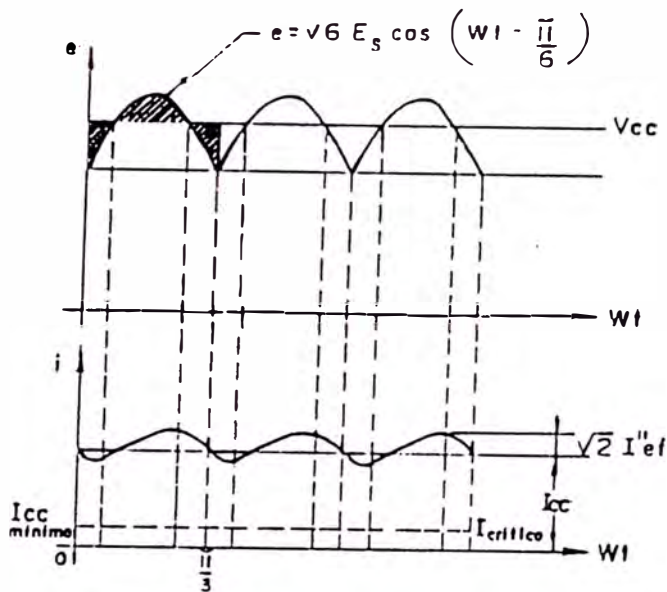


Fig. 5.4 Circuito con inductancia apropiada.

A este valor mínimo de inductancia se le conoce como inductancia crítica ( $L_{crít}$ ). Para que la corriente circule sobre la carga "R<sub>L</sub>", sin cortes durante todo el ciclo, la componente alterna no deberá ser mayor que la componente continua de la corriente.

$$I_{cc} > \sqrt{2} I'_{ef}$$

En el límite, la corriente continua crítica ( $I_{crít}$ ) será:

$$I_{crít} = \sqrt{2} I'_{ef}$$

$$I_{crít} = \frac{6 \sqrt{6} E_s}{35\pi \times 60 \times L_{crít}}$$



$$L_{crse} = \frac{6 \sqrt{6} E_s}{35\pi \times 60 \times I_{crse}}$$

$$I_{cc} = \frac{V_{cc}}{R_L} = \frac{3\sqrt{6} E_s}{\pi R_L}$$

$$I_{crse} = \frac{3\sqrt{6} E_s}{\pi R_L}$$

Entonces:

$$L_{crse} = \frac{R_L}{3 \times 35 \times \pi} = \frac{R_L}{3.9585 \times 10^4} \quad (5.11)$$

### 5.3 Resistencia de drenaje ( $R_D$ )

No sería posible satisfacer las condiciones de funcionamiento, con buena regulación para todos los valores de corriente de carga. Esto exigiría que para una corriente de carga nula ( $I_{cc}=0$ ), la resistencia de carga debería ser infinita ( $R_L=\infty$ ) y por lo tanto la inductancia también debería ser infinita. Para evitar esto, se conecta en paralelo con " $R_L$ " una resistencia de drenaje " $R_D$ ".

Con esta resistencia se evita que la tensión de salida ( $V_{ce}$ ) alcance el valor pico de la tensión aplicada ( $V_{cc}$ ) en ausencia de la carga, manteniendo así una buena regulación de la tensión.

Para no interferir con el funcionamiento del circuito, " $R_D$ " no debe desviar una cantidad importante de la corriente continua de la carga " $R_L$ ". Como la carga " $R_L$ " que representa al arco de soldadura es muy pequeña (se aproxima a un cortocircuito  $R_L \approx 0.15\Omega$ ), la carga resultante  $R_D \parallel R_L$  será del orden de magnitud " $R_L$ ".

Cuando la máquina está sin carga, "R<sub>D</sub>" debe disipar la mínima cantidad de potencia por Calor Joule.

$$R_D \gg R_L$$

luego:

$$R_D = 3.9585 \times 10^4 \times L_{crit} \quad (5.12)$$

#### 5.4 Regulación de la tensión

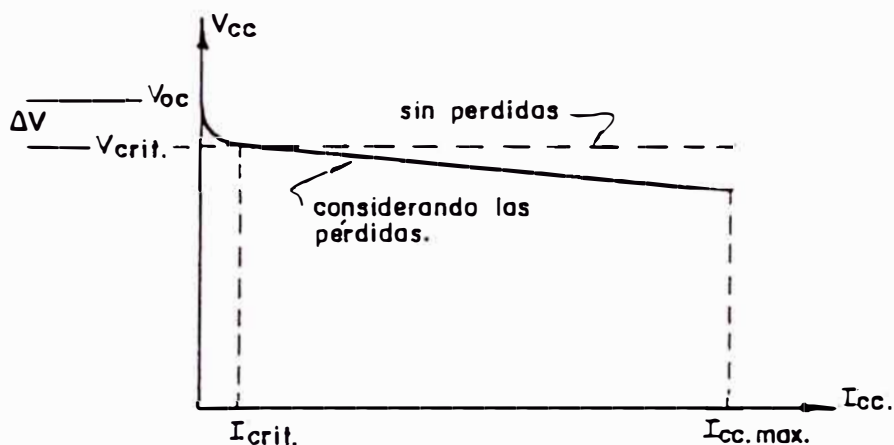


Fig. 5.5 Curva de regulación del rectificador 3ϕ de onda completa con filtro de inductancia "L"

$$V_L = (V_{cc} + \frac{6\sqrt{6}}{35\pi} E_s \cos\phi) - \Delta V_{pérd} - e_{LR} \quad (5.13)$$

El voltaje de pérdidas en el transformador es:

$$\Delta V_{transform} = \sqrt{3} (i_s r + L_e \frac{di}{dt})$$

también  $i_s = \sqrt{2} I_s$

$$\Delta V_{transform} = \sqrt{3} (\sqrt{2} I_s r + j\sqrt{2} I_s \times 2\pi f L_e) = \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} I_s (2r + j2X_e)$$

$$\Delta V_{transform} = I_{cc} (2r + j2X_e) \quad (5.14)$$

El voltaje de pérdidas en los diodos es:

$$\Delta V_{diodos} = I_{cc} \times 2r_d + 2V_{umb} \quad (5.15)$$

Esto es considerando que la corriente rectificada cierra el circuito a través de dos diodos.

El voltaje en el filtro por inductancia es:

$$e_{Lr} = R_r I_{cc} + L_r \frac{di_{ca}}{dt} \quad (5.16)$$

El voltaje de pérdidas totales será:

$$\Delta V_{pérd} = I_{cc} (2r + j2X_e + 2r + R_r) + 2 V_{umo} \quad (5.17)$$

si reemplazamos:

$$R = 2r + 2r_d + R_r \quad (5.18)$$

entonces:

$$V_L = V_{cc} - I_{cc} R - jI_{cc} (2X_e) - 2 V_{umo} + \frac{6\sqrt{6}}{35\pi} E_s \cos 60t - L_r \frac{di_{ca}}{dt}$$

considerando la acción del filtro por inductancia

$$\frac{6\sqrt{6}}{35\pi} E_s \cos 60t - L_r \frac{di_{ca}}{dt} \approx 0 \quad (5.19)$$

$$V_L = V_{cc} - I_{cc} R - jI_{cc} (2X_e) - 2 V_{umo} \quad (5.20)$$

Además la tensión de arco según norma VDE 0542 es:

$$V_{arc} = 14 + 0.05 I_{cc} \quad (5.21)$$

En el punto de operación de la máquina (ver fig. 5.5)

$$V_L = V_{arc}$$

Reemplazando valores para una corriente de soldadura de

$I_{cc} = 300$  Amp., toma N°9 escala II:

$$\text{relación de transformación: } n = \frac{217}{14} = 15.5$$

$$V_L = V_{arc} = 14 + 0.05(300) = 29 \text{ volts}$$

$$r = \frac{R_o}{n^2} + R_e = \frac{0.2517}{(15.5)^2} + 0.00074 = 0.001788 \Omega$$

$$X_e = \frac{x_o}{n^2} + x_e = \frac{0.21103}{(15.5)^2} + 0.0004304 = j0.001309 \Omega$$

$$r_o = 0.001667 \Omega$$

$$V_{umo} = 0.95 \text{ volts,}$$

$$R_e = 0.000759 \Omega$$

$$R = 0.007700 \Omega$$

reemplazando valores:

$$V_L = V_{cc} - 2V_{umo} - I_{cc}(R + j2X_e)$$

$$Z_o = R + j2X_e = 0.0077 + j 0.002618$$

$$Z_o = 0.008162 \angle 18.7^\circ$$

de la ec 3.34:  $I_{cc} = 300.9 \angle -1.48^\circ$

$$29 = \left[ \frac{3}{\pi} \sqrt{6} E_s - 2(0.95) \right] \angle 0^\circ - 300.9 \angle -1.48^\circ \times 0.008162 \angle 18.7^\circ$$

$$29 = \left( \frac{3}{\pi} \sqrt{6} E_s - 1.9 \right) \angle 0^\circ - 2.4559 \angle 17.3^\circ$$

$$29 = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} E_s - 1.9 - 2.3448 - j0.73$$

$$E_s = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} (29 + 1.9 + 2.3448 + j0.73)$$

$$E_s = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} (33.2448 + j0.73) = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} (33.25 \angle 1.25^\circ)$$

$$E_s = 14.21 \angle 1.25^\circ \text{ volts.} \quad (5.22)$$

O sea, para producir una corriente continua de soldadura de 300 amp. debemos tener una tensión de fase  $\bar{E}_a = 14.21 \angle 1.25^\circ$  en el secundario de transformador.

Asimismo, la corriente de fase del secundario del transformador será:

$$I_s = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} I_{cc} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} (300.9 \angle -1.48^\circ) = 245.68 \angle -1.48^\circ \quad (5.23)$$

Los valores reales de las corrientes y voltajes de fase del secundario del transformador serán:

$$\bar{E}_{saq} = 14.21 \angle 1.25^\circ, \quad \bar{I}_{saq} = 245.68 \angle -1.48^\circ$$

$$\bar{E}_{sbq} = 14.21 \angle 121.25^\circ, \quad \bar{I}_{sbq} = 245.68 \angle 118.52^\circ$$

$$\bar{E}_{scq} = 14.21 \angle -118.75^\circ, \quad \bar{I}_{scq} = 245.68 \angle -121.48^\circ$$

### 5.5 Cálculo de la inductancia óptima ( $L_f$ )

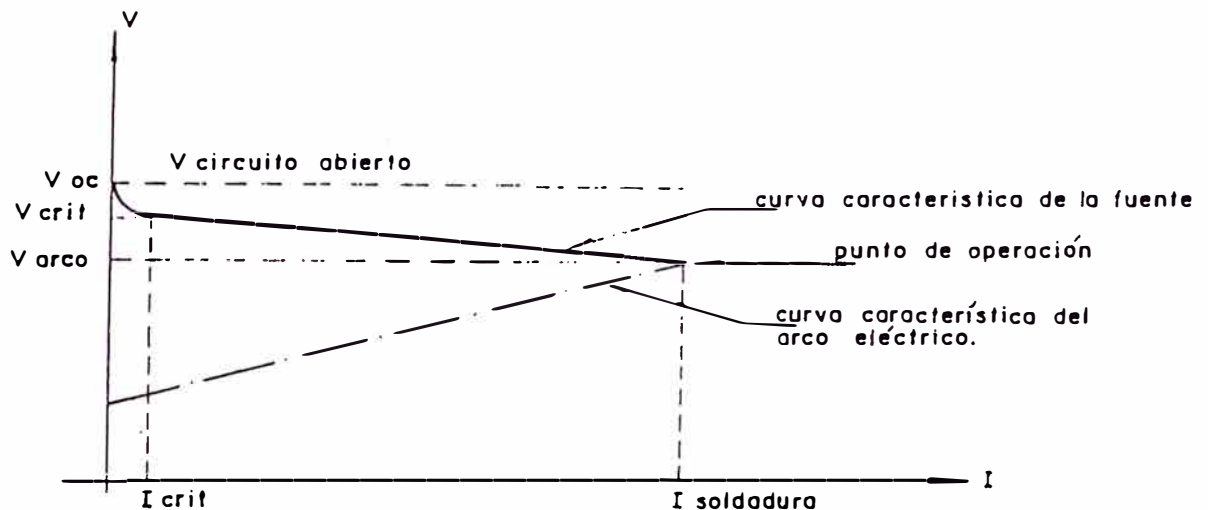


Fig. 5.5 Curva característica de voltaje de la fuente.

El voltaje de circuito abierto es:

$$V_{oc} = \sqrt{6} E_s$$

El voltaje crítico es:

$$V_{crít} = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} E_s$$

$$\Delta V = \sqrt{6} E_s - \frac{3}{\pi} \sqrt{6} E_s = 0.045 \sqrt{6} E_s$$

$$\Delta V = 4.5\% V_{cc}$$

La corriente de carga ( $I_{cc}$ ) no debe ser menor que la corriente crítica ( $I_{crít}$ ), para que no se produzca una elevación brusca de la tensión.

Generalmente, se ajustan los parámetros para que la corriente crítica varíe entre el 0.5% al 2% de la corriente a plena carga.

$$0.5\% I_{cc} \leq I_{crít} \leq 2\% I_{cc}$$

para  $I_{cc} = 300$  Amp.

$$1.5 \text{ Amp.} \leq I_{crít} \leq 6 \text{ Amp}$$

eligiendo un valor promedio tentativo

$$I_{crít} = 3.6 \text{ Amp} \tag{5.24}$$

$$I_{crít} = \sqrt{2} I'_{er} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \times \frac{6\sqrt{6} E_s}{35\pi \times 60 \times I_{crít}}$$

$$L_{crít} = \frac{6\sqrt{6} E_s}{35\pi \times 60 \times I_{crít}}$$

$$L_{crít} = \frac{6\sqrt{6} (14.21)}{35\pi \times 60 \times 3.6} = 0.2332 \times 10^{-3} \text{ Hr}$$

Al hacer este análisis se ha considerado sólo el primer término de la componente alterna.

$$e_R = \underbrace{\frac{3}{\pi} \sqrt{6} E_s}_{V_{cc}} + \underbrace{\frac{6\sqrt{6}}{35\pi} E_s \cos 6\omega t}_A + \underbrace{\frac{6\sqrt{6}}{143\pi} E_s \cos 12\omega t}_B$$

Si "A" representa la amplitud del primer término alterno y "B" la amplitud del segundo término, entonces se comete un error del 24.5% al despreciar "B" cuando se calcula la inductancia crítica. Luego en un diseño exigente se debe aumentar el valor de  $L_{crit}$  en un 25%.

$$L_{prop} = 1.25 L_{crit} = 1.25 \times 0.2332 \times 10^{-3}$$

$$L_p = 0.2915 \times 10^{-3} \quad (5.25)$$

La resistencia de drenaje será:

$$R_D = 3.9585 \times 10^4 \times L_p = 3.9585 \times 10^4 \times 0.2915 \times 10^{-3}$$

$$R_D = 11.5 \Omega$$

eligiendo un valor standard

$$R_D = 10 \Omega \quad (5.26)$$

### Valores adoptados

Haciendo un análisis similar al anterior

$I_{cc}$ Amp	Toma	$L_{prop}$ (Henrios)	$E_s$ (voltios)
300	N°9-Escala II	$0.2915 \times 10^{-3}$	14.19
150	N°4-Escala II	$0.5150 \times 10^{-3}$	10.73
60	N°9-Escala I	$1.21 \times 10^{-3}$	8.11

### 5.6 Factor de rizado (r%)

$$r = \frac{I'_{or}}{I_{cc}}$$

$$I'_{or} = \frac{6 \sqrt{6} E_s}{\sqrt{2} \times 35\pi X_L}$$

$$X_L = 2\pi \times 6 \times 60 \times 0.2915 \times 10^{-3} = 0.6593 \Omega$$

$$I'_{or} = \frac{6\sqrt{3} (14.21)}{35\pi(0.6593)} = 2.037 \text{ amp.}$$

$$r = \frac{2.037}{300} = 0.0068$$

$$r\% = 0.68\% \quad (5.27)$$

## 5.7 Diseño de la bobina de inductancia "L"

### 5.7.1 Cálculos justificativos

Característica no lineal de la inductancia de un núcleo de hierro

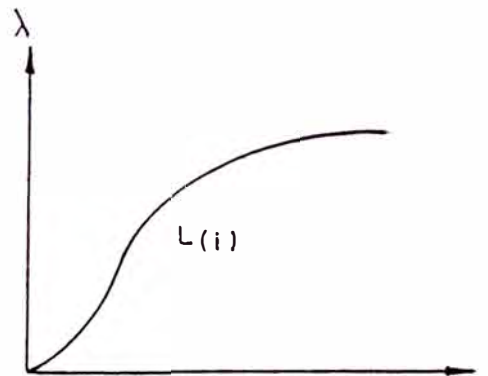


Fig. 5.6 Curva característica que define a la inductancia de un núcleo de hierro.

La pendiente de esta curva en cualquier punto es la inductancia "L(i)"

$$L = \frac{d \lambda}{d i}$$

$\lambda$  = acoplamiento inductivo

La figura 5.7 representa la curva de histéresis para el hierro. La curva de magnetización normal une los extremos de las curvas de histéresis y es una función uniforme que se aproxima a la verdadera relación  $\beta$ -H.



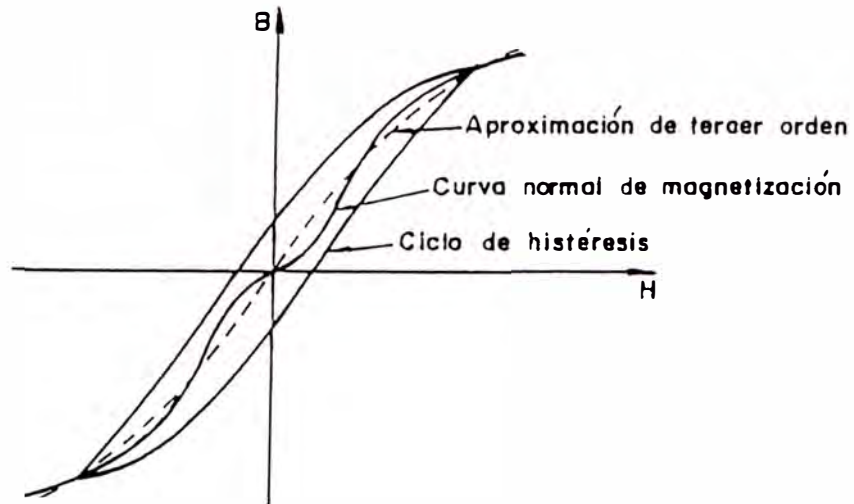


Fig. 5.7 Curva de magnetización normal y ciclo de histéresis para el núcleo de hierro. Se representa una aproximación de tercer orden, a la curva de magnetización.

$\beta$  = densidad de flujo magnético (weber/m<sup>2</sup>)

H = intensidad de flujo magnético

Cualquier curva de magnetización normal puede escribirse analíticamente en forma de una serie de potencias. Debido a la simetría del primer y tercer cuadrante, el desarrollo polinómico contiene sólo elementos impares.

$$H = a_1\beta + a_3\beta^3 = \frac{N \cdot i}{L_m}$$

$$\lambda = \sum_{K=1}^N \int_s \bar{\beta} \cdot \bar{ds} = N \cdot \beta \cdot A.$$

despejando "B" en función de "λ", tendremos:

$$i = b_1 \lambda + b_3 \lambda^3$$

donde:  $b_1 = \frac{L_m a_1}{N^2 A}$ ,  $b_3 = \frac{L_m a_3}{N^2 A^3}$

$L_m$  = longitud del núcleo de hierro

$A$  = área del núcleo de hierro

$N$  = número de vueltas

$$L = \frac{d\lambda}{di} = \frac{1}{b_1 + 3b_3 \lambda^2}$$

donde se observa la característica no lineal de la inductancia.

**Reducción de la característica no lineal mediante la inserción de un entrehierro**

Suponiendo que la permeabilidad del entrehierro es mucho mayor que la del aire y despreciando los campos en los bordes del entrehierro, tendremos:

Ley de Ampere:  $H_o g + H_e L_m = N \cdot i$

Si  $H_o \gg H_e$

$$H_o = \frac{N \cdot i}{g}$$

$$\beta = \mu_o H_o = \frac{\mu_o N i}{g}$$

Efectuando la integral de superficie de "β" sobre cada una de las "N" vueltas:

$$\lambda = \sum_{K=1}^N \int_s \beta \cdot ds = \frac{\mu_o N^2 A}{g} i$$

$$L = \frac{d\lambda}{di} = \frac{\mu_o N^2 A}{g} \tag{5.28}$$

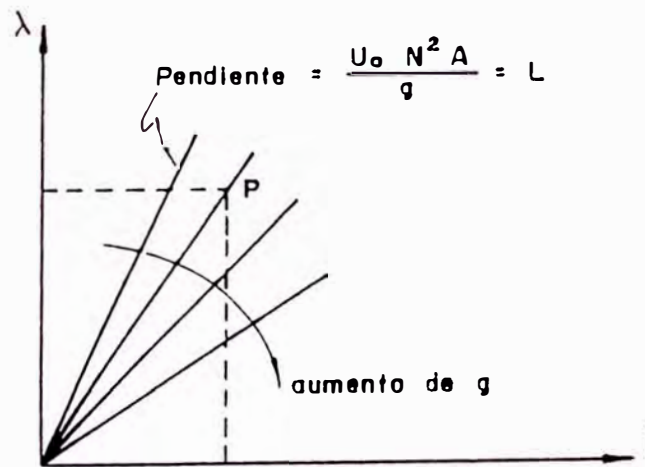


Fig. 5.8 Curva característica de la inductancia cuando se usa entrehierro.

Como se observa la curva característica de la inductancia se ha vuelto lineal.

La inserción de un entre hierro en el circuito magnético altera las características de la bobina de diversas maneras:

- Disminuye el coeficiente de autoinducción "L"
- Reduce los efectos de las características no lineales del núcleo.
- Hace que el coeficiente de autoinducción "L" se mantenga constante ante las variaciones de la densidad de flujo magnético " $\beta$ ".
- Origina una reducción de la distorsión por armónicas.
- Origina una variación del factor de calidad "Q"

#### Relación entre la longitud media del núcleo y el entrehierro

En el diseño de bobinas de núcleos de hierro que deban funcionar en un amplio dominio de densidades de flujo magnético, se debe determinar la longitud del entrehierro que hay que

insertar en el núcleo para reducir las variaciones del coeficiente de autoinducción (L), de manera que queden comprendidas dentro de tolerancias especificadas.

$$L = \frac{N^2}{R}$$

$$R = R_s + R_g = \frac{L_m}{\mu_s A_s} + \frac{g}{\mu_o A_o}$$

$$L = \frac{N^2}{\frac{L_m}{\mu_s A_s} + \frac{g}{\mu_o A_o}} \quad (5.29)$$

R = reluctancia total del circuito magnético

R<sub>s</sub> = reluctancia del hierro

R<sub>g</sub> = reluctancia del entrehierro

μ<sub>s</sub> = permeabilidad del acero

μ<sub>o</sub> = permeabilidad del aire

L<sub>m</sub> = longitud media del núcleo

g = longitud del entrehierro

A<sub>s</sub> = area del núcleo del hierro

A<sub>o</sub> = area del entrehierro

Cuando varía "β", también varía "L" a causa de las variaciones de "μ<sub>s</sub>". Para un determinado dominio de densidades de flujo "β", se conocen los valores máximo y mínimo de la permeabilidad.

La variación máxima de la inductancia "L" para este dominio será:

$$\Delta L = N^2 \left( \frac{1}{R_{\min}} - \frac{1}{R_{\max}} \right) = \left( \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\max} \cdot R_{\min}} \right) N^2$$

" $R_{max}$ " y " $R_{min}$ " son los valores máximo y mínimo de reluctancia del hierro. Si la mayor parte de la reluctancia corresponde al entrehierro:

$$R_{max} R_{min} \approx R_g^2$$

$$\Delta L \approx \frac{(R_{max} - R_{min}) N^2}{R_g^2}$$

una expresión aproximada de la inductancia es:

$$L \approx \frac{N^2}{R_g}$$

La variación máxima de "L" es:

$$\frac{\Delta L}{L} \approx \frac{R_{max} - R_{min}}{R_g}$$

$$\frac{\Delta L}{L} \approx \frac{L_m}{g} \frac{A_o}{A_s} \frac{u_o}{u_{smin}} \left(1 - \frac{u_{smin}}{u_{smax}}\right) \quad (5.30)$$

Si definimos " $\delta$ " como la tolerancia de la variación unitaria de la inductancia

$$\delta = \frac{\Delta L}{L}$$

la relación entre " $L_m$ " y " $g$ " será:

$$\frac{g}{L_m} = \frac{1}{\delta} \frac{A_o}{A_s} \frac{u_o}{u_{smin}} \left(1 - \frac{u_{smin}}{u_{smax}}\right) \quad (5.31)$$

Etapas del diseño:

- a. Elegir el dominio de densidades de flujo magnético " $\beta$ "
- b. Determinar " $u_{smin}$ " y " $u_{smax}$ " de la curva de magnetización.
- c. Estimar la razón entre las áreas " $A_o/A_s$ ", suponiendo un factor de apilamiento y una corrección por la dispersión.

d. Se condiciona el valor de la tolerancia específica "δ".

e. A partir de la ec. (5.31) se calcula el valor mínimo del cociente  $g/L_m$  necesario para satisfacer a "δ".

A partir de la curva de magnetización de acero-silicio KAWASAKI RM 14 elegimos:

$$\beta_{\text{promedio}} = 1.0 \text{ weber/m}^2$$

$$\beta_{\text{max}} = 1.2 \text{ weber/m}^2, u_{\text{Bmax}} = 10 \times 10^{-3}$$

$$\beta_{\text{min}} = 0.8 \text{ weber/m}^2, u_{\text{Bmin}} = 6 \times 10^{-3}$$

#### Relación entre áreas $A_o/A_e$

Elegimos una sección cuadrada del núcleo y asumimos un factor de apilamiento  $K = 0.94$

$$A_e = Ka^2 \quad (5.32)$$

El área del entrehierro ( $A_o$ ) considerando el "Flujo de dispersión" por efecto del aire y el "flujo de pérdidas", será:

$$A_o = \left[ a + 2 \left( \frac{g}{2} \right) \right]^2 = (a + g)^2 \quad (5.33)$$

$a$  = dimensión transversal de la cara del núcleo de hierro

$g/2$  = entrehierro entre caras paralelas

$g$  = entrehierro total del circuito magnético.

Esta corrección sólo se cumple cuando el entrehierro es menor que la quinta parte de la dimensión transversal.

$$\frac{g}{2} < \frac{a}{5}$$

si estimamos:

$$g = \frac{a}{15}$$

$$a = 15g \quad (5.34)$$

$$\frac{A_0}{A_g} = \frac{(a + g)^2}{Ka^2} = \left(\frac{16}{15}\right)^2 \frac{g^2}{0.94g^2} = 1.21 \quad (5.35)$$

Si consideramos que la tolerancia específica de la inductancia sea del 1.7%.

$$\delta = \frac{1.7}{100}$$

reemplazando en (5.24)

$$\frac{g}{L_m} = \frac{100}{1.7} (1.21) \times \frac{4\pi \times 10^{-7}}{6 \times 10^{-3}} \left(1 - \frac{6 \times 10^{-3}}{10 \times 10^{-3}}\right)$$

$$\frac{g}{L_m} \approx 168$$

$$L_m = 168 \times g \quad (5.36)$$

La variación máxima de la inductancia será:

$$\text{Inductancia} = L \pm 0.85\%L$$

### Volumen del entrehierro

Consideraciones energéticas para el cálculo del volumen del entrehierro:

- Se supone constante la inductancia "L"
- Se supone que el flujo se halla confinado totalmente en el núcleo y que éste tiene unas proporciones tales que en todo el hierro se tenga la misma inducción magnética.
- Se asume para efecto de cálculo que toda la energía del circuito magnético se almacena en el entrehierro.

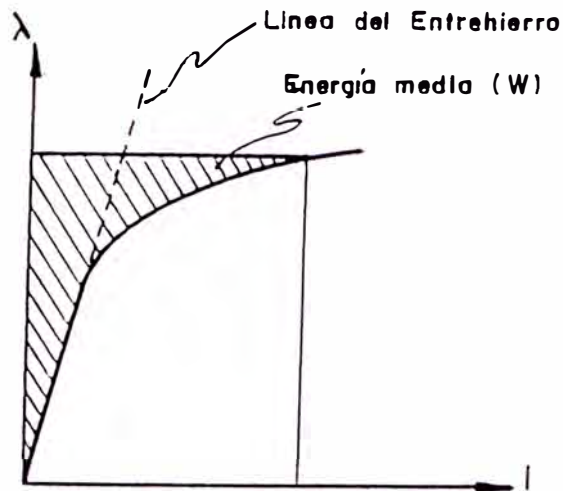


Fig. 5.9 Energía almacenada en el núcleo de hierro.

El valor medio de la energía almacenada en el núcleo es:

$$W_{med} = \frac{1}{2} LI^2$$

La energía acumulada en el campo magnético es:

$$W_{med} = Vol \frac{\beta^2}{2\mu_0}$$

El volumen del entrehierro será:

$$Vol_g = \frac{\mu_0}{\beta^2} LI^2$$

$$Vol_g = A_0 g = (a+g)^2 g$$

$$(a+g)^2 g = \frac{\mu_0}{\beta^2} LI^2$$

$$\beta^2 \approx \frac{\mu_0 LI^2}{(a+g)^2 g}$$

(5.37)



**Longitud modificada del entrehierro**

$$H_0 g + H_m L_m = H_0 g_1$$

$$g_1 = g + \frac{H_m}{H_0} L_m$$

$$g_1 = g + \frac{u_m}{u_0} L_m \quad (5.38)$$

**Cálculo del número de vueltas "N"**

$$NI = \frac{\beta}{u_0} g_1$$

$$N = \frac{\beta}{I u_0} g_1 \quad (5.39)$$

**Valores adoptados**

**Dimensión del entrehierro:** luego de hacer varias pruebas, elegimos un valor standard de entrehierro.

$$g = 5 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (5.40)$$

De (5.34) :  $a = 15 \times 5 \times 10^{-3} = 75 \times 10^{-3} \text{ m}$

Para  $I = 300 \text{ Amp}$  y  $L = 0.2915 \times 10^{-3} \text{ Hr}$

De (5.37):

$$\beta^2 = \frac{u_0 L I^2}{(a+g)^2 g} = \frac{4\pi \times 10^{-7} \times 0.2915 \times 10^{-3} \times (300)^2}{(80 \times 10^{-3})^2 \times 5 \times 10^{-3}}$$

$$\beta \approx 1.015 \text{ wb/m}^2$$

Para  $\beta = 1.015$  corresponde  $u_m = 8.6 \times 10^{-3}$

De (5.36):  $L_m = 168 \times 5 \times 10^{-3} = 0.84 \text{ m}$

$$\text{De (5.38) : } g_1 = 5 \times 10^{-3} + \frac{4\pi \times 10^{-7}}{8.6 \times 10^{-3}} (0.84) = 5.12 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\text{De (5.39) : } N = \frac{\beta \times g_1}{u_0 I} = \frac{1.015 \times 5.12 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times 300} \approx 14 \text{ vueltas}$$

Procedemos a dimensionar el núcleo en primera aproximación:

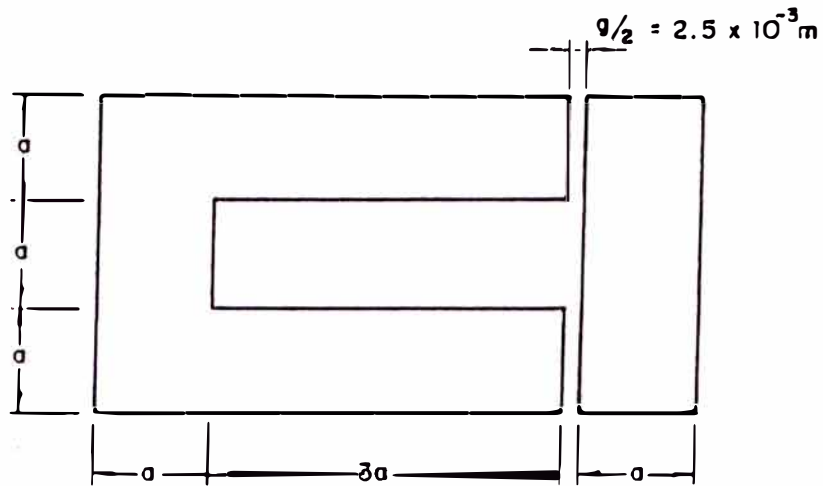


Fig. 5.10 Dimensiones del núcleo.

$$g = 5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$a = 75 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$L_m = (8 + \pi)a + g = (8 + \pi)(75 \times 10^{-3}) + 5 \times 10^{-3} = 0.84 \text{ m}$$

$$A_o = (a + g)^2 = (75 \times 10^{-3} + 5 \times 10^{-3})^2 = 6.4 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_e = K a^2 = 0.94(75 \times 10^{-3})^2 = 5.2875 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

El valor final de la inductancia será:

$$L = \frac{N^2}{\frac{L_m}{\mu_e A_e} + \frac{g}{\mu_o A_o}}$$

$$L = \frac{(14)^2}{\frac{0.84}{(8.6 \times 10^{-3})(5.2875 \times 10^{-3})} + \frac{5 \times 10^{-3}}{(4\pi \times 10^{-7})(6.4 \times 10^{-3})}}$$

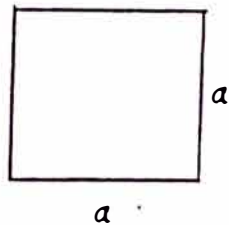
$$L = 0.3062 \times 10^{-3} \text{ Hr.}$$

Haciendo un análisis similar para diferentes corrientes de soldadura:

$I_{ee}$ (Amp)	$L_{oe}$ (Henrios)	N (Vueltas)	$\beta$ (Testla)	$u_e$
300	$0.3062 \times 10^{-3}$	14	1.04	$8.85 \times 10^{-3}$
150	$0.5062 \times 10^{-3}$	18	0.67	$9.8 \times 10^{-3}$
60	$1.2238 \times 10^{-3}$	28	0.42	$8.4 \times 10^{-3}$

**Cálculo del área real del fierro**

Tenemos un núcleo de sección cuadrada



El número de planchas es:

$$N_p = \frac{a \times K}{w} = \frac{75 \times 0.94}{0.35} = 201.43$$

tomando  $N_p = 201$

El área real del fierro es:

$$A_e = a \times w \times N_p = 75 \times 10^{-3} \times 0.35 \times 10^{-3} \times 201 = 5.27625 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

**Valores finales de inductancia**

Haciendo un recálculo final tendremos:

$I_{ee}$ (amp)	$L_{oe}$ (Henrios)	N (vueltas)	$\beta$ (Testla)
300	$0.30615 \times 10^{-3}$	14	1.04
150	$0.5079 \times 10^{-3}$	18	0.70
60	$1.2238 \times 10^{-3}$	28	0.42

**5.7.2 Dimensiones y peso del núcleo**

Las dimensiones del núcleo serán:

$$a = 75 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$g/2 = 2.5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$H = 3a$$

$$A = a$$

Disposiciones de planchas de acero-silicio

$$\rho_{Fe} = 7,650 \text{ kg/m}^3, \quad w = 0.35 \text{ mm.}$$

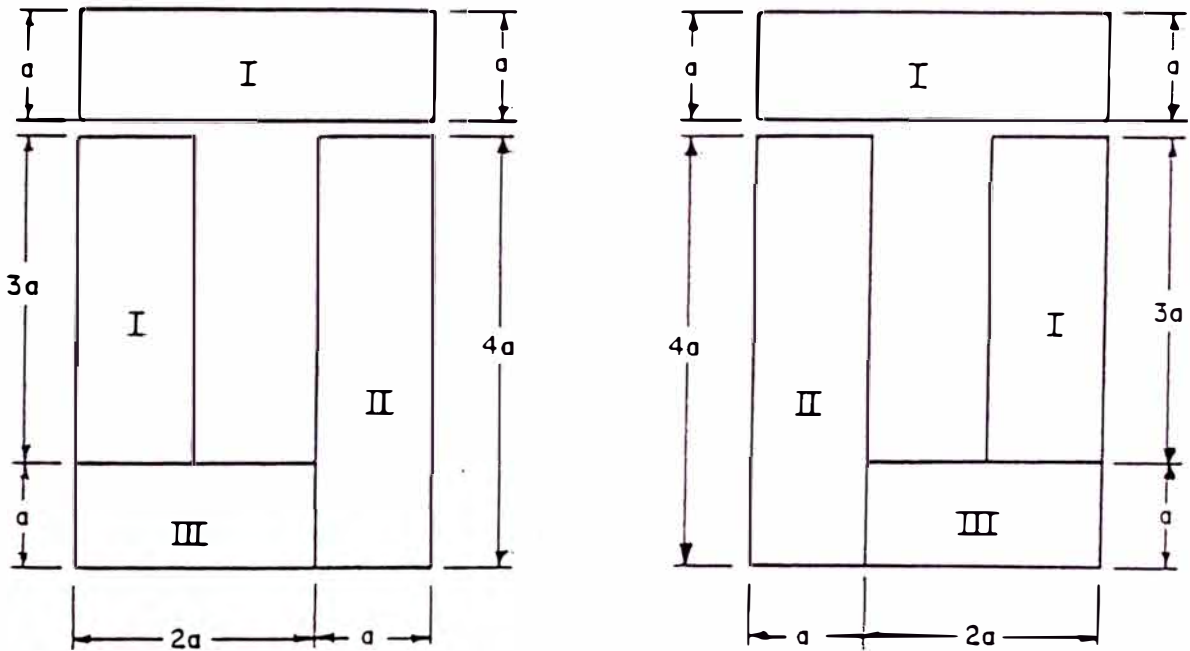


Fig. 5.11 Disposición de plancha de acero-silicio.

Plancha	Dimensiones	Dimensiones (mm)	Nº de Planchas	Peso (Kg)
I	$a \times 3a$	75 x 225	402	18.61
II	$a \times 4a$	75 x 300	201	12.10
III	$a \times 2a$	75 x 150	201	6.05
Peso del núcleo				36.31

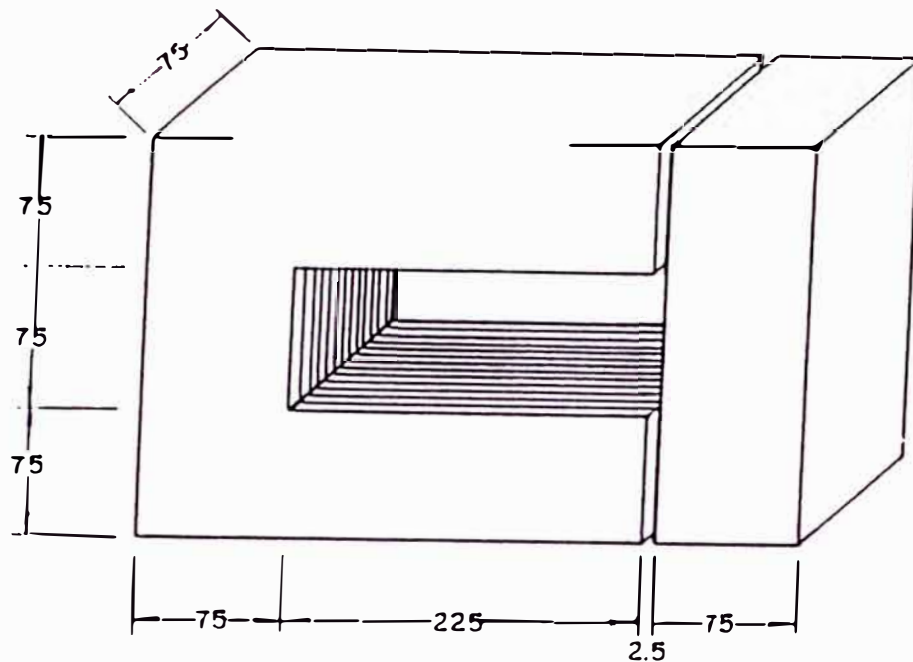


Fig. 5.12 Dimensiones de la bobina de choque en mm.  
Escala 1:25

## 5.8 Diseño del devanado

### 5.8.1 Cálculo de la sección del conductor

$$I_{ee} = 300\text{Amp.} \quad j = 2\text{amp./mm}^2$$

$$A_{cu} = \frac{I_{ee}}{j} = \frac{300}{2} = 150 \text{ mm}^2$$

escogemos una sección de barra de cobre de:

$$A_{cu} = 3 (10 \text{ mm} \times 5\text{mm}) = 150 \text{ mm}^2$$

Es decir, tres (3) barras de cobre conectadas en paralelo, cada una de 10mm x 5mm de sección.

Con un aislamiento de dos capas de algodón (en hélice) que origina un aumento de 0.4 mm de lado, tendremos:

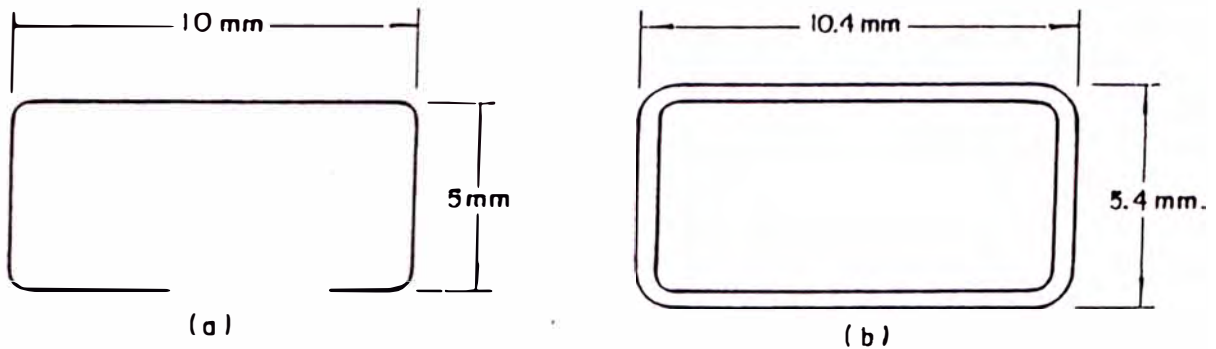


Fig. 5.13 Secciones de barra de cobre.  
 a) Barra de cobre desnudo  
 b) Barra de cobre con aislamiento de dos capas de algodón.

### 5.8.2 Cálculo de la altura del devanado

El devanado será del tipo tubular en hélice bobinado con tres conductores en paralelo.

- Número máximo de espiras  $N_T = 28$

Luego repartiremos 14 espiras en cada brazo del núcleo en serie.

- Número de espiras en cada brazo del núcleo  $N_b = 14$
- Número de capas del devanado  $N_c = 3$
- Distancia mínima de aislamiento entre los devanados y el yugo:  $\delta_z = 20\text{mm}$ .
- Factor de acomodamiento entre los conductores  $F_b = 0.9$

Consideramos una espira más por capa por el tipo de arrollamiento tubular en hélice y mejorar la distribución de los mismos, tendremos:

$$H = \frac{(N+1)L_{cu}}{F_b} + 2\delta_z = \frac{(14+1)(10.4)}{0.9} + 2(20) = 213.33\text{mm}.$$

$$H = 3a = 3 \times 75 \times 10^{-3} = 0.225\text{m} = 225\text{mm}$$

$$\delta_2^* = \frac{1}{2} \left( H - \frac{(N+1)L_{cu}}{F_b} \right) = \frac{1}{2} \left( 225 - \frac{15 \times 10.4}{0.9} \right)$$

$\delta_2^* = 25.83$  mm (distancia real de aislamiento entre los devanados y el yugo).

### 5.8.3 Cálculo del ancho del devanado

- Factor de acomodamiento  $F_b = 0.9$
- Distancia mínima entre bobinas de cada brazo del núcleo:  
 $d = 20$  mm.
- Distancia mínima de aislamiento entre los devanados y el núcleo  $\delta_1 = 3$ mm.
- Ancho total de la ventana (a)

$$a = \frac{2N_c \times A_{cu}}{F_b} + 2\delta_1 + d = 75 \times 10^{-3} \text{ m} = 75 \text{ mm}$$

$$d^* = \left( a - \frac{2N_c \times A_{cu}}{F_b} - 2\delta_1 \right) = 75 - \frac{2(3)(5.4)}{0.9} - 2(3) = 33 \text{ mm}$$

$$a_d = \frac{N_c \times A_{cu}}{F_b} = \frac{3 \times 5.4}{0.9} = 18 \text{ mm.}$$

### 5.8.4 Cálculo de la resistencia del bobinado

$$R_{20^\circ\text{C}} = \frac{\rho_{\text{Cu } 20^\circ\text{C}} \times N \times L_{cu}}{A_{cu}}$$

$$\rho_{\text{Cu } 20^\circ\text{C}} = 1/56$$

$$A_{cu} = 150 \text{ mm}^2$$

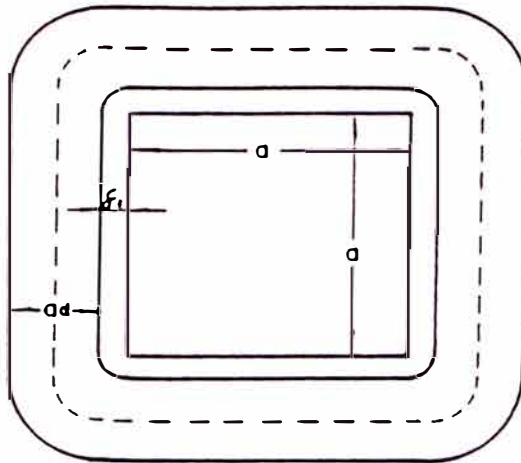


Fig. 5.14 Longitud media del corte.

La longitud media del cobre será:

$$L_{cu} = 4(a + 2\delta_1) + 2\pi \left( \frac{a\delta}{2} \right) = 4(75+2 \times 3) + 2\pi \left( \frac{3 \times 5.4}{2} \right)$$

$$L_{cu} = 374.89 \text{ mm} = 374.89 \times 10^{-3} \text{ mm}$$

La resistencia del bobinado será:

$I_{cc}$ (amp)	N (vueltas)	$R_{20-c}$ (ohmios)	$R_{75-c}$ (ohmios)
300	14	0.0006248	0.0007590
150	18	0.0008033	0.0009758
60	28	0.0012496	0.001580

Haciendo la corrección por temperatura:

$$R_{75-c} = R_{20-c} \times \frac{56}{46.1}$$

### 5.8.5 Volumen y peso del cobre

El volumen del cobre es:

$$Vol_{cu} = NA_{cu}L_{cu} = 28 \times 150 \text{ mm}^2 \times 375 \text{ mm} = 1.575 \times 10^4 \text{ mm}^3$$

$$Vol_{cu} = 1.575 \times 10^3 \text{ cm}^3$$

El peso específico del cobre es:  $\rho_{cu} = 8.9 \text{ gr/cm}^3$ .



Peso del cobre:

$$\text{Peso}_{\text{cu}} = \text{Vol}_{\text{cu}} \times \rho_{\text{cu}} = 1.575 \times 8.9 = 14.017 \text{ gr.}$$

$$\text{Peso}_{\text{cu}} = 14.017 \text{ kgs}$$

### 5.9 Pérdidas en el cobre a condiciones nominales

Para una corriente de soldadura de  $I_{\text{ce}} = 300 \text{ Amp.}$ , las pérdidas en el cobre máximas serán:

$$P_{\text{cu}} = (I_{\text{ce}})^2 \cdot R_{\text{p}} = (300)^2 \times 0.000759 = 68.31 \text{ W}$$

**Pérdidas en el fierro:** no hay, debido que la inductancia no está sometida a un flujo magnético alterno.

### 5.10 Disposición de espacio de la inductancia

La disposición isométrica de la inductancia se muestra en la fig. 5.15. Luego el conjunto de la inductancia requiere de una disposición de espacio que lo comprenda cómodamente, de las siguientes dimensiones:

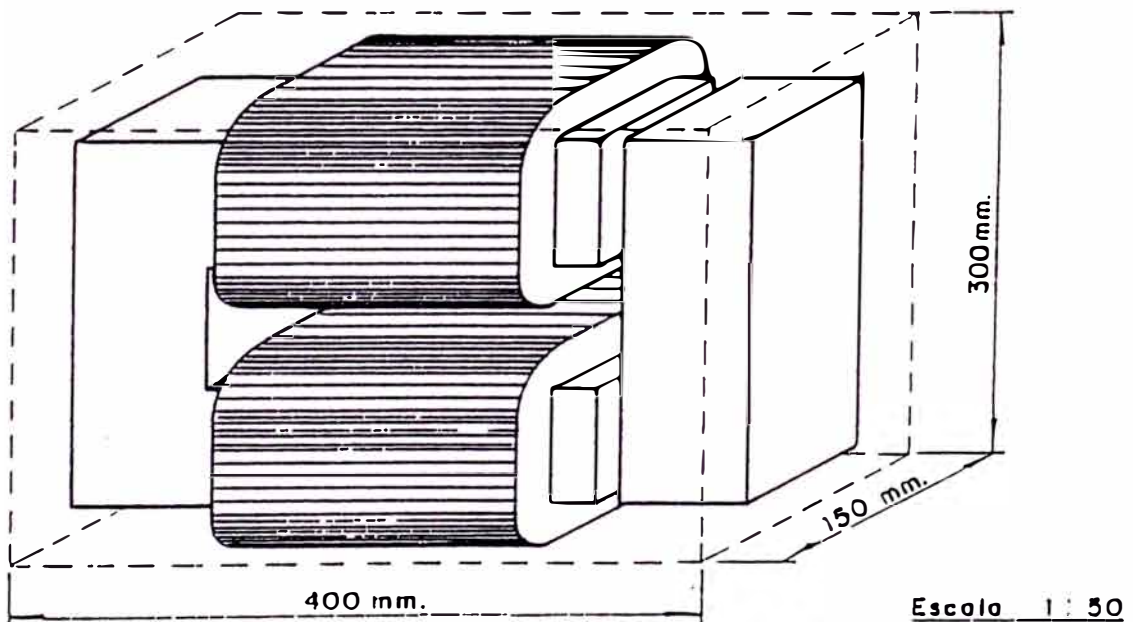


Fig. 5.15 Disposición de espacio de la inductancia.

Largo : 600mm.

Ancho : 250mm.

Altura: 350mm.

Dimensiones del núcleo:

Largo : 380mm.

Ancho : 225mm.

Altura: 75mm.

Peso : 36kg.

Dimensiones del devanado:

Ancho : 75mm.

Altura: 225mm.

Peso : 14kg.

Considerando 4kg. adicionales de los soportes y accesorios de ferretería, el peso del conjunto será:

Peso Filtro Inductancia = 36 + 14 + 4 = 54 kg.

### 5.11 Análisis de la corriente de soldadura (Circuito R - L)

El circuito equivalente final en el arco de soldadura está definido por la curva de regulación de voltaje:

$$V_L = V_{cc} - 2V_{umb} - I_{cc} \cdot R - j(2X_e) \cdot I_{cc} \quad (5.41)$$

donde:

R = resistencia de pérdidas totales

X<sub>e</sub> = reactancia de pérdidas en los devanados del transformador

V<sub>umb</sub> = voltaje de umbral de los diodos de potencia del rectificador trifásico

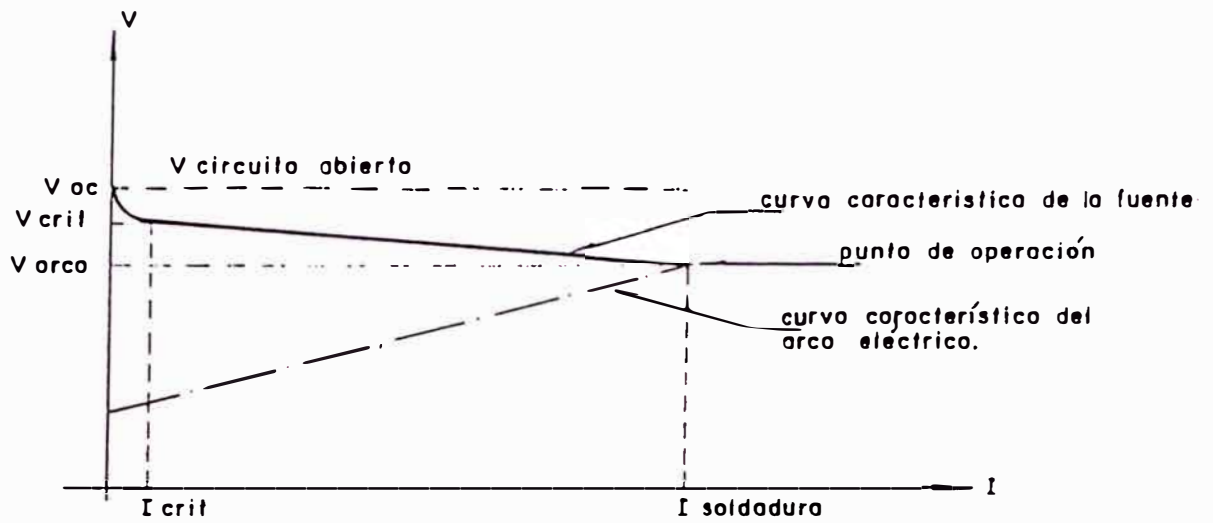


Fig. 5.5 Curva de regulación del rectificador 3 $\Phi$  de onda completa con filtro de inductancia "L".

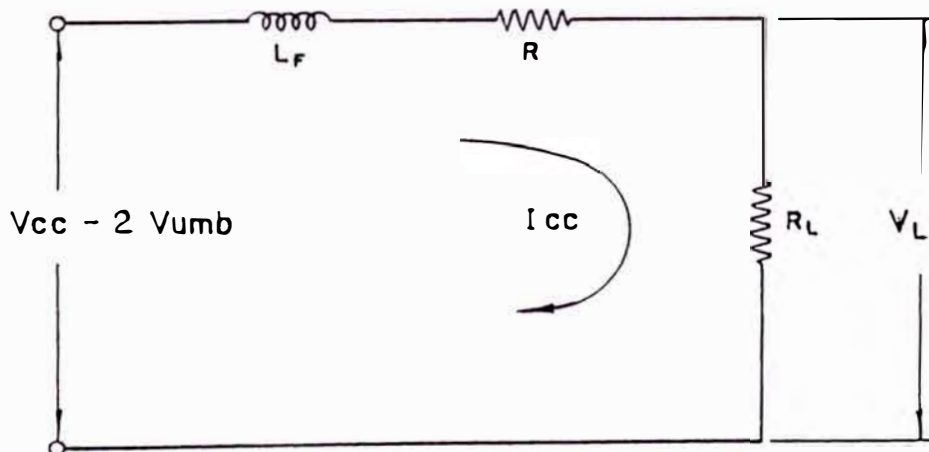
Para el análisis de la curva podemos despreciar el valor

$$jI_{cc}(2X_e) \approx 0$$

Luego la curva de regulación de voltaje cambia a:

$$V_L = V_{cc} - 2V_{umb} - I_{cc}R \quad (5.42)$$

El circuito equivalente será:



La forma de onda de la corriente es neperiana por la carga y descarga del circuito R - L

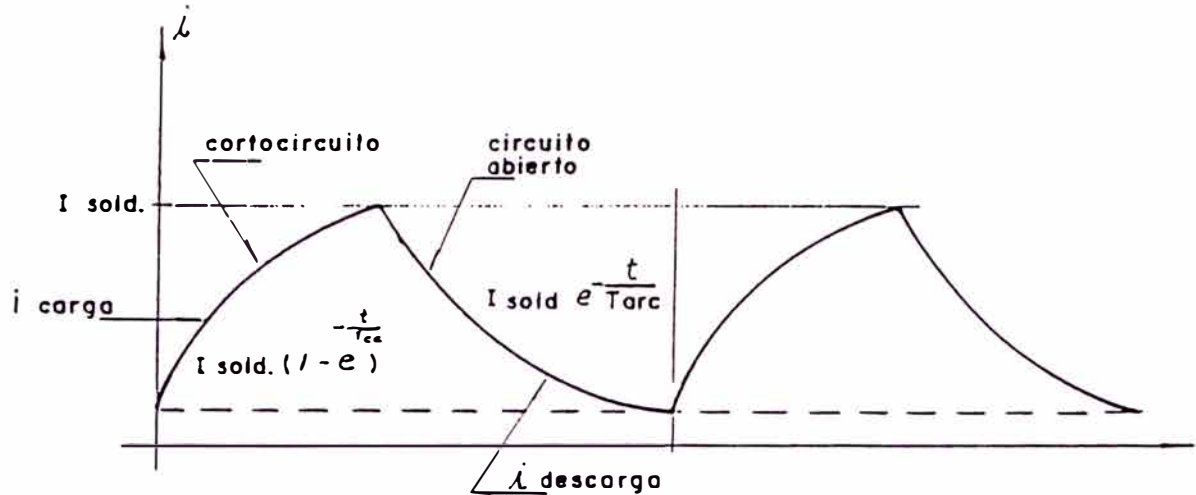


Fig. 5.16 Curva característica de corriente de la fuente.

#### Corriente de carga

$$i_c = I_{cc} (1 - e^{-t/T_{cc}}) \quad (5.43)$$

donde:  $R_L = R_{cc}$

$$T_{cc} = \frac{L_f}{R_{cc} + R} \quad (5.44)$$

$L_f$  = Inductancia del filtro

$R_{cc}$  = Resistencia de corto circuito del arco eléctrico

$R$  = Resistencia de pérdidas

#### Corriente de descarga

$$i_d = I_{cc} e^{-t/T_{arco}} \quad (5.45)$$

donde:  $R_L = R_{arco}$

$$T_{arco} = \frac{L_f}{R_{arco} + R} \quad (5.46)$$

$R_{arco}$  = Resistencia en circuito abierto del arco eléctrico

En el osciloscopio observamos oscilogramas de soldadura, tomadas en muestras de planchas de acero naval realizado en el Servicio Industrial de la Marina (son valores prácticos reales), en los que se muestra el siguiente ciclo de transferencia de metal en el arco de soldadura.

Muestra : plancha de acero estructural de 1/4"

Gas de protección : Argón

Corriente de soldadura: 150 amp.

Duración del ciclo : 20 miliseq =  $20 \times 10^{-3}$ seg.

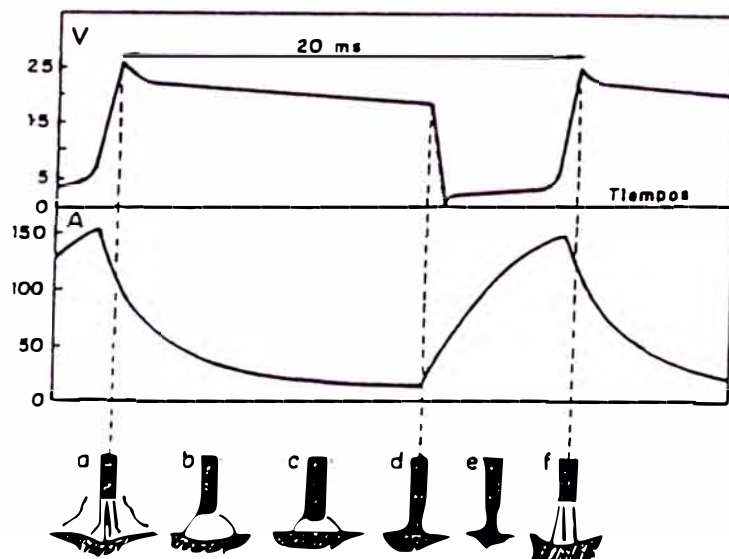
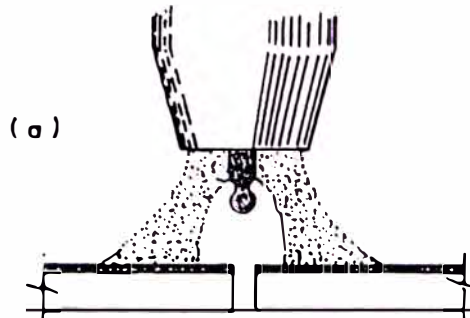
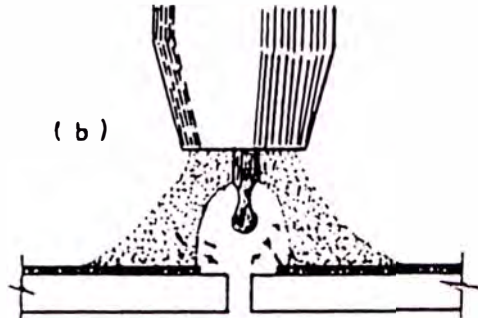


Fig. 5.17 Ciclo de transferencia de metal por cortocircuito

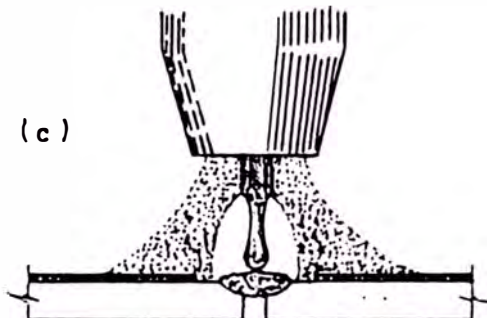
El ciclo de transferencia de metal empieza al establecerse el arco eléctrico (fig. a). La gota de metal fundido va aumentando de tamaño (fig. b y c) y llega a ponerse en contacto con el baño de fusión antes de desprenderse del alambre-electrodo, mientras esto sucede la corriente va disminuyendo exponencialmente y el voltaje se mantiene casi constante. Cuando se forma el puente de metal se forma un cortocircuito, el arco se apaga



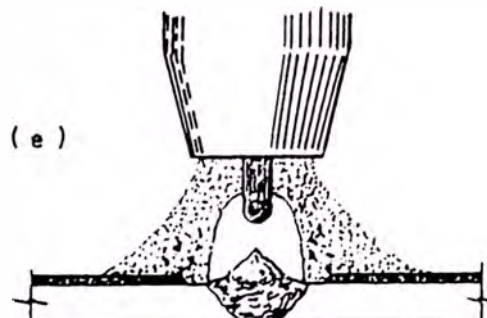
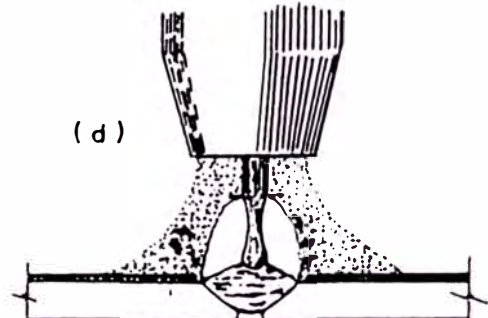
(a) Comienzo del ciclo de transporte por Arco Corto. La elevada temp. del arco va fundiendo el extremo del hilo en el que se empieza a formar un goteo. El hilo avanza automáticamente a través de la boquilla. La energía del arco se regula en el generador de soldado (Linde Co.)



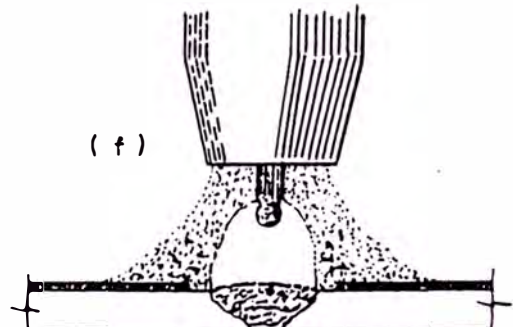
(b) El hilo avanza hacia el baño de fusión. Observar la acción de limpieza. Los mezclas a base de argón desarrolladas para arco corto, protegen el metal fundido, facilitan el reencendido del arco, reducen las proyecciones y mejoran la calidad de la soldadura (Linde Co.).



(c) El extremo del hilo entra en contacto con las piezas y se produce un cortocircuito. El arco se extingue momentáneamente, permitiendo un ligero enfriamiento del baño. El número de cortocircuitos oscila entre 20 y 200 por seg. (Linde Co.).



(e) La gota fundida en el extremo del hilo se desprende del mismo y se restablece el arco. La separación de la gota se produce por un efecto de estricción. Las características de este efecto de restricción pueden regularse en la fuente de alimentación. (Linde Co.)



(f) Una vez restablecido el arco comienza un nuevo ciclo. La precisión en el control de las características del arco, el régimen relativamente frío y la uniformidad de la operación con Arco Corto, permiten obtener soldaduras perfectas en espesores hasta unos 0.8 mm. en aceros al carbono e inoxidables. (Linde Co.)

Fig. 5.17.- Ciclo de Transferencia de metal por cortocircuito

momentáneamente y la corriente comienza a crecer y el voltaje cae a un valor muy bajo, teniendo lugar un calentamiento por resistencia en el alambre por cortocircuito (fig. d y e). Como consecuencia de la elevada corriente de cortocircuito las fuerzas magnéticas axiales rompen el cuello de la gota desprendiéndola y pasando al baño de fusión (fig.f). Al romperse el cortocircuito se reestablece el arco y comienza un nuevo ciclo.

La forma de onda y el tiempo de subidas y bajadas del oscilograma de corriente y voltaje viene determinada por el valor de la inductancia del circuito.

Si el valor de la inductancia ( $L_{\pi}$ ) fuera muy pequeño se generaría un aumento muy rápido de la corriente ( $i_c$ ) por lo que las gotas de metal se desprenderían velozmente de la varilla provocando abundantes proyecciones y un baño de soldadura bastante frío, ya que el tiempo de calentamiento del metal es muy corto (el ciclo de cortocircuito es muy corto).

Si el valor de la inductancia ( $L_{\pi}$ ) fuera muy grande, se tiende a impedir el recebado del arco eléctrico, ya que el puente de metal formado en el momento de cortocircuito entre el alambre-electrodo y el metal que se suelda, se solidificará y no se romperá, extinguiéndose el arco (el ciclo de cortocircuito es muy largo).

El valor adecuado de la inductancia ( $L_{\pi}$ ) influye en el tiempo de respuesta del arco de soldar por lo que es necesario obtener el valor exacto de la inductancia.

Comparando las curvas de voltaje y corriente de la máquina diseñada con el oscilograma de soldadura, podremos comprobar si nuestro diseño es correcto o no.

En un periodo completo de transferencia de metal de una gota de soldadura, se produce un periodo parcial de "arco eléctrico en el que se ioniza el gas inerte de protección hasta volverlo conductor" y otro periodo parcial de "cortocircuito en el que se cortocircuita el alambre-electrodo con la pieza a soldar".

En este caso el periodo de arco eléctrico (corriente de descarga) dura 13.62 milisegundos y el periodo de cortocircuito (corriente de carga) dura 6.38 milisegundos.

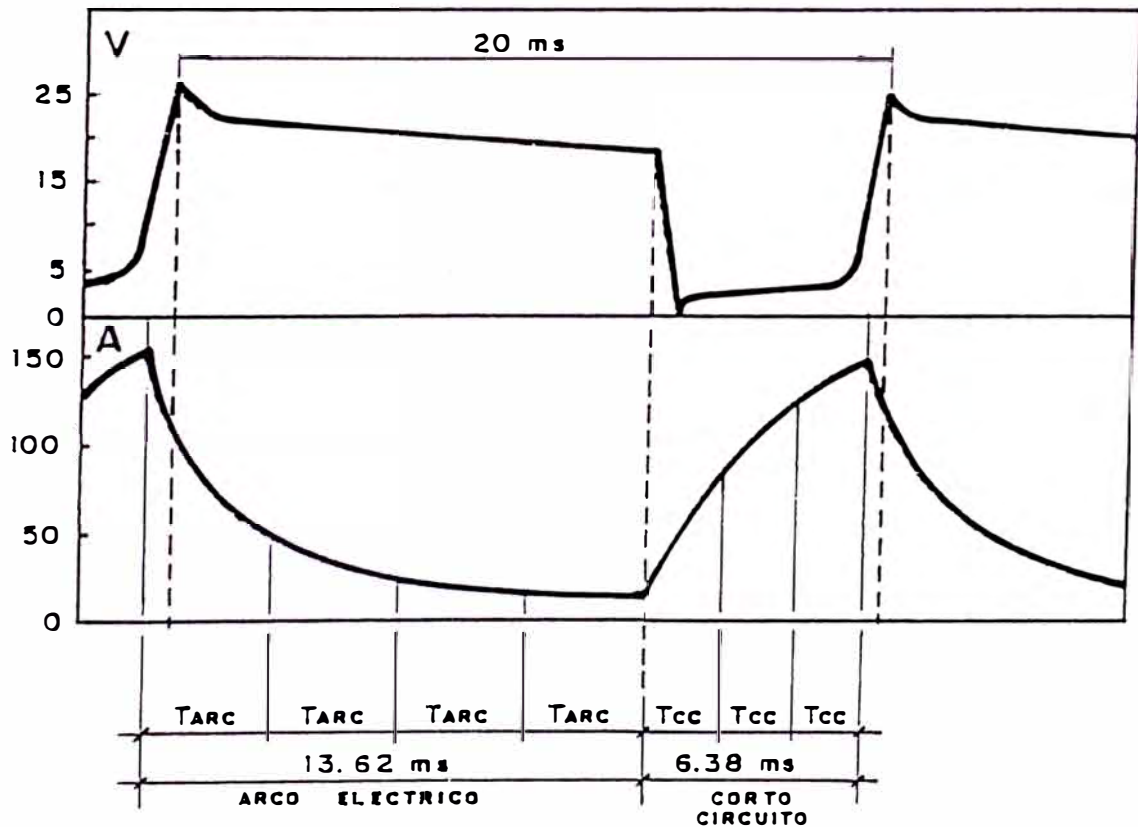


Fig. 5.18 Tiempo de arco eléctrico y cortocircuito.



$$T_{arco} = 13.62 \text{ mseg.}$$

$$T_{cc} = 6.38 \text{ mseg.}$$

$$T = T_{arco} + T_{cc} = 20 \text{ mseg.}$$

$$I_{sol} = 150 \text{ amp.}$$

**"Respuesta transitoria de la corriente de descarga con voltaje de arco"**

$$\text{Corriente de descarga: } i_d = I_{sol} e^{-t/T_{arco}}$$

$$\text{Voltaje de arco: } V_{arc} = 14 + 0.05 \times I_{sol} = 21.5 \text{ volts.}$$

$$T_{arc} = \frac{L_f}{R_{arco} + R}$$

$L_f$  = inductancia del filtro

$$\text{para } I_{sol} = 150 \text{ Amp. } \rightarrow L_f = 0.5079 \times 10^{-3} \text{ Hr}$$

$R_{arco}$  = resistencia del arco eléctrico

$$R_{arco} = \frac{V_{arc}}{I_{sol}} = \frac{14 + 0.05 I_{sol}}{I_{sol}} = \frac{14 + 0.05 \times 150}{150}$$

$$R_{arco} = 0.1433 \Omega$$

$R$  = resistencia de pérdidas

$$R = 2r + 2r_d + R_f$$

Para la toma N°2 de la escala II:

$$R = 0.00729 \Omega$$

$$T_{arco} = \frac{0.5079 \times 10^{-3}}{0.1433 + 0.00729} = \frac{0.5079 \times 10^{-3}}{0.1506}$$

$$T_{arco} = 3.37 \times 10^{-3} \text{ seg} \quad (5.47)$$

Este es el valor obtenido en nuestro diseño.

Si observamos el oscilograma de soldadura, la corriente alcanza su valor mínimo después de  $t = 4T_{arco}$

$$4T_{ARCO} = 13.62 \times 10^{-3} \text{ seg}$$

$$T_{ARCO} = 3.40 \times 10^{-3} \text{ seg} \quad (5.48)$$

De ambos resultados obtenidos (ec. 5.47 y ec. 5.48), observamos que el valor de diseño del filtro de inductancia es bastante próximo al valor óptimo de trabajo, de lo que concluimos que nuestro diseño es el correcto.

### "Respuesta transitoria de la corriente de carga con voltaje cortocircuito"

Corriente de carga:  $i_c = I_{SO} (1 - e^{-t/T_{cc}})$

Del oscilograma de soldadura observamos que la corriente alcanza su valor máximo después de  $t = 3T_{cc}$

$$3T_{cc} = 6.38 \times 10^{-3} \text{ seg}$$

$$T_{cc} = 2.127 \times 10^{-3} \text{ seg}$$

$$T_{cc} = \frac{L_f}{R_{cc} + R}$$

$R_{cc}$  = resistencia en corto circuito

$$R_{cc} + R = \frac{L_f}{T_{cc}} = \frac{0.5079 \times 10^{-3}}{2.127 \times 10^{-3}} = 0.23878 \Omega$$

$$R_{cc} = 0.23878 - R = 0.23878 - 0.00716$$

$$R_{cc} = 0.2316 \Omega$$

Observamos que la resistencia en cortocircuito es mayor que la resistencia del arco eléctrico.

$$R_{ARC} = 0.1433 \Omega$$

$$R_{cc} > R_{ARCO}$$

La resistencia del arco al ionizarse el gas inerte de protección " $R_{ARCO}$ " es menor que la resistencia cuando el electrodo está en cortocircuito con la pieza a soldar " $R_{cc}$ ".

## Conclusiones

1. Con la ubicación de la inductancia en el circuito rectificador se obtiene una fuente de tensión constante, con una buena regulación de voltaje vs. corriente.  
  
El comportamiento es similar al de un estabilizador o regulador de voltaje, con la diferencia que nuestro sistema reacciona mucho mejor, cuando se trabaja con corrientes altas (el rango de las corrientes de soldadura varía entre 50 amp. hasta 1000 amp.) ya que es un dispositivo estático sin partes móviles.
2. La inductancia actúa como un excelente filtro de armónicas ya que la reactancia del filtro aumenta con la frecuencia, por lo que su efecto es mayor con las armónicas más altas.
3. La forma de onda de la corriente es del tipo neperiana por la carga y descarga del circuito R - L.
4. La curva de voltaje es del tipo "voltaje constante" con una ligera pendiente decreciente.
5. La inductancia actúa como elemento estabilizador del arco de soldadura. El valor adecuado de inductancia influye en el tiempo de respuesta del arco de soldar (cortocircuito y circuito abierto) y en el comportamiento de la corriente de soldadura.
6. El tiempo de duración del ciclo de transferencia del metal es del orden de los milisegundos.
7. El ciclo completo de transferencia de metal se divide a su vez en un ciclo parcial de "Arco eléctrico" en el que se ioniza el gas inerte de protección hasta volverlo conductor y en otro ciclo parcial de "cortocircuito" en el que se cortocircuita el alambre-

electrodo con la pieza a soldar teniendo lugar un calentamiento por resistencia.

8. Para una corriente de soldadura de  $I_{BOL} = 150$  Amp. tenemos:

$$R_{ARCO} = 0.1433 \text{ ohmios}$$

$$R_{CORTOCIRCUITO} = 0.2316 \text{ ohmios}$$

Corriente de descarga (Arco eléctrico) es:

$$i_d = 150 e^{-t/3.4 \times 10^{-3}}$$

Corriente de carga (cortocircuito) es:

$$i_c = 150 (1 - e^{-t/2.127 \times 10^{-3}})$$

9. La inductancia propia del núcleo de hierro del transformador trifásico no se toma en cuenta, ya que está en paralelo con la inductancia de dispersión de los devanados.

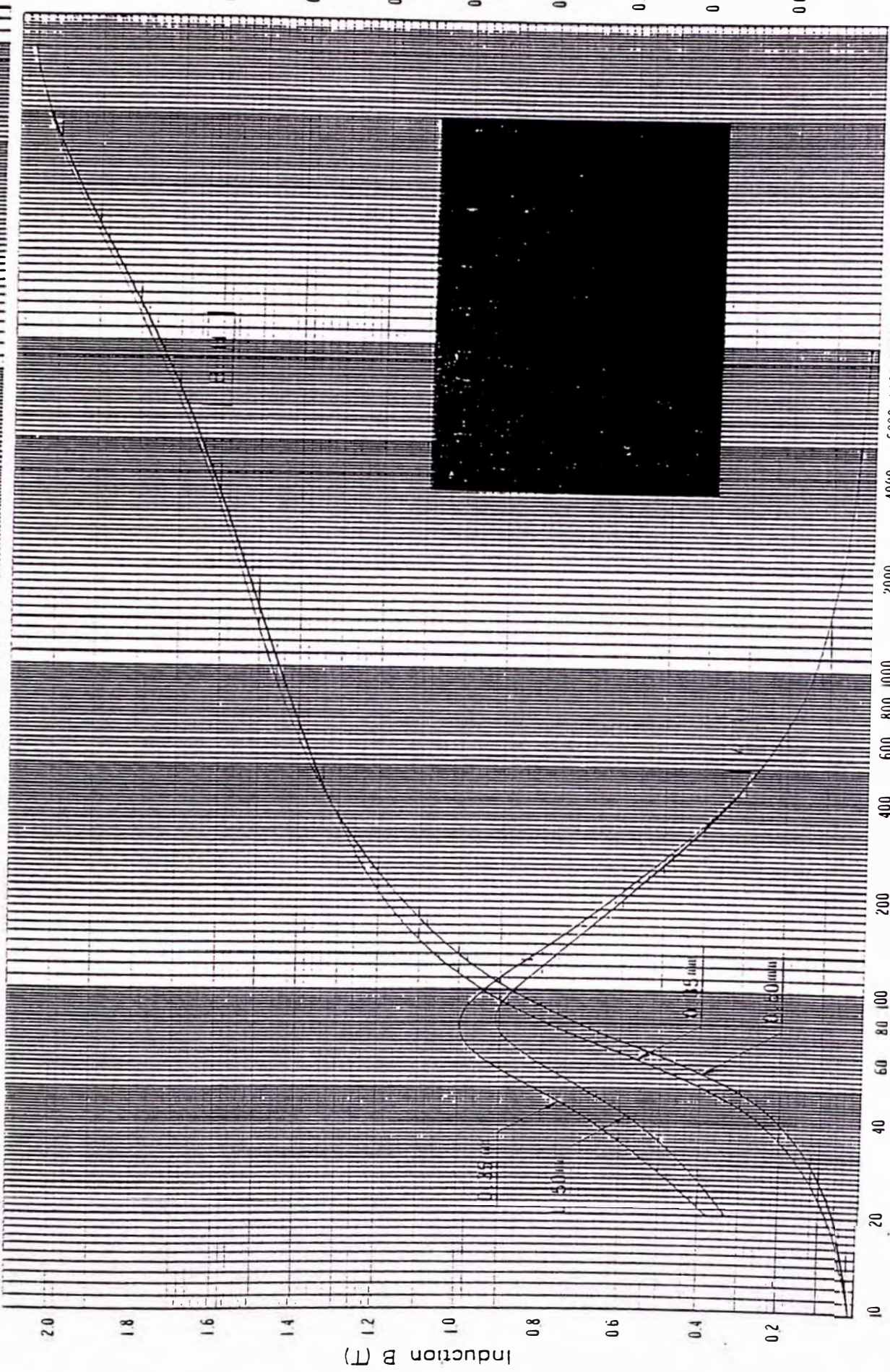
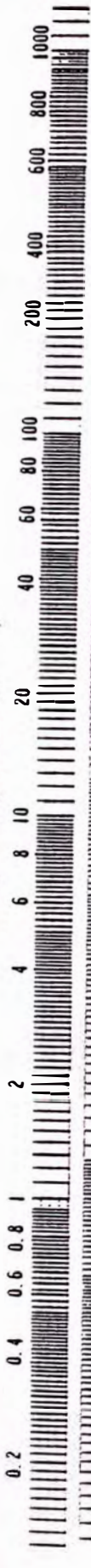
$$X_m \gg X_e$$

$X_m$  = reactancia de magnetización del transformador

$X_e$  = reactancia de dispersión de los devanados

$$X_m \parallel X_e = X_T = \frac{X_m \cdot X_e}{X_m + X_e} \approx \frac{X_m \cdot X_e}{X_m} \approx X_e$$

Magnetizing Force H (Oe)



Magnetizing Force H (A/m)

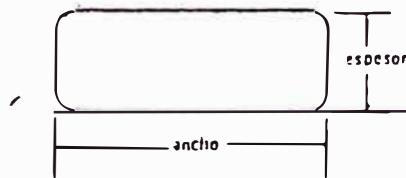




Tabla de Especificaciones

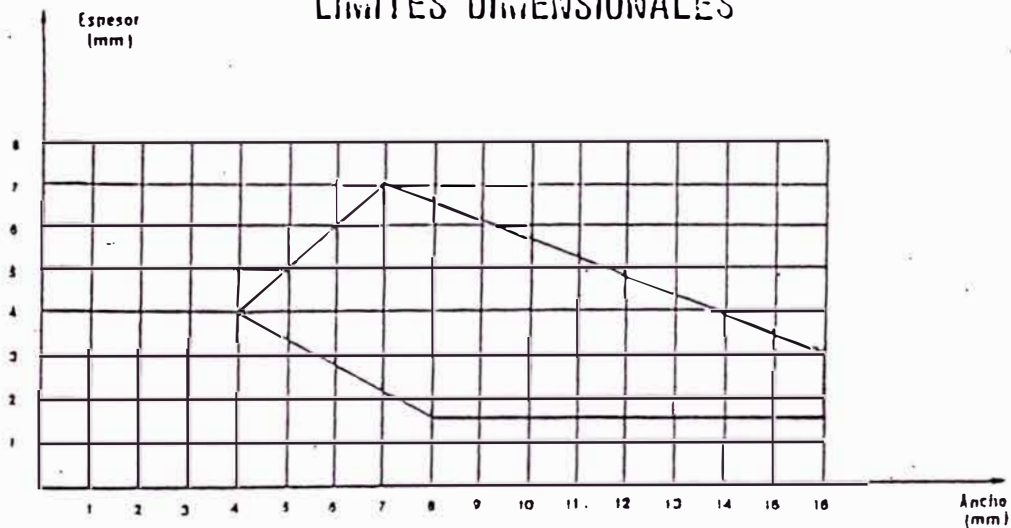
**ALAMBRES RECTANGULARES  
DE COBRE DESNUDOS**

**TIPO DE FABRICACION**



**CON CANTOS REDONDOS**

**LIMITES DIMENSIONALES**



**NOTAS:**

- a) Cualquier combinación de espesor y ancho que caiga dentro del área encerrada, puede ser suministrado.
- b) A fin de determinar las posibilidades de fabricación del calibre deseado, sírvase confirmarlo con nuestro Dpto. Comercial.
- c) Cantidades mínimas de despacho: 500 kilos.

## CAPITULO VI UNIDAD DE ALIMENTACION DEL ALAMBRE-ELECTRODO

La unidad de alimentación del alambre-electrodo es el dispositivo que alimenta el alambre-electrodo a la pieza de soldar.

Está contenida en una caja de acero dividida verticalmente en dos compartimientos distintos, uno de ellos contiene la bobina del alambre-electrodo, los rodillos de arrastre del alambre y el bloque de conexiones con la manguera que desarrolla el alambre hasta la pieza a soldar. El otro contiene el motor eléctrico de c.c, el reductor de velocidad, el circuito impreso del control automático de velocidad del alambre-electrodo y la electroválvula del gas de protección.

### **BOBINA DE ALAMBRE-ELECTRODO**

Las bobinas de alambre-electrodo se suministran en carretes de 30 cm. de diámetro de 10 kg y de 15 kg.

El diámetro de los alambre-electrodos varía entre  $\phi = 0.8$  mm. y  $\phi = 1.6$  mm.

Los carretes de alambre se acoplan a un árbol portabobinas, de tal forma que el orificio que llevan los carretes coincida con el eje del indicado árbol, fijándolos por medio de un freno regulable.

### **MECANISMO DE ARASTRE DEL ALAMBRE-ELECTRODO**

Se utiliza un motor de corriente continua de excitación independiente con reductor de velocidad incorporado del tipo tornillo sin fin.

El alambre-electrodo es empujado por dos rodillos uno de arrastre accionado por el motor-reductor y el otro de presión, el cual está presionado por un resorte regulable contra el primero.

El arrastre del alambre-electrodo debe ser a velocidad constante, sin deformaciones del alambre y sin deslizamiento en los rodillos.

#### **MANGUERA DE DESARROLLO Y SOPLETE DE SOLDADURA**

La manguera de desarrollo contiene bajo una envoltura única de caucho, el tubo guía de alambre-electrodo de material plástico, la canalización del gas de protección de material de nylon, el cable de corriente de soldadura y los cables de mando.

El soplete de soldadura se encuentra ubicado al otro extremo de la manguera de desarrollo. Dentro del soplete se encuentra un tubito de contacto, donde el alambre-electrodo hace contacto eléctrico con uno de los polos de la corriente de soldadura.

Al desarrollarse el alambre, tiende a conservar cierta curvatura que debe hacerse desaparecer para reducir el rozamiento que pueda producir en la manguera de desarrollo, en el tubo guía del alambre, y en el tubo de contacto del soplete de soldadura. Esto se consigue ubicando la entrada del tubo guía cerca a los rodillos de arrastre y alineado con estos y así evitar deformaciones en el alambre-electrodo.

El operador debe poder variar la velocidad de alimentación a voluntad, según las necesidades de trabajo. La variación de velocidad va desde 1 m/min hasta 18 m/min. Una vez fijada la velocidad de alimentación, es necesario mantenerla constante, mientras el operador está soldando. Esto se consigue mediante un control automático de velocidad a través de tiristores aplicado al motor-reductor.



El sistema tiene un dispositivo de frenado instantáneo que bloquea el arrastre de alambre cuando el operador interrumpe la corriente de soldadura. Con el frenado instantáneo se consigue evitar la formación de dobleces en el alambre, que debido a la inercia del sistema obligaría al carrete a seguir girando y dejar algunas espiras de alambre sueltas.

### 6.1 Motor de arrastre

Motor de corriente continua con excitación de campo independiente.

Cualidades: - alto par de arranque  
- facilidad de regulación de velocidad angular

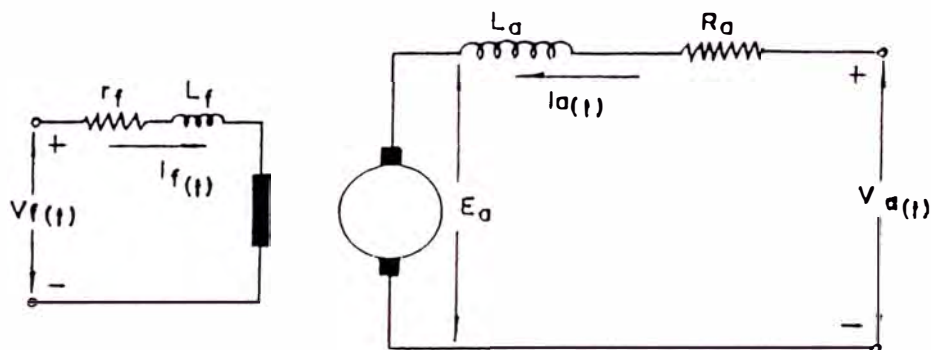


Fig. 6.1 Circuito del motor de arrastre.

$E_a$  = reacción de armadura  
 $V_a$  = tensión de alimentación en los bornes del inducido  
 $i_a$  = corriente de armadura  
 $R_a$  = resistencia interna de la armadura  
 $L_a$  = inductancia de la armadura  
 $V_f$  = tensión de alimentación del campo  
 $i_f$  = corriente de campo  
 $r_f$  = resistencia de campo

$L_f$  = inductancia del campo

$\phi$  = flujo máximo por polo

$p$  = número de pares de polos

$a$  = número de pares de ramas en paralelo del inducido

$Z$  = número total de conductores del inducido en serie

$\omega_m$  = velocidad angular de armadura (rad/seg)

$T_e$  = torque electromagnético

$G_{af}$  = inductancia rotacional

$T_L$  = torque de carga

**Sistema de ecuaciones:**

$$V_a = E_a + I_a R_a$$

$$E_a = \left( \frac{p Z}{2\pi a} \right) \phi \omega_m = K_1 \phi \omega_m$$

$$\phi = K_2 I_f$$

$$T_e = K_1 \phi I_a = K_1 K_2 I_f I_a$$

$$G_{af} = K_1 K_2$$

Si mantenemos la corriente de campo constante

$$I_f = \text{cte}$$

$$K\phi = K_1 \phi = \text{cte}$$

$$T_e = K\phi I_a$$

$$E_a = K\phi \omega_m$$

$$V_a = K\phi \omega_m + I_a R_a$$

$$\omega_m = \frac{V_a}{K\phi} - \frac{I_a R_a}{K\phi} \quad (6.1)$$

$$W_m = \frac{V_a}{K\phi} - T_e \frac{R_a}{K\phi^2} \quad (6.2)$$

$$T_L = T_e \quad (6.3)$$

La disminución del torque de carga traerá como consecuencia la disminución de la corriente de armadura y el aumento de la velocidad de rotación del motor.

En estado permanente el torque de carga ( $T_L$ ) es igual al torque electromagnético ( $T_e$ ).

## 6.2 Ecuaciones del sistema en estado dinámico

Al desenrollarse el alambre-electrodo, el radio efectivo de la bobina de alambre-electrodo disminuye, aumentando la velocidad angular del carrete, disminuyendo el momento de inercia de la bobina, el torque resistente de la carga y la masa efectiva del sistema (Ver figura 6.2).

$V_L$  = velocidad de alimentación del alambre-electrodo

$W_L$  = velocidad angular de la bobina

$r_L$  = radio efectivo del bobinado de alambre-electrodo

$T_L$  = torque de carga de la bobina

$J_L$  = momento de inercia de la bobina

$h$  = ancho efectivo de la bobina

$D$  = diámetro del alambre-electrodo

$n$  = relación de engranajes

$F_{(t)}$  = fuerza de tensión del alambre-electrodo

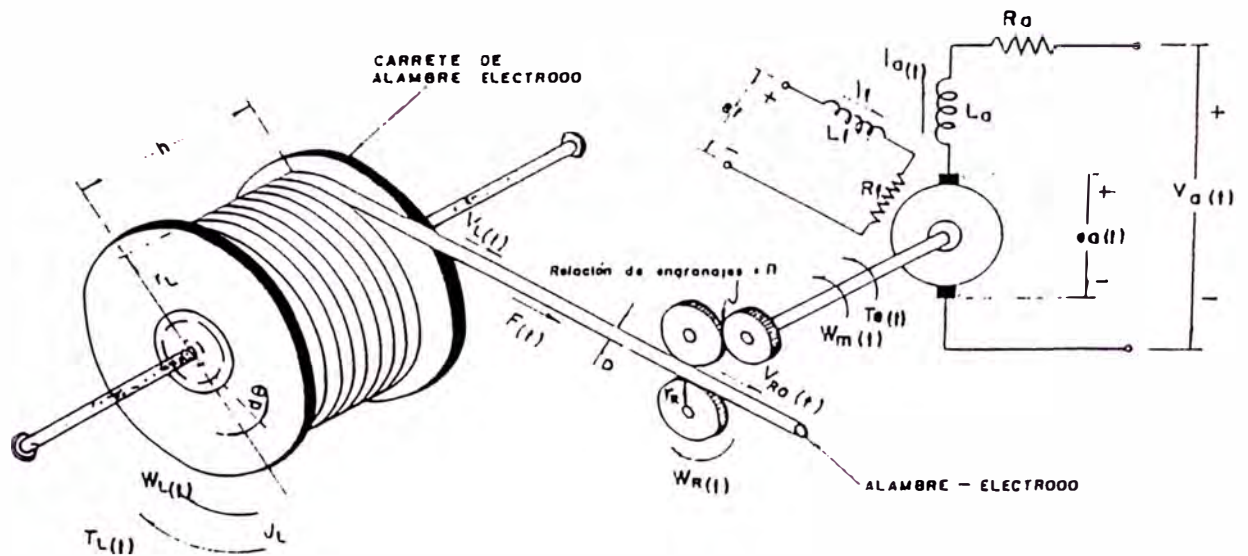


Fig. 6.2 Diagrama esquemático de la unidad de alimentación del alambre-electrodo.

$J_{m\rightarrow} = J_m + (1/n)^2 J_L$  = momento de inercia total en el eje del motor

$B_L$  = coeficiente de rozamiento viscoso de la bobina de alambre-electrodo

$B_{m\rightarrow} = B_m + (1/n)^2 B_L$  = coeficiente de rozamiento viscoso total

$V_{RO}$  = velocidad del alambre-electrodo en los rodillos de arrastre

$W_m$  = velocidad angular del motor

$W_R = (1/n)W_m$  = velocidad angular de los rodillos de arrastre

Momento de inercia de la bobina:

$$J_L = \frac{\rho\pi}{2} r_L^4$$

$\rho$  = densidad de masa del alambre-electrodo

Ecuaciones del sistema en estado dinámico:

$$V_{a(t)} = R_a i_{a(t)} + L_a \frac{di_{a(t)}}{dt} + E_a$$

$$V_{a(t)} = R_a i_{a(t)} + L_a \frac{di_{a(t)}}{dt} + K\phi \omega_m(t)$$

$$T_e(t) = \frac{d(J_m \omega_m(t))}{dt} + B_m \omega_m(t) + \frac{r_L}{n} F_c(t)$$

"J<sub>L</sub>" y "r<sub>L</sub>" disminuyen con el tiempo a medida que se desenrolla el alambre-electrodo.

$$\frac{dJ_L}{dt} = 2 \pi \rho r_L^3 \frac{dr_L}{dt}$$

$$\frac{dr_L}{dt} = \frac{D^2}{2\pi h} \frac{d\theta}{dt}$$

$$\frac{dJ_L}{dt} = 2 \pi \rho r_L^3 \frac{D^2}{2\pi h} \left( \frac{d\theta}{dt} \right)$$

Si el alambre-electrodo es muy delgado, podemos considerar que durante un cierto período de tiempo "r<sub>L</sub>" y "J<sub>L</sub>" son constantes.

$$D \approx 0$$

$$J_L = \text{cte}$$

$$J_m = J_m + (1/n)^2 J_L \approx \text{cte}$$

La fuerza de tensión en el alambre-electrodo es:

$$F_c(t) = K \cdot x(t)$$

K = coeficiente de elasticidad del alambre-electrodo

x = elongación del alambre-electrodo

Si asumimos que el alambre-electrodo no sufre deformación en el proceso de arrastre, podemos considerar que:

$$\Delta x = 0$$

$$F_{ct} = 0$$

Por lo tanto, se puede considerar que la velocidad tangencial en la bobina de alambre-electrodo ( $V_L$ ) es igual a la velocidad tangencial del alambre electrodo en los rodillos de arrastre ( $V_{RO}$ ).

$$V_L = V_{RO} = \text{cte} \quad (6.4)$$

$$\omega_L r_L = \omega_R r_R = \text{cte} \quad (6.5)$$

$$r_R = \text{radio del rodillo de arrastre} = \text{cte}$$

Si el rodillo de arrastre se mueve a una velocidad angular ( $\omega_R$ ) constante, entonces la velocidad tangencial de alimentación del alambre-electrodo también es constante, aún así varíen el radio efectivo de la bobina y la velocidad angular de la bobina.

Luego controlando la velocidad angular del rodillo de arrastre, controlamos la velocidad de alimentación del alambre-electrodo.

Las ecuaciones en estado dinámico se reducen a:

$$V_{a(ct)} = R_a i_{a(ct)} + L_a \frac{di_{a(ct)}}{dt} + K\phi \omega_{m(ct)} \quad (6.6)$$

$$T_{e(ct)} = J_{me} \frac{d\omega_{m(ct)}}{dt} + B_{me} \omega_{m(ct)} \quad (6.7)$$

### 6.3 Especificaciones técnicas del motor de arrastre

Motor de corriente continua con excitación de campo independiente.

**Inducido:**

Voltaje	$V_a = 36$ voltios
Corriente	$I_a = 3$ amp.
Resistencia	$R_a = 1.44\Omega$
Inductancia	$L_a = 0.07$ Hr = $70 \times 10^{-3}$ Hr

**Excitación de Campo:**

Voltaje	$V_f = 36$ voltios
Corriente	$I_f = 0.83$ amp.
Potencia	$P = 95$ watts
Eficiencia	$\eta = 0.72$
Régimen	rpm = 3,000 rpm

Velocidad angular  $\omega_m = 314$  rad/seg

Reducción de tornillo

sin fin con relación

de reducción  $n = 38$

Hallamos la constante " $K\phi$ " de los valores dados por las especificaciones técnicas del motor.

$$K\phi = \frac{V_a - I_a R_a}{\omega_m} = \frac{36 - (3)(1.44)}{314.16} = 0.10084 \frac{\text{volt-seg}}{\text{rad}}$$

Luego, el torque electromagnético máximo del motor será:

$$T_e = K\phi I_a = (0.10084)(3) = 0.3025 \text{ Nw-m}$$

**Característica mecánica del motor**

$$\omega_m = \frac{V_a}{K\phi} - T_e \frac{R}{K\phi^2}$$

$$\Delta\omega_m = \omega_{m0} - \omega_m$$

donde:

$\omega_m$  = velocidad de rotación del motor (rad/seg)

$\omega_{m0}$  = velocidad de rotación del motor en vacío

$\Delta\omega_m$  = variación de la velocidad de rotación del motor debido al par de carga

Como veremos más adelante la resistencia total del circuito del inducido será:

$$R = R_a + R_{ext}$$

siendo " $R_{ext}$ " una resistencia externa conectada en serie con la armadura, proporcional a " $R_a$ "

$$R_a = 1.44\Omega$$

$$R_{ext} = 0.36\Omega$$

$$R = R_a + R_{ext} = 1.8\Omega$$

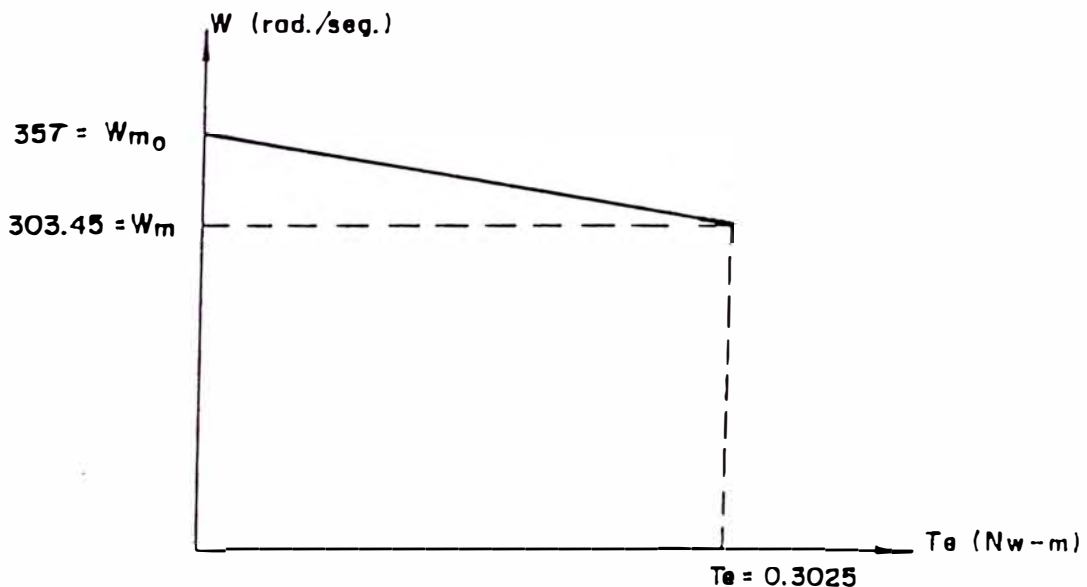


Fig. 6.3 Gráfico de la característica mecánica del motor.

La velocidad en vacío del motor es (en el momento del arranque):

$$\omega_{m0} = \frac{V_{a \max}}{K\phi} = \frac{36}{0.10084} = 357 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$$



La velocidad máxima del motor considerando la resistencia total "R":

$$\omega_m = \frac{V_{a \max}}{K\phi} - T_e \frac{R}{K\phi^2} = \frac{36}{0.10084} - 0.3025 \frac{1.8}{(0.10084)^2}$$

$$\omega_m = 303.45 \text{ rad/seg}$$

La variación de velocidad es:

$$\Delta\omega_m = \omega_{m0} - \omega_m$$

$$\Delta\omega_m = 357 - 303.45 = 53.55 \text{ rad/seg.}$$

#### 6.4 Cálculo del momento de inercia total del sistema (Jme)

De acuerdo a las especificaciones técnicas de soldadura la velocidad de avance del alambre-electrodo ( $V_L$ ) varia entre:

$$V_{L \max} = 18 \text{ m/min} = 0.30 \text{ m/seg.}$$

$$V_{L \min} = 2 \text{ m/min} = 0.033 \text{ m/seg.}$$

$$\omega_{m \max} = \text{velocidad angular máxima del motor (rad/seg)}$$

$$\omega_{R \max} = \text{velocidad angular máxima del rodillo de arrastre (rad/seg.)}$$

$$n = \text{relación de reducción del reductor de velocidad}$$

$$r_R = \text{radio del rodillo de arrastre}$$

$$\omega_{m \min} = \text{velocidad angular mínima del motor (rad/seg.)}$$

$$\omega_{R \min} = \text{velocidad angular mínima del rodillo de arrastre (rad/seg.)}$$

$$\omega_{m \max} = 303.45 \text{ rad/seg.}$$

$$\omega_{R \max} = \frac{\omega_{m \max}}{n} = \frac{303.45}{38} = 8 \text{ rad/seg}$$

$$r_R = \frac{V_{RO}}{\omega_R} = \frac{V_{L \max}}{\omega_R} = \frac{0.30}{8} = 3.75 \times 10^{-2} \text{ m}$$

$$\omega_{R \min} = \frac{V_{L \min}}{r_R} = \frac{0.033}{3.75 \times 10^{-2}} = 0.88 \text{ rad/seg}$$

$$\omega_{m \min} = n \omega_{R \min} = (38) (0.88) = 33 \text{ rad/seg}$$

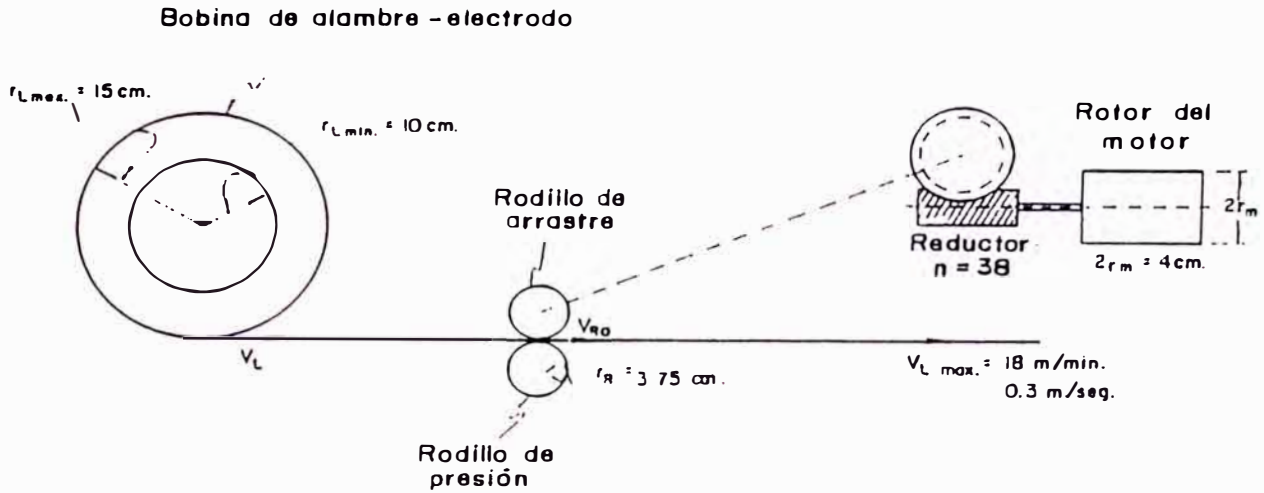


Fig. 6.4 Diagrama esquemático de la unidad de alimentación del alambre-electrodo.

**Momento de Inercia total del sistema ( $J_{me}$ )**

Se reducen los momentos de Inercia del sistema referido al eje de rotación del motor.

$$J_{me} = J_m + \frac{J_R}{n^2} + m \frac{(V_L)^2}{(W_m)^2} \quad (6.8)$$

$J_{me}$  = momento de Inercia total reducido al eje del motor

$J_m$  = momento de Inercia del rotor del motor

$n$  = relación de reducción del reductor de velocidad

$J_R$  = momento de Inercia de los rodillos de arrastre

$m$  = masa del elemento en movimiento de traslación con velocidad tangencial  $V_L$

$V_L$  = velocidad de alimentación del alambre-electrodo

$W_m$  = velocidad angular del motor

**Momento de inercia del rotor del motor ( $J_m$ )**

Material: acero-silicio 2%

Densidad:  $\rho = 7.85 \text{ gr/cm}^3 = 7,850 \text{ kg/m}^3$

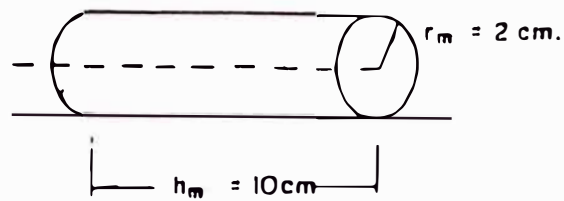


Fig. 6.5 Rotor del motor.

$$J_m = \frac{\pi}{2} \rho h_m r_m^4 = \frac{\pi}{2} (7,850) (10 \times 10^{-2}) (2 \times 10^{-2})^4$$

$$J_m = 1.973 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

**Momento de inercia de los rodillos de arrastre ( $J_R$ )**

Material : Fierro

Densidad :  $\rho = 7,850 \text{ kg/m}^3$

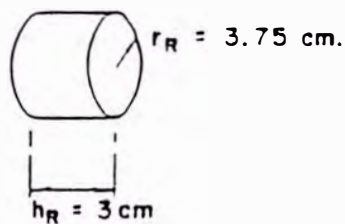


Fig. 6.6 Rodillo de arrastre.

$$J_R = \frac{\pi}{2} \rho h_R r_R^4 = \frac{\pi}{2} (7,850) (3 \times 10^{-2}) (3.75 \times 10^{-2})^4$$

$$J_R = 7.315 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

son dos rodillos

$$2J_R = 14.63 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

El momento de inercia referido al eje del motor

$$\frac{2 J_R}{n^2} = \frac{14.63 \times 10^{-4}}{38^2} = 0.01013 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

**Momento de Inercia del tambor devanador ( $J_L$ )**

$$J_L = m_L \frac{(V_L)^2}{(W_m)^2}$$

$m_c$  = masa del carrete

$m_a$  = masa del bobinado de alambre-electrodo

$$m_L = m_c + m_a$$

$$m_c = 1.255 \text{ kg}$$

$$m_a = 10 \text{ kg}$$

Para:

$$V_{L \text{ max}} = 18 \text{ m/min} = 0.3 \text{ m/seg}$$

$$\omega_{m \text{ max}} = 303.45 \text{ rad/seg}$$

carrete lleno:

$$J_L = (m_c + m_a) (V_{L \text{ max}} / \omega_{m \text{ max}})^2$$

$$J_L = 11.255 (0.3/303.45)^2 = 0.11 \times 10^{-4}$$

carrete vacio:

$$J_L = m_c (V_{L \text{ max}} / \omega_{m \text{ max}})^2$$

$$J_L = 1.255 (0.3/303.45)^2 = 0.01226 \times 10^{-4}$$

Para:

$$V_{L \text{ min}} = 2 \text{ m/min} = 0.033 \text{ m/seg.}$$

$$\omega_{m \text{ min}} = 33 \text{ rad/seg}$$

Carrete lleno:

$$J_L = (m_c + m_a) (V_{L \text{ min}} / \omega_{m \text{ min}})^2$$

$$J_L = 11.255 (0.33/33)^2 = 0.1125 \times 10^{-4}$$

Carrete vacio:

$$J_L = m_c (V_{L \text{ min}} / \omega_{m \text{ min}})^2$$

$$J_L = 1.255 (0.033/33)^2 = 0.01255 \times 10^{-4}$$

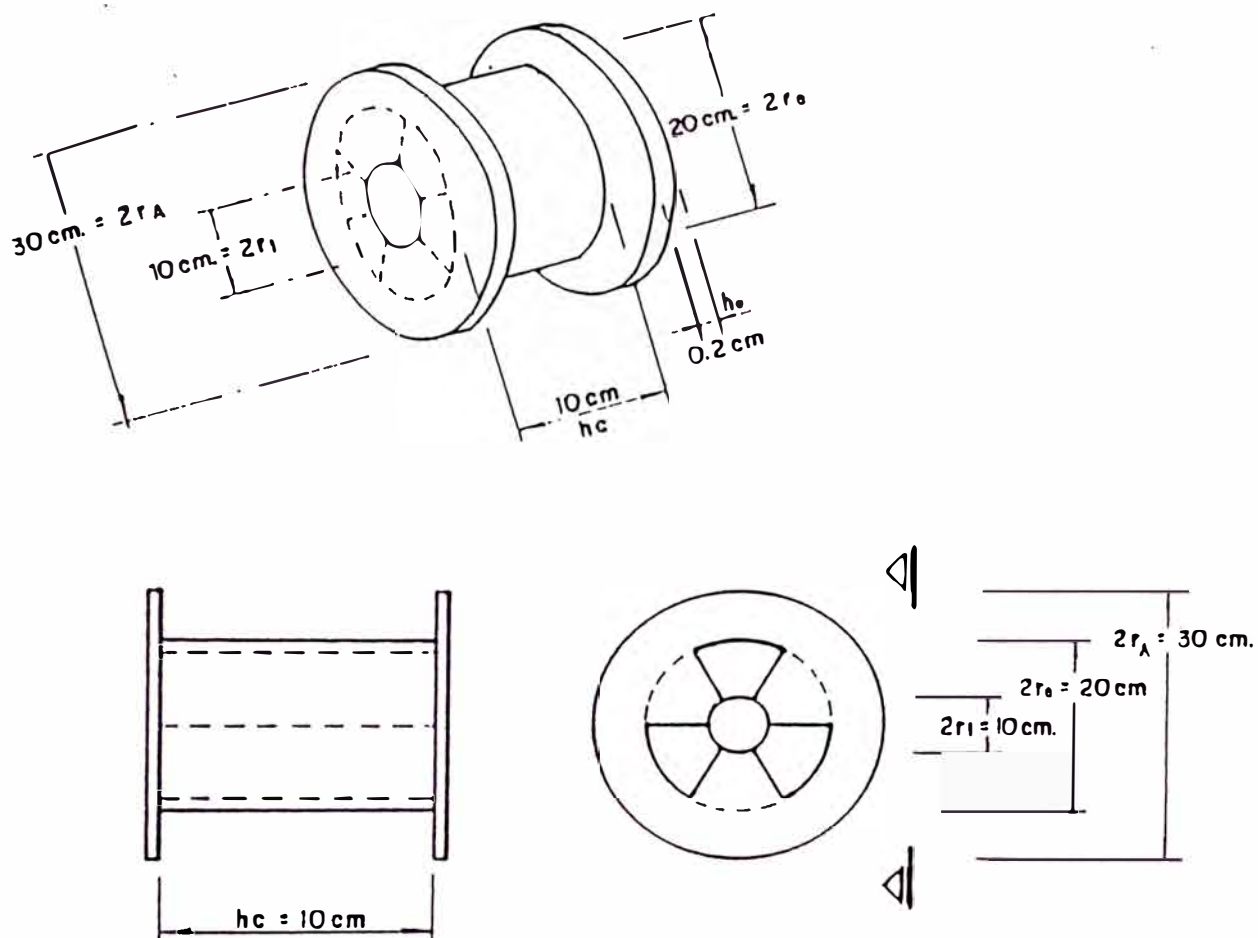


Fig. 6.7 Carrete del alambre-electrodo.

Los valores limites del momento de inercia del carrete serán:

$$J_{L \text{ max}} = 0.1125 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{L \text{ min}} = 0.01226 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

El momento de inercia total del sistema será:

$$J_{me \text{ max}} = 1.973 \times 10^{-4} + 0.01013 \times 10^{-4} + 0.1125 \times 10^{-4}$$

$$J_{me \text{ max}} = 2.096 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{me \text{ min}} = 1.973 \times 10^{-4} + 0.01013 \times 10^{-4} + 0.01226 \times 10^{-4}$$

$$J_{me \text{ min}} = 1.995 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

podemos aproximar:

$$2.0 \times 10^{-4} < J_{me} < 2.1 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

$$J_{me} = 2.1 \times 10^{-4} - 5\% \text{ (kg} \cdot \text{m}^2)$$

cometiendo un error del 5%

Luego:

$$J_{me} = 2.1 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 = 2.1 \times 10^{-4} \text{ Nw} \cdot \text{m} \cdot \text{seg.} \quad (6.7)$$

### 6.5 Cálculo del coeficiente de rozamiento viscoso (Bme)

Se supone que la característica par-velocidad de la carga es una línea recta que va desde el origen hasta el punto correspondiente a la carga nominal.

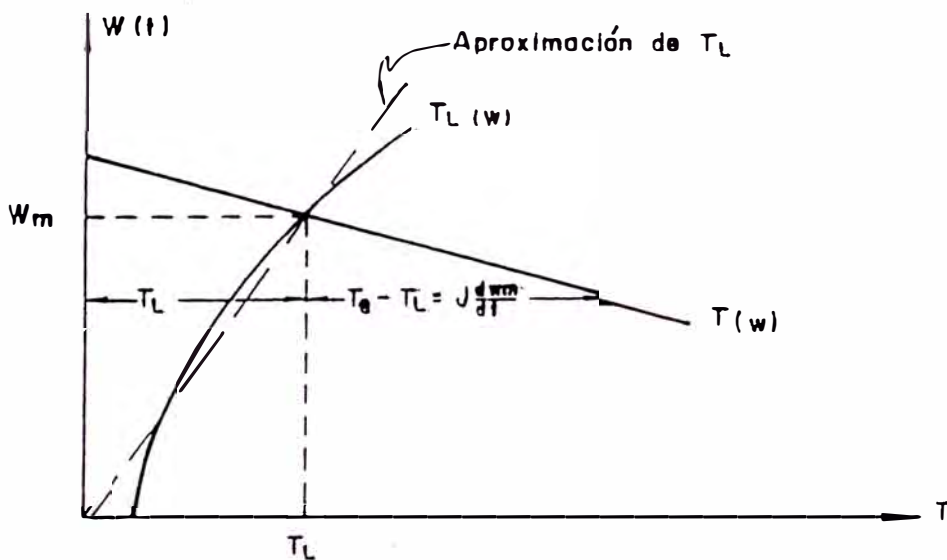


Fig. 6.8 Curva característica par-velocidad.

$$T_e = K\phi i_a(t) = T_L + J_{me} \frac{dW_m(t)}{dt}$$

El par resistente de la carga ( $T_L$ ) es función directa de la velocidad angular del motor.

$$T_L = B_{me} W_m(t)$$

En estado estable toda la potencia convertida es absorbida por el par de carga.

$$T_e W_m(t) = T_L W_m(t)$$

$$T_e = K\phi I_a = T_L = B_{me} \omega_m$$

$$T_e = T_L = 0.3025 \text{ Nw-m}$$

$$B_{me} = \frac{T_L}{\omega_m} = \frac{0.3025}{303.45}$$

$$B_{me} = 9.97 \times 10^{-4} \text{ Nw-m-sec.} \quad (6.10)$$

Estamos asumiendo que  $B_{me}$  es un valor constante.

### 6.6 Control de velocidad

La velocidad de rotación del motor se controla por regulación de la tensión de armadura.

$$V_a = R_a I_a + E_a$$

$$E_a = K\phi \omega_m$$

$$\omega_m = \frac{E_a}{K\phi}$$

La velocidad de rotación del motor es proporcional a la reacción de armadura. Se obtiene un sistema transductor proporcional a la velocidad de rotación del motor, midiendo la reacción de armadura ( $E_a$ ).

Se conecta en serie con el motor una resistencia externa " $R_{ext}$ " proporcional a la resistencia interna de la armadura.

$$R_{ext} = 1/4 \cdot R_a = 1/4 \cdot (1.44) = 0.36\Omega \quad (6.11)$$

La resistencia total del circuito será:

$$R = R_a + R_{ext} = 1.44 + 0.36 = 1.8\Omega \quad (6.12)$$

$$E_a = V_a - R I_a$$

Sea " $\theta$ " el ángulo de disparo de los tiristores:

desarrollando la ecuación diferencial

$$L_a \frac{di_a(\tau)}{dt} + R i_a(\tau) = V_a \text{ sen } \omega t - E_a$$

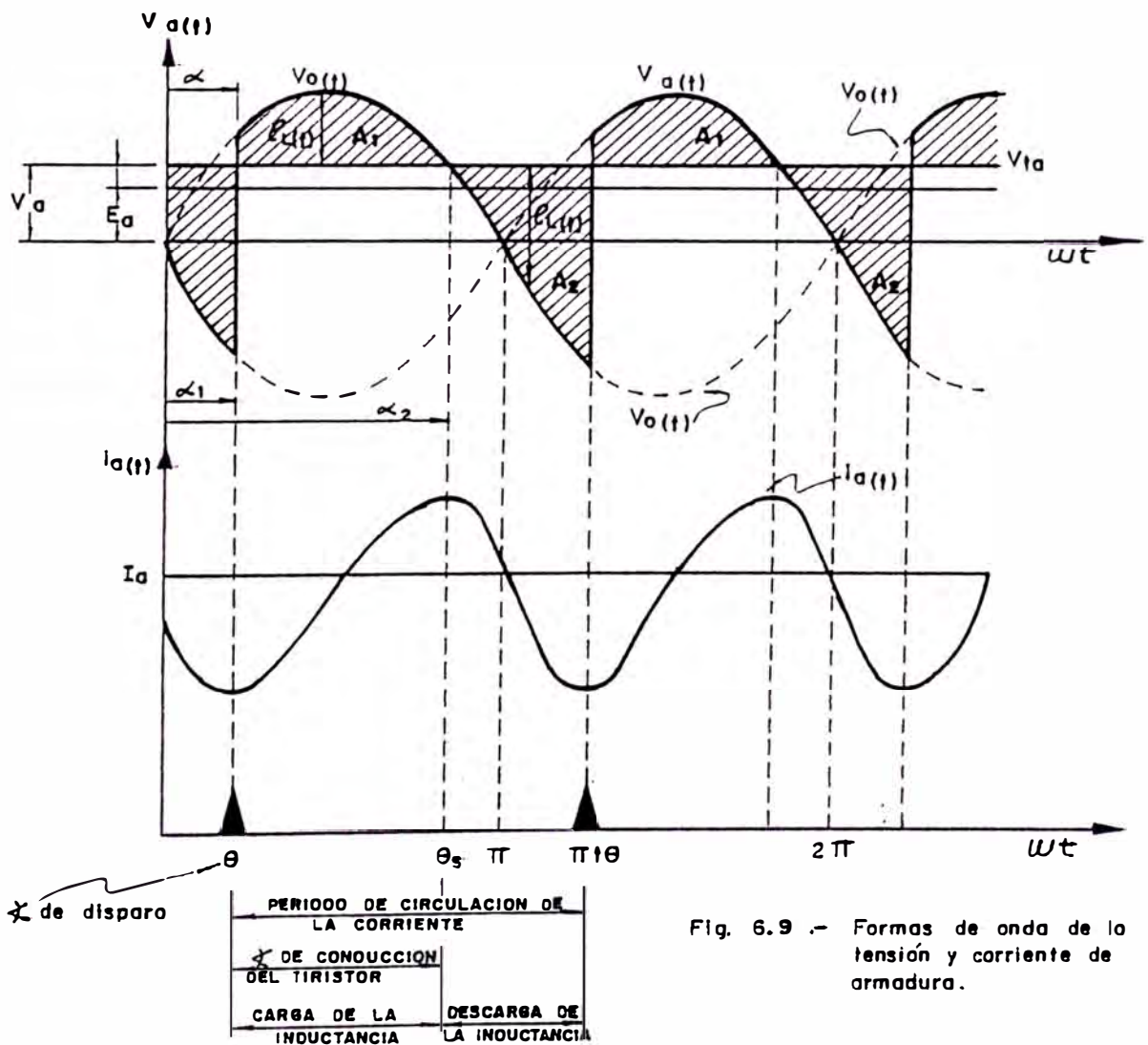
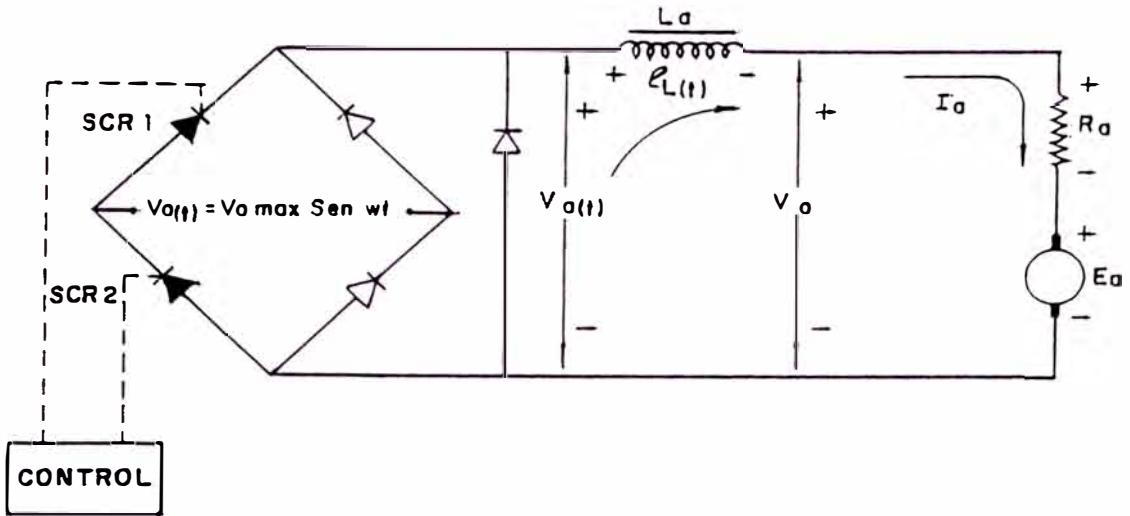


Fig. 6.9 .- Formas de onda de la tensión y corriente de armadura.



para  $\theta \leq \omega t \leq \pi + \theta$

$$I_a = \frac{V_a}{R} \cos \theta - \frac{E_a}{R} \quad (6.13)$$

$$T_e = K\phi I_a = T_L \quad (6.14)$$

$$\omega_m = \frac{V_a \cos \theta - RI_a}{K\phi} \quad (6.15)$$

$$\omega_m = \frac{V_a}{K\phi} \cos \theta - \frac{R}{K\phi^2} T_L \quad (6.16)$$

Cuando el par resistente de la carga ( $T_L$ ) disminuye, el ángulo de disparo  $\theta$  debe aumentar para conservar la velocidad angular del motor ( $\omega_m$ ) constante (Ver figura 6.10).

La velocidad angular del motor será:

$$\omega_m = \frac{V_a}{K\phi} \cos \theta - \frac{R}{K\phi^2} (B_m \omega_m)$$

reordenando:

$$\omega_m = \frac{K\phi}{K\phi^2 + B_m R} V_a \cos \theta \quad (6.17)$$

La velocidad angular en los rodillos de arrastre será:

$$\omega_r = \frac{1}{n} \left( \frac{K\phi}{K\phi^2 + B_m R} \right) V_a \cos \theta \quad (6.18)$$

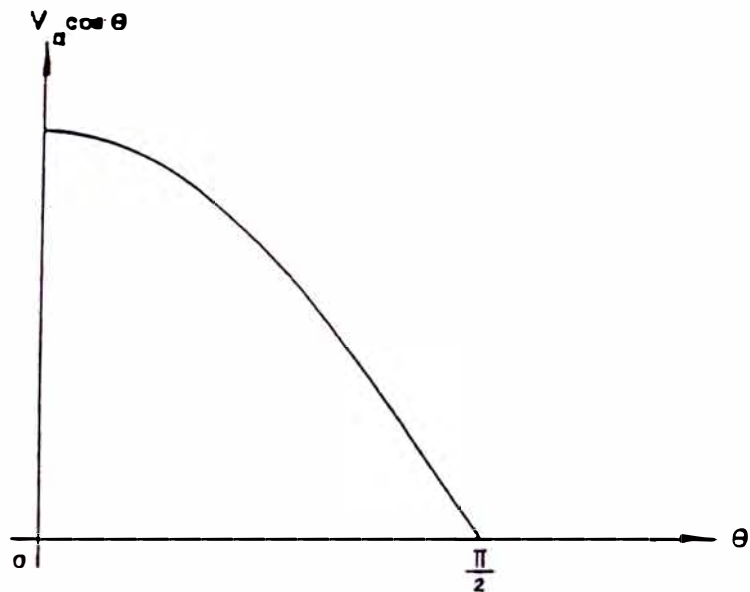


Fig. 6.10 Característica de transferencia del Puente de Tiristores.

Variando el ángulo de disparo " $\theta$ " controlamos la velocidad angular del motor y de los rodillos de arrastre, controlando así la velocidad de alimentación del alambre-electrodo.

#### Cálculo del ángulo de disparo " $\theta$ "

Sabemos:

$$K\phi = 0.10084 \text{ V-seg/rad}$$

$$B_{me} = 9.97 \times 10^{-4} \text{ Nw-m-seg}$$

$$R = 1.8 \ \Omega$$

$$V_a = 36 \text{ V}$$

reemplazando valores en (6.18)

$$W_m = \frac{0.10084}{(0.10084)^2 + (9.97 \times 10^{-4}) 1.8} 36 \cos \theta$$

$$W_m = 303.45 \cos \theta$$

$$W_{max} = 303.45 \text{ rad/seg.} \quad , \quad W_{min} = 33 \text{ rad/seg}$$

$$\text{para } W_{max} : \quad W_m = 303.45 \cos \theta = 303.45$$

$$\theta_1 = 0^\circ$$

para  $\omega_{min}$  :  $\omega_m = 303.45 \cos \theta = 33$

$$\theta_2 = 83.62^\circ$$

Luego la tensión en los terminales de armadura para  $\theta_2$  será:

$$V_a = 36 \cos \theta_2 = 4 \text{ volts.}$$

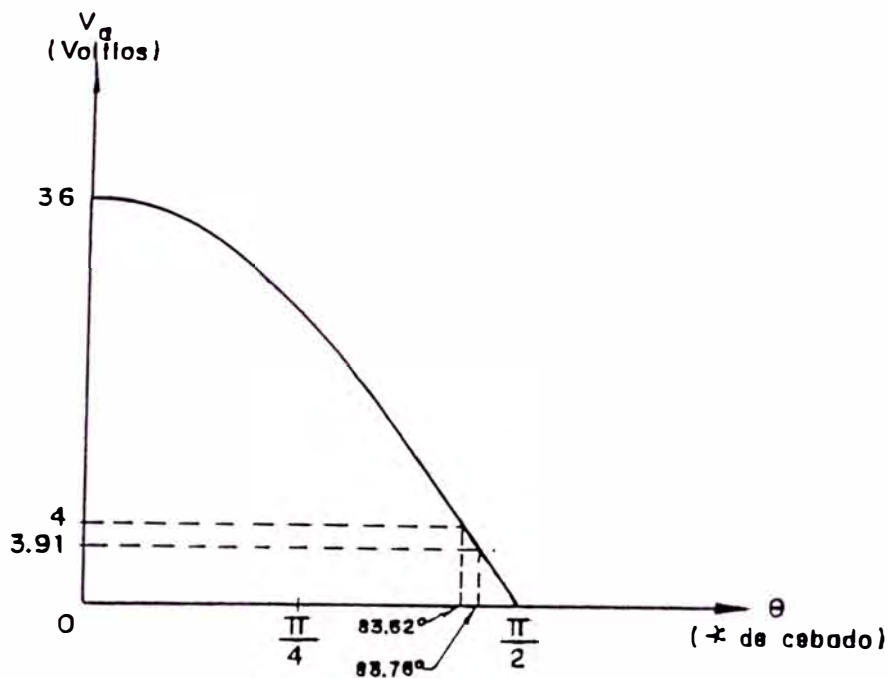


Fig. 6.11 Variación del ángulo de disparo.

### 6.7 Funciones de transferencia del regulador de velocidad de alimentación del alambre-electrodo

El regulador automático de velocidad procesa la señal realimentada de salida comparándola con una señal de referencia previamente ajustada. La señal de error alimenta la entrada del amplificador de potencia, que a su vez establece la señal de potencia requerida por el motor.

El regulador automático de velocidad es un sistema de control de lazo cerrado. La señal realimentada de salida se toma de la resistencia externa ( $R_{ext}$ ) conectada en serie con la armadura.

La velocidad se controla indirectamente controlando la tensión en los bornes de la armadura (Ver figura 6.13).

$$R_{ext} = 1/4 \cdot R_a$$

$$R = R_a + R_{ext}$$

Luego:  $R = 5 R_{ext}$

$$E_a = V_a \cos \theta - 5 R_{ext} I_a$$

$$\frac{E_a}{\omega_m} = K\phi$$

$$K\phi = \text{elemento transductor} = \text{cte.}$$

Al usar este tipo de transductor, eliminamos toda posibilidad de que se introduzcan perturbaciones de alta o baja frecuencia en el sistema de control, como es el caso, cuando se usa un tacómetro como elemento transductor.

$$\omega_m = \frac{V_a \cos \theta - 5 R_{ext} I_a}{K\phi} \quad (6.19)$$

La señal realimentada de salida resultante "E<sub>a</sub>" se compara con un voltaje de referencia "V<sub>R</sub>". La señal de error "V<sub>e</sub>" se amplifica tantas veces tal que suministre la nueva tensión en los bornes de la armadura "V<sub>a</sub>" que mantenga constante la velocidad angular del motor y la velocidad de avance del alambre-electrodo.

$$E_a = V_a \cos \theta - 5 R_{ext} I_a$$

$$V_R - E_a = V_e$$

$$\text{nueva } V_a = G V_e$$

$$G = \text{ganancia del lazo de control}$$

$$V_R = \text{voltaje de referencia}$$

La figura 6.12 muestra el diagrama de bloques del regulador de velocidad. El lazo de control está conformado por el sensor y transductor de velocidad; el controlador de velocidad (comparador y compensador), limitador de corriente, circuito de control de fase (sincronismo de disparo de tiristores y conversión tensión-ángulo de disparo) y la unidad de potencia.

Al regulador de velocidad se le adiciona un limitador de corriente que tiene una salida lineal por debajo de un nivel predeterminado y una salida constante por encima del nivel. Esto se consigue mediante un diodo Zener limitador. De esta forma la transición del modo de operación transitoria al estable se hace de manera continua y suave.

Cuando el motor arranca, la señal aplicada al controlador de velocidad es bastante grande, ya que la velocidad angular es cero ( $\omega_m = 0$ ) y el voltaje realimentado también es cero ( $E_a = 0$ ) y el voltaje de error  $V_e = V_R - E_a$  será una señal bastante grande que satura el regulador de velocidad.

La señal de salida tendrá un valor máximo determinado por el diodo Zener (enclavador del límite de corriente). Esta señal máxima de salida se mantiene constante, mientras el motor acelera hasta alcanzar el valor de velocidad angular deseado. El valor máximo de la señal de salida corresponde a un valor máximo permisible de la corriente de armadura.

Cuando el motor alcanza el valor de velocidad angular deseado, el regulador de velocidad comienza a actuar, manteniendo la velocidad angular del motor en un valor constante escogido.

El regulador de velocidad comprende:

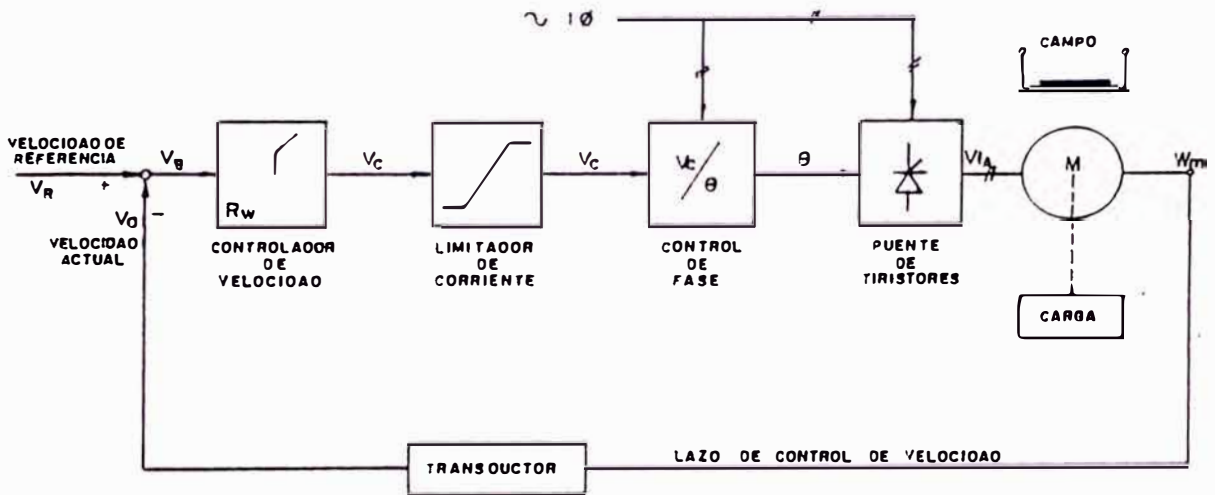


Fig. 6.12 Diagrama de Bloques del regulador de velocidad de lazo cerrado

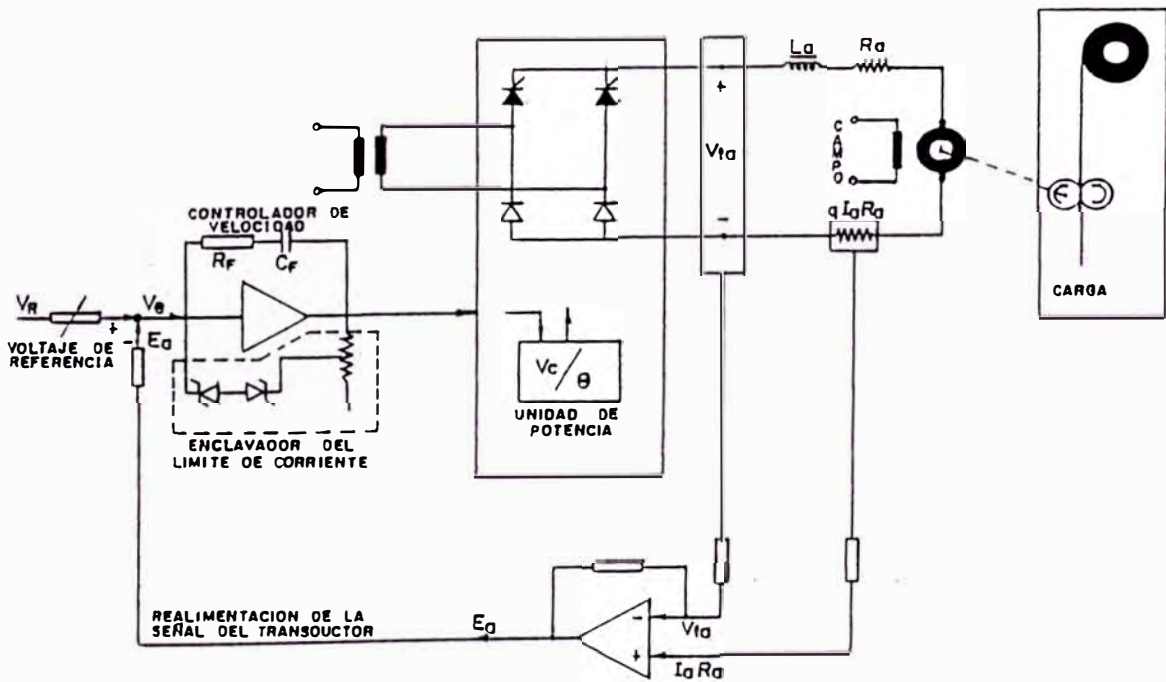


Fig. 6.13 - Diagrama elemental del regulador de velocidad.

- Un controlador de velocidad del tipo PI (Proporcional e integral).
- Un filtro contra ruidos de alta de frecuencia que pudieran haber sido amplificadas por el controlador PI.

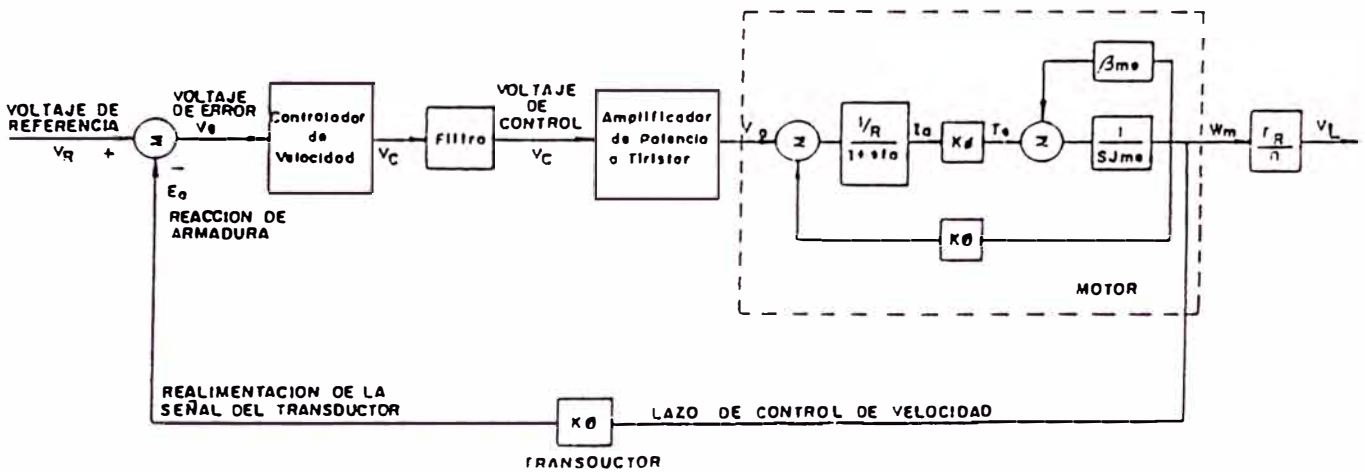


Fig. 6.14 Funciones de transferencia del regulador.

6.7.1 Primera etapa: controlador de velocidad PI

En el control proporcional e integral se junta la acción del control proporcional que tiende a estabilizar el sistema y la acción del control integral que tiende a eliminar o reducir cualquier error en estado estable del sistema en respuesta a diferentes entradas.

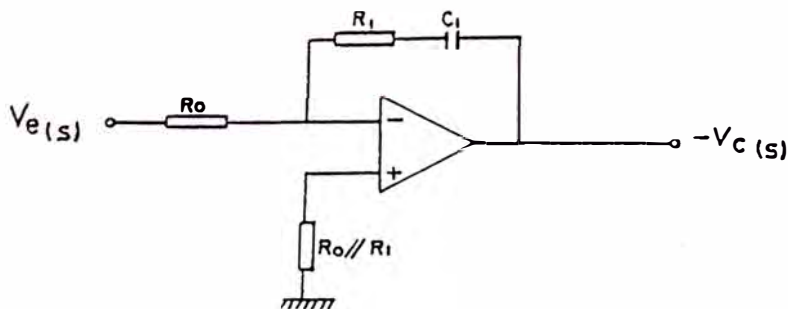


Fig. 6.15 Control proporcional e integral.





$$V_c(s) = -G \left( \frac{1 + st_1}{st_1} \right) (V_R'(s) - V_A'(s) + 5V_a'(s)) \quad (6.20)$$

$$V_R' = \frac{V_R}{10}, \quad V_A' = \frac{V_A}{10}, \quad V_a' = \frac{V_a}{10}, \quad 5V_a' = \frac{5V_a}{10}$$

$$G = \frac{100 \text{ K}\Omega}{10 \text{ K}\Omega} = 10, \quad t_1 = R_1 C_1 = (100 \text{ K}\Omega) C_1$$

**6.7.2 Segunda etapa: filtro de ruidos de alta frecuencia**

La segunda etapa es de atraso simple y sirve para filtrar ruidos de alta frecuencia que fueron amplificados por la primera etapa y tiene una ganancia 1 para bajas frecuencias.

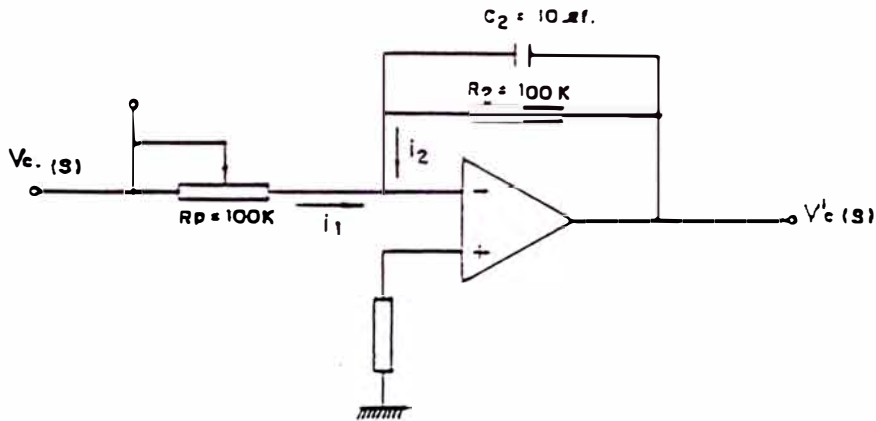


Fig. 6.17 Diagrama de bloques del filtro pasabajo.

$$\frac{V_c'(s)}{V_c(s)} = \frac{-K}{1 + st_2}$$

$$K = \frac{100 \text{ K}\Omega}{100 \text{ K}\Omega} = 1, \quad t_2 = R_2 C_2 = (100 \text{ K}\Omega) C_2$$

$$V_c'(s) = \left( \frac{1}{1 + st_2} \right) V_c(s) \quad (6.21)$$

### 6.7.3 Amplificador de potencia a tiristor (voltaje de control)

Se sincroniza el disparo de los tiristores con la red, a través de la onda de diente de sierra. El voltaje de control ( $V_c'$ ) obtenido a la salida del controlador de velocidad se resta algebraicamente con la onda de sierra ( $V_s$ ). La diferencia  $V_s - V_c'$  es aplicado al generador de pulsos de disparo de los tiristores.

La onda de diente de sierra ( $V_s$ ) tiene la siguiente ecuación:

$$V_s = \left( \frac{-V_{s0}}{\pi/2} \right) \omega t = -V_{s0} \left( \frac{\omega t}{\pi/2} \right)$$

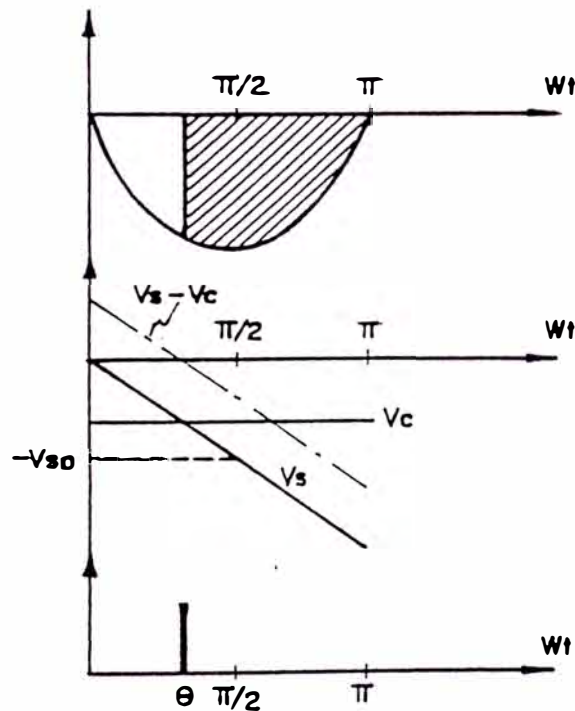


Fig. 6.18 Sincronización del ángulo de disparo con la red.

En el instante  $\omega t = \theta$ ,  $V_s - V_c' = 0$  se genera el pulso de disparo.

$$V_s - V_c' = -V_{s0} \left( \frac{\theta}{\pi/2} \right) - V_c' = 0$$

$$\theta = - \frac{\pi}{2} \left( \frac{V_c'}{V_{s0}} \right)$$

De acuerdo a la función de transferencia de la unidad de potencia:

$$V_a = V_{a \max} \cos \theta = V_{a \max} \cos \left( \frac{-\pi}{2} \cdot \frac{V_c''}{V_{s0}} \right)$$

$$V_a = V_{a \max} \cos \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{V_c''}{V_{s0}} \right)$$

que es una función de dependencia no lineal como muestra la línea continua de la fig. 6.19.

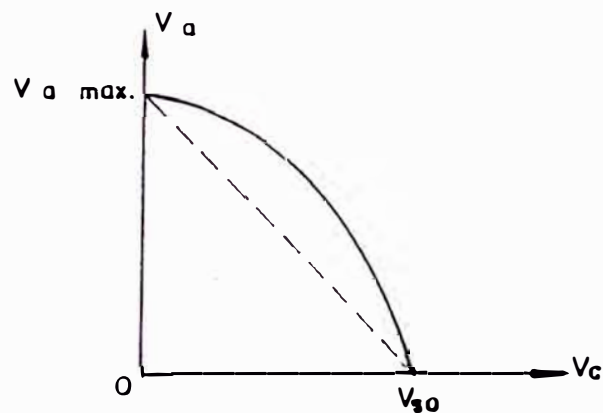
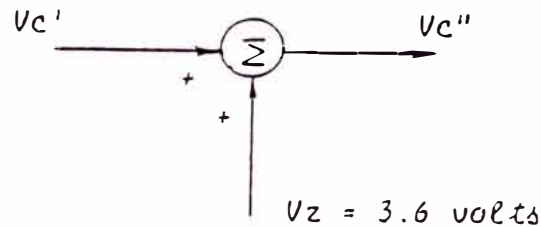


Fig. 6.19 Función de transferencia de la unidad de potencia.

Linealizando la función de transferencia entre  $V_a$  y el voltaje de control  $V_c''$  tendremos:

$$V_a = V_{a \max} - \left( \frac{V_{a \max}}{V_{s0}} \right) V_c'' \quad (6.22)$$

El voltaje de control ( $V_c''$ ) se obtiene de la interacción del voltaje a la salida del filtro de ruidos ( $V_c'$ ) y de una fuente fija proveniente de un diodo Zener ( $V_z$ ).



$$V_c'' = V_c' + V_z$$

$$V_a = V_{a \max} - \frac{V_{a \max}}{V_{so}} (V_c' + V_z) \quad (6.23)$$

La expresión anterior es válida para operación en estado estable.

En estado transitorio hay que tomar en cuenta el tiempo muerto ( $t_u$ ) de disparo del tiristor. El tiempo muerto ( $t_u$ ) aparece como consecuencia del retraso existente entre la respuesta del tiristor y su circuito de disparo con respecto al voltaje de control que comanda el ángulo de disparo.

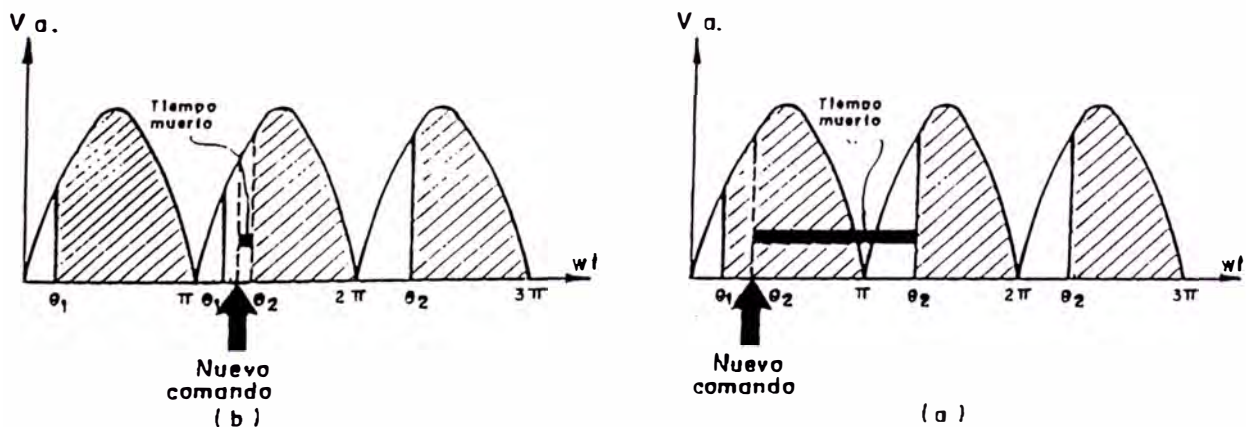


Fig. 6.20 Tiempo muerto de rectificador a tiristores.  
 a.- Nuevo comando aplicado después de disparado el tiristor.  
 b.- Nuevo comando aplicado antes de ser disparado el tiristor.

$\theta_1$  es el instante en el cual se dispara el tiristor debido a un voltaje de control o comando  $V_c \theta_1$  y  $\theta_2$  es el instante en que se produce un nuevo disparo debido a  $V_c \theta_2$ .

Las líneas punteadas indican el instante en que el nuevo voltaje de control es aplicado. Esto puede ocurrir antes (fig. 6.20.a) o después (fig. 6.20.b) que el tiristor ha recibido el pulso de disparo. En el primer caso, el tiristor es disparado por  $V_c \theta_1$  y cuando recibe un nuevo pulso de disparo en el instante  $\theta_2$  correspondiente a  $V_c \theta_2$  no responde a ninguna señal porque el tiristor ya ha sido disparado. En el segundo caso el tiristor recibe su pulso de disparo en el instante  $\theta_2$  que precede a  $\theta_1$ . En ambos casos el tiempo muerto aparece entre el momento en que el nuevo voltaje de control es aplicado  $V_c \theta_2$  y el momento cuando el voltaje instantáneo  $V_a$  realmente aparece. El tiempo muerto " $t_u$ " es un parámetro aleatorio cuyo valor mínimo es cero y cuyo valor máximo es  $1/f_m$ , siendo " $f_m$ " la frecuencia de la fuente. El tiempo muerto ( $t_u$ ) estadístico de los rectificadores a tiristores es tomado entre el promedio de ambos extremos.

$$t_u = \frac{1}{2 \times f_m}$$

El voltaje de control ( $V_c''$ ) varía con el tiempo de la siguiente forma:

$$V_c'' = \begin{cases} V_c''(t), & \text{para } t > 0 \\ 0, & \text{para } t < 0 \end{cases}$$

El voltaje en los bornes de la armadura varía con el tiempo.

$$V_a = \begin{cases} K_a V_c (t - t_u) , & \text{para } t > t_u \\ 0 , & \text{para } t \leq t_u \end{cases}$$

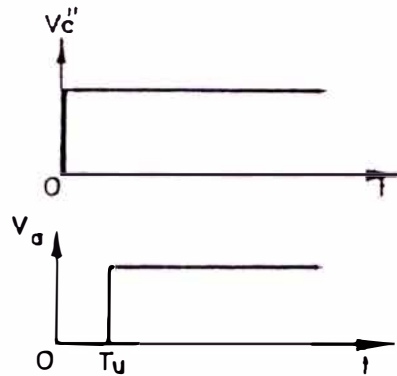


Fig. 6.21 Variación con el tiempo de  $V_a$  frente a la entrada escalón unitario de  $V_c''$

Aplicando la transformada de Laplace

$$V_a(s) = \int_0^{\infty} K_a e^{-st} V_c''(t - t_u) dt$$

$$V_a(s) = K_a e^{-st_u} V_c''(s)$$

Función de transferencia de la unidad de potencia

$$\frac{V_a(s)}{V_c''(s)} = K_a e^{-st_u} = \frac{K_a}{e^{st_u}}$$

Como  $t_u$  es muy pequeño (del orden de unos pocos milisegundos), el denominador puede ser expandido en una serie de potencias, de los cuales sólo se considerará los dos primeros términos.

$$e^{st_u} \approx 1 + st_u$$

$$\frac{V_a(s)}{V_c''(s)} \approx \frac{K_a}{1 + st_u}$$

Luego se puede considerar el tiempo muerto " $t_u$ " como un tiempo constante de atraso entre  $V_a$  y  $V_c''$ .

$$V_a(s) = \left( \frac{K_a}{1 + s t_a} \right) V_c''(s) \quad (6.24)$$

El valor de  $K_a$  (amplificador de potencia) puede ser encontrado de la relación entre  $V_a$  y  $V_c''$  en estado estable.

$$V_a = V_{a \text{ max}} - \left( \frac{V_{a \text{ max}}}{V_{a0}} \right) V_c'' \quad (6.22)$$

#### 6.7.4 Función de transferencia del motor

$$t_a = \frac{L_a}{R} = 38.89 \times 10^{-3} \text{ seg} , \quad t_m = \frac{J_m R}{K \phi^2} = 37.17 \times 10^{-3} \text{ seg}$$

$t_a$  = constante de tiempo eléctrico del inducido.

$t_m$  = constante de tiempo mecánica del motor

$$K \phi = 0.10084 \frac{\text{Nw-m}}{\text{Amp}}$$

$$J_m = 2.1 \times 10^{-4} \text{ Nw - m - seg}^2$$

$$B_m = 9.97 \times 10^{-4} \text{ Nw - m - seg}$$

$$p = \frac{d}{dt} = \text{operador derivada}$$

$$i_a = \frac{V_a - K \phi \omega_m}{R} \cdot \frac{1}{1 + p t_a}$$

$$\omega_m = \frac{K \phi}{J_m} i_a \cdot \frac{1}{B_m/J_m + p}$$

$$\omega_m(s) = \left( \frac{1}{K \phi} \right) \cdot \left( \frac{1}{[t_m(1 + s t_a)(B_m/J_m + s) + 1]} \right) V_a(s)$$

#### Función de transferencia de carga

$V_L$  = velocidad de alimentación del alambre-electrodo

$r_R$  = radio del rodillo de arrastre

$n$  = relación de reducción del reductor de velocidad

$$V_L(s) = \frac{r_R}{n} \cdot W_m(s)$$

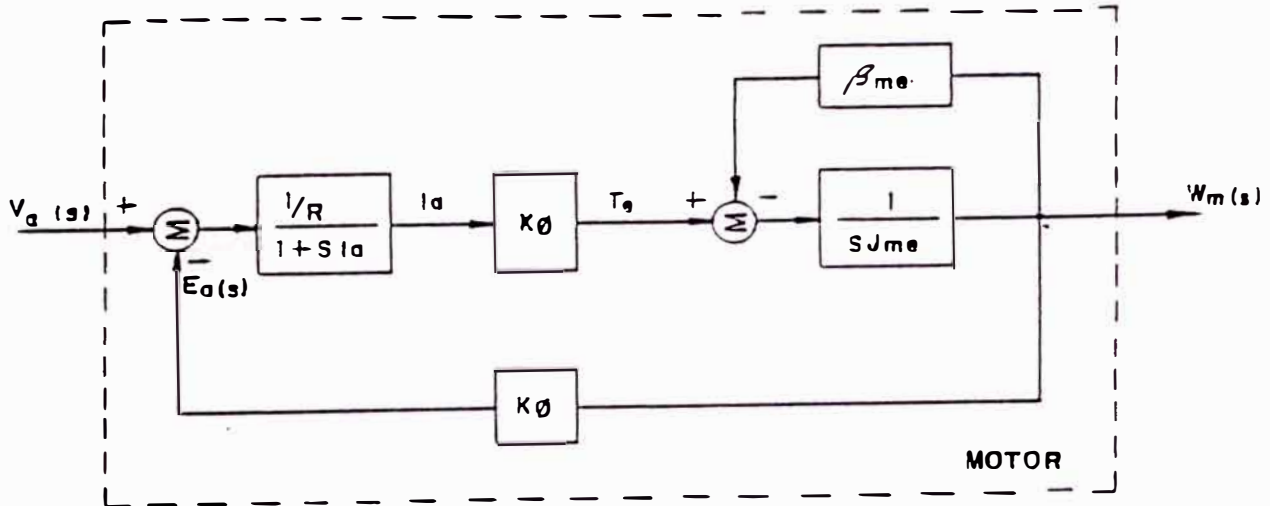


Fig. 6.22 Función de transferencia del motor.

6.7.5 Función de transferencia del control automático de velocidad

$$V_A(s) = \frac{K_A}{1 + st_u} \cdot \frac{1}{1 + st_1} \cdot \frac{1 + st_1}{st_1} \cdot V_e(s)$$

$$V_e(s) = V_R(s) - V_A(s) + R I_A(s) = \text{señal de error}$$

$$\text{pero } E_A(s) = V_A(s) - R I_A(s)$$

$$V_e(s) = V_R(s) - E_A(s)$$

$$V_A(s) = \frac{K_A}{1 + st_u} \cdot \frac{1}{1 + st_2} \cdot \frac{1 + st_1}{st_1} \cdot [V_R(s) - V_A(s) + R I_A(s)]$$

donde:

$\frac{1}{1 + st_u}$  = función de transferencia del tiempo muerto de disparo del tiristor



$\frac{1}{1 + st_2}$  = función de transferencia del filtro de ruidos de alta frecuencia.

$\frac{1 + st_1}{st_1}$  = función de transferencia del controlador de velocidad

$K_a$  = Ganancia del control automático

$t_u$  =  $4.16 \times 10^{-3}$  seg = tiempo muerto del tiristor

$V_R$  = voltaje de referencia del control automático

$V_a$  = voltaje de los bornes de la armadura

$V_e$  = voltaje de error

$R$  =  $R_a + R_{ext}$  = resistencia total de la armadura

$I_a$  = corriente de la armadura

$t_1 = C_1 R_1$  = constante de tiempo del controlador de velocidad

$C_1$  = condensador del OPAMP N° 1

$R_1$  = resistencia del OPAMP N° 1

$t_2 = C_2 R_2$  = constante de tiempo del filtro de ruidos de alta frecuencia

$C_2$  = condensador del OPAMP N° 2

$R_2$  = resistencia del OPAMP N° 2

Si hacemos  $t_1 = t_2$  la función de transferencia cambia a:

$$V_a(s) = \frac{1}{1 + t_u} \cdot \frac{K_a}{st_1} [V_R(s) - V_a(s) + R I_a(s)]$$

La función de transferencia del sistema será:

$$\frac{W_m(s)}{V_R(s)} = \frac{d}{K\phi s (s^2 + 2as + \omega_n^2 + d)}$$

Si nuevamente hacemos los siguientes reemplazos:

$$a_1 = a - p/2$$

$$\omega_{n1} = \sqrt{\omega_n^2 - (2a - p) p}$$

$$\delta_1 = \frac{a_1}{\omega_{n1}}$$

$$p = \frac{2a(1-2\delta_1^2) - 2\delta_1 \sqrt{\omega_n^2 - 4\delta_1^2 (\omega_n^2 - a^2)}}{1 - 4\delta_1^2}$$

La función de transferencia cambia a:

$$\frac{W_m(s)}{V_R(s)} = \frac{\omega_{n1}^2 p}{K\phi s (s+p) (s^2 + 2\delta_1 s + \omega_{n1}^2)}$$

Si reemplazamos:  $t_k = 1/p$

$$\frac{W_m(s)}{V_R(s)} = \frac{\omega_{n1}^2}{K\phi s (st_k + 1) (s^2 + 2\delta_1 \omega_{n1} s + \omega_{n1}^2)}$$

En el dominio del tiempo:

$$\text{definimos: } \beta = \frac{1}{\delta_1 \omega_{n1} t_k} = \frac{p}{a - p/2}$$

$$\frac{K\phi W_m(t)}{V_R(t)} = 1 - \frac{e^{-\sigma_1 \omega_{n1} t}}{\beta \delta_1^2 (\beta - 2) + 1} \left\{ \beta \delta_1 (\beta - 2) \cos \sqrt{1 - \delta_1^2} \omega_{n1} t \right. \\ \left. + \frac{\beta \delta_1 [\delta_1^2 (\beta - 2) + 1] \text{sen } \sqrt{1 - \delta_1^2} \omega_{n1} t}{\sqrt{1 - \delta_1^2}} \right\} - \\ - \frac{e^{-t/t_k}}{\beta \delta_1^2 (\beta - 2) + 1}$$

La figura 6.23 muestra las curvas de respuesta al escalón unitario de este sistema de 3er. orden, donde  $\beta$  es el parámetro que define la familia de curvas.

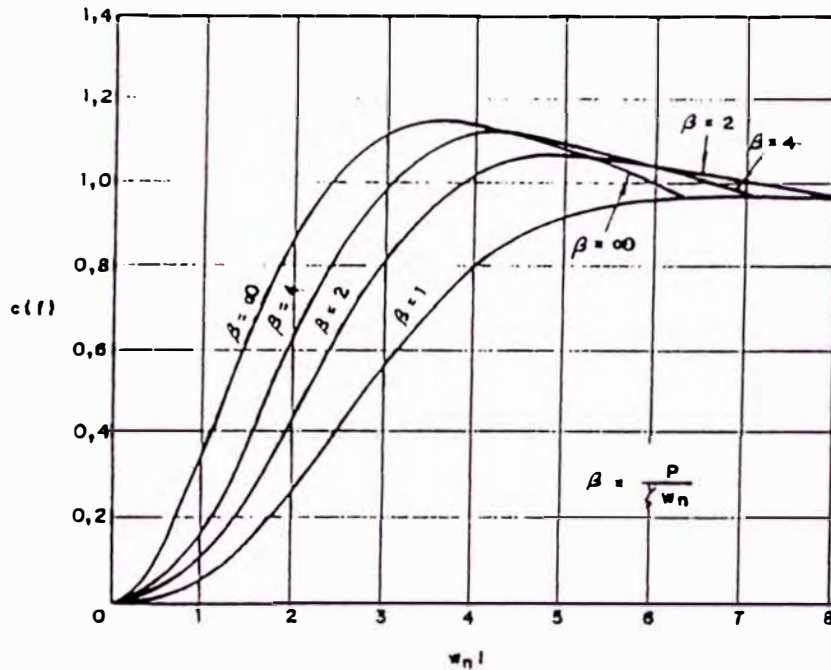


Fig. 6.23 Curvas de respuesta al escalón unitario del sistema de tercer orden.

En las curvas de respuesta se observa que para  $\beta = 1$  se obtiene el valor óptimo "Críticamente amortiguado".

Para diferentes valores de " $\delta_1$ " obtendremos la siguiente tabla con los diferentes valores de:

$\delta_1$	$\rho$	$\alpha_1$	$\omega_{n1}$	$t_K$ (mseg)	$t_1$ (seg)	$C_1$ (uf)	$R_1$ (K $\Omega$ )	$\beta$
0.53	0.507	14.98	28.26	1971	17.07	170.76	100	0.03
0.51	2.77	13.85	27.15	361	3.39	33.87	100	0.20
0.50	3.74	13.36	26.72	267	2.59	25.91	100	0.28
0.45	7.91	11.27	25.05	126	1.39	13.90	100	0.70
0.40	10.85	9.81	24.52	92	1.06	10.60	100	1.11
0.33	14.37	8.05	24.14	69	0.83	8.25	100	1.80
0.25	18.30	6.08	24.32	54	0.64	6.39	100	3.01
0.20	20.21	4.78	23.88	47	0.58	5.80	100	4.23
0.10	25.24	2.61	26.15	39	0.40	4.00	100	9.65

Las curvas de respuesta del sistema para los diferentes valores de  $\beta$  se muestra en la figura 6.24.

En nuestro caso cuando  $\delta_z = 0.4$ ,  $\beta = 1.11$ , siendo este valor el más próximo al valor críticamente amortiguado.

$$\text{Luego: } t_1 = C_1 R_1 = t_2 = C_2 R_2 \quad (6.23)$$

para  $\beta = 1.11$  tenemos  $t_1 = 1.06$

$$\text{Si } R_1 = 100 \text{ K}\Omega \quad (6.24)$$

El valor del condensador tendria que ser:

$$C_1 = 10.6 \mu\text{f}$$

eligiendo un valor comercial

$$C_1 = 10 \mu\text{f} \quad (6.25)$$

para este valor de  $C_1$  tendremos los valores de las demás variables.

$$t_1 = t_2 = C_1 R_1 = C_2 R_2 = 1.00$$

$$\delta_z = 0.388$$

$$\alpha_z = 9.47$$

$$\omega_{n_z} = 24.41$$

$$\rho = 11.53$$

$$t_k = 86.75 \times 10^{-3} \text{ seg}$$

$$\beta = 1.2172 \approx 1.22$$

Si hubiéramos resuelto la función de transferencia considerando el tiempo muerto " $t_u$ " hubiéramos obtenido los siguientes valores:

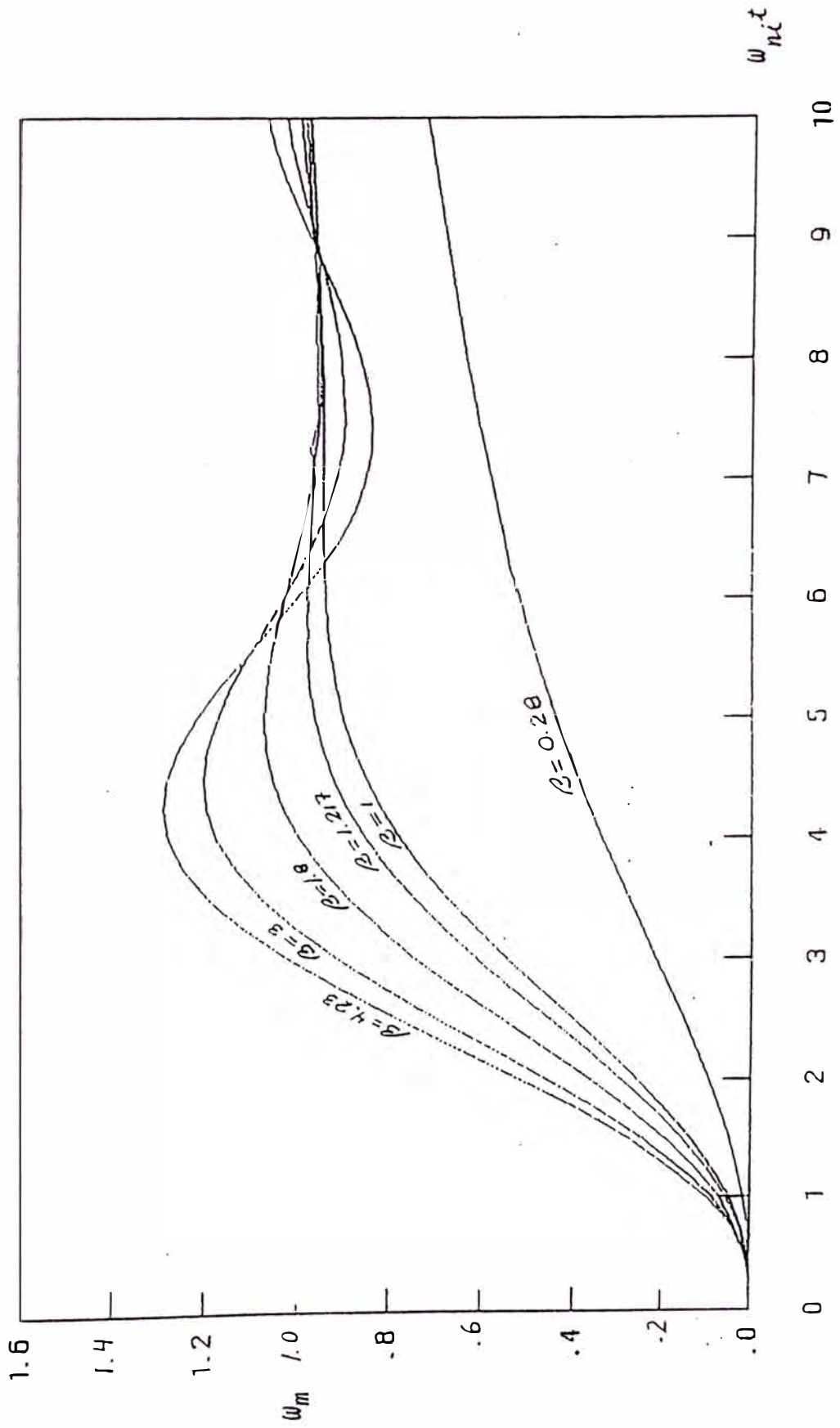
$$\delta_z = 0.3694$$

$$\alpha_z = 9.08$$

$$\omega_{n_z} = 24.58$$

$$\rho = 11.54$$

Figura 6.24.- CURVAS DE RESPUESTA DEL SISTEMA



$$t_k = 86.63 \times 10^{-3} \text{ seg}$$

$$\beta = 1.27$$

Lo cual no hubiera afectado los cálculos obtenidos con la aproximación hecha considerando  $t_u \approx 0$ .

El valor de  $t_1$  se obtuvo de:

$$t_1 = \frac{K_a}{t_m t_n d} = \frac{K_a}{t_m t_n \omega_{n1}^2 p}$$

El tiempo que toma el sistema para llegar al estado estable es según la figura 6.24.

$$W_{m(\infty)} = 0.8 W_m \text{ max}$$

$$\omega_{n1} t = 3.5 \text{ y } \omega_{n1} = 24.41$$

$$t_s = \frac{3.5}{24.41} = 143 \times 10^{-3} \text{ seg} \quad (6.26)$$

$t_s$  = tiempo de establecimiento del sistema.

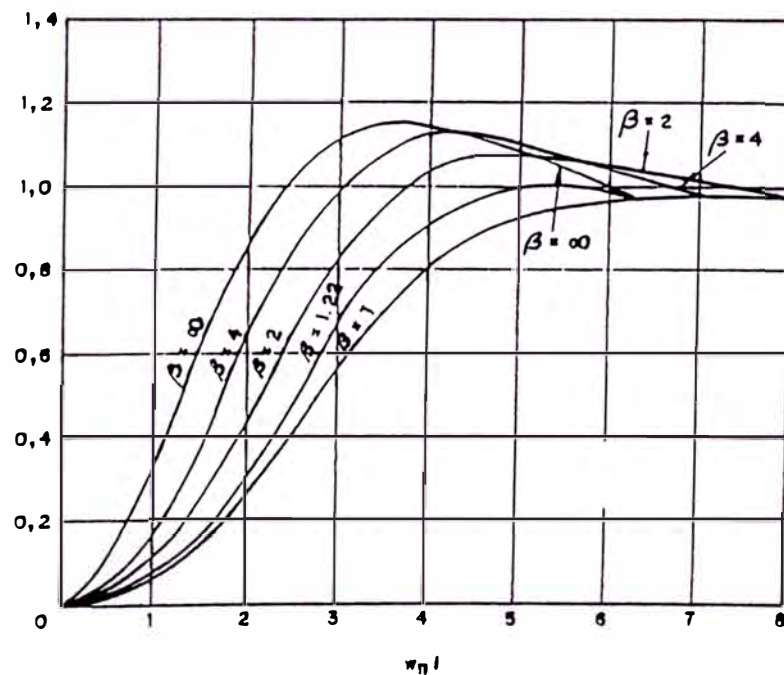


Fig. 6.24 Curvas de respuesta al escalón unitario del sistema de tercer orden.

La respuesta del sistema del motor frente a la entrada de un escalón unitario será:

$$\frac{W_m(s)}{V_R(s)} = \frac{1}{K\phi} \cdot \frac{W_{n1}^2}{s(st_k+1)(s^2 + 2\delta_1 W_{n1}s + W_{n1}^2)}$$

cuando  $t = \infty$  y  $s = 0$

$$\frac{W_m(s)}{V_R(s)} = \frac{1}{K\phi}$$

La respuesta del sistema motor+carga frente a la entrada de un escalón unitario será:

$$\frac{V_L(s)}{V_R(s)} = \frac{r_R}{n K\phi} \cdot \frac{W_{n1}^2}{s(st_k+1)(s^2+2\delta_1 W_{n1}s+W_{n1}^2)}$$

cuando  $t = \infty$  y  $s = 0$

$$\frac{V_L(\infty)}{V_R(\infty)} = \frac{r_R}{n K\phi} = \frac{3.75 \times 10^{-2}}{38 \times 0.10084} = 9.78 \times 10^{-3}$$

La función de transferencia que relaciona la velocidad angular del motor con el par resistente es:

$$\frac{W_m(s)}{T_L(s)} = -\frac{R}{K\phi^2} \cdot \frac{W_{n1}^2(1+st_a)}{(1+st_k)(s^2+2\delta_1 W_{n1}s+W_{n1}^2)}$$

La función de transferencia entre la velocidad de alimentación del alambre-electrodo y el torque resistente es:

$$\frac{V_L(s)}{T_L(s)} = \frac{-R}{K\phi^2} \cdot \frac{r_R}{n} \cdot \frac{W_{n1}^2(1+st_a)}{(1+st_k)(s^2+2\delta_1 W_{n1}s+W_{n1}^2)}$$

cuando  $t = \infty$  y  $s = 0$

$$\frac{W_m(\infty)}{T_L(\infty)} = -\frac{R}{K\phi^2} = \frac{1.8}{(0.10084)^2} = -177$$

Siendo la variación del par resistente:

$$T_{L(\infty)} = 0 - T_L = 0 - 0.3025 = -0.3025 \text{ Nw-m}$$

$$\omega_{m(\infty)} = -177 \cdot T_{L(\infty)} = (-177) \cdot (-0.3025) = 53.55 \text{ rad/seg}$$

$$\omega_{m(\infty)} = \omega_{m \text{ vacio}} - \omega_{m \text{ carga}}$$

$$\omega_{m(\infty)} = 357 - 303.45 = 53.55 \text{ rad/seg} \quad (6.27)$$

De esto se concluye que la variación de velocidad angular del motor depende de la resistencia interna de la armadura ( $R_a$ ) y de la resistencia externa ( $R_{ext}$ ) conectada en serie con la armadura. También depende de la constante  $K\phi$  propia de las características internas del motor.

La variación de la velocidad de alimentación del alambre-electrodo ( $V_L$ ) debido a la variación del par resistente " $T_L$ " es: cuando  $t = \infty$  y  $s = 0$

$$\frac{V_{L(\infty)}}{T_{L(\infty)}} = - \frac{R}{K\phi^2} \cdot \frac{r_m}{n} = \frac{-1.8 \times 3.75 \times 10^{-2}}{(0.10084)^2 \times 38} = -0.17$$

$$V_{L(\infty)} = -0.17 \cdot T_{L(\infty)} = (-0.17) \cdot (-0.3025) = 0.05 \text{ m/seg}$$

$$V_{L(\infty)} = 0.05 \text{ m/seg} = 3 \text{ m/seg} \quad (6.28)$$

Para una velocidad de alimentación de:  $V_L = 18 \text{ m/min.}$ , en el instante de arranque la velocidad será:

$$V_{L \text{ arranque}} = V_L + V_{L(\infty)} = 18 + 3 = 21 \text{ m/min} \quad (6.29)$$

que se estabiliza en  $18 \text{ m/min.}$  después de  $143 \times 10^{-3} \text{ seg.}$

La ecuación característica de la velocidad angular del motor en estado estable es:

$$\omega_m = \frac{V_a}{K\phi} - \frac{R}{K\phi^2} T_L$$

donde:  $V_a = V_{a \text{ max}} \cos \theta$

También sabemos que del controlador de velocidad hemos obtenido " $V_a$ " en función del voltaje de control de disparo de los tiristores.



$$V_a = V_{a \text{ max}} - \frac{V_{a \text{ max}}}{V_{\infty}} \cdot V_c''$$

que se transforma en  $V_a = -10 V_c''$

donde:  $V_c'' = V_R - E_a = V_R - K\phi \omega_m$

nueva  $V_a = -10 (V_R - K\phi \omega_m)$

reemplazando en la ecuación característica

$$\omega_m = \frac{-10 (V_R - K\phi \omega_m)}{K\phi} - \frac{R}{K\phi^2} T_L \quad (6.30)$$

$$\omega_m = \frac{10}{9} \cdot \frac{V_R}{K\phi} + \frac{1}{9} \cdot \frac{R}{K\phi^2} T_L \quad (6.31)$$

reemplazando valores:

$$V_R = 27V, R = 1.8\Omega, T_L = 0.3025 \text{ Nw-m}, K\phi = 0.10084$$

$$\omega_{m(\infty)} = 297.5 + 5.95 = 303.45 \text{ rad/seg}$$

Lo que quiere decir que nuestro regulador de velocidad cumple con las condiciones requeridas para mantener la velocidad de alimentación de alambre-electrodo constante.

### 6.7.6 Limitador de corriente

En el instante inicial ( $t = 0^+$ ) no existe señal de realimentación.

$$V_a - 5 R_{\text{ext}} I_a = E_a = K\phi \omega_m = 0$$

$$V_a = K_a V_e$$

$$\text{la relación: } V_a(0^+) = K_a [V_R(0^+) - K\phi \omega_m(0^+)]$$

$$\text{cambia a: } V_a(0^+) = K_a V_R(0^+) \quad (6.32)$$

$$\text{y } \omega_m(0^+) = \frac{V_a(0^+)}{K\phi} - \frac{R}{K\phi^2} T_L(0^+)$$

$$\text{cambia a: } \omega_m(0^+) = \frac{V_a}{K\phi} (0^+)$$

$$w_m(0^+) = \frac{K_a}{K\phi} V_R(0^+) \quad (6.33)$$

Estas ecuaciones 6.32 y 6.33 son extrañas al sistema, ya que estos valores llevarían a situaciones peligrosas al motor, porque la corriente podría alcanzar valores muy altos que destruirían los devanados del motor.

Limitaremos la corriente de armadura a un valor máximo para  $t = 0^+$  por medio de un diodo zener enclavador de corriente.

Luego en el instante inicial debe cumplirse

$$V_e'(0^+) = V_z$$

$$V_a(0^+) = -10V_e'(0^+)$$

$$V_a(0^+) = -10V_z \quad (6.34)$$

para un valor máximo de  $V_a(0^+) = 36 \text{ V}$

$$\text{tendremos } V_z = -3.6 \text{ V} \quad (6.35)$$

Este diodo zener debe ir conectado en paralelo con el controlador de velocidad. Por conveniencia usaremos dos diodos zener conectados en oposición para dar mayor seguridad al sistema.

## 6.8 Circuito de disparo de los tiristores

El circuito de disparo de los tiristores está compuesto:

1. Un transformador de sincronismo
2. Un conformador de onda cuadrada
3. Un conformador de onda triangular (integrador)
4. Un comparador variable
5. Un multivibrador monoestable

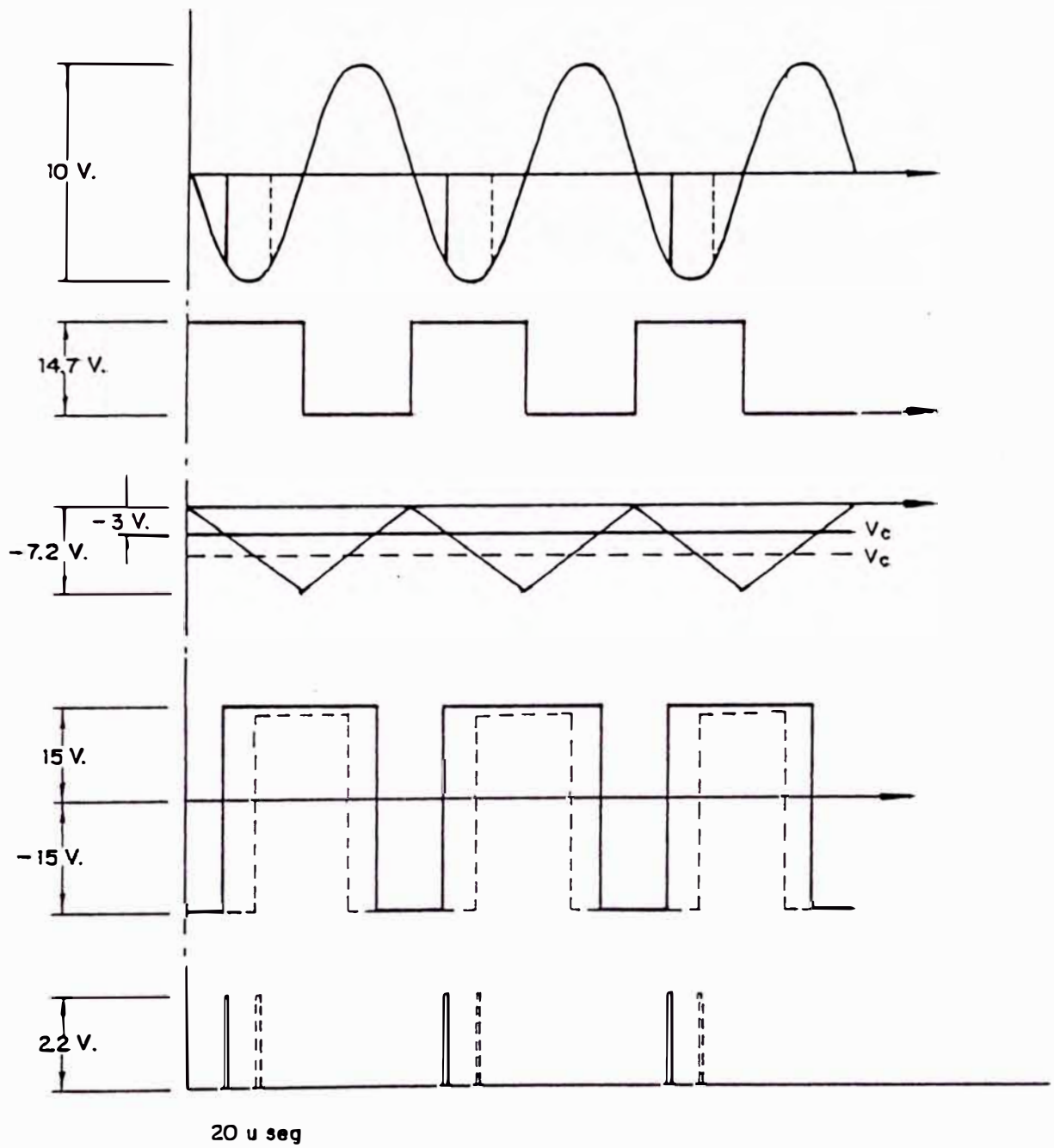


Fig. 6.25 .- Etapas de la sincronización del disparo de los tiristores.

La acción conjunta de estos dispositivos sincronizan el ángulo de disparo de los tiristores de acuerdo a los requerimientos del control automático de velocidad (ver fig. 6.25).

#### Transformador de sincronismo

Se usa un transformador de sincronismo de 42 V/3.5V-3.5V de toma central. La onda sinusoidal tomada a la salida del transformador de sincronismo mide entre pico y pico.

$$e_o = \sqrt{2} [3.5 - (-3.5)] = 7 \sqrt{2} = 10 \text{ V}$$

#### Conformador de onda cuadrada

La onda sinusoidal de 10V se cuadra con la combinación del diodo  $D_1$  y el diodo base-emisor del transistor  $T_1$ . El transistor  $T_1$  opera en corte y en saturación (Ver figura 6.26).

La amplitud pico a pico de la onda cuadrada es 14.7 V.

#### Conformador de onda triangular (Integrador)

Se integra la salida de la onda cuadrada, generando una función rampa.

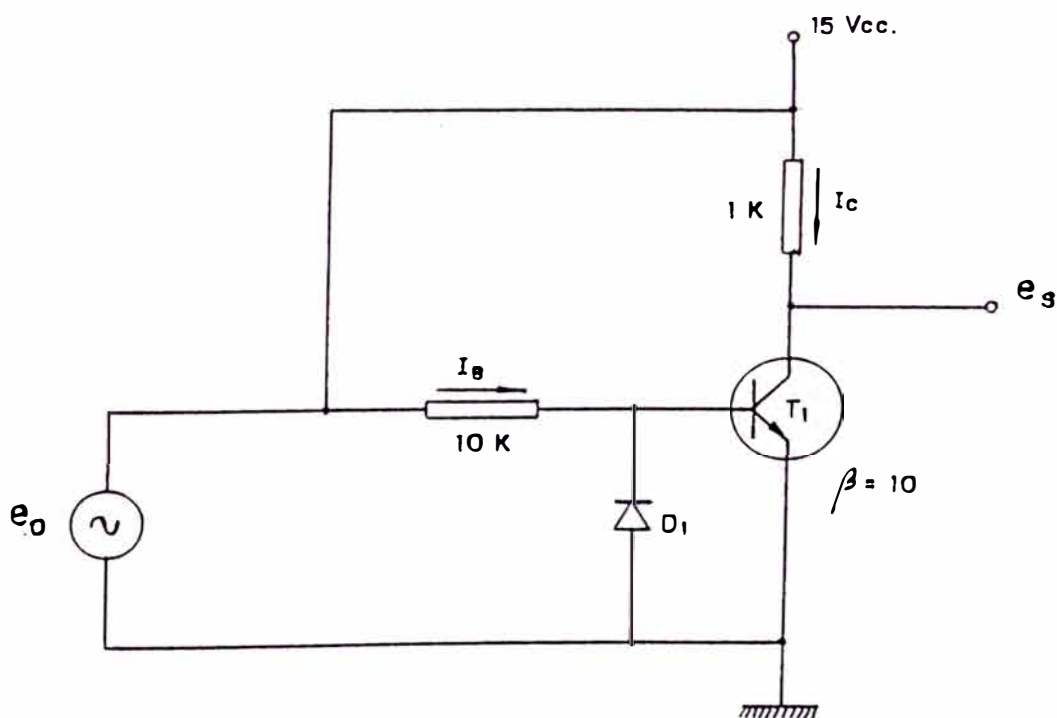


Fig. 6.26 Conformador de onda cuadrada.

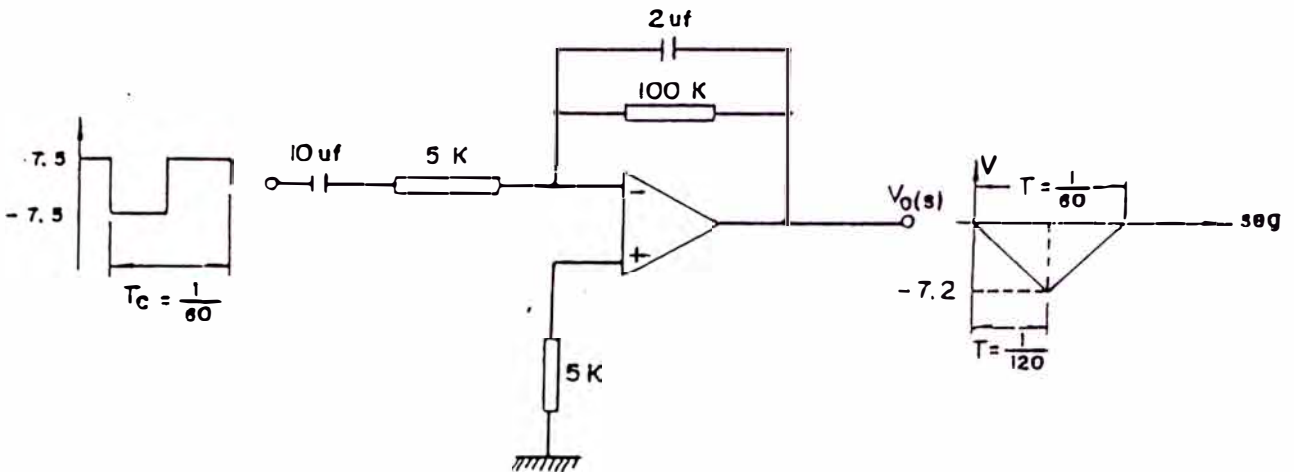


Fig. 6.27 Conformador de onda triangular.

Comparador variable

Se utiliza la entrada inversora y no inversora de un amplificador operacional.

Cuando  $V_e$  es mayor que algún punto de la pendiente negativa la salida cambia de nivel. La onda de salida es una onda cuadrada de  $\pm 15 V_{cc}$ . Con la transición positiva se dispara el multivibrador estable de la siguiente etapa.

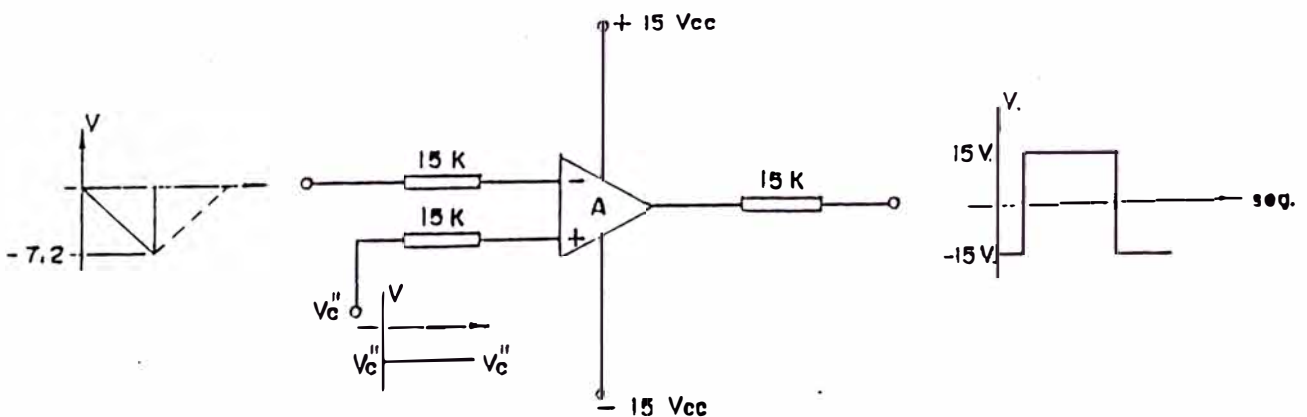


Fig. 6.28 Comparador variable.

### Multivibrador monoestable

Se utiliza el multivibrador monoestable para generar un pulso de salida de periodo de  $T = 20 \mu\text{seg.}$  suficiente para encender el tiristor.

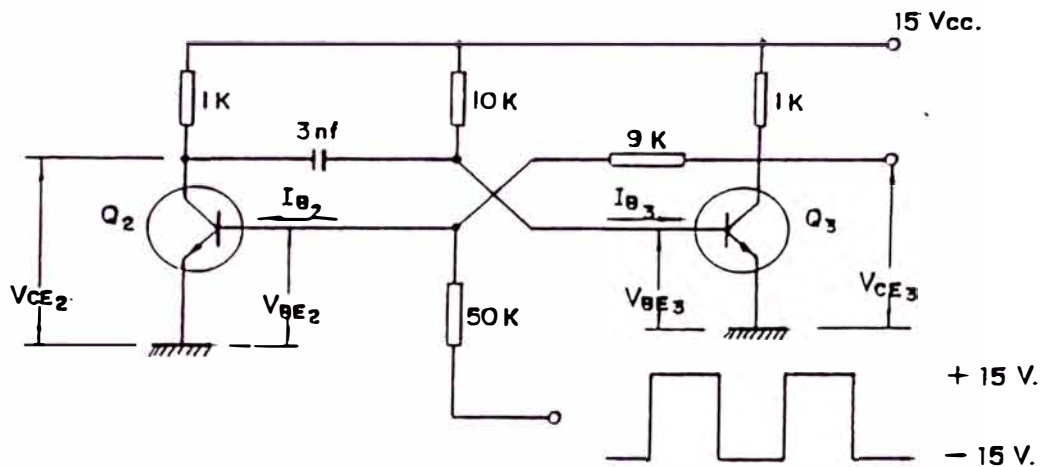


Fig. 6.29 Multivibrador mono estable.

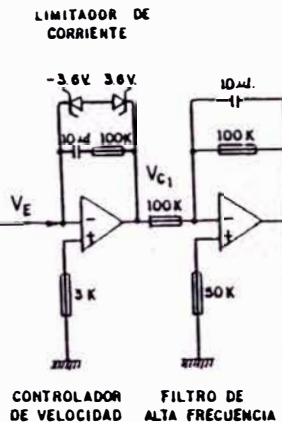
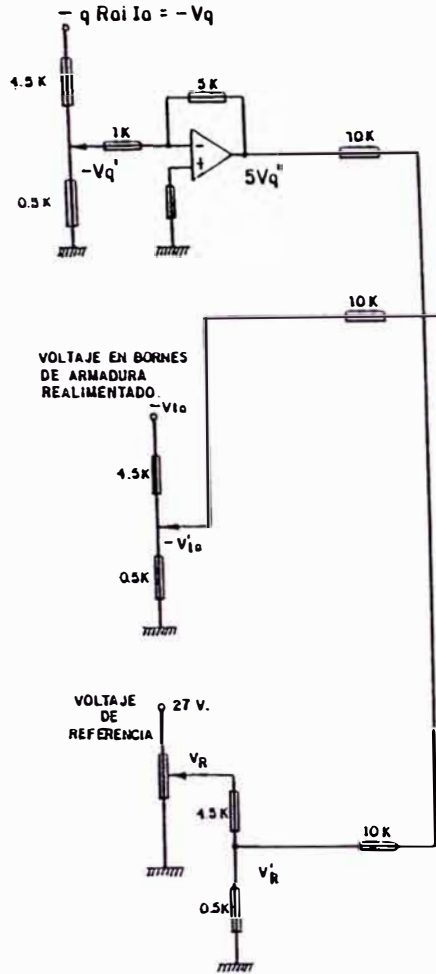
### 6.9 Frenado dinámico del motor de arrastre

Para parar rápidamente la alimentación del alambre-electrodo usamos la técnica de frenado dinámico. Se desconecta el inducido del motor de la red de alimentación y se le conecta automáticamente a una resistencia de frenado. El devanado de campo sigue conectado a la red. El motor sigue siendo arrastrado por su propia inercia comportándose como un generador con excitación independiente.

La energía cinética rotacional almacenada en el motor y en los elementos móviles del mecanismo accionado por éste, se disipa en forma de calor en la resistencia de frenado dinámico ( $R_F$ ) y en pérdidas por rozamiento viscoso del aire.

En el instante  $t = 0$  el interruptor se traslada instantáneamente a la posición 2.

VOLTAJE EN RESISTENCIA DE CONTROL REALIMENTADO



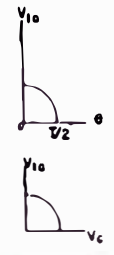
LIMITADOR DE CORRIENTE  
CONTROLADOR DE VELOCIDAD  
FILTRO DE ALTA FRECUENCIA

$$V'_{io} = \frac{V_{io}}{10}$$

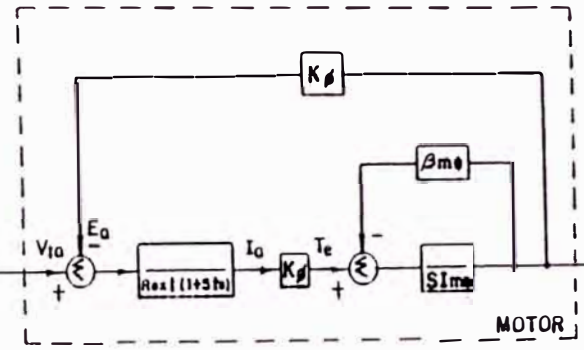
$$V'_R = \frac{V_R}{10}$$

$$V'_q = \frac{-q R_{oi} I_o}{10}$$

$$5V' = \frac{R_{exl} I_o}{10}$$

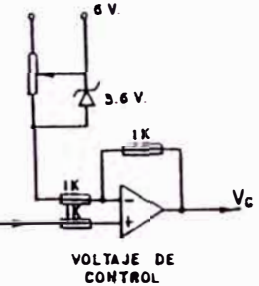


AMPLIFICADOR DE POTENCIA



MOTOR

VELOCIDAD DE ALIMENTACION DEL ALAMBRE-ELECTRODO.



VOLTAJE DE CONTROL

$$K_{\Delta} = \frac{-10}{1+S T_u}$$

Fig. 6.30 - Diagrama de bloques del Sistema.

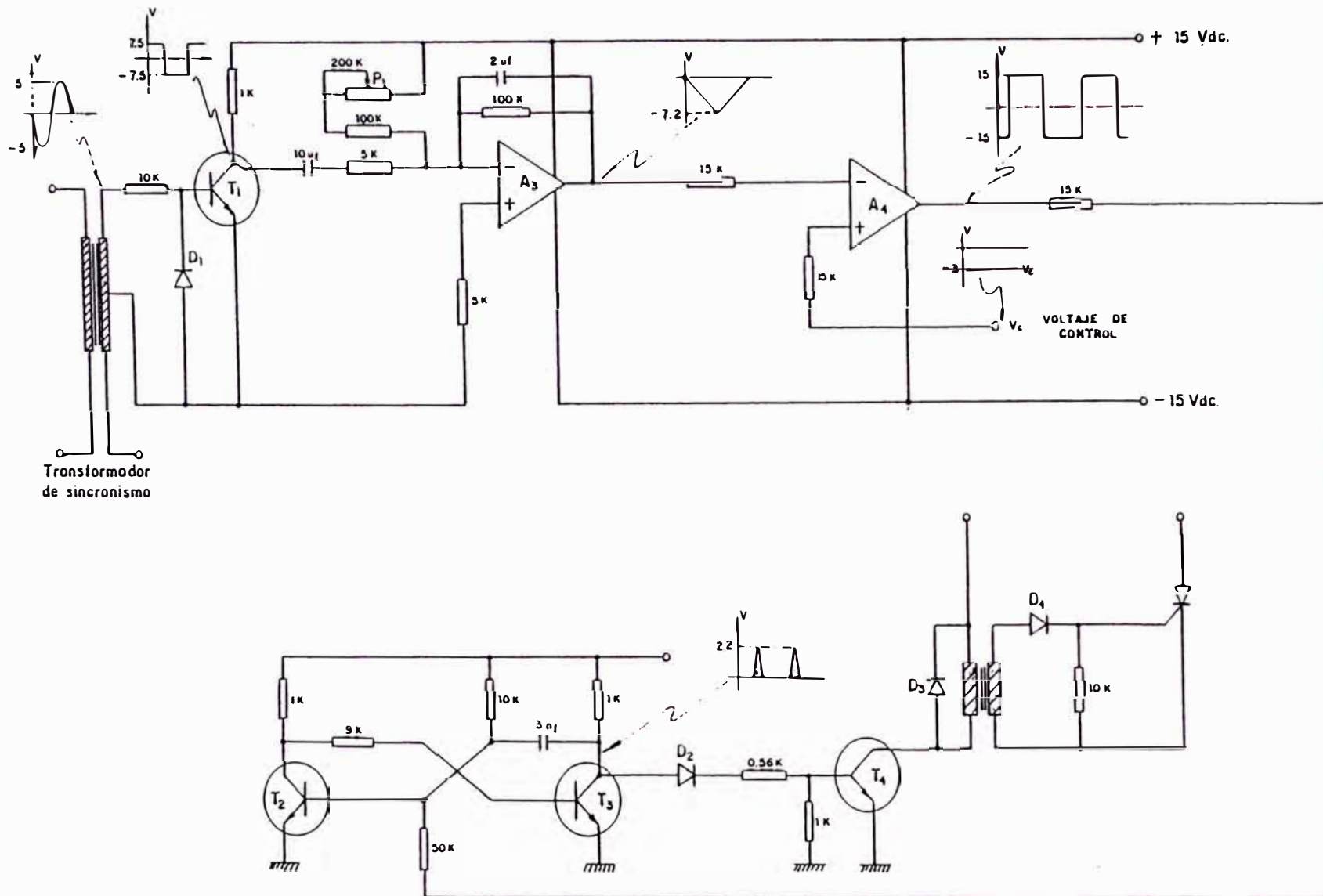


Fig. 6.31 .- CONVERTIDOR SINUSOIDAL - TRIANGULAR Y CIRCUITO DE DISPARO.



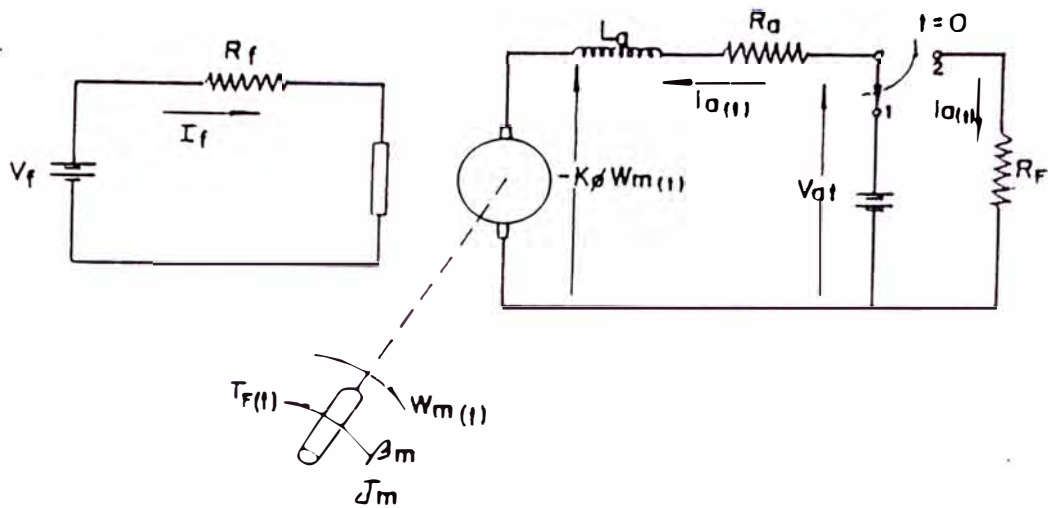


Fig. 6.32 Circuito equivalente del motor para el frenado dinámico.

Al cambiar la máquina de motor a generador, la corriente de armadura ( $i_a(t)$ ) se invierte y el torque desarrollado (inicialmente constante) se invierte frenando así la máquina. La corriente máxima se presenta inmediatamente después de conmutar la armadura de la red a la resistencia de frenado ( $t=0^+$ ). En este momento el valor del voltaje generado es:

$$E_a(t) = K\phi W_m(t)$$

El máximo torque de frenado se origina inmediatamente después de la conmutación. A medida que  $W_m(t)$  disminuye,  $E_a(t)$  también disminuye y el torque de frenado " $T_F(t)$ " también decae. Al llegar la armadura a velocidad cero, no se genera voltaje, no hay paso de corriente y no se desarrolla torque.

Para  $t < 0$  el interruptor está en la posición 1 y la máquina se encuentra en régimen estacionario:

$$V_f = R_f I_f \tag{6.36}$$

$$V = -K\phi W_m + R I_a \tag{6.37}$$

$$T = B_m W_m + K\phi I_a \tag{6.38}$$

El signo menos (-) de la velocidad resulta como consecuencia de los sentidos de referencia (ver figura 6.32).

Toda la potencia convertida es absorbida por el par de carga constante  $T_L$ .

$$K\phi I_a \omega_m = T_L \omega_m$$

$$T_L = K\phi I_a = T_e$$

Luego el par constante  $T_L$  es igual al par electromagnético  $T_e$ .

En  $t = 0$  el interruptor se traslada instantáneamente a la posición 2 y la máquina pasa a régimen transitorio.

$$-i_{a1}(t) R_f = -K\phi \omega_{m1}(t) + (R_a + pL_a) i_{a1}(t)$$

$$T_{f1}(t) = (pJ_m + B_m) \omega_{m1}(t) + K\phi i_{a1}(t)$$

El subíndice 1 indica la variación incremental del nivel de funcionamiento

$$0 = -K\phi \omega_{m1}(t) + (R_f + R_a) i_{a1}(t) + L_a p i_{a1}(t)$$

$$T_{f1}(t) = J_m p \omega_{m1}(t) + B_m \omega_{m1}(t) + K\phi i_{a1}(t)$$

aplicando la transformada de Laplace

$$0 = -K\phi \omega_{m1}(s) + (R_f + R_a) I_{a1}(s) + L_a [sI_{a1}(s) - i_{a1}(0^+)]$$

$$T_{f1}(s) = J_m [s\omega_{m1}(s) - \omega_{m1}(0^+)] + B_m \omega_{m1}(s) + K\phi I_{a1}(s)$$

reordenando

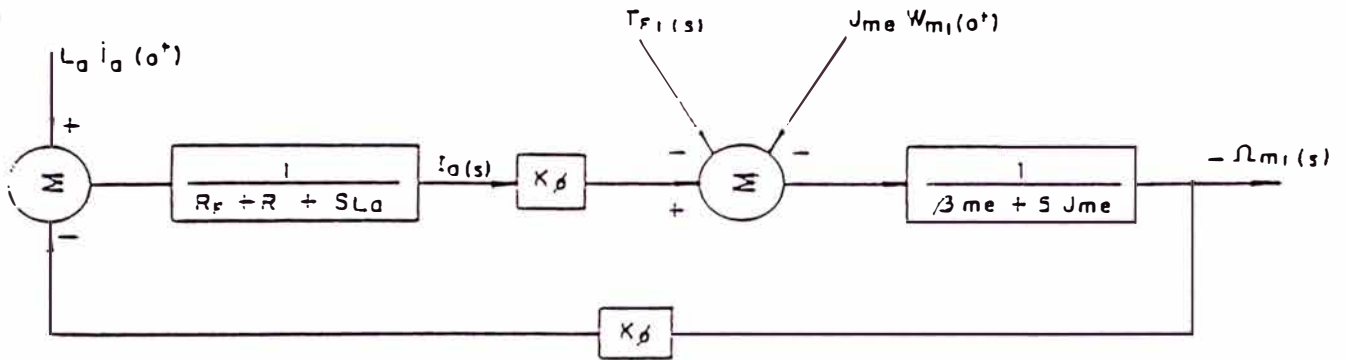
$$L_a i_{a1}(0^+) = [(R_f + R_a) + sL_a] I_{a1}(s) - K\phi \omega_{m1}(s)$$

$$T_{f1}(s) + J_m \omega_{m1}(0^+) = (B_m + sJ_m) \omega_{m1}(s) + K\phi I_{a1}(s)$$

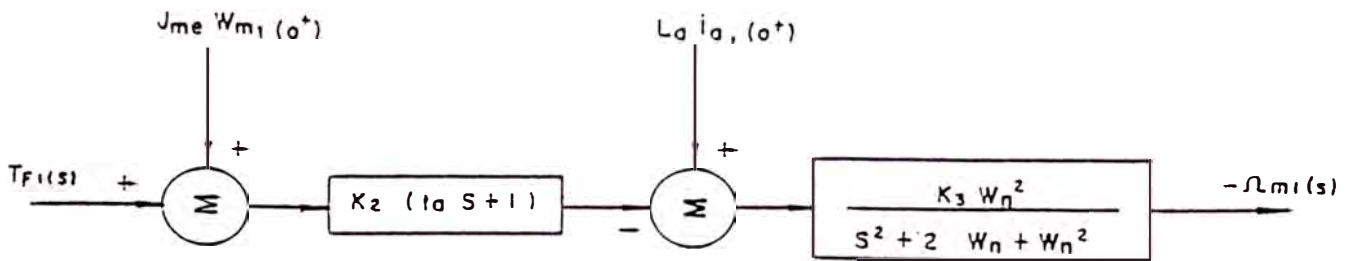
$$I_{a1}(s) = \{-[K\phi (-\omega_{m1}(s))] + L_a i_{a1}(0^+)\} \frac{1}{R_f + R_a + sL_a}$$

$$-\omega_{m1}(s) = [K\phi I_{a1}(s) - T_{f1}(s) - J_m \omega_{m1}(0^+)] \frac{1}{B_m + sJ_m}$$

En base a estas ecuaciones levantamos el siguiente diagrama de bloques:



Luego de una serie de transformaciones se convierte en:



$$K_2 = \frac{R_F + R_a}{K\phi}$$

$$K_3 = \frac{K\phi}{(R_F + R_a) + K\phi^2}$$

$$t_a = \frac{L_a}{R_F + R_a}$$

$$\omega_n^2 = \frac{(R_F + R_a) B_{me} + K\phi^2}{L_a J_{me}}$$

$$\beta = \frac{1}{2\sqrt{(R_F + R_a) B_{me} + K\phi^2}} \left( B_{me} \sqrt{\frac{L_a}{J_{me}}} + (R_F + R_a) \sqrt{\frac{J_{me}}{L_a}} \right)$$

El incremento inicial en la velocidad angular del motor  $\omega_{m1}(0^+)$  es cero debido a que la inercia del rotor mantiene la

velocidad angular en -303.45 rad/seg en el momento de la conmutación.

$$W_{m1}(0^+) = 0$$

Asimismo, podemos despreciar el producto  $L_{ai}i_{a1}(0^+)$  debido a que la inductancia del inducido es bastante pequeña.

$$L_{ai}i_{a1} \approx 0$$

Luego obtenemos la función de transferencia de la velocidad angular del motor.

$$\frac{-W_{m1}(s)}{T_{F1}(s)} = - (K_2 K_3) \frac{W_n^2 (s t_d + 1)}{s^2 + 2\delta W_n s + W_n^2}$$

$$W_{m1}(s) = (K_2 K_3) \left( \frac{W_n^2 (s t_d + 1)}{s^2 + 2\delta W_n s + W_n^2} \right) \cdot \left( \frac{2 T_L}{s} \right)$$

donde:  $T_{F1}(s) = \frac{2 T_L}{s}$

Hallando la transformada inversa obtenemos el incremento de velocidad.

$$W_{m1}(w_n t) = (2 T_L)(K_2 K_3) [1 - e^{-\delta w_n t} \cosh (W_n \sqrt{\delta^2 - 1} t) - \frac{\delta - t_d W_n}{\sqrt{\delta^2 - 1}} e^{-\delta w_n t} \sinh (W_n \sqrt{\delta^2 - 1} t)]$$

En el instante  $t = 0$ , el incremento se reduce a:

$$W_{m1}(0) = (2 T_L)(K_2 K_3) (1-1-0) = 0$$

Para  $W_n t = 1.5$  el sistema se vuelve estable

$$W_{m1}(1.5) = (2 T_L)(K_2 K_3) = 2 T_L \frac{(R_F + R_A)}{(R_F + R_A) B_{me} + K\phi^2}$$

$$W_{m1}(1.5) = W_{m1}(\infty) = \frac{(2 \times 0.3025) \times 10.2}{(10.2)(9.97 \times 10^{-4}) + (0.10084)^2}$$

$$\omega_{m1(\infty)} = 303.45 \text{ rad/seg}$$

Cuando el sistema se vuelve estable se debe cumplir que:

$$\omega_m(\infty) = \omega_m + \omega_{m1(\infty)}$$

$$\omega_m(\infty) = -303.45 + 303.45 = 0$$

$$\omega_n t = 1.5$$

$$t = \frac{1.5}{\omega_n} = \frac{1.5}{37.1949} = 40.328 \times 10^{-3} \text{ seg} \quad (6.39)$$

El sistema se detiene por efecto del torque de frenado en  $t = -40.328 \times 10^{-3} \text{ seg}$ .

El valor de  $R_F$  se halla de considerar que la máxima corriente que puede soportar el motor es de 3 amperios.

$$I_a = \frac{0 - E_a}{R_a + R_F} = - \frac{K\phi \omega_m}{R_a + R_F}$$

$$R_F + R_a = \frac{-K\phi \omega_m}{I_a} = \frac{-(0.10084)(-303.45)}{3} = 10.2 \Omega$$

$$R_F = 10.2 - R_a = 10.2 - 1.44 = 8.76 \Omega$$

$$R_F = 8.76 \Omega \quad (6.40)$$

#### 6.10 Peso y dimensiones de la unidad de alimentación del alambre-electrodo

Bobina de Alambre-electrodo:

Diámetro : 300 mm.

Ancho : 100 mm.

Motor:

Diámetro : 120 mm.

Ancho : 100 mm.

Reductor de Velocidad tipo tornillo sin fin:

Largo : 120 mm.

Altura : 120 mm.

Ancho : 120 mm.

Si disponemos la longitud de la caja devanadera con 350 mm. para la bobina de alambre-electrodo y 350 mm. para el motor-reductor, entonces la longitud de ésta será:

Largo :  $350 + 350 = 700$  mm.

La altura de la caja devanadera lo determina el diámetro de la bobina de alambre-electrodo, luego hacemos:

Altura : 400 mm.

Para el ancho de la caja, disponemos 150 mm. para la bobina de alambre-electrodo y 150 mm. para la combinación motor-reductor, luego:

Ancho :  $150 + 150 = 300$  mm.

Dimensiones finales:

Largo : 700 mm.

Altura : 400 mm.

Ancho : 300 mm.

y el peso del conjunto será:

Bobina alambre-electrodo : 15 kg.

Motor - reductor : 10 kg.

Mueble : 10 kg.

---

Peso total : 35 kg.

### CONCLUSIONES

1. La respuesta del sistema de alimentación del alambre-electrodo es "críticamente amortiguado"

2. El tiempo de establecimiento del sistema es:

$$t_s = 143 \times 10^{-3} \text{ seg.}$$

a partir desde que el operador comienza a soldar.

3. La resistencia de frenado dinámico es:

$$R_f = 3.76 \text{ ohmios}$$

4. El sistema demora en detenerse:

$$t_f = 40.33 \times 10^{-3} \text{ seg.}$$

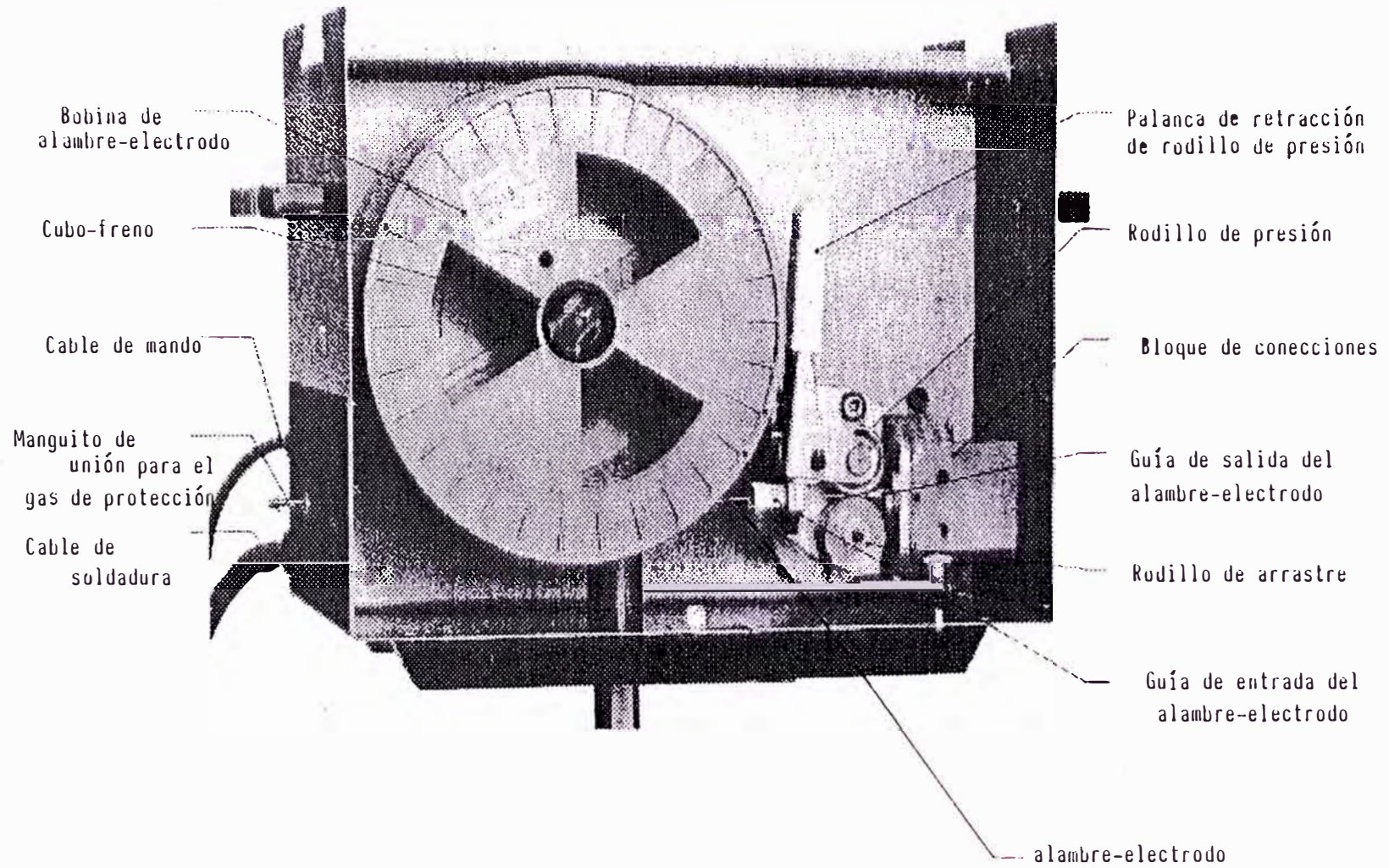


Fig. 6.33 Disposición de espacio del 2do. Módulo  
Vista lateral izquierda

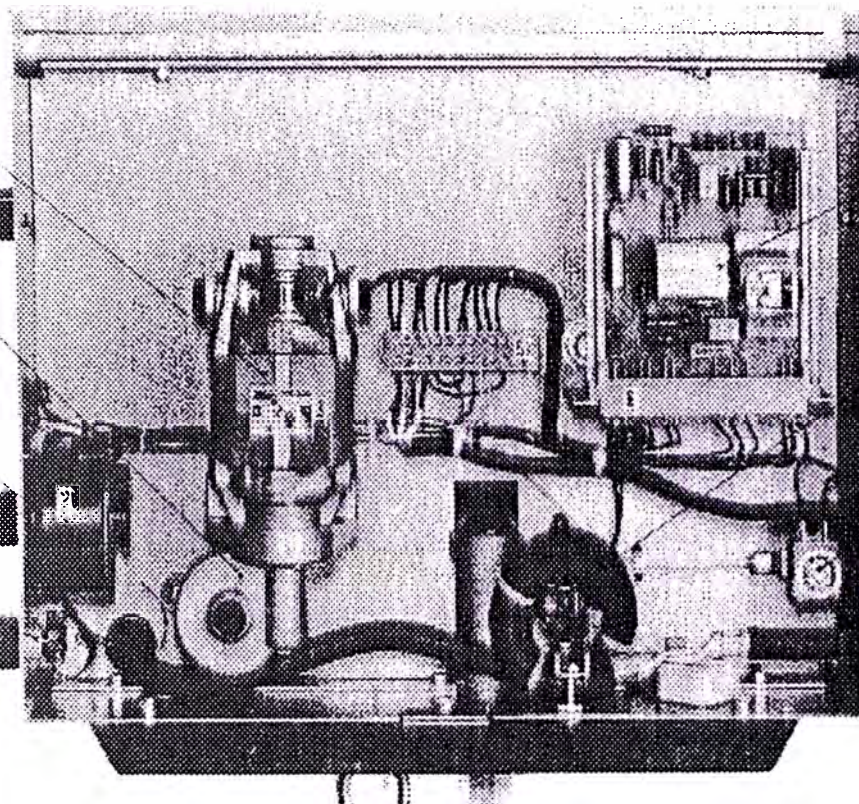


Motor de arrastre

Reductor de  
velocidad

Potenciómetro

Reostato



Tarjeta impresa  
regulador de velocidad

Cable de soldadura

Electroválvula

Manguera

Fig. 6.33 Disposición de espacio del 2do. Módulo  
Vista lateral derecha

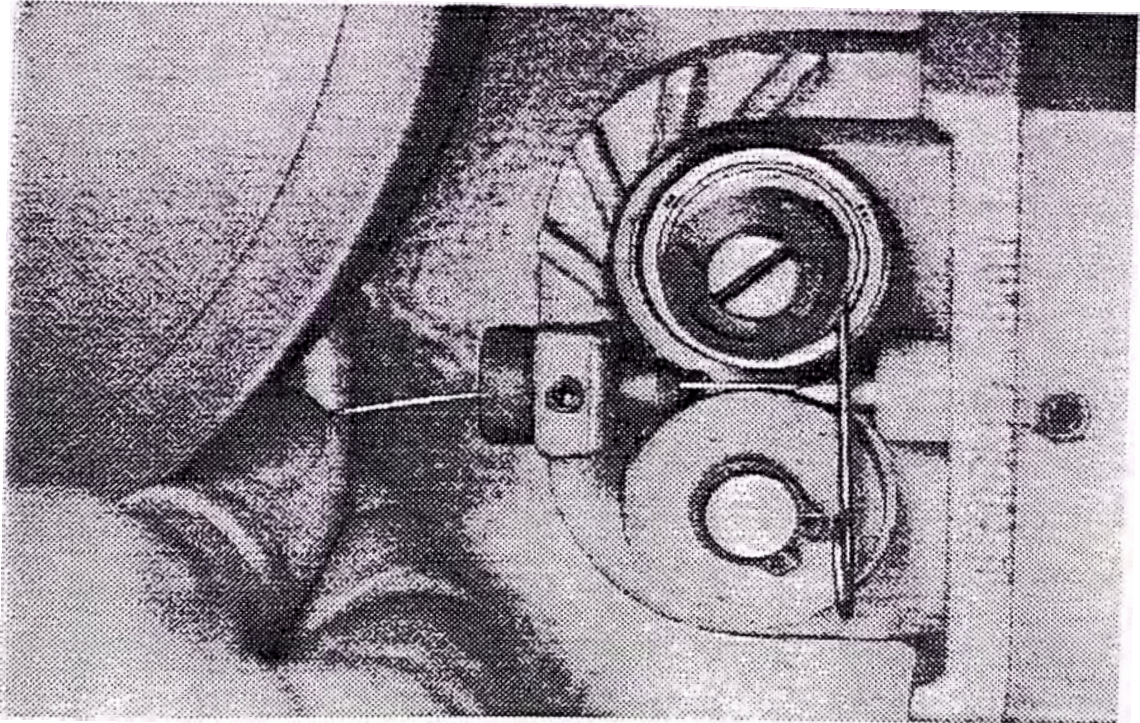
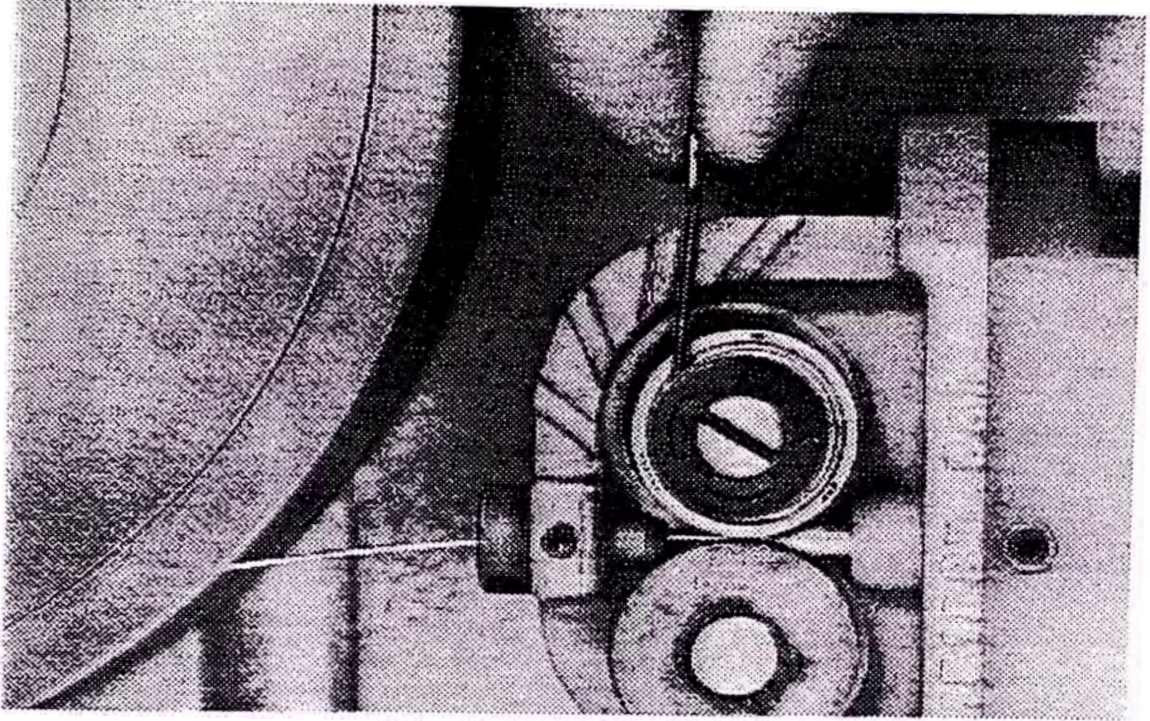


Fig. 6.34 Vista de detalle del diámetro del alambre-electrodo

CAPITULO VII  
CONTROL Y MANDO DE LA MAQUINA DISEÑADA

**7.1 Sistema manguera - Soplete de soldar**

Con el sistema transformador 3 $\phi$  - Rectificador 3 $\phi$  - Filtro por Inductancia, se obtiene la corriente de soldadura a voltaje constante requerida por la máquina. La Unidad de Alimentación del Alambre-electrodo consumible provee el material fundente en la pieza a soldar. El gas de protección es alimentado desde un balón metálico, a través de una canalización de gas que es gobernada mediante una electro-válvula.

Mediante un sistema de control y mando se interconectan estos tres sistemas, a través de un circuito de contactores, para que actúen en forma simultánea sobre la pieza que se suelda. Este circuito de contactores es accionado desde un gatillo-interruptor ubicado en el soplete de soldadura, a través de un par de cables de mando que los interconecta.

Las conexiones de estos sistemas viajan en forma conjunta a través de una manguera desde la máquina hasta el soplete de soldadura.

Esta manguera incorpora bajo una envoltura única de caucho las conducciones de:

- El tubo guía del alambre-electrodo.
- La canalización del gas de protección.
- El cable de corriente de soldadura.

Los cables de mando.

Los cuatro elementos están cubiertos por una chaqueta exterior de neoprene que corre a todo lo largo de la manguera.

El tubo guía del alambre-electrodo que es de material plástico con débil coeficiente de fricción, suministra el camino de alimentación del alambre-electrodo dentro de la manguera sin que éste se maltrate.

Este tubo va conectado desde la devanadera alimentadora hasta una punta de contacto que se encuentra en el soplete de soldadura, donde se hace la conexión eléctrica con el cable de corriente.

La canalización del gas de protección es de nylon, por extrusión con nervios longitudinales internos de refuerzo asegurando la rigidez radial de la guía del alambre-electrodo. Su sección útil es de  $12 \text{ mm}^2$ .

El cable de corriente de soldadura es de trenza de cobre, de sección de  $70 \text{ mm}^2$ , que va conectado a un conector eléctrico ubicado en el soplete de soldadura. Este conector es un pequeño tubo que hace contacto eléctrico con el alambre-electrodo, cuando éste lo atraviesa concéntricamente.

El cable de mando es de aislamiento de teflón, cable bipolar de sección  $2 \times 0.34 \text{ mm}^2$ .

La manguera tiene un sistema adaptador que conecta todo el conjunto entre la máquina y el soplete de soldadura, llevando dentro de sí las conducciones indicadas. (Fig. 7.1).

El soplete de soldadura lleva ubicado dentro de sí un manguito de contacto que está conectado al polo negativo de la corriente

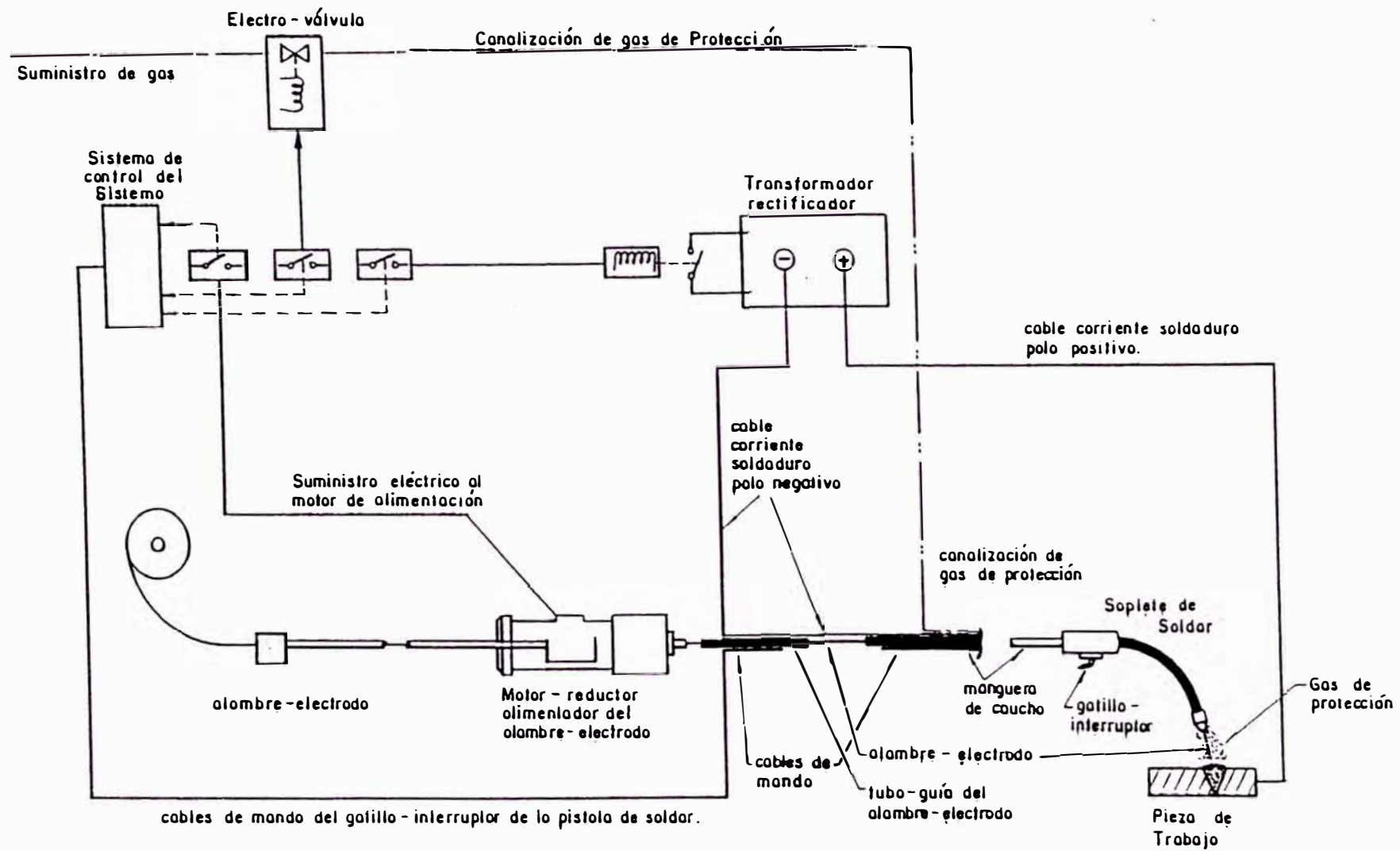


Fig. 7.1 Control y mando de lo Máquina de Soldar.

de soldadura. El alambre-electrodo hace contacto con la corriente al atravesar concéntricamente este manguito. Luego se ubica una pequeña tobera de material refractario resistente a las altas temperaturas por donde se desplaza el alambre-electrodo hacia la pieza de soldar. Luego se ubica la boquilla de gas, por donde se suministra el gas protector en forma concéntrica a la alimentación del alambre-electrodo. (Fig. 7.2).

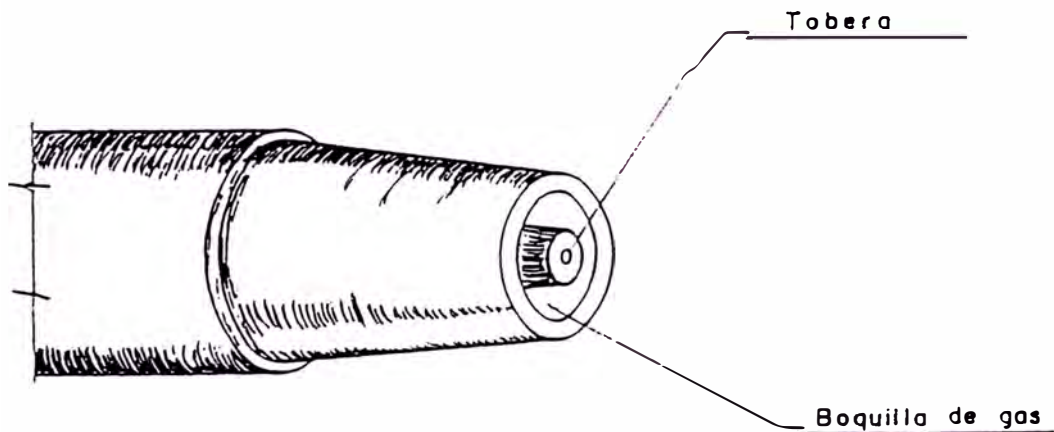


Fig. 7.2 Soplete de soldadura.

## 7.2 Circuito de control y mando de la máquina diseñada

El circuito de control y mando del sistema se muestra en la figura 7.3.

Operación del circuito de control y mando:

El proceso de soldadura comienza cuando se presiona el gatillo-interruptor "G" en el soplete de soldar. Se energiza la

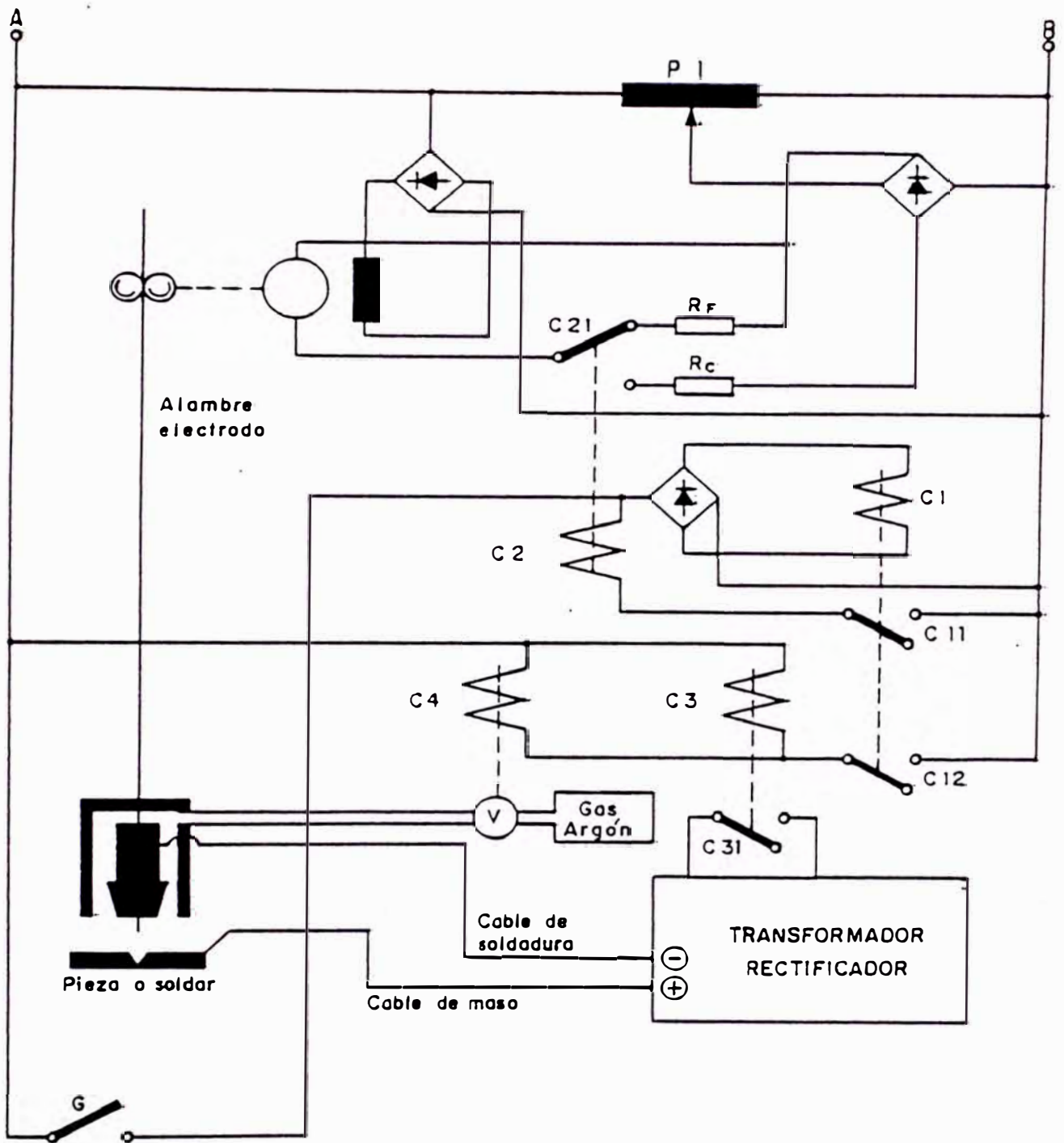


Fig. 7.3 Circuito de Control y Mando.

- P1 = Potenciómetro de 0 a 36 voltios.
- Rc = Resistencia de control del motor de C.C.
- RF = Resistencia de Frenado dinámico.

bobina del contactor "C1", cerrándose los contactos auxiliares "C11" y "C12". Al cerrarse el contacto C11 se energiza la bobina del contactor "C2", cerrándose el contacto auxiliar "C21" alimentando la armadura del motor de c.c., que mueve los rodillos que empujan el alambre-electrodo hacia la pieza a soldar. Al cerrarse el contacto auxiliar C12 se energizan las bobinas de los contactores "C3" y "C4", cerrándose el contacto auxiliar "C31" y accionando la electroválvula "V" respectivamente. Cuando se cierra el contacto auxiliar C31 el transformador-rectificador suministra la corriente de soldadura. Al ser accionada la electroválvula se permite el flujo de gas de protección hacia la manguera, el cual escapa de la boquilla del soplete alrededor del alambre-electrodo.

Desde que el alambre-electrodo entra en contacto con la pieza a soldar, se obtiene un circuito cerrado, entonces el arco se ceba y el soldeo comienza. La corriente de soldadura circula entre el alambre-electrodo y la pieza a soldar (polaridad -) y regresa al transformador-rectificador por el cable de masa (polaridad +).

Mientras el gatillo-interruptor de la pistola de soldar, se mantiene presionado, el soldeo continúa.

Cuando el gatillo se suelta, se desenergiza el contactor C1 abriéndose los contactos auxiliares C11 y C12, desenergizándose los contactos C2, C3 y C4, lo cual trae como efecto parar la alimentación del gas, del alambre-electrodo y cortar la corriente de soldadura.



Cuando se desenergiza el contactor C2 el contacto auxiliar C21, conecta la armadura del motor de c.c. a la resistencia  $R_f$  para producirse el frenado dinámico instantáneo.

### 7.3 Dimensiones y acomodamiento de la máquina diseñada

La máquina diseñada se puede armar en tres módulos:

**Primer módulo:** Que comprende el transformador trifásico, el rectificador trifásico y el filtro por inductancia, que suministra corriente de soldadura hasta un máximo de 300 A. También se consideran en este módulo el transformador de mando que suministra la energía al motor de c.c. y al circuito de contactores de control de la máquina. También van los conmutadores de regulación de corriente de soldadura.

Este módulo está montado sobre un carro de cuatro ruedas que lo hace movable y manejable.

**Segundo módulo:** Comprende la caja devanadera que contiene la bobina de alambre-electrodo, el motor-reductor, los rodillos de arrastre y el circuito impreso del control automático de velocidad de alimentación del alambre-electrodo.

El fondo de la caja es de base hueca, permitiendo situarla en rotación sobre el pivote-soporte situado sobre la tapa del primer módulo.

**Tercer Módulo:** Comprende la botella de gas de protección y el sistema manguera-soplete de soldar.

En el carro que soporta el primer módulo se hace un emplazamiento para ubicar la botella de gas de protección.

El conjunto manguera-soplete de soldar forman una sola unidad que se conecta fácilmente a la caja devanadora.

### Dimensiones y acomodamiento de espacio del primer módulo

Del capítulo N° 3 tomamos las dimensiones y peso del transformador trifásico:

Dimensiones del núcleo : 371 mm x 364 mm x 57 mm

Peso : 35 kg

Dimensiones del devanado:

Ancho : 100 mm

Altura: 250 mm

Peso : 48 kg

Considerando 4 kg adicionales de los soportes y accesorios de ferretería, al peso del transformador trifásico será:

$$35 + 48 + 4 = 87 \text{ kg}$$

Luego el transformador trifásico ocupará una disposición de espacio como el que se muestra en la figura 7.4 de las siguientes dimensiones:

Largo : 600 mm

Altura : 450 mm

Ancho : 250 mm

Del capítulo N° 4 tomamos las dimensiones y peso del rectificador trifásico:

Usaremos 6 disipadores de calor cada uno de las dimensiones que se muestran según catálogo SEMIKRON. Cada disipador pesa 2 kg.

Peso de los disipadores :  $6 \times 2 \text{ kg} = 12 \text{ kg}$

El peso aproximado de cada diodo, según catálogo Westhinghouse es de aproximadamente 0.25 kg.

Peso de los diodos :  $6 \times 0.250 \text{ kg} = 1.5 \text{ kg}$

Considerando el peso de los demás elementos 2.5 kg

El peso del rectificador trifásico será:

$$12 + 1.5 + 2.5 = 16 \text{ kg}$$

Haciendo un arreglo de dos filas, cada una con tres disipadores, el rectificador ocupará una disposición de espacio como se muestra en la figura 7.4 de las siguientes dimensiones:

Largo            600 mm

Altura            350 mm

Ancho            200 mm

Del capítulo N° 5 tomamos las dimensiones y peso del filtro por inductancia:

Dimensiones del núcleo: 380 mm x 225 mm x 75 mm

Peso: 36 kg

Dimensiones del devanado:

Ancho        75 mm

Altura:      225 mm

Peso        14 kg

Considerando 4 kg adicionales de los soportes y accesorios de ferretería, el peso del filtro por inductancia será:

$$36 + 14 + 4 = 54 \text{ kg}$$

El filtro por inductancia ocupará una disposición de espacio que se muestra en la figura 7.4 de las siguientes dimensiones:

Largo        600 mm

Altura:      350 mm

Ancho        250 mm

Asumiremos el peso del transformador de mando de 15 kg.

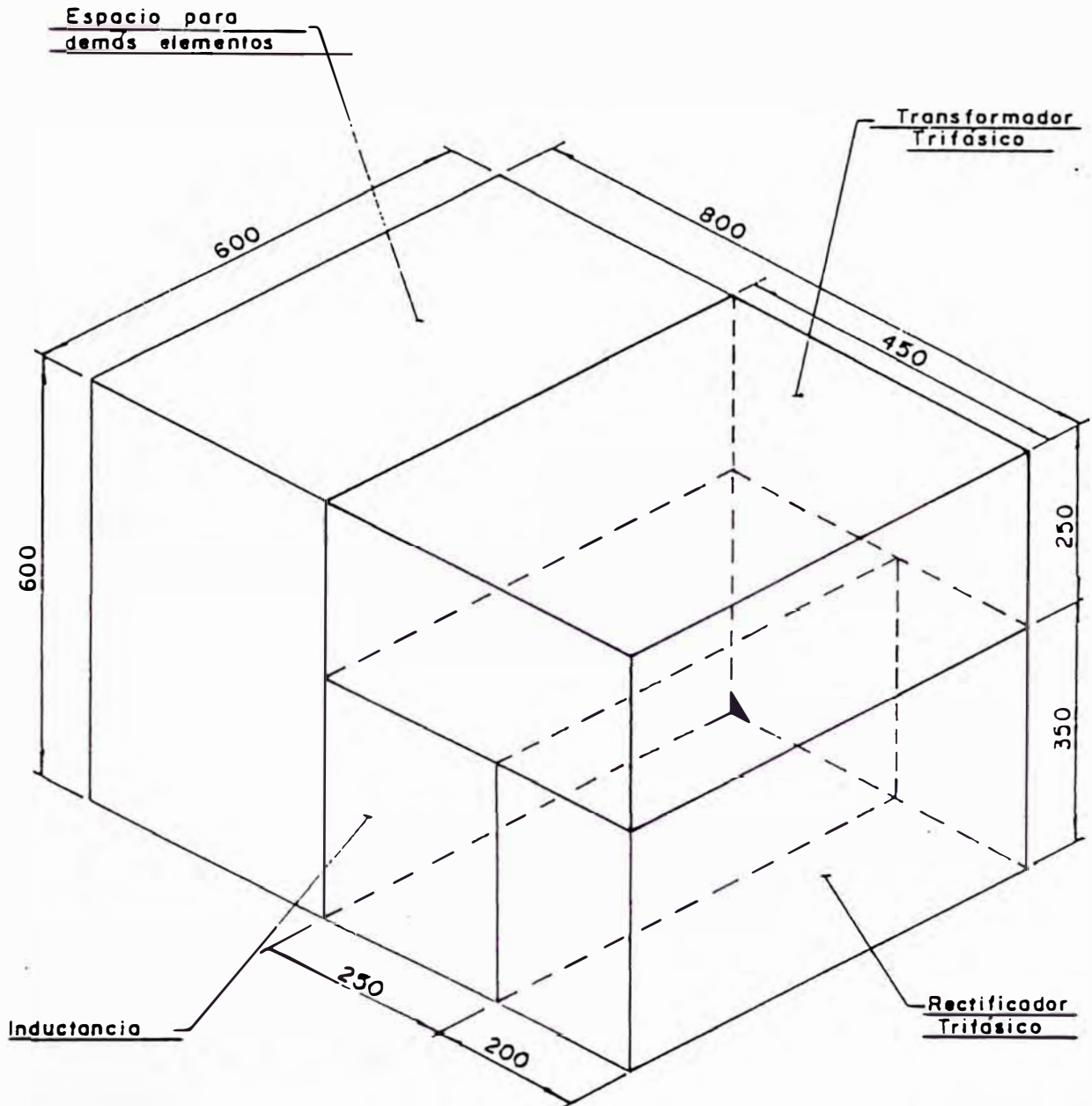


Fig. 7.4 - DISPOSICION DE ESPACIO DEL 1er. MODULO  
(Dimensiones en mm.)  
Escala : 1 : 100

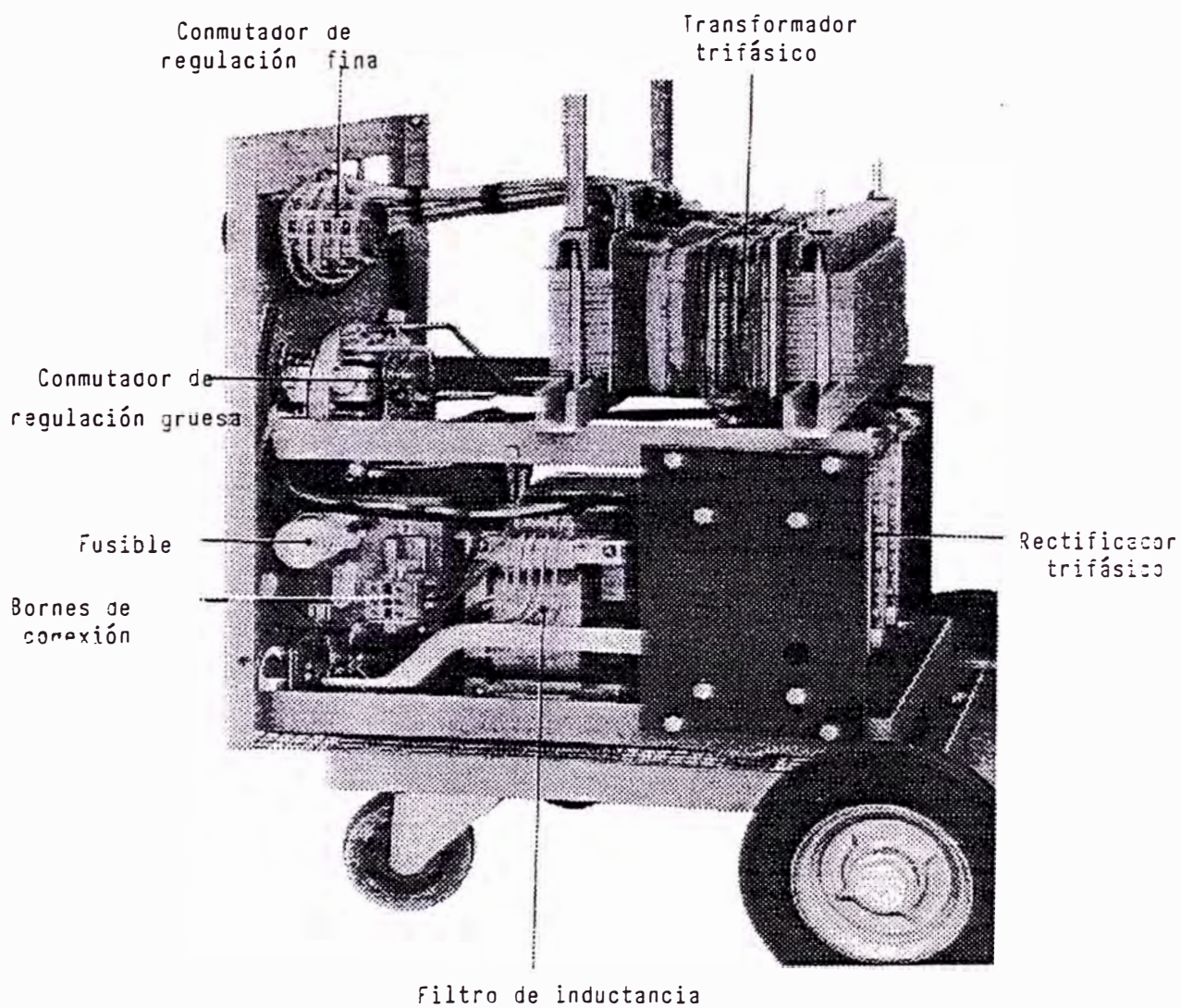


Fig. 7.4.- Disposición de espacio del 1er. Módulo  
Vista lateral izquierda

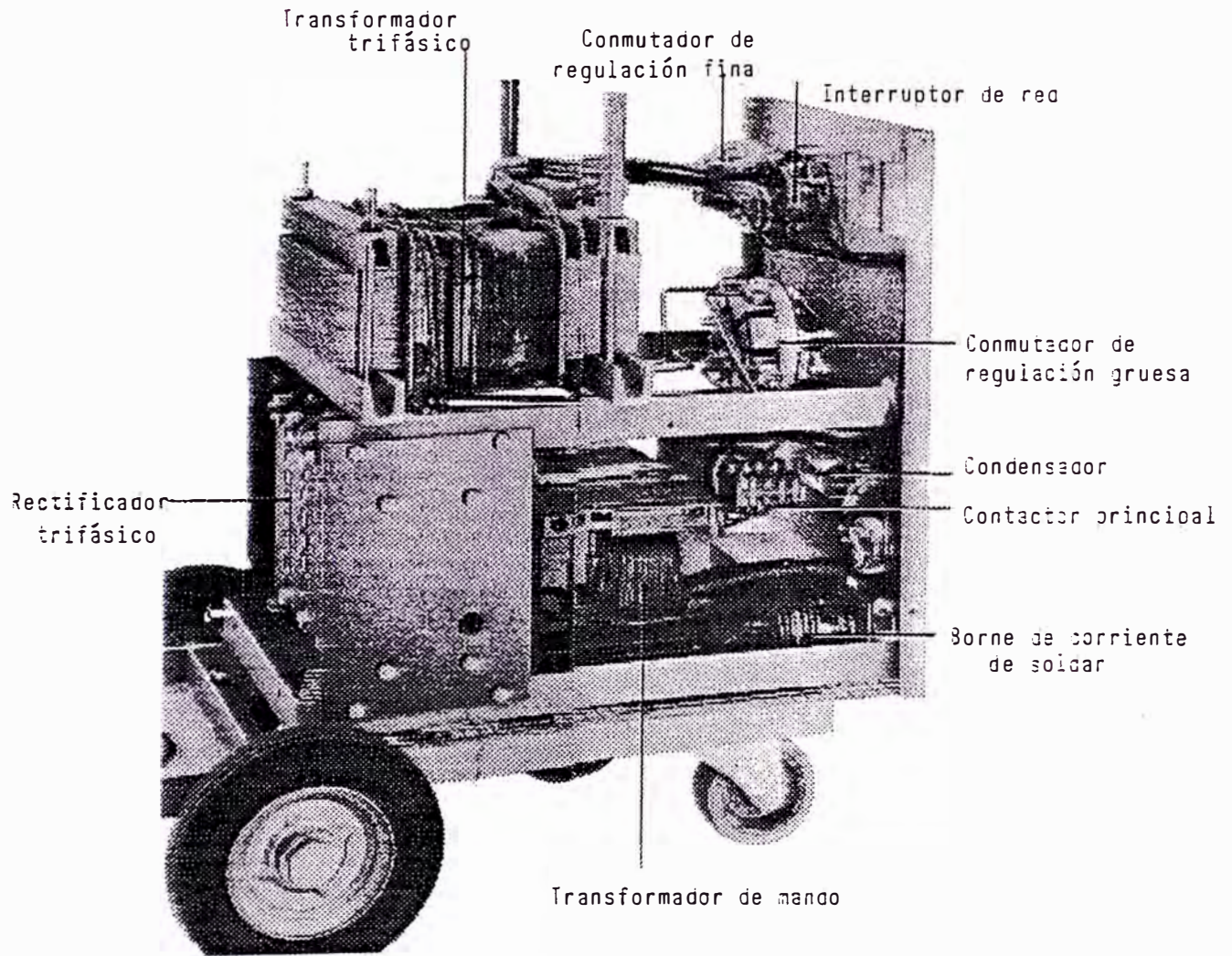


Fig. 7.4.- Disposición de espacio del 1er. Módulo  
Vista lateral derecha

Los demás elementos como los conmutadores, contactores y otros, lo asumiremos como 20 kg.

El peso total del 1er. módulo será:

Transformador 3 $\phi$	:	87 kg
Rectificador 3 $\phi$	:	16 kg
Filtro por inductancia	:	54 kg
Transf. de mando	:	15 kg
Accesorios	:	20 kg
Base con ruedas	:	20 kg
		<hr/>
		212 kg

La disposición del espacio total del 1er módulo será de las siguientes dimensiones (fig. 7.4):

Largo	:	600 mm
Altura	:	600 mm
Ancho	:	800 mm

**Desarrollo del acomodamiento de espacio del 2do. módulo:**

Las dimensiones de la caja devanadora la determinan la bobina del alambre-electrodo y el motor-reductor.

Bobina del alambre-electrodo:

Diámetro	:	300 mm
Ancho	:	100 mm

Motor:

Diámetro	:	120 mm
Ancho	:	100 mm

Reductor de velocidad tipo tornillo sin fin:

Largo	:	120 mm
Altura	:	120 mm
Ancho	:	120 mm

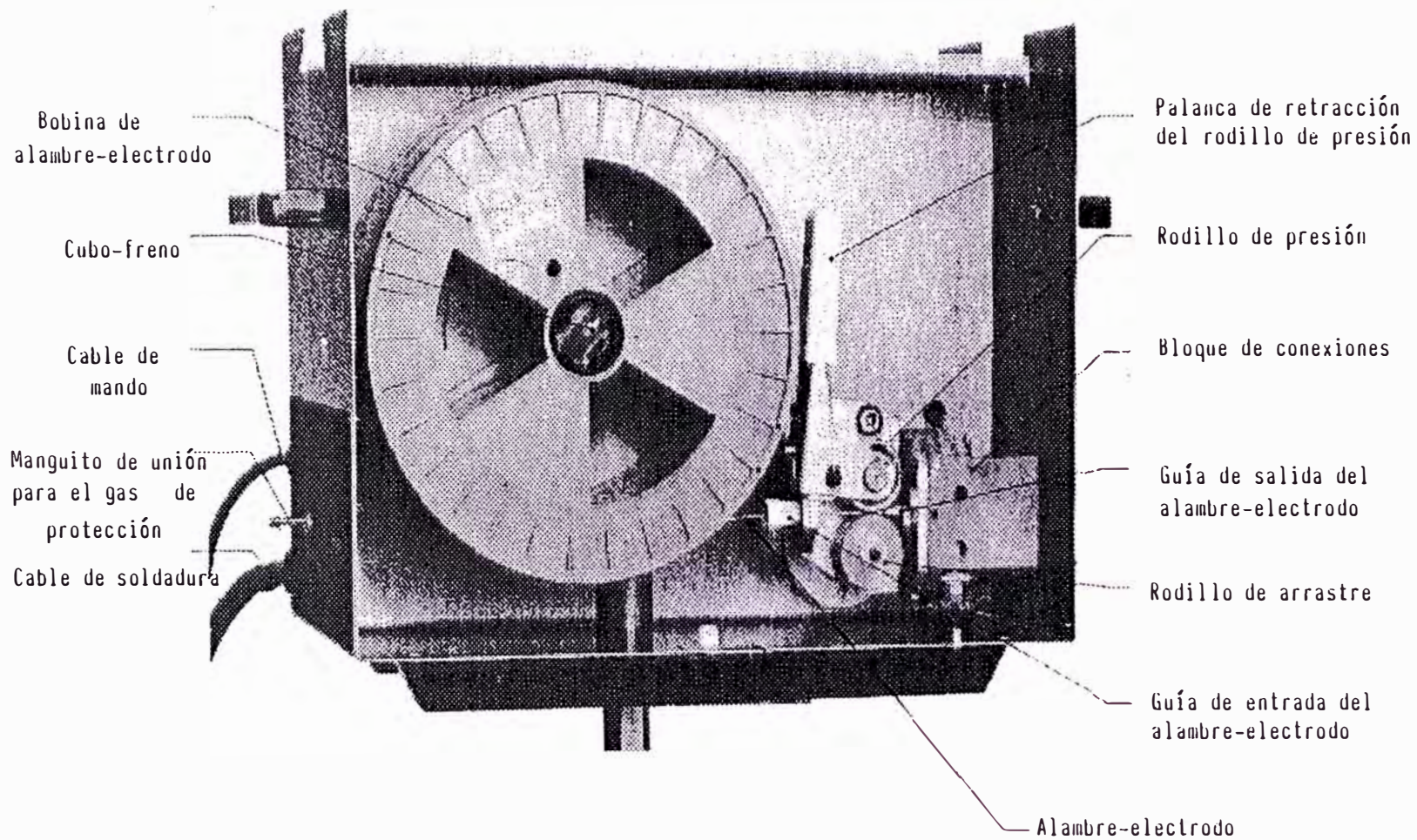


Fig. 7.5 Disposición de espacio del 2do. Módulo  
Vista lateral izquierda



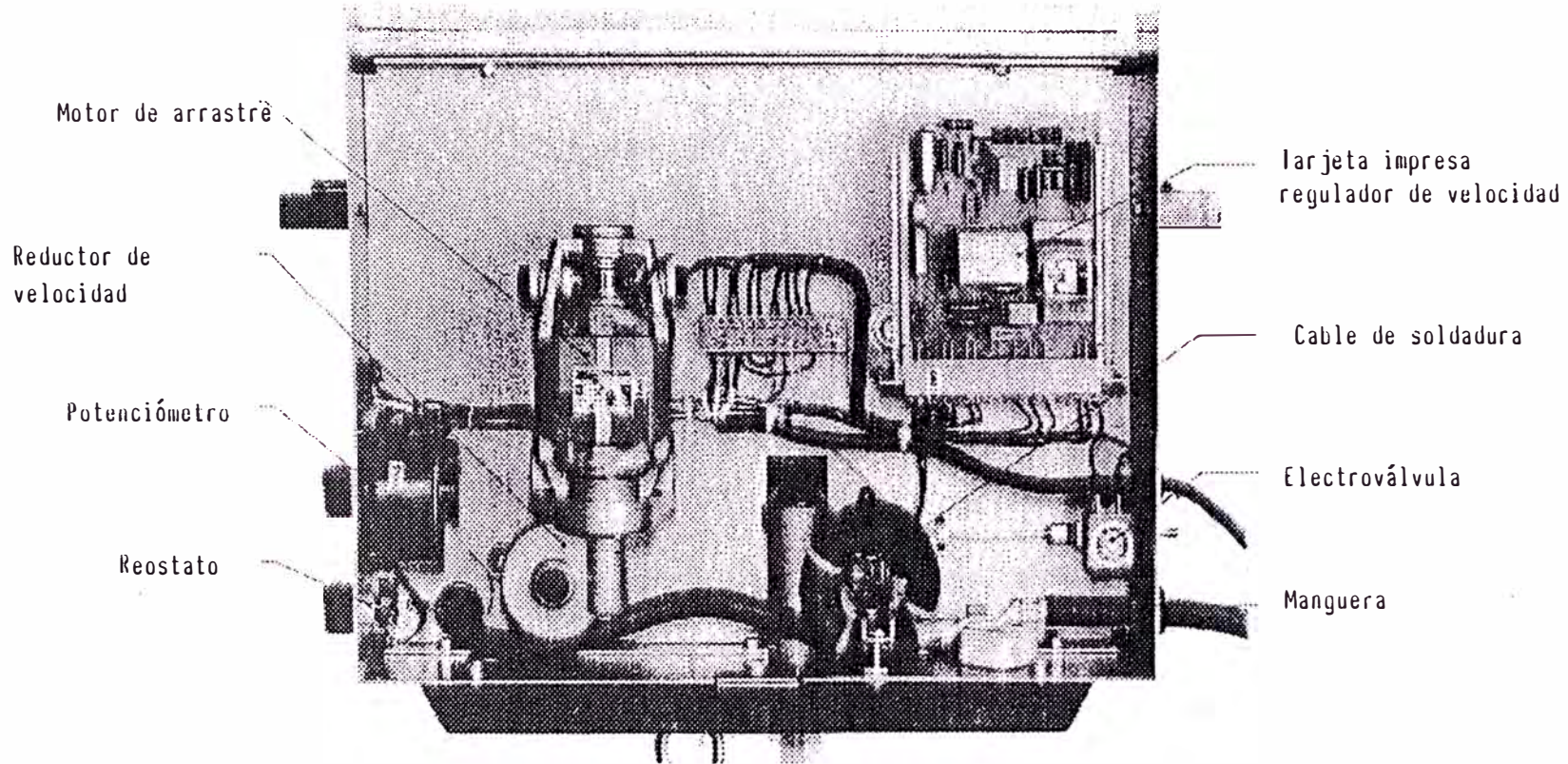


Fig. 7.5 Disposición de espacio del 2do. Módulo  
Vista Lateral derecha

Si disponemos la longitud de la caja devanadora con 350 mm para la bobina de alambre-electrodo y 350 mm para el motor-reductor, entonces la longitud de ésta será:

$$\text{Largo} \quad : \quad 350 + 350 = 700 \text{ mm}$$

La altura de la caja devanadora lo determina el diámetro de la bobina de alambre-electrodo, luego hacemos:

$$\text{Altura} \quad : \quad 400 \text{ mm}$$

Para el ancho de la caja, disponemos 150 mm para la bobina de alambre-electrodo y 150 mm para la combinación motor-reductor, luego:

$$\text{Ancho} \quad : \quad 150 + 150 = 300 \text{ mm}$$

El acomodamiento de espacio se muestra en la figura 7.5 cuyas dimensiones son:

$$\text{Largo} \quad : \quad 700 \text{ mm}$$

$$\text{Altura} \quad : \quad 400 \text{ mm}$$

$$\text{Ancho} \quad : \quad 300 \text{ mm}$$

y el peso del conjunto será:

$$\text{Bobina alambre-electrodo} \quad : \quad 15 \text{ kg}$$

$$\text{Motor-reductor} \quad : \quad 10 \text{ kg}$$

$$\text{Mueble} \quad : \quad 10 \text{ kg}$$

---

$$35 \text{ kg}$$

**Tercer módulo:** compuesto por la manguera-soplete de soldadura y la botella de gas de protección:

Manguera-soplete de soldadura:

$$\text{Peso aproximado} \quad : \quad 4 \text{ kg}$$

Botella de gas de protección:

$$\text{Peso} \quad : \quad 60 \text{ kg}$$

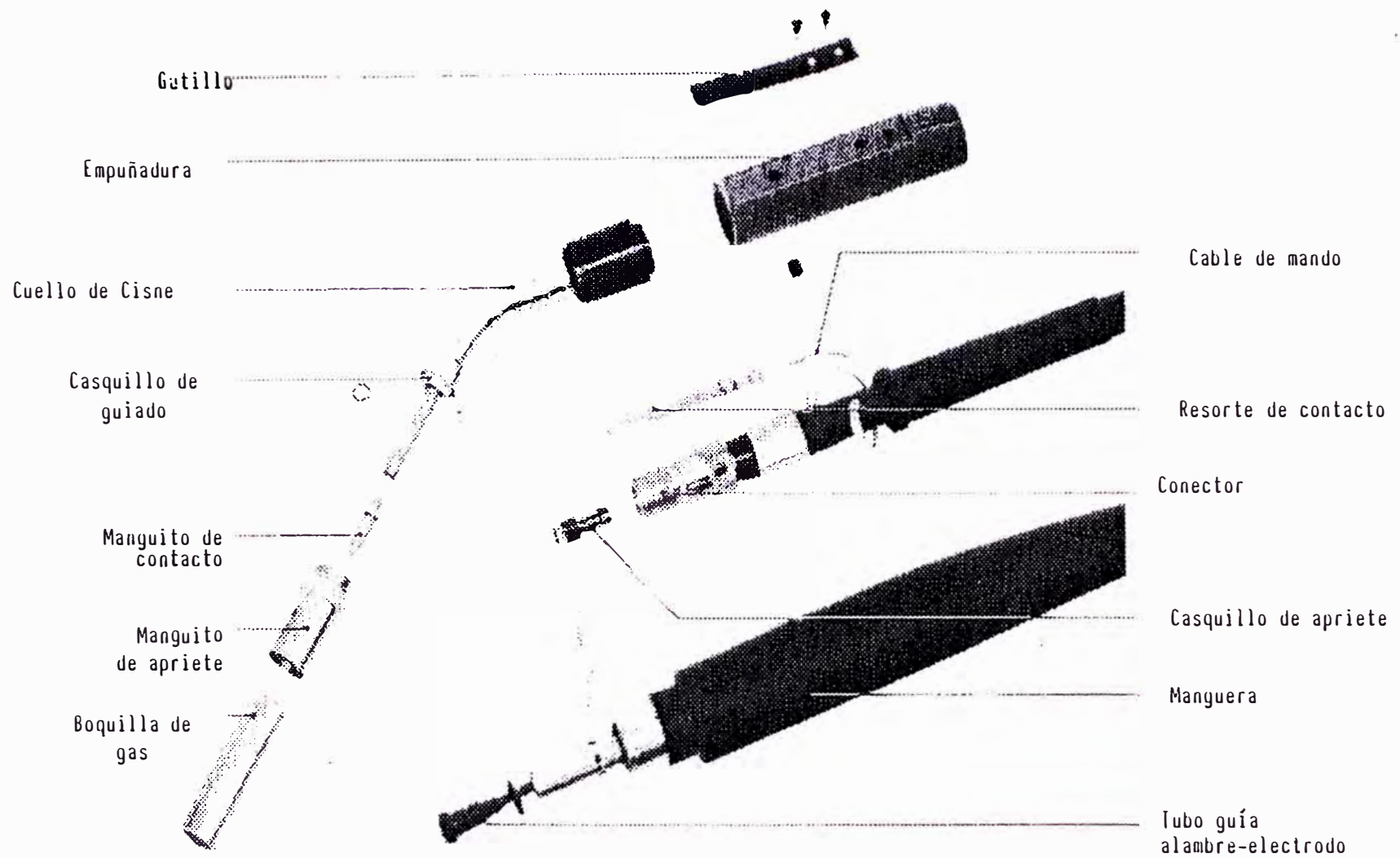
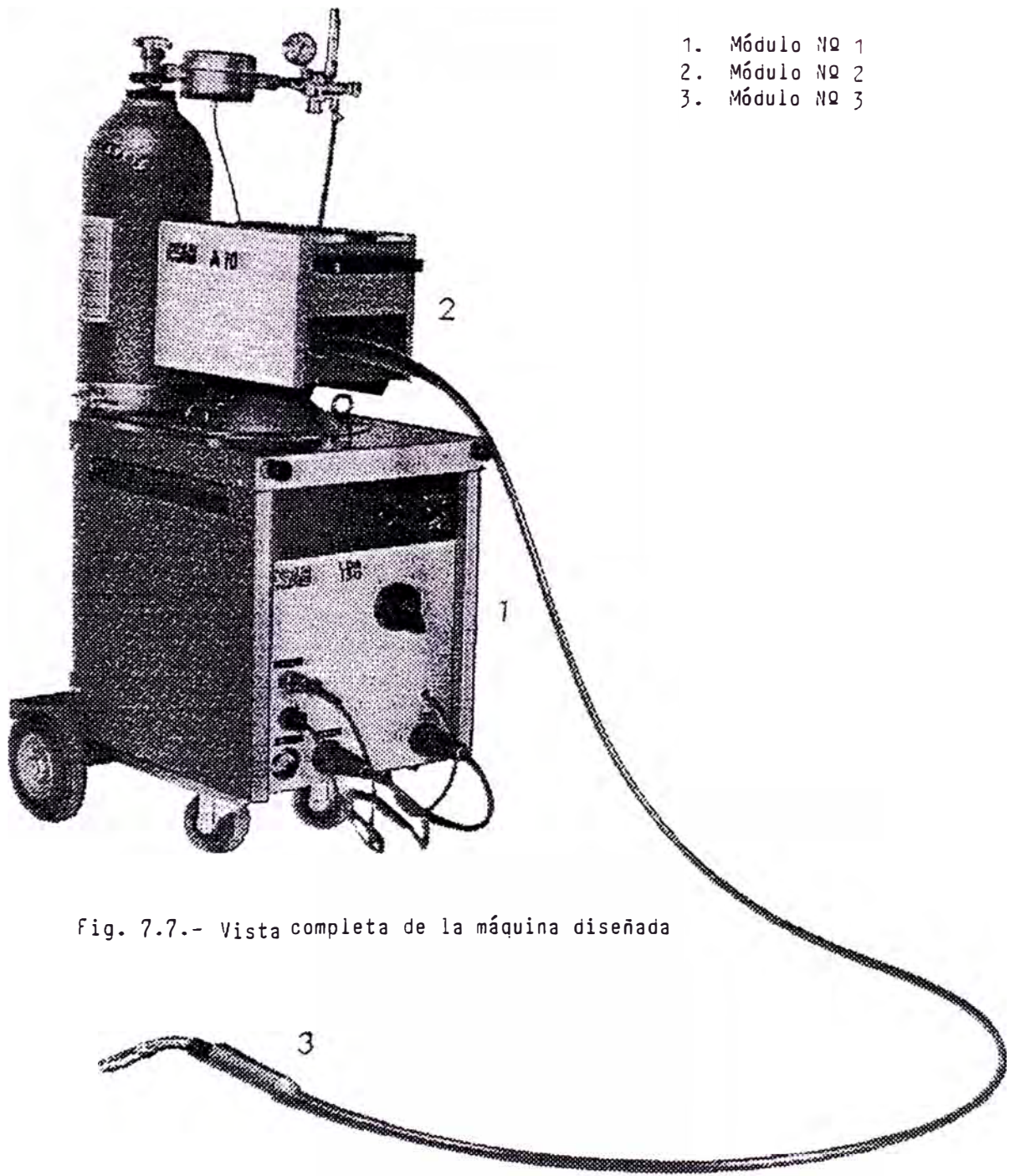


Fig. 7.6 Vista de detalle de la manguera y soplete de soldadura



- 1. Módulo N° 1
- 2. Módulo N° 2
- 3. Módulo N° 3

Fig. 7.7.- Vista completa de la máquina diseñada

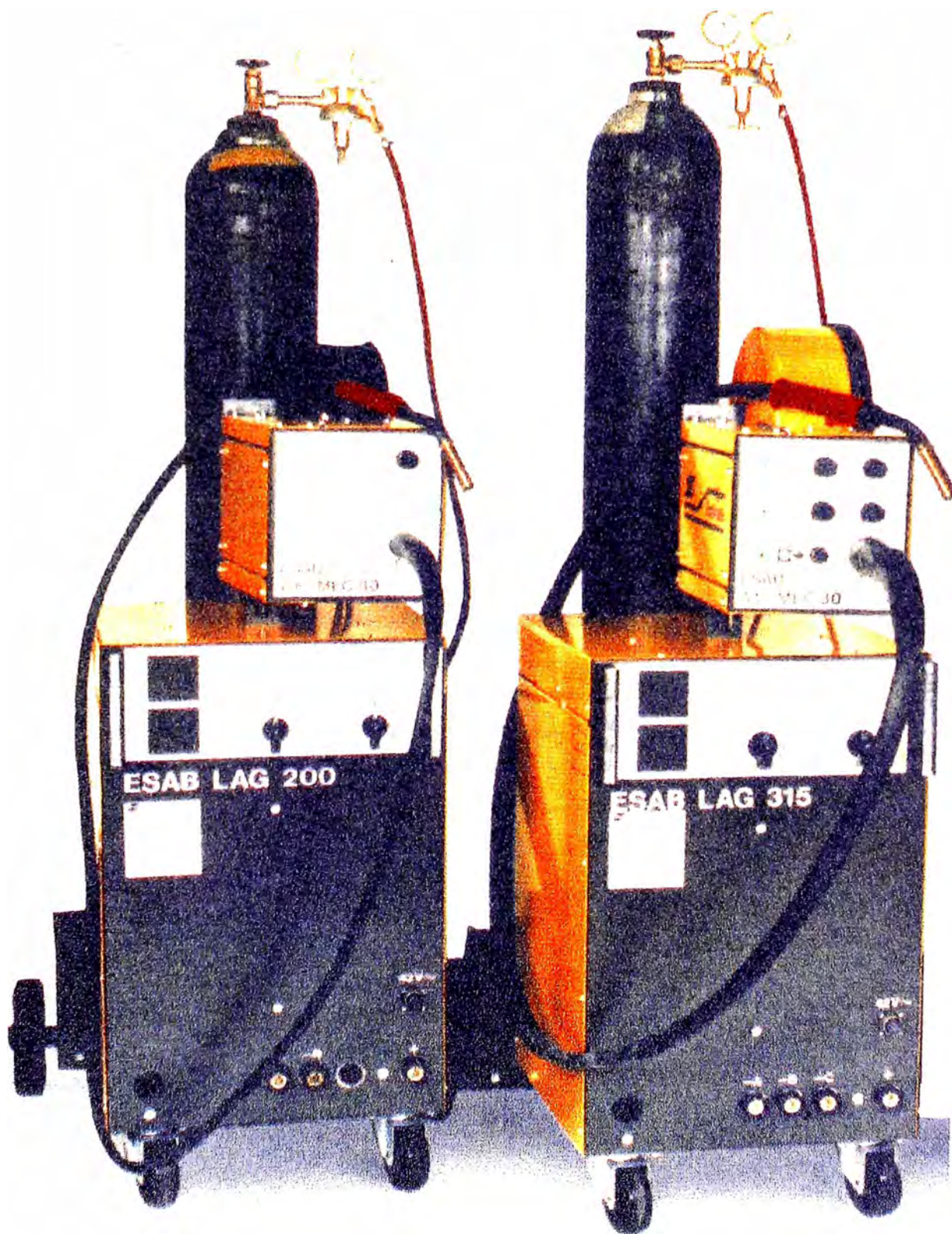


Fig. 7.7.- Máquina de soldar diseñada

Dimensiones:

Diámetro : 200 mm

Altura : 1,200 mm

Luego, la máquina diseñada tendrá un peso total:

1er módulo : 212 kg

2do módulo : 35 kg

3er módulo : 64 kg

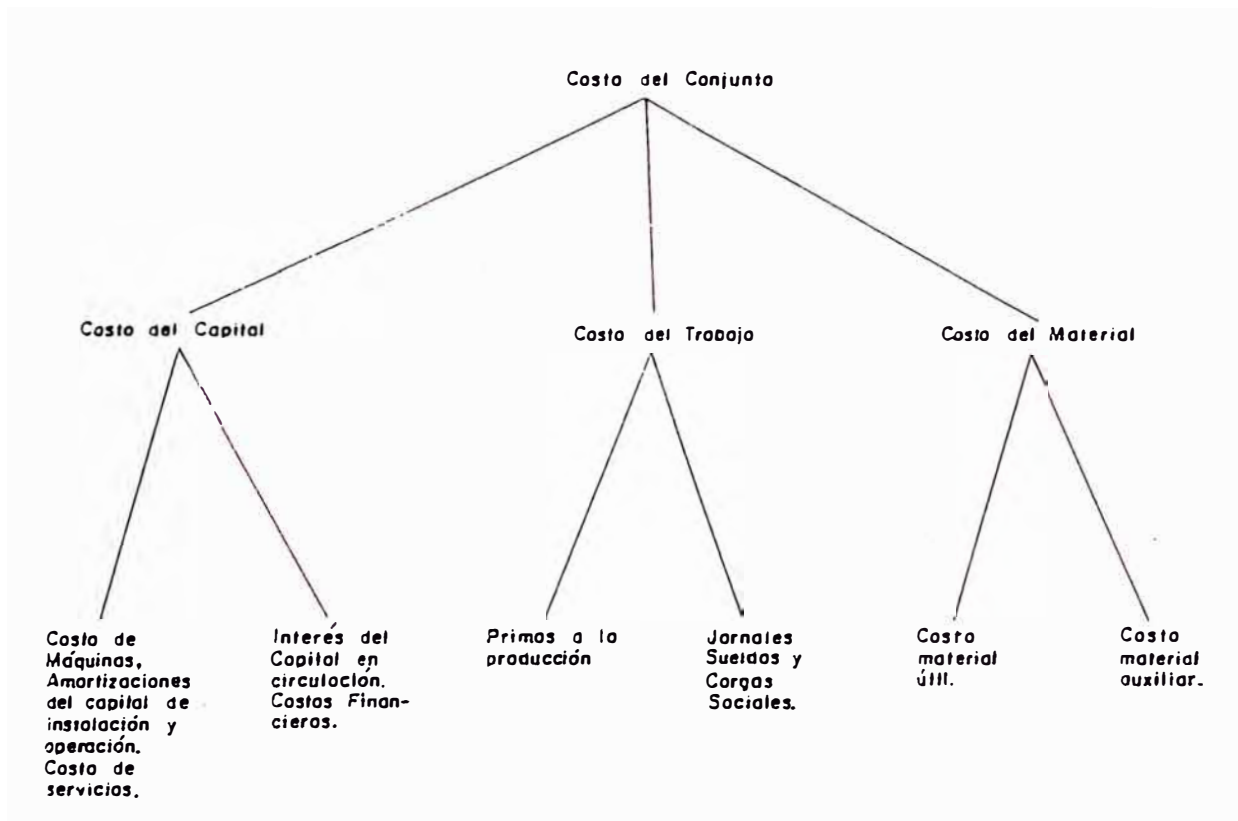
---

PESO TOTAL : 311 kg

CAPITULO VIII  
ANALISIS ECONOMICO

**8.1 Costos**

Son aquellos gastos incurridos en la elaboración de un producto. Comprende los valores de las materias consumidas para la realización de un cierto trabajo y los servicios absorbidos. Son bienes utilizados y se trata de sacar, de un cierto capital un rendimiento de producción máximo, el máximo beneficio y el producto más económico posible.



$$\frac{\text{Beneficio del Trabajo} - \text{Costo del Trabajo}}{\text{Costo de Trabajo}} = \text{Rentabilidad}$$

Los costos tienen que ser menores que el beneficio, pues lo contrario, resulta antieconómico.

Los costos se dividen en:

- a - Costos fijos, y
- b - Costos variables.

### 8.1.1 Costos fijos

Se refieren principalmente al costo de capital. En el costo de capital se encuentra incluido el costo de instalación y operación de la máquina, interés del capital invertido, seguros, impuestos, almacenaje, repuestos y mano de obra de mantenimiento, depreciación y fondo de reposición.

### 8.1.2 Costos variables

Se refieren a los costos de fabricación de una pieza terminada. Intervienen el material consumido, la mano de obra utilizada y algunos gastos generales.

### 8.1.3 Costos unitarios

Son aquellos que se cargan directamente al producto terminado. En las empresas, la contabilidad y la liquidación de servicios se hace por meses y por años; pero, en el taller se cuenta por horas y esto genera los costos por hora o mes (costo por periodo de tiempo). También se puede hacer el cálculo del costo unitario, por pieza terminada (costo por pieza).

En nuestro caso específico de un trabajo de soldadura, haremos el cálculo de costo unitario por metro lineal de



soldadura. Esto se debe a la diversidad de formas que tienen las piezas trabajadas en soldadura.

## **8.2 Análisis de costos**

En la soldadura de arco el costo de producción se divide en:

- a - Costo de Máquina
- b - Costo de materiales consumibles (electrodos y gas de protección).
- c - Costo de mano de obra.
- d Costo de energía.

### **8.2.1 Costo de máquina (C<sub>m</sub>)**

El costo de operación de una máquina es la cantidad de dinero invertido en adquirirla, hacerla funcionar, realizar un trabajo y mantenerla en buen estado de conservación.

Se debe incluir en este "Costo de Operación", el dinero de compra, intereses, seguros, impuestos, almacenaje, gastos de depreciación y demás gastos conexos.

Para determinar el costo de operación, debemos conocer:

- El valor de adquisición de la máquina.
- El valor promedio de inversión anual.

#### **8.2.1.1 Valor de adquisición (VA)**

Se obtiene pidiendo cotizaciones a las casas especializadas en este tipo de máquina.

#### **8.2.1.2 Valor promedio de inversión (VPI)**

Es el valor que se considera como invertido al principio de cada año de la vida de la máquina. Dependerá generalmente del "precio de venta de la máquina", de su "vida económica

útil estimada", del "valor recuperable al final de ésta", al que llamaremos "valor residual".

La vida económica útil de una máquina: es el lapso en que resulta comercialmente provechoso operarla. Terminado éste, resultará más económico reponer una unidad igual nueva que continuar manteniendo la que actualmente opera.

El valor residual (VR): es el valor de reventa que tendría la máquina al final de su vida económica útil y se puede estimar en términos de un porcentaje del valor de adquisición.

El cálculo del valor promedio de inversión de la máquina (VPI), depende de:

- Valor de adquisición.
- Valor económico útil estimado.
- Valor residual estimado.

Si consideramos que al final de la vida útil, es decir al final del tiempo en que la máquina es económicamente aprovechable, su valor residual es del 25% del valor de adquisición, esto quiere decir que únicamente estará sujeto a la depreciación anual, mensual u horaria el 75% restante del valor de adquisición.

Ejemplo: Si tenemos una máquina con vida económicamente útil estimada en 5 años. Su depreciación anual, una vez deducido el valor residual estimado será:

$$\frac{100 - 25}{5} = 15\% \text{ anual}$$

El valor durante el Primer año será:

	$0.25 \text{ VA} + 0.75 \text{ VA} = 1.00 \text{ VA}$
Segundo año:	$0.25 \text{ VA} + 0.60 \text{ VA} = 0.85 \text{ VA}$
Tercer año:	$0.25 \text{ VA} + 0.45 \text{ VA} = 0.70 \text{ VA}$
Cuarto año:	$0.25 \text{ VA} + 0.30 \text{ VA} = 0.55 \text{ VA}$
Quinto año:	$0.25 \text{ VA} + 0.15 \text{ VA} = 0.40 \text{ VA}$
	<hr style="width: 10%; margin-left: auto; margin-right: 0;"/> $3.50 \text{ VA}$

Para obtener el valor promedio para un determinado lapso de vida bastaría dividir la suma de los valores en cada año entre el número de años de vida útil considerados; en este caso el valor promedio de inversión de la máquina es:

$$\frac{3.5 \text{ VA}}{5} = 0.70 \text{ VA}$$

o sea setenta por ciento del valor de adquisición.

#### **8.2.1.3 Costo de operación de máquina**

Una vez fijados los conceptos respecto a lo que es el valor de adquisición y el valor promedio de inversión, podemos entrar a definir los diversos gastos que intervienen en el costo de operación.

**Intereses del capital invertido en la máquina:** Se debe considerar, tanto el propio intereses del capital que es necesario disponer para la compra de la máquina, como las comisiones y gastos adicionales que demanda la transacción. La Cámara Peruana de la Construcción CAPECO, asume para este costo el 12% Anual del V.P.I.

**Seguros, Impuestos, Almacenaje, etc.:** Comprenden éstos el valor de las primas que por este concepto deberán pagarse periódicamente, a fin de tener la máquina a cubierto de

cualquier accidente; el depósito y el cuidado de las mismas durante los lapsos de inactividad. CAPECO estima para este costo un promedio del 8% del V.P.I.

**Repuestos y mano de obra de reparaciones:** Este acápite ofrece gran variación con las condiciones particulares en cada caso. En Estados Unidos por ejemplo, por concepto de repuestos y mano de obra de reparación durante la vida de una máquina se estima un promedio que alcanza un 100% del valor de venta.

En el país debemos tener un criterio más pesimista a este respecto, si consideramos lo siguiente:

El 100% por concepto de gastos de reparaciones puede descomponerse en 75% por costo de repuestos y 25% por costo de mano de obra en los Estados Unidos u otro país igualmente industrializado.

EL 75% del costo de repuestos se ve incrementado por los costos de distribución (cuando se compra el stock de un distribuidor autorizado sino esto será un cobro administrativo por hacer el pedido directo). En total el costo de repuesto vendrá a ser aproximadamente:

$$\begin{array}{rcl}
 \text{Precio Original} & = & 100 \\
 \text{Costo de distrib.} & = & 40 \\
 & & \hline
 & & 140 \times 75\% \\
 & & = 105\% \text{ del precio original}
 \end{array}$$

El 25% correspondiente a mano de obra, si bien en otros países industrializados el nivel de pago es superior que en nuestro país, esta situación se puede compensar con las facilidades de orden técnico y de equipamiento que tiene

el personal, que determina por lo tanto, que aceptamos la incidencia del 25% de mano de obra.

Si además consideramos un 25% extra, en gastos de transporte al lugar de la obra y otros, tenemos que en total el costo por concepto de repuestos puede representar un 155% o más del valor de adquisición.

Luego, podemos estimar por gastos de mantenimiento:

Costo de Repuestos	=	105%
Costo Mano de Obra	=	50%
		<hr/>
Total		155%

Ejemplo: Vida económica en años

en cierta máquina : 10 años

Gastos por Mantenimiento anual ideal:

$$\frac{VA}{\text{Años}} = \frac{100\%}{10} = 10\%$$

Costo de Repuestos: 105%(10)	=	10.5%
Costo Mano de Obra : 50%(10)	=	5.0%
		<hr/>
Costo Total Mantenimiento Anual	=	15.5%VA

**Depreciación:** Se considera aquí la evaluación del desgaste natural de la máquina. En principio este factor es difícil de establecer por ser muy variables las posibles condiciones de trabajo y de servicio de conservación de cada unidad. Es necesario primero, establecer la vida útil de la máquina. Un promedio aceptable en la mayoría de los casos para condiciones de trabajo normales, es de 10,000 horas, lo que equivale a 05 años de 10 meses, cada mes de 25 días y cada día de 08 horas útiles de trabajo.

Establecida la vida útil, determinamos la depreciación, teniendo en cuenta el valor que se ha considerado como valor residual. Si este fue de 0.25 VA de la máquina, solamente estará sujeto a la depreciación anual el 75% restante.

$$\text{Depreciación por hora} = \frac{0.75 \text{ VA}}{\text{tiempo de vida en horas}}$$

**Fondo de Reposición:** En algunas fábricas el plan de amortización anual se aumenta para proporcionar una cifra al final de la vida útil para la compra de una nueva instalación.

$$\text{Amortización por hora} = \frac{V.A. - V.R.}{\text{Tiempo de vida en horas}}$$

El costo anual de máquina se divide por el número de horas de elaboración al año y se obtiene el costo por hora.

### 8.2.2 Costo de materiales

En soldadura el costo de material consumible comprende:

- a - Costo de electrodos
- b - Costo de gas de protección

#### 8.2.2.1 Costo de electrodos (C<sub>e</sub>)

El costo de electrodos se calcula con la siguiente fórmula:

$$C_e = \frac{\text{Kg electrodo consumido}}{\text{mt. de soldadura}} \times \frac{\text{Precio}}{\text{Kg. electrodo}}$$

La eficiencia de deposición es el % de electrodo que se usa y deposita en la unión de soldadura. Con la soldadura por arco manual, utilizando electrodo recubierto, una gran parte del electrodo se desperdicia en recubrimiento, extremo del

electrodo y salpicaduras, resultando con una eficiencia de deposición de menos del 70%.

Sin embargo, la soldadura semiautomática MIG, que casi no produce salpicaduras y no tiene extremos por desperdiciar, tiene una eficiencia de deposición del 90%.

El costo efectivo del electrodo por metro de soldadura será:

$$C_e = \frac{\frac{\text{kg de depósito}}{\text{mt de soldadura}} \times \frac{\text{Precio}}{\text{kg de electrodo}}}{\text{Eficiencia de deposición}}$$

#### 8.2.2.2 Costo de gas de protección (C<sub>g</sub>)

El costo de gas de protección se calcula con la siguiente fórmula:

$$C_g = \frac{\frac{\text{Flujo de Gas en } \frac{\text{m}^3}{\text{hora}} \times \frac{\text{Precio}}{\text{m}^3 \text{ de gas}}}{\text{Velocidad de soldadura en } \frac{\text{m}}{\text{hora}}}}$$

#### 8.2.3 Costo de mano de obra (C<sub>mo</sub>)

La mano de obra y los gastos generales pueden ser calculados como un total. En los gastos generales están consideradas las cargas sociales más los gastos administrativos.

El costo de la mano de obra se calcula con la siguiente fórmula:

$$C_{mo} = \frac{\frac{\text{Salario}}{\text{Hora}} (\text{Mano de Obra} + \text{Gastos Generales})}{\frac{\text{Velocidad de soldadura en } \frac{\text{m}}{\text{Hora}} \times \text{Factor de operación}}$$

El factor de operación: es el % de tiempo de soldador en su operación de soldar. Debido al cambio de electrodos y limpieza de la costra, el soldador con electrodo recubierto suelda efectivamente durante un 30% o menos del tiempo, mientras que el operario de soldadura semiautomática MIG está produciendo soldaduras en más de un 60% de su tiempo.

#### 8.2.4 Costo de energía

El costo de energía será pequeño y casi igual en ambos procesos por lo que vamos ignorarla cuando se hagan los cálculos. En todo caso podría considerarse incluido en los gastos generales.

El costo de producción final será:

$$C_o = C_m + C_e + C_g + C_{mo}$$

donde:

$C_o$  = Costo de producción final

$C_m$  = Costo de Máquina

$C_e$  = Costo de Electrodo

$C_g$  = Costo de gas de protección

$C_{mo}$  = Costo de mano de obra

### 8.3 Análisis comparativo de costos en un proceso de soldadura entre un sistema por "Arco Manual" y otro "semiautomático MIG"

La finalidad de este capítulo es hacer el análisis comparativo de costos en la ejecución de un proceso de soldadura determinado, utilizando una máquina de soldar por Arco Manual versus una máquina de soldar semiautomática MIG. Luego de hecha la comparación veremos cual de los dos procedimientos es el más



económico y a partir de cuántas piezas terminadas o metros lineales trabajados, resulta económicamente más rentable.

Haremos el Análisis comparativo de costos unitarios por metro lineal de soldadura.

Muestra de trabajo: Plancha de Acero dulce estructural de 1/4" de espesor, soldadura a tope con chaflán a 60°.

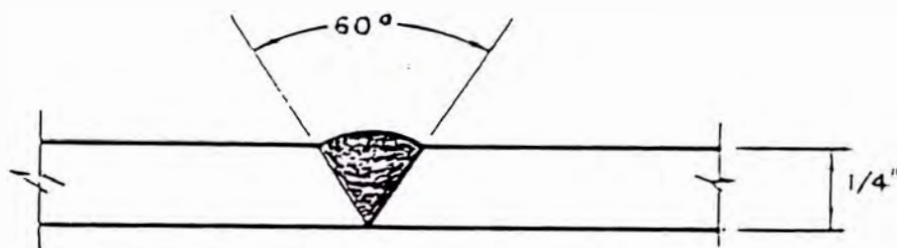


Fig. 8.1 Soldadura a tope con chaflán a 60°, plancha de acero estructural 1/4" de espesor.

### 8.3.1 Sistema MIG

#### 8.3.1.1 Costo de máquina

- Máquina de soldar semiautomática por arco eléctrico bajo protección gaseosa, corriente de soldadura de 300 Amp.
- Vida Económica Util: 05 años
- Valor de Adquisición VA: 5,000\$ USA
- Valor Promedio de inversión Anual VPI: 70% VA
- Valor Residual VR: 25% VA
- Depreciación Anual: 15% VA
- Interés de Capital Anual (12% del VPI): 8.4% VA
- Seguros, gastos de almacenamiento anual (8% del VPI): 5.6% VA
- Gastos de mantenimiento anual
- Repuestos: 21% VA

Mano de Obra: 10% VA

- Amortización Anual: 15% VA

**Costo Anual de Máquina**

$$C_{m \text{ anual}} = 70\% \text{ VA} + 8.4\% \text{ VA} + 5.6\% \text{ VA} \\ + 21\% \text{ VA} + 10\% \text{ VA} + 15\% \text{ VA}$$

$$C_{m \text{ anual}} = 130\% \text{ VA} = 1.30 \text{ VA} = 1.3 \times 5,000\$ \text{ USA}$$

$$C_{m \text{ anual}} = 6,500\$ \text{ USA/AÑO}$$

**Costo de Máquina por hora**

Horas de funcionamiento al año:

$$1 \text{ año} \times 10 \text{ meses} \times 25 \text{ días} \times 8 \text{ horas} = 2,000 \text{ hrs/año}$$

$$C_m = \frac{6,500 \$ \text{ USA /año}}{2,000 \text{ horas/año}} = 3.25 \$ \text{ USA/hora}$$

**Costo de máquina por metro de soldadura**

Datos de tablas de soldadura:

Velocidad de soldadura  $V_s$ :

$$V_s = 20 \frac{\text{pulg}}{\text{min}} = 30.48 \frac{\text{mt}}{\text{hora}}$$

Factor de operación:  $f_{op} = 60\%$

$$C_m = \frac{3.25 \$ \text{ USA/hora}}{30.48 \text{ mt/hora} \times 0.6} = 0.1777 \$ \text{ USA/mt}$$

**8.3.1.2 Costo de material**

**- Costo de Alambre-electrodo**

Cotización de Rollos de alambre MIG HB-25 de 30 libras

c/u. de 0.045"  $\phi$  (1.2 mm  $\phi$ ): 4.11 \$ USA/Kg

Suponiendo que el tiempo de inactividad es cero, se puede depositar 2.12 kg. de metal en una hora con alambre-electrodo de 1.2 mm  $\phi$  (según tablas).

Velocidad depósito de soldadura  $V_{\text{depo}}$ :

$$V_{\text{depo}} = 2.12 \text{ Kg/hora}$$

eficiencia de deposición:  $n = 90\%$

Peso de electrodo depositado por metro de soldadura:

$$W_e = \frac{2.12 \text{ Kg/hora}}{30.48 \text{ mt/hora} \times 0.9} = 0.077 \text{ kg/mt}$$

Costo del electrodo por metro de soldadura:

$$C_e = 0.077 \text{ kg/mt} \times 4.11 \text{ \$ USA/kg}$$

$$C_e = 0.3165 \text{ \$ USA/mt}$$

- Costo de Gas de Protección:  $\text{CO}_2$

Usaremos  $\text{CO}_2$  como gas de protección por ser el más económico.

Cotización de balón de  $\text{CO}_2$  de 15 kg

(Fabricación Nacional) : 9.2 \$ USA

15 Kg equivalente a 6 m<sup>3</sup>

Costo de  $\text{CO}_2$  por m<sup>3</sup>:

$$\frac{9.2 \text{ \$USA}}{6 \text{ m}^3} = 1.53 \text{ \$USA/m}^3 = 0.043 \text{ \$USA/Pie}^3$$

De las tablas de soldadura, tenemos que el flujo de gas para alambre-electrodo de 1.2 mm  $\phi$  es:

Flujo de Gas  $\text{CO}_2$  : 35 Pie<sup>3</sup>/Hora

Vel. sold.  $V_s = 20 \text{ Pulg/min} = 100 \text{ Pie/hora}$

Tiempo necesario para soldar un (01) pie de longitud:

100 Pie ----- 01 hora

01 Pie ----- t horas

$$t = \frac{1}{100} \text{ horas}$$

Cantidad de CO<sub>2</sub> por pie de soldadura:

$$\frac{1}{100} \text{ horas/Pie} \times 35 \text{ Pie}^3/\text{hora} = 0.35 \frac{\text{Pie}^3 \text{ CO}_2}{\text{Pie sold.}}$$

Costo de CO<sub>2</sub> por pie de soldadura:

$$C_q = 0.35 \frac{\text{Pie}^3 \text{ CO}_2}{\text{Pie sold.}} \times 0.043 \frac{\$ \text{ USA}}{\text{Pie}^3 \text{ CO}_2}$$

$$C_q = 0.0152 \text{ \$USA/Pie}$$

Costo de CO<sub>2</sub> por metro de soldadura

$$C_q = 0.0152 \frac{\$ \text{ USA}}{\text{Pie}} \times \frac{1 \text{ Pie}}{0.3048 \text{ mt}}$$

$$C_q = 0.05 \text{ \$USA/mt}$$

### 8.3.1.3 Costo de mano de obra

El cálculo de costos de materiales han sido realizados considerando un tiempo de inactividad cero (tiempo de fusión del electrodo).

Para el cálculo de la mano de obra debemos considerar el tiempo real.

Tiempo real = tiempo de fusión + tiempo de descanso

Tiempo de descanso: encendido del arco, observación del cordón de soldadura, tiempo de recibir instrucciones, etc.

Para soldadura semiautomática con CO<sub>2</sub> se considera un factor de operación del 60% (según tablas).

La mano de obra promedio de un soldador calificado, en el país, es de aproximadamente:

200 \$USA/mes

Costo de Mano de obra por hora:

$$200 \frac{\$USA}{\text{mes}} \times \frac{1 \text{ mes}}{200 \text{ hora}} = 1.00 \text{ \$USA/hora}$$

Hora-Hombre:	1.0 \$USA +
Gastos Generales:	<u>2.0 \$USA</u>
Costo mano de obra/hora:	3.0 \$USA

Costo de Mano de Obra por metro de soldadura

$$C_{MO} = \frac{3.0 \text{ \$USA/hora}}{30.48 \text{ mt/hora} \times 0.6}$$

$$C_{MO} = 0.164 \text{ \$USA/mt}$$

### 8.3.2 Sistema por arco manual

#### 8.3.2.1 Costo de máquina

- Máquina de soldar por Arco Manual, corriente de soldadura de 300 Amp., ciclo de trabajo 80%.
- Vida económica útil: 10 años
- Valor de adquisición VA: 1,000 \$USA
- Valor Promedio de Inversión VPI: 64% VA
- Valor Residual VR: 20% VA
- Depreciación Anual: 8% VA
- Interés de capital anual (12% del VPI) 7.68% VA
- Seguros, gastos de almacenamiento anual (8% del VPI): 5.12% VA

- Gastos de mantenimiento anual:
  - Repuestos : 10.5% VA
  - Mano de obra: 5% VA
- Amortización anual: 8% VA

**Costo Anual de Máquina:**

$$C_{m \text{ anual}} = 64\% \text{ VA} + 7.68\% \text{ VA} + 5.12\% \text{ VA} + \\ + 10.5\% \text{ VA} + 5\% \text{ VA} + 8\% \text{ VA}$$

$$C_{m \text{ anual}} = 100.3\% \text{ VA} = 1.003 \text{ VA} = 1.003 \times 1,000 \text{ \$USA}$$

$$C_{m \text{ anual}} = 1,003 \text{ \$USA/Año}$$

**Costo de Máquina por hora:**

$$C_m = \frac{1,003 \text{ \$USA/año}}{2,000 \text{ horas/año}} = 0.5015 \text{ \$USA/hora}$$

**Costo de máquina por metro de soldadura:**

De las tablas de soldadura OERLIKON:

Velocidad de soldadura  $V_s$ :

$$V_s = 9.65 \text{ mt/hora}$$

Factor de operación: fop = 30%

$$C_m = \frac{0.5015 \text{ \$USA/hora}}{9.65 \text{ mt/hora} \times 0.3} = 0.1732 \text{ \$USA/mt}$$

**8.3.2.2 Costo de material**

**- Costo de Electrodo**

Usaremos electrodo rutilico con revestimiento OERLIKON

Tipo E-6012 OVERCORD F. (Fabricación Nacional).

Cotización de lata de 20 kg. de electrodo

E-6012: 44 \$USA

Considerando un tiempo de inactividad cero, se

depositarán: (según tablas)

$$V_{dep} = 1.88 \text{ kg/hora}$$

Eficiencia de deposición:  $n = 70\%$

Peso de metal fundido por metro de soldadura:

$$W_{m\tau} = \frac{1.88 \text{ kg/hora}}{9.65 \text{ mt/hora} \times 0.7}$$

$$W_{m\tau} = 0.2795 \frac{\text{kg de metal fundido}}{\text{mt de soldadura}}$$

Relación de peso entre un electrodo con revestimiento en frío y su núcleo fundido:

Peso de un (01) electrodo:

Núcleo metálico + revestimiento = 71.43 gr

Peso de metal depositado por (01) electrodo

Núcleo metálico = 53.60 gr

Luego, el peso de electrodos utilizados para soldar un metro lineal será:

$$W_e = 0.2795 \frac{\text{kg metal dep.}}{\text{mt}} \times \frac{0.071 \text{ kg electrodo}}{0.053 \text{ kg met. dep.}}$$

$$W_e = 0.3725 \frac{\text{kg de electrodo}}{\text{mt de sold.}}$$

El costo de kg. de electrodo será:

$$\frac{44 \text{ \$USA}}{20 \text{ Kg.}} = 2.2 \frac{\text{\$USA}}{\text{kg electrodo}}$$

Costo de electrodos por metros de soldadura

$$C_e = 0.3725 \frac{\text{kg electrodo}}{\text{metro}} \times \frac{2.2 \text{ \$USA}}{\text{kg. electrodo}}$$

$$C_e = 0.8195 \text{ \$USA/mt}$$

- Costo de gas de protección

No hay.

**8.3.2.3 Costo de mano de obra**

Factor de operación : 30%

Costo de Mano de Obra por metro de soldadura:

$$C_{mo} = \frac{3.0 \text{ \$USA/hora}}{9.65 \text{ mt/hora} \times 0.30}$$

$$C_{mo} = 1.036 \text{ \$USA/mt}$$

**8.3.3 Cuadro comparativo de costos**

De los resultados obtenidos podemos armar los siguientes cuadros:

Datos básicos para soldadura a tope con chaflán a 60°, posición horizontal, de plancha de acero estructural de 1/4" (6.35 mm.) de espesor.

DESCRIPCION	MIG	ARCO MANUAL
- Costo Hora-máquina \$USA/Hora	3.25	0.5015
- Salario por hora \$USA/Hora	3.0	3.0
(Mano de obra+Gastos Generales)		
- Velocidad de soldadura mt/hora	30.48	9.65
- Factor de Operación %	60	30
- Velocidad de deposición de soldadura kg/hora.	2.12	1.88
- Eficiencia de deposición %	90	70
- Peso de electrodos depositados por mt de soldadura kg/mt	0.077	0.2795
- Precio de electrodo \$USA/kg	4.11	2.20
- Precio de electrodo depositado \$USA/kg	4.57	4.21
- Flujo de gas CO <sub>2</sub> m <sup>3</sup> /hora (pie <sup>3</sup> /hora)	0.99 (35.00)	—————
- Precio de gas CO <sub>2</sub> \$USA/m <sup>3</sup> (\$USA/Pie <sup>3</sup> )	1.53 (0.043)	—————



**Cuadro Comparativo de Costos por metro lineal de soldadura**

COSTOS	CLASE COSTO	MIG	ARCO MANUAL
- Costo de operación de máquina por metro de soldadura \$USA/mt	Fijo	0.1777	0.1732
- Costo de electrodo por metro de soldadura \$USA/mt	Variable	0.3165	0.8195
- Costo de Gas CO <sub>2</sub> por metro de soldadura \$USA/mt	Variable	0.05	—
- Costo de mano de obra por metro de soldadura \$USA/mt	Variable	0.164	1.036
- Sumatoria de costos de variables por metro de soldadura \$USA/mt		0.5305	1.8555
- Costo total por metro de soldadura \$USA/mt		0.7082	2.0287
- Ahorro en costo por metro de sold. \$USA/mt		1.3205	
- % de Ahorro		65	

**8.3.4 Punto de equilibrio (P<sub>e</sub>)**

Es el punto donde los gastos unitarios por metro lineal de soldadura son iguales en ambos procedimientos. Antes del punto de equilibrio el sistema por Arco Manual es económicamente más rentable. Después del punto de equilibrio el sistema semiautomático MIG es más rentable.

$$P_e = \frac{|\text{Gastos Fijos}|}{|\text{Gastos Variables}|} = \frac{5,000 - 1,000}{1.8555 - 0.5305}$$

$$P_e = \frac{4,000}{1.325} = 3,019 \text{ mts.}$$

Luego de trabajado 3,019 metros, el sistema semiautomático es más rentable.

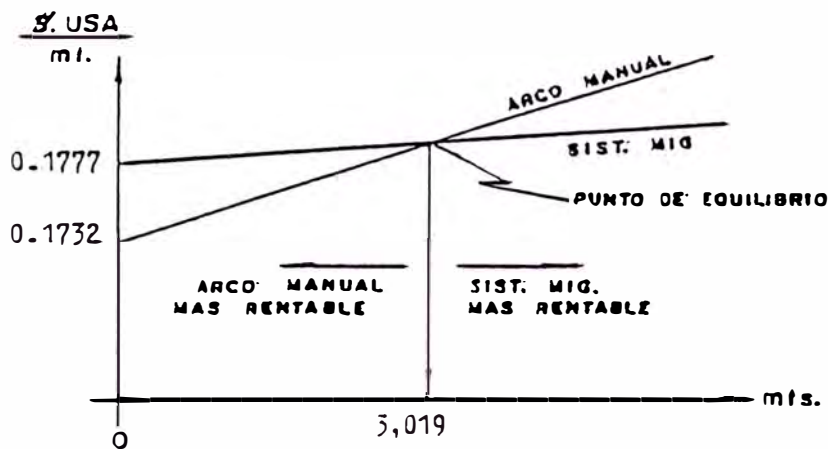


Fig. 8.2 Punto de equilibrio de costos.

### 8.3.5 Ejemplos de ahorro de costos

a. En la construcción de embarcaciones pesqueras de pequeño calado, por ejemplo, de una embarcación de 36 metros de longitud de 120 toneladas se emplean 3,600 kg. de soldadura, equivalente a 18,560 metros lineales de soldadura.

$$\text{Arco Manual: } 18,560 \times 2.0287 \text{ \$/mt} = 37,652 \text{ \$USA}$$

$$\text{Sist. MIG : } 18,560 \times 0.7082 \text{ \$/mt} = 13,144 \text{ \$USA}$$

$$\text{Ahorro} = 24,508 \text{ \$USA}$$

b. En la construcción de tanques para depósitos de las dimensiones que se muestra en la fig. 8.3 se emplean 38 kg de soldadura, equivalente a trabajar 180 metros lineales de soldadura por depósito.

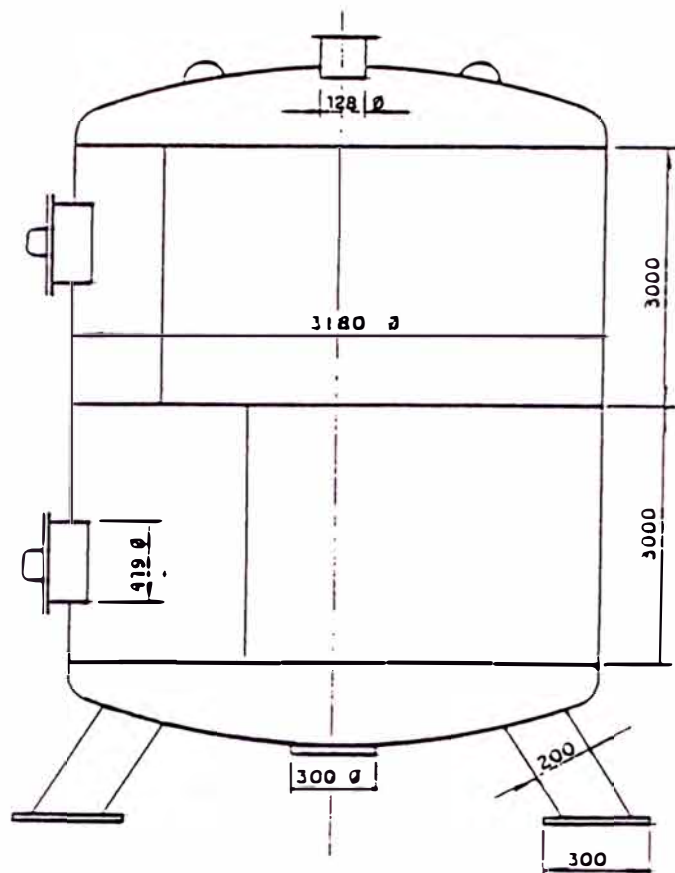


Fig. 8.3 Tanque para depósito (Dimensiones en mm).

Luego:

$$\frac{3,019 \text{ mt}}{180 \text{ mt/tanque}} = 16.77 \approx 17 \text{ tanques}$$

Es económicamente rentable trabajar con el sistema semiautomático MIG para hacer 17 depósitos o más.

Haremos el desarrollo del Análisis comparativo de costos para la construcción de un tanque para depósito:

Soldadura con arco manual:

Costo de materiales/tanque

$$0.8195 \frac{\$USA}{\text{mt}} \times \frac{180 \text{ mt}}{\text{tanque}} = 147.51 \frac{\$USA}{\text{tanque}}$$

Costo de mano de obra/tanque

$$1.036 \frac{\$USA}{mt} \times \frac{180 \text{ mt}}{\text{tanque}} = 186.48 \frac{\$USA}{\text{tanque}}$$

Suma de costos variables:

$$147.51 + 186.48 = 334 \text{ \$USA}$$

Costo de máquina: 1,000 \$USA

Costo para el primer tanque:

$$1,000 + 334 = 1,334 \text{ \$USA/tanque}$$

**Soldadura con sistema MIG:**

Costo de materiales/tanque

(electrodo + Gas de protección)

$$0.3655 \frac{\$USA}{mt} \times \frac{180 \text{ mt}}{\text{tanque}} = 65.77 \frac{\$USA}{\text{tanque}}$$

Costo de mano de obra/tanque

$$0.164 \frac{\$USA}{mt} \times \frac{180 \text{ mt}}{\text{tanque}} = 29.52 \frac{\$USA}{\text{tanque}}$$

Suma de costos variables:

$$67.97 + 29.52 = 95.5 \text{ \$USA}$$

Costo de máquina: 5,000 \$USA

Costo para el primer tanque:

$$5,000 + 95.5 = 5,095.5 \text{ \$USA/tanque}$$

El punto de coincidencia de costo es:

$$n = \frac{5,000 - 1,000}{334 - 95.5} = 16.77$$

$n \approx 17$  tanques.

**COMPARACION DE COSTOS DE SOLDADURA ENTRE EL SISTEMA MIG vs ARCO MANUAL PARA LA CONSTRUCCION DE TANQUES DE DEPOSITO DE LA FIGURA 8.3**

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA	COSTO \$ USA		NUMERO DE TANQUES PARA DEPOSITO						
	Para	Clase	1	10	16	17	20	50	100
Soldadura con Arco Manual	Máquina	Fijo	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	Materiales	Variable	148	1,480	2,368	2,516	2,960	7,400	14,800
	Jornales	Variable	187	1,870	2,992	3,179	3,740	9,350	18,700
	Suma		1,335	4,350	6,360	6,695	7,700	17,750	34,500
	Costo por pieza		1,335	435	398	394	385	355	345

PROCEDIMIENTO DE SOLDADURA	COSTO \$ USA		NUMERO DE TANQUES PARA DEPOSITO						
	Para	Clase	1	10	16	17	20	50	100
Soldadura con Sistema MIG	Máquina	Fijo	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000	5,000
	Materiales	Variable	66	660	1,056	1,122	1,320	3,300	6,600
	Jornales	Variable	30	300	480	510	600	1,500	3,000
	Suma		5,096	5,960	6,536	6,632	6,920	9,800	14,600
	Costo por pieza		5,096	596	409	390	346	196	146

## CONCLUSIONES

1. El presente trabajo a criterio del autor representa una modesta contribución desde el punto de vista teórico, al análisis completo del comportamiento de una máquina de soldar semiautomática por arco eléctrico bajo atmósfera protectora de gas inerte. La formulación teórica del presente trabajo puede servir de guía en la técnica de diseño de este tipo de máquinas de soldar por la minuciosidad con que se ha desarrollado el tema, así como por la justificación teórica que se da a cada uno de los pasos de diseño.
2. Se presenta una aplicación práctica del diseño de una máquina de soldar de 300 amperios de corriente máxima de soldadura. Se muestran las especificaciones técnicas para la construcción de la máquina, estableciendo las condiciones mecánicas y eléctricas que debe cumplir así como su disposición de volumen y peso. Se puede emplear los mismos principios teóricos como guía para diseñar otra máquina de soldar con los rangos de corriente de soldadura deseados.
3. Se contribuye al desarrollo de la tecnología nacional, ya que sustituye tecnología extranjera, pudiéndose construir íntegramente en el país utilizando materiales de fabricación nacional disponibles en el mercado local. Se ha hecho una investigación de mercado en el ámbito nacional, encontrándose

que este tipo de máquinas no se construyen en el país, no por falta de insumos, si no mas bien por la falta de tecnología para construirlas. Todas las máquinas de soldar de este tipo existentes en el país son importadas. Actualmente en el país se construyen solo máquinas de soldar por arco manual, y aún algunas de estas se fabrican bajo patente ó licencia extranjera.

4. Se demuestra que el uso de este tipo de máquinas de soldar y su procedimiento de soldadura es económicamente más rentable que los procedimientos de soldadura convencionales.

Podemos concluir lo siguiente:

- 4.1 Se obtiene una mejor calidad de soldadura a un menor costo.
- 4.2 Se consigue un ahorro de material de aporte por metro lineal de soldadura.
- 4.3 El tiempo de soldadura es menor, por lo que los trabajos se hacen con mayor rapidez.
- 4.4 El procedimiento de soldadura empleado es más confiable.
- 4.5 Se obtiene un ahorro de costo de mano de obra.
- 4.6 Se obtiene una mejor utilización y mayor rendimiento de uso de la capacidad instalada del taller.

## BIBLIOGRAFIA

1. Manual de la tecnologia de la soldadura eléctrica por arco.  
Helmut Koch  
Tomo A:       Cap 1:       pags. 5-19  
              Cap 2:       pags. 24-47  
              Cap 3:       pags. 66-67  
Tomo B:       Cap 1:       pags. 168-171, 204-207  
              Cap 2:       pags. 248-271, 298-304  
Editorial Reverté S.A.  
Edición 1965.
2. Física del arco de soldadura  
Nils Manmarlund - Lars Lundstram  
Pags 1-28  
AGA  
Amsterdam, Holanda 1979
3. Manual de Soldadura Hobart  
Cap 10:       pags. 65-78  
Hobart Brothers A.G.  
Amsterdam, Holanda 1964
4. Manual de soldadura Oerlikon  
Cap 1:        pags. 9-16  
OERLIKON  
Lima 1980
5. Electroodos y Varillas para aceros  
OERLIKON  
Cap 12:       pags. 65-78  
Lima 1980
6. Física  
Volumen III: Fundamentos Cuánticos y Estadísticos  
Marcelo Alonso - Edwards J. Finn  
Cap 1:        pags. 12-14, 18-30  
Cap 4:        pags. 164-177  
Cap 6:        pags. 252-259, 270-273  
Cap 10:       pags. 462-463  
Cap 13:       pags. 538-540  
Editorial Fondo Educativo Interamericano S.A.  
Edición 1971



7. Cálculo Industrial de Máquinas Eléctricas  
Juan Corrales Martín  
Tomo I: Cap 1.10: pags. 474-479  
Tomo II: Cap 2.09: pags. 431-502  
Cap 2.10: pags. 503-561  
Editorial Marcombo Boixareu Editores  
Barcelona, España, edición 1982
8. La escuela del técnico electricista  
Tomo 7: Teoría, cálculo y construcción de transformadores  
Juan Corrales Martín  
Cap 8: pags. 535-582  
Editorial Labor S.A.  
Barcelona, España, Quinta Edición 1969
9. Elements of electrical machine design.  
Alfred still and Charles S. Sisking  
Cap 12: pags. 339-351  
Editorial McGraw-Hill  
New York 1954
10. Circuitos Magnéticos y Transformadores  
E.E. Staff of M.I.T.  
Cap 3: pags. 54-80  
Cap 5: pags. 121-149  
Cap 6: pags. 151-186  
Cap 7: pags. 220-222  
Editorial Mc Graw-Hill  
Cambridge, Massachusetts 1943
11. Principios de Conversión de energía electromecánica  
Jerome Meisel  
Cap 1: pags. 25-29  
Cap 8: pags. 371-376  
Editorial McGraw-Hill  
Mexico 1975
12. Máquinas electromagnéticas y electromecánicas  
Leander W. Matsch  
Cap 2: pags. 69-79  
Editorial Representaciones y Servicios de Ingeniería , S.A.  
Mexico 1974
13. Teoría y Análisis de las máquinas eléctricas  
Fitzgerald, Kingsley, Kusko  
Cap 8: pags. 357-385  
Cap 10: pags. 407-430  
Editorial Hispano Europea  
Barcelona España 1976
14. Dispositivos y Circuitos Electrónicos  
Millman y Hallkias  
Cap 20: pags. 662-693  
Editorial Ediciones Pirámide, S.A.  
Madrid, 1974

23. Revista de soldadura del Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas de España  
Volumen IX octubre-diciembre 1979  
"Regulación de parámetros y defectos de soldadura inherentes al procedimiento de soldeo M.I.G."  
Pags. 167-181  
Madrid, España 1979
24. Revista IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation  
"Critical Inductance and Controlled Rectifiers"  
R.J. Distler - S.G.Munshi  
Pags. 34-37  
New York 1965
25. La máquina y sus costos de operación  
Cámara Peruana de la Construcción CAPECO  
Boletín Julio 1979  
Lima-Perú
26. Catálogo Manual de Instrucciones de Máquinas de soldar MIG-MAG.  
Marca ESAB  
Pags. 1-23  
Estocolmo, Suecia 1973
27. General Purpose Rectifier  
Westinghouse  
Pags. R35-R37  
New York 1984
28. Datos Técnicos-prácticos SIMA-PERU  
Gerencia Técnica  
Callao, 1984.

15. Ingeniería de Control Moderno  
Katsuhiko Ogata  
Cap 6: pags. 267-271  
Editorial Prentice/Hall Internacional  
Buenos Aires, 1974
16. Electrical Machines and drive systems  
Alexandru Fransua-Razvan Magureanu  
Cap 4: pags. 4.2-4.56  
Editorial Técnica  
Bucarest, Rumania 1984
17. Accionamientos eléctricos  
Mijail Chilikin  
Cap 2: pags. 29-59  
Cap 3: pags.104-110  
Cap 5: pags.176-195  
Editorial MIR  
Moscú, 1974
18. Electrónica de potencia  
Raymond Ramshaw  
Cap 4: pags. 143-159  
Editorial Marcombo Boixareu Editores  
Barcelona, España 1977
19. Electronics engineering for professional engineers' examinations  
Charles R. Hafer  
Cap 2: pags. 93-95  
Editorial McGraw-Hill  
New York 1981
20. Transistores y semiconductores industriales  
Gúy A. Leclercq  
Cap 2: pags. 41-44  
Cap 3: pags. 112-117  
Editorial Marcombo Boixareu Editores  
Barcelona, España 1978
21. Tesis de Grado: "Diseño de un transformador de soldadura eléctrica con regulación de corriente de soldadura mediante shunt magnético"  
Ing. Javier García  
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Universidad Nacional de Ingeniería  
Lima 1979
22. Tesis de Grado: "Control de Velocidad de motores de corriente continua"  
Ing. Manuel Márquez Marrow  
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica  
Universidad Nacional de Ingeniería  
Lima 1978