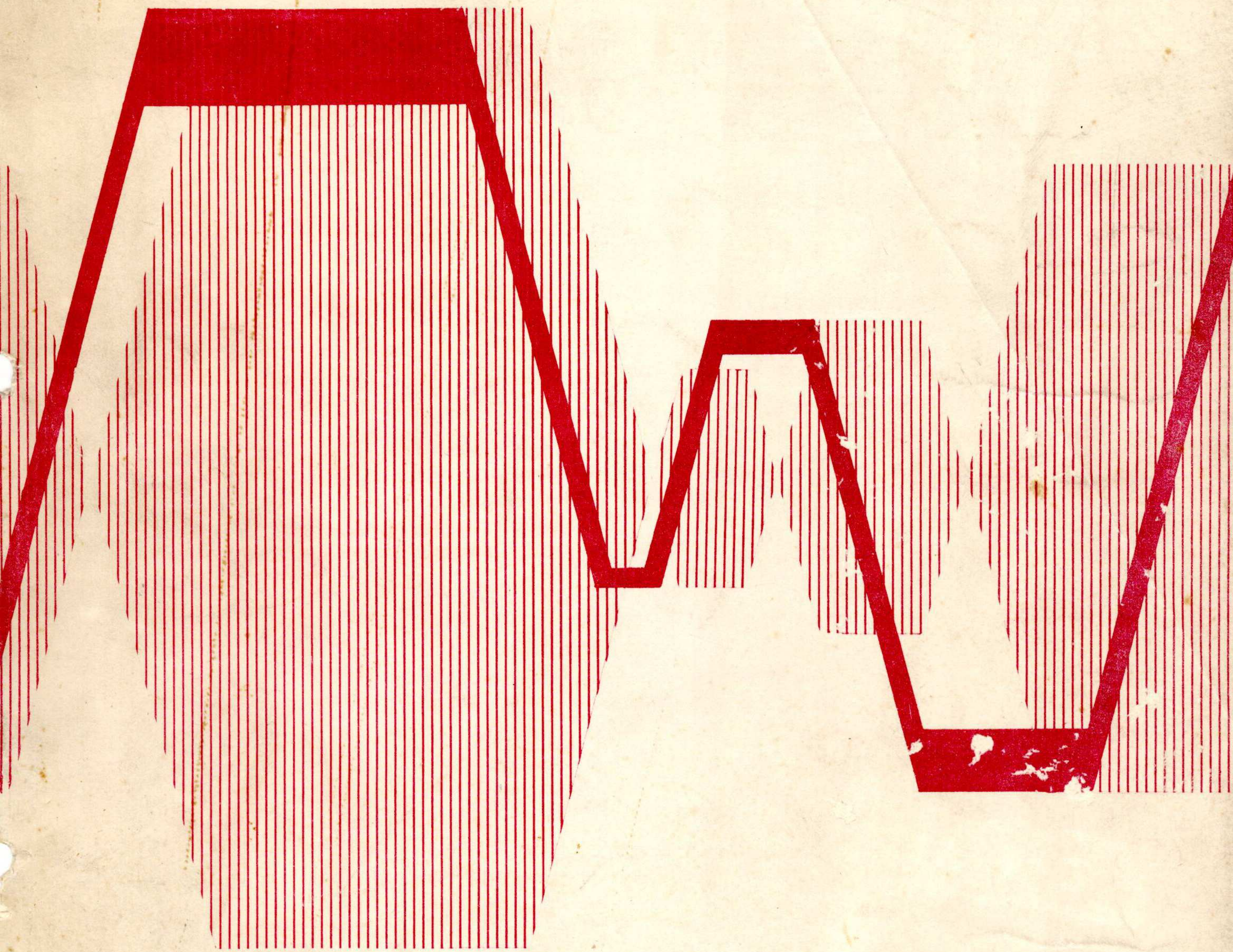


71
08-15
920.2



Electronicista

CIUO 8-52.10



COLECCIONES BASICAS CINTERFOR

Copyright © ORGANIZACION INTERNACIONAL DEL TRABAJO (CINTERFOR) - 1980

Las publicaciones de la Organización Internacional del Trabajo están protegidas por el *Copyright* de conformidad con las disposiciones del protocolo número 2 de la Convención Universal sobre Derecho de Autor.

CBC Electronicista

Primera edición en español: 1980

Hecho el depósito legal N° 145.835/80

El Centro Interamericano de Investigación y Documentación sobre Formación Profesional (Cinterfor) es una agencia regional especializada de la Organización Internacional del Trabajo (OIT).

Establecida en 1964, Cinterfor tiene como objetivos impulsar y coordinar los esfuerzos de los institutos, organismos y empresas que se ocupan de formación profesional en América Latina.

Dir. Postal: Casilla de correo 1761

Dir. Telegráfica: "CINTERFOR"

Telex: CINFO UY 6521

Montevideo - Uruguay



COLECCIONES BÁSICAS CINTERFOR ©



Títulos publicados

Operador de máquinas agrícolas -AGRIC. (Segunda edición corregida)
Mecánico automotriz -CIUO 8-43.20
Cocinero profesional -CIUO 5-31.30
Electricista de automóviles -CIUO 8-55.41
Electricista de edificios -Instalador- -CIUO 8-55.20
Ajustador electricista, Bobinador -CIUO 8-51.20/30
Mecánico de maquinaria agrícola -CIUO 8-49.55
Mecánico de motores diesel -CIUO 8-49.20 y 8-43.21
Plomero -CIUO 8-71.05
Albañil -CIUO 9-51.20
Encofrador -CIUO 9-52.20
Armador de hormigón -CIUO 9-52.30
Mecánico de refrigeración -CIUO 8-41.80
Camarera de hotel -CIUO 5-40.50
Productor de maíz -AGRIC.
Productor de naranja -AGRIC.
Productor de tomate -AGRIC.
Ciencias básicas (Colección de hojas de informaciones complementarias)
Electronicista -CIUO 8-52.10

Mecánico Ajustador -CIUO 8-41.05 (2da. correg.)
Tornero mecánico -CIUO 8-33.20 (2da. correg.)
Fresador mecánico -CIUO 8-33.30 (2da. correg.)
Rectificador mecánico -CIUO 8-33.70
Tratador térmico de metales -CIUO 7-26.10
Soldador por arco eléctrico -CIUO 8-72.20 (2da.)
Soldador oxiacetilénico -CIUO 8-72.15 (2da.)
Matricero para metales -CIUO 8-32.21
Matricero para plásticos -CIUO 8-32.22
Afilador de herramientas -CIUO 8-35.30
Herrero -CIUO 8-31.10
Calderero -CIUO 8-73.10 y 8-74.30
Trabajador en chapa fina y perfiles
-CIUO 8-73.30/40

A partir de 1980 estos
títulos se publican
agrupados en la

ENCICLOPEDIA PRÁCTICA
DE MECÁNICA GENERAL
en seis volúmenes

Algunos títulos aún pueden
ser suministrados por separado.

Impresos en los talleres de Cinterfor

© Cinterfor.

1 OCT 1984

INTRODUCCIÓN

La Colección Básica Cinterfor para *Electronicista* forma parte de una familia de CBC de ocupaciones afines, denominada *Electricidad y Electrónica*.

Integran la familia de "Electricidad y Electrónica" las CBC referidas a ocupaciones del subgrupo 8-5 de la Clasificación Internacional Uniforme de Ocupaciones de la OIT (CIUO), o sea *ajustadores, montadores, reparadores e instaladores de aparatos eléctricos y electrónicos, receptores de radio y televisión, teléfonos y telégrafos, líneas eléctricas y de telecomunicaciones e instalaciones eléctricas en general*.

Cada CBC en sí no constituye un manual pero, concebidas con la ductilidad necesaria, sirven de base para la preparación de manuales de instrucción para todo tipo de cursos, tanto de formación profesional como de educación técnica.

Es preciso advertir que la presente CBC es una colección fuera de serie dentro de la familia referida, por dos razones fundamentales: no se ajusta a una ocupación particular y está formada exclusivamente por hojas de información tecnológica.

El fundamento de que así sea, radica en que es el resultado de un acuerdo entre la Universidad Simón Bolívar de Venezuela y Cinterfor, por el cual su primera aplicación fue servir como material didáctico para la enseñanza de electricidad y electrónica en los cursos de técnico superior del Núcleo Universitario del Litoral, de la institución citada en primer término.

Las hojas de información tecnológica (HIT) contenidas en la presente CBC para *Electronicista*, son aplicables en la preparación de material didáctico para la enseñanza de aspectos teóricos de todas las ocupaciones de la familia de "Electricidad y Electrónica".

También podrá aplicárselas en la enseñanza de aspectos parciales de algunas ocupaciones que, consideradas en sus modalidades polivalentes, pueden necesitar una instrucción teórica sobre instalaciones y equipos eléctricos. Tales ocupaciones pueden ser entre otras: 6-28.20 Operador de máquinas agrícolas; 8-43.20 Mecánico automotriz; 8-49.55 Mecánico de maquinaria agrícola; 8-55.40 Electricista de vehículos en general; 9-85 Conductores de vehículos a motor, etc.

En la presente CBC no se incluye el Documento Normativo dado que ha sido ampliamente difundido en todas las CBC anteriormente editadas y distribuidas.

ÍNDICES

HOJAS DE INFORMACIÓN
TECNOLÓGICA
(de la ocupación)

V - TEMAS TECNOLÓGICOS por número de REFERENCIA para ELECTRONICISTA.

REFE- RENCIA	Título del tema tecnológico	
098	Conducción eléctrica en los sólidos	
099	Resistores en circuitos	
100	Potencia	
101	Resistencia como componente electrónica: el resistor	
102	Aplicaciones de las resistencias	
103	Portadores de corriente eléctrica	
104	Potencia	
105	Resistores en circuitos	
106	Resistencia como componente electrónica: límite de potencia	
107	Aplicaciones de las resistencias	
108	Resistencias en alta frecuencia	
109	Leyes de Kirchoff	
110	Teorema de Thévenin	
111	Análisis de circuitos	
112	Fuentes de corriente	
113	Sinusoide	
114	Diagramas logarítmicos	
115	Decibeles	
116	Series de Fourier	
117	Componentes en corriente alterna	
118	Circuitos de corriente alterna	
119	Impedancia	
120	Carga y descarga de un capacitor	
121	Capacitor en circuitos	

V - TEMAS TECNOLÓGICOS por número de REFERENCIA para ELECTRONICISTA.

REFE- RENCIA	Título del tema tecnológico	
122	Circuitos impresos	
123	Instrumentos de medida	
124	Especificaciones de los instrumentos de medida	
125	Voltímetro de continua	
126	Voltímetro de alterna	
127	Amperímetro de continua	
128	Amperímetro de alterna	
129	Conductores impresos	
130	Pérdidas en un capacitor	
131	Serie y paralelo de capacitores	
132	Física del capacitor	
133	Rectificación	
134	Rectificación de onda completa	
135	Rectificadores dobladores de tensión	
136	Fuente de poder	
137	Diagramas de bloques	
138	Amplificadores	
139	Límites de frecuencia de un amplificador	
140	Límites de amplitud de un amplificador	
141	Impedancias de entrada y de salida	
142	Óhmetro	
143	Circuitos lineales	
144	Representación de vectores por números complejos	
145	Rectificación trifásica	

V - TEMAS TECNOLÓGICOS por número de REFERENCIA para ELECTRONICISTA.

REFE- RENCIA	Título del tema tecnológico	
146	Diseño de fuentes de poder	
147	Distorsión	
148	Ruido	
149	Descripción de las máquinas de continua	
150	Características de los generadores de continua	
151	Funcionamiento del rotor de continua	
152	Protecciones contra sobrecorrientes	
153	Descripción de fusibles	
154	Medida de la temperatura de un devanado	
155	Cebado de los generadores autoexcitados	
156	Conmutación en máquinas de continua	
157	Detector de amplitud	
158	Materiales aislantes	
159	Descripción de capacitores	
160	Semiconductores	
161	Microestructuras semiconductoras	
162	Resistor y capacitor integrado	
163	Termistores	
164	Diodo semiconductor (Juntura P-N)	
165	Estructura de transistor	
166	Estructuras de efecto de campo	
167	Estructuras PNP	
168	Acoplamiento magnético	
169	Inductores acoplados	

V - TEMAS TECNOLÓGICOS por número de REFERENCIA para ELECTRONICISTA.

REFE- RENCIA	Título del tema tecnológico	
170	Energía almacenada en un inductor	
171	Inductor en circuitos	
172	Estabilidad de sistemas realimentados	
173	Realimentación y sistemas de control	
174	Estabilidad	
175	Fusibles	
176	Calentamiento de componentes	
177	Fuentes reguladas	
178	Reguladores integrados de voltaje fijo	
179	Descripción de un regulador integrado	

VI - Índice alfabético de TEMAS TECNOLÓGICOS para ELECTRONICISTA.
(Incluye referencia.)

TÍTULO DEL TEMA TECNOLÓGICO	Referencia	
Acoplamiento magnético	168	
Amperímetro de alterna	128	
Amperímetro de continua	127	
Amplificadores	138	
Análisis de circuitos	111	
Aplicaciones de las resistencias	102	
Aplicaciones de las resistencias	107	
Calentamiento de componentes	176	
Capacitor en circuitos	121	
Características de los generadores de continua	150	
Carga y descarga de un capacitor	120	
Cebado de los generadores autoexcitados	155	
Circuitos de corriente alterna	118	
Circuitos impresos	122	
Circuitos lineales	143	
Componentes en corriente alterna	117	
Conducción eléctrica en los sólidos	098	
Conductores impresos	129	
Conmutación en máquinas de continua	156	
Decibeles	115	
Descripción de capacitores	159	
Descripción de fusibles	153	
Descripción de las máquinas de continua	149	
Descripción de un regulador integrado	179	

VI - Índice alfabético de TEMAS TECNOLÓGICOS para ELECTRONICISTA.
(Incluye referencia.)

TÍTULO DEL TEMA TECNOLÓGICO	Referencia	
Detector de amplitud	157	
Diagramas de bloques	137	
Diagramas logarítmicos	114	
Diodo semiconductor (Juntura P-N)	164	
Diseño de fuentes de poder	146	
Distorsión	147	
Energía almacenada en un inductor	170	
Especificaciones de los instrumentos de medida	124	
Estabilidad	174	
Estabilidad de sistemas realimentados	172	
Estructura de transistor	165	
Estructuras de efecto de campo	166	
Estructuras PNP	167	
Física del capacitor	132	
Fuente de poder	136	
Fuentes de corriente	112	
Fuentes reguladas	177	
Funcionamiento del rotor de continua	151	
Fusibles	175	
Impedancia	119	
Impedancias de entrada y de salida	141	
Inductor en circuitos	171	
Inductores acoplados	169	
Instrumentos de medida	123	

VI - Índice alfabético de TEMAS TECNOLÓGICOS para ELECTRONICISTA.
(Incluye referencia.)

TÍTULO DEL TEMA TECNOLÓGICO	Referencia	
Leyes de Kirchoff	109	
Límites de amplitud de un amplificador	140	
Límites de frecuencia de un amplificador	139	
Materiales aislantes	158	
Medida de la temperatura de un devanado	154	
Microestructuras semiconductoras	161	
Óhmetro	142	
Pérdidas en un capacitor	130	
Portadores de corriente eléctrica	103	
Potencia	104	
Potencia	100	
Protecciones contra sobrecorrientes	152	
Realimentación y sistemas de control	173	
Rectificación	133	
Rectificación de onda completa	134	
Rectificación trifásica	145	
Rectificadores dobladores de tensión	135	
Reguladores integrados de voltaje fijo	178	
Representación de vectores por números complejos	144	
Resistencia como componente electrónica: el resistor	101	
Resistencia como componente electrónica: límite de potencia	106	
Resistencias en alta frecuencia	108	
Resistor y capacitor integrado	162	
Resistores en circuitos	105	

VI - Índice alfabético de TEMAS TECNOLÓGICOS para ELECTRONICISTA.
(Incluye referencia.)

TÍTULO DEL TEMA TECNOLÓGICO	Referencia	
Resistores en circuitos	099	
Ruido	148	
Semiconductores	160	
Serie y paralelo de capacitores	131	
Series de Fourier	116	
Sinusoide	113	
Teorema de Thévenin	110	
Termistores	163	
Voltímetro de alterna	126	
Voltímetro de continua	125	

ÍNDICE GENERAL DE
TEMAS TECNOLÓGICOS
PARA ("Electricidad
y Electrónica")

VIII - Índice general de TEMAS TECNOLÓGICOS para "ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA" por número de REFERENCIA.

Colecciones consideradas: ELECTRICISTA DE EDIFICIOS -INSTALADOR-; AJUSTADOR ELECTRICISTA, BOBINADOR; ELECTRICISTA DE AUTOMÓVILES; ELECTRONICISTA. HIT. 001 a 179.

REFE- RENCIA	TÍTULO DEL TEMA TECNOLÓGICO	
001	Conductores eléctricos (Generalidades)	
002	Herramientas (Generalidades)	
003	Herramientas (Para quitar aislación)	
004	Herramientas (Soldadores)	
005	Herramientas (Lámpara de soldar)	
006	Voltímetro y amperímetro (Generalidades)	
007	Ohmímetro	
008	Megóhmetro	
009	Pinza de medición	
010	Terminales para conductores	
011	Materiales aislantes (Generalidades)	
012	Cintas aislantes	
013	Fusible (Generalidades)	
014	Lámparas eléctricas (Generalidades)	
015	Transformadores	
016	Condensadores (Generalidades)	
017	Máquinas eléctricas rotativas (Generalidades)	
018	Generador de corriente continua	
019	Motores de corriente continua	
020	Aleaciones estaño-plomo para soldaduras	
021	Enchufe eléctrico	
022	Tubos rígidos y flexibles	
023	Herramientas (Doblatubos)	
024	Morsa para tubos	

VIII - Índice general de TEMAS TECNOLÓGICOS para "ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA" por número de REFERENCIA.

Colecciones consideradas: ELECTRICISTA DE EDIFICIOS -INSTALADOR-; AJUSTADOR ELECTRICISTA, BOBINADOR; ELECTRICISTA DE AUTOMOVILES; ELECTRONICISTA. HIT. 001 a 179.

REFE- RENCIA	TÍTULO DEL TEMA TECNOLÓGICO	
025	Escaleras	
026	Tuercas, boquillas y conectadores para tubos	
027	Cajas para instalaciones eléctricas	
028	Uniones y curvas para tubos	
029	Tornillos para madera	
030	Grapas y abrazaderas	
031	Tacos para fijación	
032	Herramientas (Para perforar mampostería)	
033	Boquillas y pipas para instalaciones eléctricas	
034	Conductores eléctricos (Alambres y cables)	
035	Conductores eléctricos (Con cubierta protectora)	
036	Conductores eléctricos (Cordones)	
037	Conductores eléctricos (Tabla para instalaciones eléctricas)	
038	Herramientas (Barrena de mano)	
039	Elementos para pasar conductores dentro de tubos	
040	Aisladores para instalaciones eléctricas	
041	Portalámparas y receptáculos	
042	Lámparas incandescentes	
043	Equipo fluorescente	
044	Interruptores para instalaciones eléctricas	
045	Cortacircuitos y fusibles (Para instalaciones eléctricas)	
046	Timbres y zumbadores	
047	Cuadros indicadores	

VIII- Índice general de TEMAS TECNOLÓGICOS para "ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA" por número de REFERENCIA.

Colecciones consideradas: ELECTRICISTA DE EDIFICIOS -INSTALADOR-; AJUSTADOR ELECTRICISTA, BOBINADOR; ELECTRICISTA DE AUTOMÓVILES; ELECTRONICISTA. HIT. 001 a 179.

REFE- RENCIA	TÍTULO DEL TEMA TECNOLÓGICO	
048	Conectores para alambres	
049	Escobillas	
050	Portaescobillas	
051	Núcleos magnéticos	
052	Máquinas bobinadoras y moldes regulables	
053	Herramientas (Para bobinar)	
054	Barnices aislantes para impregnación	
055	Conexionado de motores eléctricos (Para corriente alterna)	
056	Materiales aislantes (Para bobinados)	
057	Colectores	
058	Conductores eléctricos (Para bobinados)	
059	Motores con rotor de jaula de ardilla	
060	Interruptores centrífugos	
061	Condensadores (Para arranque de motores monofásicos)	
062	Bobinados de estatores (Esquemas)	
063	Bobinados de rotores (Esquemas)	
064	Cono de terminación de rotores	
065	Probador de inducidos	
066	Instalación eléctrica del automóvil y sus componentes	
067	Batería de acumuladores	
068	Instrumentos de control de la batería de acumuladores	
069	Cargador de batería	
070	Regímenes de carga de batería	

VIII - Índice general de TEMAS TECNOLÓGICOS para "ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA" por número de REFERENCIA.

Colecciones consideradas: ELECTRICISTA DE EDIFICIOS -INSTALADOR-; AJUSTADOR ELECTRICISTA, BOBINADOR; ELECTRICISTA DE AUTOMÓVILES; ELECTRONICISTA. HIT. 001 a 179.

REFE- RENCIA	TÍTULO DEL TEMA TECNOLÓGICO	
071	Lámparas para automóviles	
072	Interruptores (Para circuitos de automóviles)	
073	Conmutadores y selectores para automóviles	
074	Relés para automóviles	
075	Sistema de señalización	
076	Sistema de alumbrado	
077	Pantallas para alinear faros	
078	Conductores eléctricos (Para instalaciones en automóviles)	
079	Mazo de conductores para automóvil	
080	Bocina	
081	Radio y antena para automóviles	
082	Bomba eléctrica para combustible	
083	Indicadores eléctricos de control (Presión de aceite, temperatura y nivel de combustible)	
084	Circuito de carga	
085	La dínamo	
086	Reguladores (Para dínamo)	
087	Amperímetro (Para automóvil)	
088	Alternador para automóviles	
089	Diodos rectificadores de silicio	
090	Reguladores (Para alternadores)	
091	Limpiaparabrisas	
092	Sistema de encendido	
093	Bujías	

VIII - Índice general de TEMAS TECNOLÓGICOS para "ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA" por número de REFERENCIA.

Colecciones consideradas: ELECTRICISTA DE EDIFICIOS -INSTALADOR-; AJUSTADOR ELECTRICISTA, BOBINADOR; ELECTRICISTA DE AUTOMÓVILES; ELECTRONICISTA. HIT. 001 a 179.

REFE- RENCIA	TÍTULO DEL TEMA TECNOLÓGICO	
094	Condensadores (Blindados para automóviles)	
095	Bobina de encendido	
096	Distribuidor	
097	Motor de arranque	
098	Conducción eléctrica en los sólidos	
099	Resistores en circuitos	
100	Potencia	
101	Resistencia como componente electrónica: el resistor	
102	Aplicaciones de las resistencias	
103	Portadores de corriente eléctrica	
104	Potencia	
105	Resistores en circuitos	
106	Resistencia como componente electrónica: límite de potencia	
107	Aplicaciones de las resistencias	
108	Resistencias en alta frecuencia	
109	Leyes de Kirchoff	
110	Teorema de Thévenin	
111	Análisis de circuitos	
112	Fuentes de corriente	
113	Sinusoide	
114	Diagramas logarítmicos	
115	Decibeles	

VIII - Índice general de TEMAS TECNOLÓGICOS para "ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA" por número de REFERENCIA.

Colecciones consideradas: ELECTRICISTA DE EDIFICIOS -INSTALADOR-; AJUSTADOR ELECTRICISTA, BOBINADOR; ELECTRICISTA DE AUTOMÓVILES; ELECTRONICISTA. HIT. 001 a 179.

REFE- RENCIA	TÍTULO DEL TEMA TECNOLÓGICO	
116	Series de Fourier	
117	Componentes en corriente alterna	
118	Circuitos de corriente alterna	
119	Impedancia	
120	Carga y descarga de un capacitor	
121	Capacitor en circuitos	
122	Circuitos impresos	
123	Instrumentos de medida	
124	Especificaciones de los instrumentos de medida	
125	Voltímetro de continua	
126	Voltímetro de alterna	
127	Amperímetro de continua	
128	Amperímetro de alterna	
129	Conductores impresos	
130	Pérdidas en un capacitor	
131	Serie y paralelo de capacitores	
132	Física del capacitor	
133	Rectificación	
134	Rectificación de onda completa	
135	Rectificadores dobladores de tensión	
136	Fuente de poder	
137	Diagramas de bloques	

VIII - Índice general de TEMAS TECNOLÓGICOS para "ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA" por número de REFERENCIA.

Colecciones consideradas: ELECTRICISTA DE EDIFICIOS -INSTALADOR-; AJUSTADOR ELECTRICISTA, BOBINADOR; ELECTRICISTA DE AUTOMÓVILES; ELECTRONICISTA. HIT. 001 a 179.

REFE- RENCIA	TÍTULO DEL TEMA TECNOLÓGICO	
138	Amplificadores	
139	Límites de frecuencia de un amplificador	
140	Límites de amplitud de un amplificador	
141	Impedancias de entrada y de salida	
142	Óhmetro	
143	Circuitos lineales	
144	Representación de vectores por números complejos	
145	Rectificación trifásica	
146	Diseño de fuentes de poder	
147	Distorsión	
148	Ruido	
149	Descripción de las máquinas de continua	
150	Características de los generadores de continua	
151	Funcionamiento del rotor de continua	
152	Protecciones contra sobrecorrientes	
153	Descripción de fusibles	
154	Medida de la temperatura de un devanado	
155	Cebado de los generadores autoexcitados	
156	Conmutación en máquinas de continua	
157	Detector de amplitud	
158	Materiales aislantes	
159	Descripción de capacitores	

VIII - Índice general de TEMAS TECNOLÓGICOS para "ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA" por número de REFERENCIA.

Colecciones consideradas: ELECTRICISTA DE EDIFICIOS -INSTALADOR-;
AJUSTADOR ELECTRICISTA, BOBINADOR; ELECTRICISTA DE AUTOMÓVILES;
ELECTRONICISTA. HIT. 001 a 179.

REFE- RENCIA	TÍTULO DEL TEMA TECNOLÓGICO	
160	Semiconductores	
161	Microestructuras semiconductoras	
162	Resistor y capacitor integrado	
163	Termistores	
164	Diodo semiconductor (Juntura P-N)	
165	Estructura de transistor	
166	Estructuras de efecto de campo	
167	Estructuras PNP	
168	Acoplamiento magnético	
169	Inductores acoplados	
170	Energía almacenada en un inductor	
171	Inductor en circuitos	
172	Estabilidad de sistemas realimentados	
173	Realimentación y sistemas de control	
174	Estabilidad	
175	Fusibles	
176	Calentamiento de componentes	
177	Fuentes reguladas	
178	Reguladores integrados de voltaje fijo	
179	Descripción de un regulador integrado	

ADVERTENCIAS

- 1) Las hojas incluidas a continuación, servirán de patrón para imprimir matrices o estenciles para máquinas offset de oficina o mimeógrafos u otro tipo de duplicadores. Deben ser tratadas con cuidado a fin de no dañar el papel, ni manchar su superficie.
- 2) Es conveniente que las hojas sean verificadas antes de realizar la impresión de las matrices, pudiendo retocarse con lápiz común o tintas de dibujo los trazos demasiado débiles, así como tapar las manchas e imperfecciones con "gouache" (témpera blanca).
- 3) Los agregados que deban hacerse a las hojas, por ejemplo código local, pueden escribirse en papel blanco y pegarse en el lugar correspondiente. El mismo procedimiento es adecuado para corregir erratas y otras faltas.

HOJAS DE
INFORMACIÓN TECNOLÓGICA



NATURALEZA ELÉCTRICA DE LA MATERIA

La materia está constituida, en su estructura elemental, por sistemas estables llamados átomos.

Las partículas que constituyen un átomo (protones, neutrones, electrones) se caracterizan por poseer masa, y también carga eléctrica.

Según el modelo clásico, estas partículas se disponen como en un sistema solar, con un núcleo central formado por protones y neutrones, alrededor del cual giran los electrones en distintas órbitas.

Existe entonces una unidad elemental de carga eléctrica: la carga de *electrón*.

Según el modelo descrito, algunos electrones de la órbita externa pueden, bajo ciertas condiciones, desvincularse del átomo constituyéndose así en *portadores de carga eléctrica*.

Bajo la acción de fuerzas eléctricas, estos portadores se mueven, dando así origen a una *corriente eléctrica*.

De acuerdo con la cantidad de portadores disponibles y su mayor o menor movilidad, el material podrá conducir la electricidad con mayor o menor facilidad; es decir, será más o menos conductor.

En este sentido los materiales se clasifican en 3 grandes categorías:

- buenos conductores, o simplemente conductores (metales)
- malos conductores o aislantes
- **semiconductores**

Las propiedades de conducción dependen directamente de la manera como se disponen los átomos dentro de un material sólido. Un mismo elemento, en estado sólido, puede presentar propiedades diferentes. Así por ejemplo, el carbono bajo la forma de diamante es un excelente aislante y bajo la forma de grafito es un buen conductor.

La distinción entre aislantes y semiconductores es sólo de grados. Una barra de silicio cristalino, según su contenido de impurezas y el criterio aplicado, puede ser considerada desde aislante hasta conductor.



La electrónica ha encontrado siempre aplicaciones para los semiconductores. En el pasado se emplearon la galena, el selenio y el óxido de cobre, entre otros. En los últimos años se destacan el silicio, el germanio, el arseniuro de galio y el sulfuro de cadmio.

LA CONDUCCION ELÉCTRICA

Sin ninguna perturbación exterior, los portadores de carga eléctrica de un conductor se mueven en forma desordenada. Cuando se aplican desde el exterior fuerzas eléctricas, se ordena parcialmente el movimiento, lo cual da lugar a un transporte de cargas eléctricas. Este transporte de cargas eléctricas es lo que se llama *corriente eléctrica*.

Los dispositivos capaces de aplicar fuerzas eléctricas a un conductor se llaman *generadores*. Dentro de ellos se destacan las pilas y acumuladores, que aplican fuerzas eléctricas originadas en una reacción química, y las dínamos, en las que el origen de las fuerzas eléctricas es magnético.

Las características de la corriente eléctrica que establece un generador aplicado sobre un conductor, dependen de ambos elementos. Con un mismo generador, la corriente depende sólo de las propiedades del conductor. Estas propiedades se traducen en la *resistencia al paso de la electricidad* del conductor. Cuanto mayor es esa resistencia, menor es la corriente que permite circular.

La capacidad de aplicar fuerzas eléctricas de un generador se traduce en la *diferencia de potencial* que posee. Cuanto mayor es la diferencia de potencial, el generador creará una corriente más intensa sobre un mismo conductor.

UNIDADES DE MEDIDA

La corriente se mide en *amperios* (símbolo A) con un instrumento de medida llamado amperímetro.

La diferencia de potencial se mide en *voltios* (símbolo V) con un instrumento de medida llamado voltímetro.



La resistencia eléctrica se mide en ohmios (símbolo Ω) y hay diversas técnicas de medida.

Todas las unidades de medida poseen múltiplos y submúltiplos normalizados internacionalmente. Al nombre de la unidad se le antepone un prefijo cuyo significado y símbolo se aclara en la tabla siguiente.

PREFIJO	SÍMBOLO	VALOR	
micro	μ	millonésimo	0,000.001
mili	m	milésimo	0,001
kilo	K	mil	1.000.
mega	M	millón	1.000.000.

Ejemplos de aplicación: μV = microvoltio = 0,000 001 V
 mA = miliamperios = 0,001 A
 $K\Omega$ = kilohmio = 1.000 Ω

LEY DE OHM

Al establecer entre los extremos de un conductor una diferencia de potencial \textcircled{V} (también llamada tensión o voltaje), circulará por el mismo una corriente eléctrica \textcircled{i} .

Midiendo ambas variables puede observarse que para un mismo conductor se cumple entre ellas una relación de dependencia proporcional. Así, si aplicando

entre bornes una tensión de 10 voltios circula una corriente de 4mA, con una tensión de 20 voltios circulará una corriente de 8mA (fig. 1).

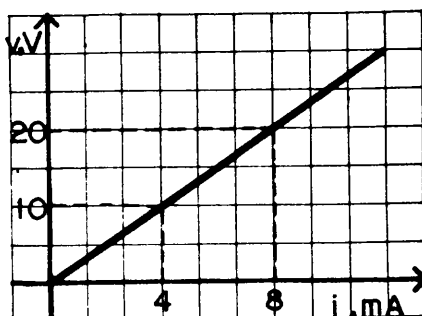


Fig. 1

La ley de Ohm dice que la corriente (i) que circula en un conductor aumenta en forma proporcional a la diferencia de potencial (V) aplicada entre sus bornes y disminuye también proporcionalmente a la resistencia (R) del conductor.

$$i = \frac{V}{R}$$

Es decir que, para cada conductor, el cociente entre voltaje y corriente instantáneos es una constante que caracteriza a ese conductor, independientemente de cuál sea el voltaje aplicado.

Esa constante se define como *resistencia* R del conductor, y su valor depende de la forma y dimensiones del mismo y de la naturaleza del material que lo constituye. En el ejemplo anterior, la resistencia es:

$$R = \frac{V}{i} = \frac{10V}{4mA} = \frac{20V}{8mA} = \frac{10V}{0,004A} = \frac{20V}{0,008A} = 2.500\Omega$$

RESISTORES

Llamamos *resistor* a la componente de un circuito eléctrico cuya conductancia eléctrica queda definida por su resistencia. Al dibujar esquemas que representan circuitos, el símbolo que representa a un resistor es el indicado en la figura 2.

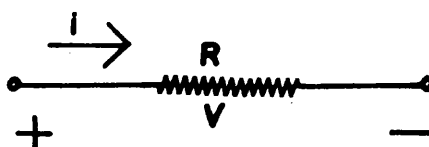


Fig. 2

Tanto para la diferencia de potencial como para la corriente, deben tomarse sentidos de referencia o *polaridad*: para la diferencia de potencial se marcan signos + y - en los bornes de la componente, entendiendo así que V es la diferencia de potencial entre el borne marcado + y el -. Se habla en ese sentido de caída de voltaje.

Para la corriente, el sentido de la misma se indica por una flechita. Este sentido es, *por convención*, el del movimiento de las cargas positivas, opuesto al del movimiento de las negativas.

Los sentidos de referencia o polaridad del voltaje V y la corriente i constituyen una información imprescindible para definir sin ambigüedades ambas magnitudes.

Obsérvese que la expresión $V = Ri$ es válida sólo si se cumplen las convenciones de polaridad para V e i que se indican en la figura 2. El cambio de orientación de una de ellas cambiará su signo en la expresión de la ley de Ohm.

La unidad de resistencia es el ohmio.

Un ohmio es la resistencia de un conductor tal que, al aplicarse entre sus bornes una tensión de 1 voltio, es recorrido por una corriente de 1 amperio.

$$1\Omega = \frac{1V}{1A}$$

Supongamos ahora que la diferencia de potencial aplicada a un conductor es variable con el tiempo. Tal cosa sucede, por ejemplo, cuando entre una pila y un conductor interponemos una llave que permite conectar y desconectar ambos elementos. Al accionar reiteradamente la llave, el voltaje aplicado tendrá el valor del de la pila en los intervalos en que la llave está cerrada, y valdrá cero en los intervalos en que está abierta. Se dice que el voltaje tiene una forma de onda rectangular. Un caso de gran importancia por sus aplicaciones, se tiene cuando el generador aplica un voltaje que varía con el tiempo en forma sinusoidal (figura 3b).

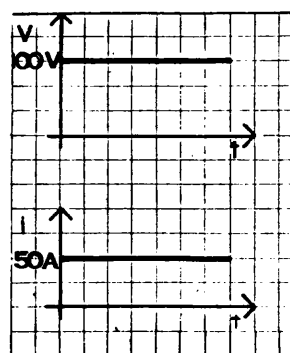
Debe destacarse que en los casos de voltajes y corrientes variables con el tiempo, la ley de Ohm se cumple para los valores que tienen V e i en cada instante.

Ejemplo: Sea una resistencia de 2Ω .

Aplicamos entre bornes los voltajes que evolucionan en el tiempo según se indica en la figura (3a. constante, 3b sinusoidal y 3c diente de sierra).

Las corrientes que circulan tienen la misma forma gráfica y valores de acuerdo con las características del conductor.

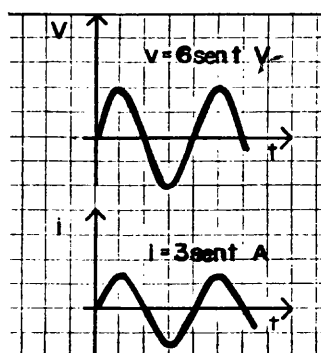
Fig. 3a



CONSTANTE

$$i = \frac{100V}{2\Omega} = 50A$$

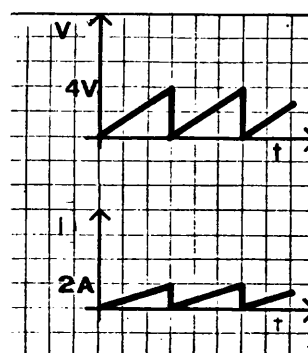
Fig. 3b



SINUSOIDAL

$$i = \frac{6 \text{ sen } t \text{ V}}{2\Omega} = 3 \text{ sen } t \text{ A}$$

Fig. 3c



DIENTE DE SIERRA

$$i_m = \frac{4V}{2\Omega} = 2A \quad i_m = \frac{0V}{2\Omega} = 0A$$

En las aplicaciones de los circuitos, los resistores se suelen interconectar en diversas configuraciones. Las conexiones elementales son: *serie* y *paralelo* (figura 1).

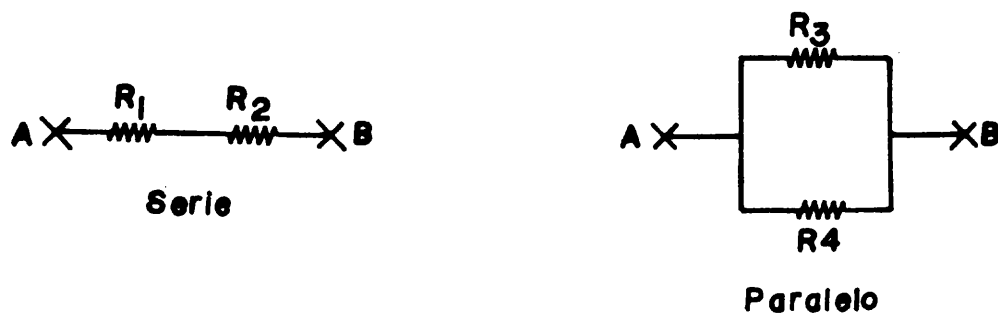


Fig. 1

En cada caso, el conjunto, desde sus terminales extremos A y B, se comporta como una resistencia cuyo valor es, respectivamente:

$$\text{caso serie: } R_s = R_1 + R_2$$

$$\text{caso paralelo: } R_p = \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}$$

Ejemplo: Supongamos que se conectan dos resistores de $1 \text{ k}\Omega$ en serie y en paralelo.

Calcular en ambos casos el valor de la resistencia equivalente.

$$R_s = 1 + 1 = 2 \text{ k}\Omega$$

$$R_p = \frac{1 \times 1}{1 + 1} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ k}\Omega$$

Se observa que, en general, dado un resistor, al agregarle otro en serie, el valor de la resistencia total aumenta, mientras que si se le agrega uno en paralelo, la resistencia total disminuye.

En general, configuraciones más complejas pueden reducirse a combinaciones de series y paralelos.

Ejemplo: Sea el circuito de la figura 2, en que un resistor R se ha puesto en paralelo con un tramo de una resistencia variable (potenciómetro).

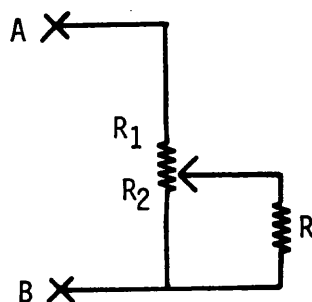


Fig. 2

Se reconoce que entre A y B se tiene la serie de R_1 , con el paralelo de R y R_2 .

$$R_{AB} = R_1 + \frac{R_2 R}{R_2 + R}$$



Hasta aquí, hemos visto el fenómeno de la conducción de corriente eléctrica, sin explicar los mecanismos que la causan.

Es claro que el pasaje de corriente a través de una resistencia implica un suministro de *energía*.

Esa energía es provista por un generador, y se mide en **wattios**.

En la resistencia, la energía recibida se manifiesta en dos hechos, que se pueden observar y medir:

- el desarrollo de una corriente proporcional al voltaje aplicado (*ley de Ohm*)
- la elevación de temperatura del material (efecto Joule).

Hay dos casos particulares de interés, en que la potencia disipada tiene una expresión sencilla:

- en continua, es decir si $V = \text{cte.}$ $p = R I^2$

Ejemplo. Calcular la potencia disipada por un resistor de 150Ω que tiene 30 v. aplicados entre sus bornes.

$$I = \frac{V}{R} = \frac{30v}{150\Omega} = 0,2 \text{ A}$$

$$p = R I^2 = 150 \times 0,2^2 = 6 \text{ W}$$

- en alterna, es decir si voltaje y corriente son funciones sinusoidales del tiempo.

En este caso, la potencia instantánea es una función que varía en forma periódica.

Su valor medio, o potencia media es: $P = \frac{VI}{2}$, en que V e I son

las amplitudes de voltaje y corriente (figura 1).

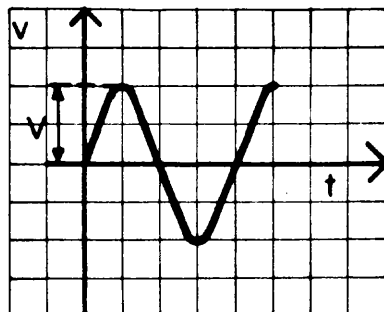


Fig. 1

Resulta más práctico trabajar con los *valores eficaces* de voltaje y corriente, que se definen así:

$$V_{ef} = \frac{V}{\sqrt{2}}$$

$$I_{ef} = \frac{I}{\sqrt{2}}$$

Expresada en función de los valores eficaces, la potencia media es:

$$P = RI_{ef}^2$$

Obsérvese que como $RI_{ef} = V_{ef}$, la expresión anterior equivale a:

$$P = V_{ef} I_{ef}$$

Ejemplo. Supongamos una estufa de 50Ω que trabaja a un voltaje eficaz de 220V.

Calcular la potencia que entrega.

$$I_{ef} = \frac{V_{ef}}{R} = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ A} \quad \text{entonces} \quad P = 220 \times 4,4 = 968 \text{ W}$$



Las resistencias con las que se trabaja en electrónica pueden clasificarse en dos tipos: fijas y variables (potenciómetros). Entre las fijas se distinguen varios tipos, según la tecnología de su fabricación:

- a. Las de composición, constituidas por una barra de material resistivo. Los materiales más usados son el carbón y el grafito, mezclados con resinas.
- b. Las de film, formadas por una película de material resistivo depositado sobre un núcleo aislante (vidrio, cerámica o bakelita).
- c. Las de alambre bobinado. Los alambres empleados son de diversas aleaciones, que ofrecen sobre los metales puros dos ventajas:
 - menos variación con la temperatura;
 - amplios rangos de resistividad para las distintas aleaciones, lo cual permite fabricar resistores de alto valor con longitudes de alambres pequeños.

Las aleaciones más usadas son: Ni-Cu; Ni-Cr-Al y Ni-Cr.

Valores estándar

Con el fin de uniformizar la fabricación de resistores, diversas organizaciones de normas han establecido valores estándar para estos componentes. Los valores que forman una serie son tales que la relación entre dos consecutivos es un factor constante. La serie de valores más usual es la de 12 valores.

Tabla de valores estándar

10	Puede observarse que la relación entre dos valores consecutivos es aproximadamente la misma, es decir esos valores son términos de una progresión geométrica. Es justamente a partir de este criterio que se han elegido los valores de la serie.
12	
15	
18	
22	
27	
33	
39	
47	
56	
68	
82	
100	

*Tolerancias*

Cada resistor comercial se caracteriza, además de su valor nominal, por su tolerancia, es decir la máxima desviación que el valor real de la componente puede tener respecto del nominal antes de ser usada. Los valores más usuales para las tolerancias son: $\pm 20\%$; $\pm 10\%$; $\pm 5\%$.

Para usos críticos se requieren resistores de mayor precisión (tolerancia $\pm 1\%$) que necesariamente deben poseer gran estabilidad.

Códigos de colores

La información sobre valor nominal y tolerancia de un resistor se suele expresar codificada por medio de bandas de color pintadas sobre el cuerpo de la componente. Los valores numéricos asociados a los distintos colores son los siguientes:

<i>Color</i>	<i>Valor</i>	<i>Factor</i>	<i>Tolerancia</i>
Negro	0	1	
Marrón	1	10	
Rojo	2	10^2	
Naranja	3	10^3	
Amarillo	4	10^4	
Verde	5	10^5	
Azul	6	10^6	
Violeta	7	10^7	
Gris	8	10^8	
Blanco	9	10^9	
Dorado		10^{-1}	$\pm 5\%$
Plata		10^{-2}	$\pm 10\%$

Sobre el cuerpo del resistor y a partir de uno de sus extremos se pintan 3 ó 4 bandas de colores (figura 1) que representan respectivamente:

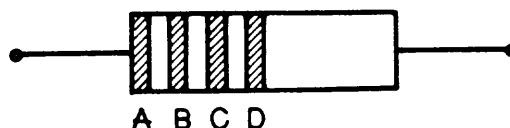


Fig. 1

- A - Primer dígito significativo del valor nominal
- B - Segundo dígito
- C - Factor multiplicador
- D - Si existe, indica la tolerancia. Si no existe, la tolerancia es 20 %.

Ejemplo: Si las bandas son respectivamente: amarillo-violeta-rojo-plata, se trata de un resistor de 4700Ω al 10 %.

Límites (Ratings)

Deben respetarse determinados límites, en el empleo de cada resistencia.

- Hay un *límite de potencia*, es decir una potencia máxima a disipar por la componente para que la temperatura de la misma no exceda determinado valor. Desde este punto de vista hay resistencias de $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, 1 watt, etc.

Físicamente, este límite está vinculado con el tamaño de la componente. Será de fundamental importancia, al armar un circuito, verificar que el límite de potencia de cada resistor supere, con cierta holgura, el valor de potencia que esa componente deberá disipar.

Ejemplo: Sea una resistencia de 2,2 kΩ con un voltaje aplicado de continua de 10 v.

¿De qué límite de potencia debe ser la componente?

- La potencia disipada es:

$$P = \frac{V^2}{R} = \frac{100}{2200} = 0,045 \text{ W}$$

De modo que un resistor de $\frac{1}{8} \text{ W} = 0,125 \text{ W}$ es adecuado.

- Hay un *límite de voltaje* de trabajo, es decir, un valor máximo para el voltaje que es posible aplicar continuamente a la componente, sin deteriorarla.

Un parámetro importante de la resistencia es la *estabilidad* de su valor. Así, el valor de la resistencia de un resistor de carbón suele derivar con el tiempo en hasta un 2 %. Esta variación puede ser mayor si se exceden momentáneamente los límites de potencia o voltaje, o debido al calentamiento excesivo producido al soldar la componente.

La humedad ambiente también afecta el valor de la resistencia, pues tiende a aumentarla.

En general, los resistores más estables y que por tanto pueden ser más precisos son los bobinados y en segundo lugar los de film.

Efecto de la temperatura

Como sabemos, el límite de potencia se fija de modo de no superar cierto valor de temperatura. Pero aun sin llegar al límite, las variaciones de temperatura afectan el valor de la resistencia. Los *coeficientes de dependencia con la temperatura* dependen del tipo de resistor.

Para los de composición, son del orden de $\pm 0,25 \% / ^\circ\text{C}$.

Los de film son mejores, con coeficientes menores a $- 0,05 \% / ^\circ\text{C}$ en las de carbón depositado y aun menores en aquellos que agregan pequeñas cantidades de boro disperso en la película de carbón.

Para los bobinados, el coeficiente depende del material del alambre.
Para el cobre puro, el coeficiente es de $0,39 \% / ^\circ\text{C}$ pero baja fuertemente para las aleaciones especiales:

Constantán - $0,001 \% / ^\circ\text{C}$

Manganina - $0,003 \% / ^\circ\text{C}$

Nichrome - $0,02 \% / ^\circ\text{C}$

Potenciómetros

Son resistencias provistas de un tercer terminal móvil o cursor C (figura 2). Si la resistencia es recorrida por una cierta corriente, entre el cursor y un extremo, se dispone de una fracción del voltaje total.

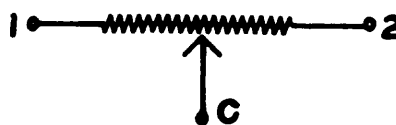


Fig. 2

Se distinguen dos tipos de potenciómetros: *lineales* y *logarítmicos*.

En los lineales, la resistencia entre cursor y extremo es linealmente proporcional al desplazamiento del cursor.

En los logarítmicos, la relación con el desplazamiento es de tipo exponencial, de tal manera que al 50 % del desplazamiento corresponde una resistencia de alrededor del 10 % de la total.

Los logarítmicos encuentran aplicación en controles de volumen de audio, ya que la respuesta del oído a sonidos de distinta intensidad es aproximadamente logarítmica.



Aparte de las derivadas de la ley de Ohm, que tienen lugar destacado en los circuitos que se describen en el curso, podemos señalar otras aplicaciones de la resistencia.

CALEFACTOR

La potencia que se disipa como calor en todo resistor, se puede utilizar en diversos artefactos (estufas, planchas, calefones) y; en general, como calefactor en equipos industriales, hogareños y médicos.

El hecho de que superar el límite de disipación puede tener efecto destructivo sobre la componente es utilizado deliberadamente en un caso particular, como protección del circuito: los fusibles.

TERMISTOR

Sea una barra de material semiconductor.

Según las propiedades de estos materiales resulta que el valor de su resistencia es función muy sensible de la temperatura. En un semiconductor puro, como el silicio, la resistencia disminuye un 8 %/°C al subir la temperatura.

Esta propiedad se aprovecha precisamente en todas aquellas aplicaciones en que se necesite un transductor de temperatura (termometría, controles de temperatura, medidas de potencia en microondas).

Un resistor fabricado con este propósito se llama termistor.



Al separarse un electrón del átomo, resultan dos tipos de cargas eléctricas: una partícula, el electrón, de carga negativa, y el átomo con la ausencia de un electrón, llamado ión, de carga positiva.

En líquidos y gases, los átomos disponen de gran libertad de movimiento, por lo que electrones y iones positivos constituyen portadores de carga eléctrica de distinto signo.

Como la masa de los iones es mucho mayor que la de los electrones, el movimiento de ambos presenta características diferentes.

En *estado sólido*, aunque por razones distintas, también hay portadores de cargas eléctricas de distinto signo. La característica del estado sólido es que los átomos se disponen en estructuras cristalinas fijas, por lo que al desvincularse un electrón del átomo, el electrón podrá moverse bajo la acción de fuerzas eléctricas, pero el ión permanece unido a la estructura cristalina.

Un electrón que ha roto su vínculo con un átomo deja un *hueco* en la estructura del átomo original, que queda con una carga global positiva, de magnitud igual a la del electrón. Ese hueco puede ser llenado por otro electrón de un átomo vecino. Todo sucede como si ese hueco, dotado de carga positiva, se hubiera desplazado en sentido inverso al del movimiento del electrón.

Este es el concepto de *agujero* (hole) o *portador de carga positiva*, cuya importancia surge del hecho de que en cada material son distintas las energías requeridas para separar un electrón de su átomo (es decir, crear un par electrón-agujero) y para capturar con electrón libre (anulando un par electrón-agujero).

La existencia de portadores positivos encuentra gran aplicación en los materiales semiconductores, en los que el agregado de determinadas impurezas a un material base, por ejemplo, silicio, da origen a un material en que los portadores de corriente son predominantemente electrones o agujeros. Se habla así de *materiales tipo n* o *tipo p* respectivamente.

En los metales también existen portadores de ambos signos, aunque son muy pocas las situaciones en que este hecho se pone en evidencia.



DISTRIBUCIÓN DE CORRIENTE EN UN CONDUCTOR

La manera como se mueven los portadores de corriente eléctrica en el seno de un conductor homogéneo, depende de la forma del conductor y de la frecuencia de la corriente.

En corriente *continua*, el factor determinante de la distribución es la *forma* del conductor: cambios bruscos de la sección, ángulos, conexiones externas, tornillos, afectan localmente la distribución de la corriente, al punto de que estos hechos deben tenerse en cuenta en operaciones de medidas eléctricas de precisión.

En el caso ideal de un conductor rectilíneo indefinido de sección constante, la corriente se distribuye uniformemente.

Este es el llamado *conductor filiforme*. Los conductores reales se aproximarán aceptablemente a ese modelo si:

- son suficientemente largos (longitud decenas de veces mayor que el diámetro) y están curvados con un radio varias veces mayor que el diámetro de su sección. Esas dos condiciones se dan en la mayoría de los casos prácticos.

En corriente *alterna*, la distribución de corriente no es uniforme. Se concentra en la periferia del conductor. Al aumentar la frecuencia se concentra cada vez más en la superficie del conductor.

RESISTIVIDAD

Cuantitativamente, cada material se caracteriza por una constante propia: la *conductividad*, simbolizada por γ (o su inversa la *resistividad* ρ).

Esta constante resume las características de: disponibilidad y movilidad de los portadores.

TABLA DE RESISTIVIDADES DE ALGUNOS MATERIALES

	Material	Resistividad a 20° C (en $\mu\Omega\text{cm}$)
CONDUCTORES	Aluminio	2,8
	Constantán	49
	Cobre	1,7
	Hierro	10
	Mercurio	96
SEMICONDUCTORES	Germanio	45×10^6
	Silicio	23×10^{10}
AISLANTES	Cuarzo	$\sim 10^{18}$

RESISTENCIA DE CONDUCTORES FILIFORMES

En un conductor filiforme de longitud L, sección de área S, y resistividad ρ (figura 1) la resistencia R es: $R = \frac{L\rho}{S}$

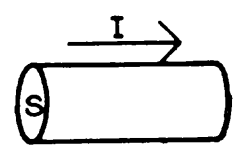


Fig. 1

En el uso de esta expresión se debe tener particular cuidado con el manejo de las unidades.

Ejemplo: Se tiene un conductor de cobre, de 10 cm. de largo y 0,1 mm. de diámetro.

Calcular: 1) la resistencia del conductor; 2) la caída de tensión que provoca el pasaje de una corriente de 1mA.

$$R = \frac{L\rho}{S} = \frac{0,1 \times 1,7 \times 10^{-8} \times 4}{\pi \times 0,1^2 \times 10^{-6}} = \frac{4 \times 1,7}{\pi} \times 10^{-1} = 0,216\Omega$$

$$V = RI = 0,216 \times 10^{-3} \quad V = 0,216 \text{ mV.}$$

La potencia instantánea entregada a una componente de dos terminales (bipolo) (figura 1) es el producto de la tensión y la corriente.

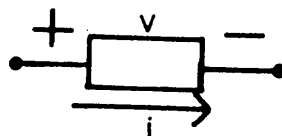


Fig. 1

$p = v \cdot i$ La unidad de potencia es el wattio. 1 wattio = 1V. x 1A.

En el caso de una resistencia $v = Ri$ entonces $p = Ri^2$

La potencia entregada al resistor sabemos que se disipa en **éste** forma de calor.

La energía entregada al resistor en un intervalo breve de tiempo t , es:

$$W = v \cdot i \cdot t$$

Hay dos casos particulares de interés:

- en continua, es decir si $v(t) = V = \text{cte.}$

$$V = RI$$

$$p = VI = RI^2 = \frac{V^2}{R}$$

- en alterna, la potencia instantánea es una función periódica.

Interesa su valor medio o potencia **media**.

Siendo $p(t) = v(t) \cdot i(t)$ con:

$$v = \sqrt{2} V_{ef} \cos \omega t$$

$$i = \sqrt{2} I_{ef} \cos \omega t$$

$$V_{ef} = R I_{ef}$$

$$p = 2 V_{ef} I_{ef} \cos^2 \omega t = 2 V_{ef} I_{ef} \frac{(1 + \cos 2\omega t)}{2} =$$

$$p = V_{ef} I_{ef} + V_{ef} I_{ef} \cos 2\omega t$$

Se observa que la potencia instantánea tiene dos términos: uno pulsante, de valor medio nulo y el otro fijo, la potencia media: $P = V_{ef} I_{ef}$. (figura 2).

$$P = V_{ef} I_{ef} = R I_{ef}^2 = \frac{V_{ef}^2}{R}$$

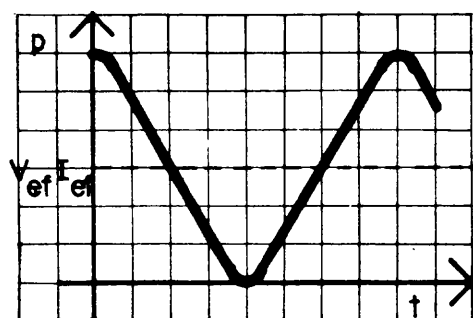


Fig. 2

Ejemplo: Sea una estufa de 50Ω . Calcular la potencia que disipa si trabaja con un voltaje eficaz de:

- a) 220 v. b) 110 v.

$$P = \frac{V_{ef}^2}{R}$$

$$P_a = \frac{220^2}{50} = 968 \text{ W}$$

$$P_b = \frac{110^2}{50} = 242 \text{ W}$$

Obsérvese que al bajar el voltaje a la mitad, la potencia baja a la cuarta parte.

Las expresiones de las resistencias equivalentes a una serie y paralelo surgen de aplicar directamente la ley de Ohm.

Así, en el caso serie (figura 1).

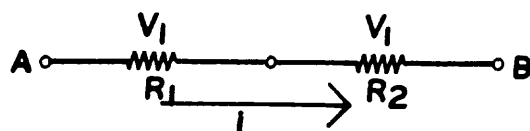


Fig. 1

$$V_{AB} = V_1 + V_2 = R_1 i + R_2 i = (R_1 + R_2) i = R_s i$$

en que $R_s = R_1 + R_2$

En el caso paralelo (figura 2).

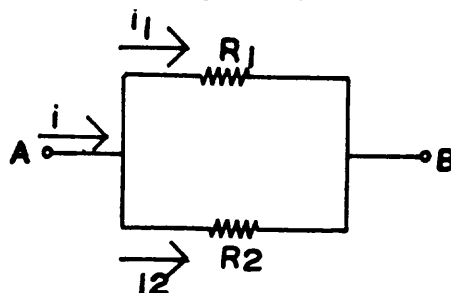


Fig. 2

$$i = i_1 + i_2 = \frac{V_{AB}}{R_1} + \frac{V_{AB}}{R_2} = V_{AB} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = V_{AB} \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2}$$

$$V_{AB} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} i = R_p i$$

en que $R_p = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

MEDIDA DE RESISTENCIAS

La ley de Ohm permite medir una resistencia. Bastará para ello medir el voltaje en bornes del resistor y la corriente que lo recorre (figura 3).

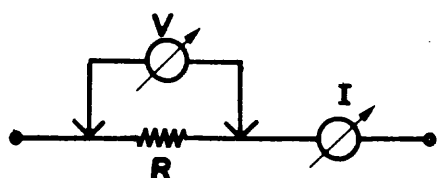


Fig. 3a

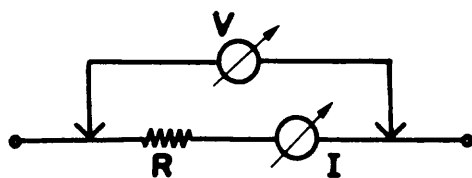


Fig. 3b

El cociente de ambas medidas da el valor de la resistencia.

Este es el llamado método *voltamperimétrico* de medida de resistencias. La precisión del mismo es limitada por la propia presencia de los instrumentos de medida, tanto en la conexión de la figura 3a (el amperímetro mide la corriente por R más la que deriva por el voltímetro) como en la de la figura 3b (el voltímetro mide la caída de tensión en R más la caída en el amperímetro).

PUENTES

Sea la configuración de la figura 4, llamada puente.

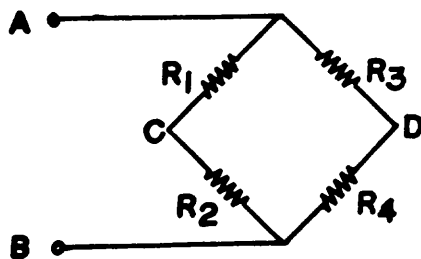


Fig. 4

Si entre A y B se aplica una tensión V , podemos calcular la tensión entre C y B:

$$V_{CB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V$$

Entre D y B:

$$V_{DB} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V$$

Si entre los puntos C y D conectamos un instrumento de medida de voltajes, ese instrumento leerá 0 cuando $V_C = V_D$. Se dice en ese caso que el puente está equilibrado.

La *condición de equilibrio* es: $V_{CB} = V_{DB}$

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} V = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V$$

$$R_2 (R_3 + R_4) = R_4 (R_1 + R_2)$$

$$R_2 R_3 = R_1 R_4$$

Esta condición se recuerda fácilmente ya que expresa que *deben ser iguales los productos de las resistencias cruzadas*.

Véase que si una de las resistencias es desconocida, por ejemplo $R_4 = X$ y R_2 es variable, variando R_2 hasta conseguir el equilibrio del puente (lectura nula en el detector), podrá medirse la resistencia desconocida:

$$X = \frac{R_2 R_3}{R_1}$$

Se tiene así un método de medida más preciso que el voltamperimétrico.

Con respecto al límite de potencia vale la pena hacer una observación que es general para toda componente. El límite lo establece, en rigor, la temperatura máxima admisible, estando implícita una temperatura ambiente. Si se trabaja a mayor temperatura ambiente, el límite de potencia debe ser reducido proporcionalmente.

Supongamos por ejemplo, que la temperatura máxima admisible es 120°C , y para una temperatura ambiente de 40°C el límite es de 1W . La línea de límites se da en la figura 1.

Si la componente trabajará a una temperatura de 60°C , la potencia disipada no podrá superar $0,75\text{W}$.

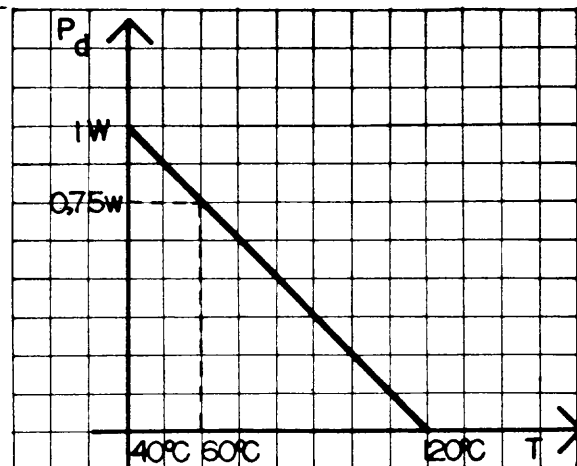


Fig. 1

DISEÑO DE UN CALEFACTOR

Se quiere construir una plancha de 750W que trabaja a 220V.

¿De qué valor debe ser la resistencia de la plancha?

$$P = \frac{V^2}{R} ; R = \frac{V^2}{P} = \frac{220^2}{750} = 64,53\Omega$$

PUENTES DE MEDIDA CON TERMISTOR

Supongamos un puente en el que uno de los resistores es un termistor R_t (figura 1). Veremos dos tipos de aplicaciones:

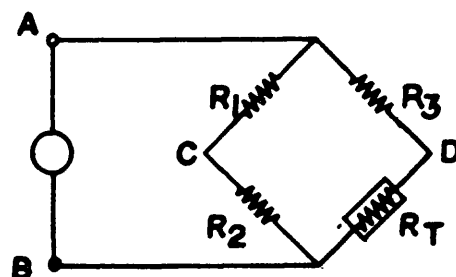


Fig. 1

- En el caso en que la potencia eléctrica disipada en el termistor es despreciable, el voltaje entre C y D será función de la temperatura del termistor. Se tiene así un *puente de medida de temperaturas*. Bastará colocar el termistor en el punto cuya temperatura se desea determinar (por ejemplo, un horno).
- En el caso que el termistor esté, con el puente, a temperatura ambiente y sea calentado sólo en forma eléctrica por el voltaje que alimenta el puente, el equilibrio del mismo se dará para un valor de la resistencia del termistor. Dadas sus características, esto permite determinar la temperatura de equilibrio, la potencia disipada y por tanto el voltaje de alimentación para el que se da el equilibrio. El puente funciona en este caso como *sistema de medidas de tensiones*.

LÁMPARA INCANDESCENTE

Consiste en una resistencia de tungsteno encapsulada al vacío.

La resistencia del tungsteno varía con la temperatura, por lo que estas bombitas tienen aplicaciones similares a las de los termistores. A diferencia de éstos, la resistencia de una bombita aumenta con la temperatura.

FOTORRESISTENCIAS

Si a un material semiconductor se le suministra energía radiante bajo la forma de luz, esta energía permite aumentar el número de portadores disponibles para el transporte de corriente. Este efecto se utiliza en las fotorresistencias, cuya resistencia disminuye fuertemente al subir el nivel de iluminación. Esto permite alimentar un circuito con corriente, bajo la acción de la luz; por ejemplo, activando o no un relé mediante una fotorresistencia (figura 2).

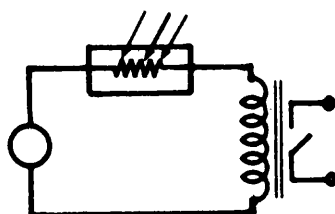


Fig. 2

STRAIN GAGES

Son resistores cuyo valor depende de la deformación que sufren. Se aplican para medir tensiones y deformaciones de una estructura. Como $R = \frac{L\rho}{S}$

la variación porcentual de R es igual a la de L.



Es importante distinguir entre la resistencia como elemento ideal de teoría de circuitos, definida por la ley de Ohm: $v = Ri$, y el resistor como componente real, cuya conducta se aproximará más o menos a la del modelo ideal.

Por ejemplo, es evidente que un resistor de alambre, por su propia construcción en bobinado, no se comportará como una resistencia pura, sino que también tendrá un efecto de inductancia.

En general, se llaman "parásitos" a esos efectos indeseados e inevitables en las componentes reales, que se ponen de manifiesto sólo en determinados rangos de frecuencia. Así, un resistor real, en alta frecuencia, puede representarse por una combinación de elementos ideales (figura 1).

C es la capacidad parásita; L_1 y L_2

son las inductancias parásitas de los terminales de conexión.

A frecuencias más altas, tampoco esta representación es fiel, y debe recurrirse a parámetros "distribuidos".

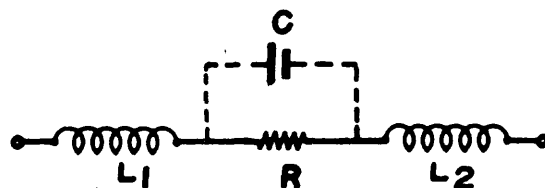


Fig. 1

Otro efecto de importancia en alta frecuencia es el llamado *efecto skin*. Consiste en la concentración de la corriente en la periferia de los conductores, por lo que ya no se puede suponer una distribución uniforme de la densidad de corriente.

Se prueba que la densidad de corriente J , decrece exponencialmente hacia el interior de la superficie del conductor. El fenómeno se caracteriza por la llamada profundidad de penetración $\delta = \frac{6,64}{\sqrt{f}}$ cm.

Véase que para $f = 1$ MHz, δ es ya muy chico $\delta = 0,0066$ cm.

A la frecuencia de la red, $f = 50$ Hz, $\delta = 0,94$ cm., por lo que en conductores gruesos (de distribución de energía) el efecto es apreciable.

Al reducirse por efecto skin la sección útil, aumenta la resistencia del conductor.



Introducción

Las leyes de Kirchhoff suministran relaciones entre corrientes o tensiones de un circuito, *independientes de las componentes que posea*. Son *leyes físicas* que reflejan propiedades muy generales de los fenómenos eléctricos.

La ley de los nudos refleja el hecho de que la carga eléctrica no puede crearse ni desaparecer; la ley de las mallas refleja la conservación de la energía en los circuitos eléctricos.

Estas leyes fundamentales de los circuitos, que se cumplen en cualquier condición, suministran un método de análisis y de diseño de los circuitos.

Generadores de voltaje

Los generadores de voltaje son dispositivos que suministran entre sus bornes una diferencia de potencial determinada. Una pila común suministra una tensión continua de 1,5 voltios. Los enchufes domiciliarios nos permiten la conexión a un generador de tensión alterna, de características constantes: valor 220 o 110 voltios eficaces, frecuencia 50 a 60 ciclos por segundo.

Debemos distinguir entre generadores *ideales* y *reales*. En el modelo ideal, la diferencia de potencial del generador es una característica propia del mismo, independiente del circuito al que se conecte, llamado *carga* (load).

En este sentido hablamos por ejemplo de una pila de 1,5 V.

En la realidad, sabemos que el voltaje que esa pila suministra depende en parte del circuito al que se conecta. Si la carga extrae de la pila una corriente grande, el voltaje que realmente provee la pila es más pequeño.

El símbolo con que se representa un generador de voltaje en el dibujo de un circuito eléctrico se da en la figura 1.

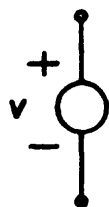


Fig. 1

Para que la información sobre el generador quede definida sin ambigüedades, deben darse: la *función* de variación de *voltaje* con el tiempo y la *polaridad*, marcada por signos +, - , en los bornes respectivos.

En un automóvil, no alcanza con decir que se emplea una batería de 12 V; debe indicarse además cuál de sus bornes (positivo o negativo) se conecta a la masa metálica del vehículo.

En el caso de los generadores de voltaje de continua, se suele emplear el símbolo de la Fig. 2, en el que la información de polaridad se da por medio de dos segmentos de distinta longitud. Convencionalmente, el segmento largo corresponde al terminal positivo.

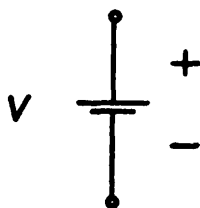


Fig. 2

Un conjunto de generadores y componentes interconectados constituyen un circuito eléctrico (Fig. 3). Trabajaremos con *circuitos de continua*, formados por generadores de continua y resistores.

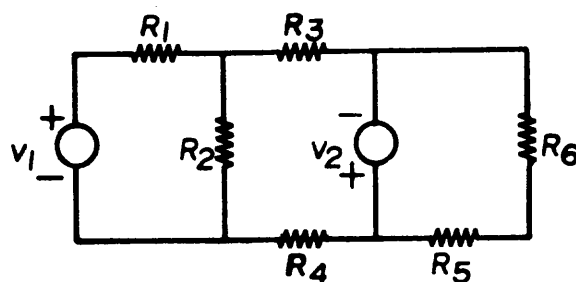


Fig. 3

Si el circuito posee capacitores (en corriente continua) se pueden eliminar sin que se altere la conducta eléctrica. Si el circuito posee inductores, se comportan como resistores de baja resistencia.

En todo circuito, voltajes y corrientes cumplen relaciones de dos tipos:

a) En cada componente, la relación entre voltajes y corrientes es una característica de esa componente. Si la componente es un resistor, esa relación es la ley de Ohm $v = Ri$.

b) Hay otro tipo de relaciones que cumplen voltajes y corrientes: son relaciones que dependen de la forma como las componentes están interconectadas, (Fig. 4) y se cumplen cualesquiera sean las componentes.

Antes de enunciar estas relaciones definiremos ciertos conceptos que caracterizan la estructura de los circuitos.

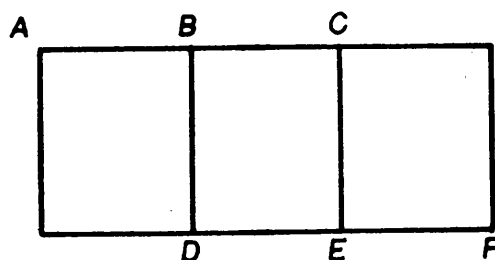


Fig. 4

La figura 4 se vincula directamente con la figura 3. Cada uno de los tramos corresponde a uno o más elementos según la correspondencia:

AD	generador	V_1
BD	R_2	
AB	R_1	
DE	R_4	
CE	generador	V_2
EF	R_5	
BC	R_3	
CF	R_6	

Llamamos *nudo* a la unión de dos o más elementos, tales como A, B, C, D, E, F.

Llamamos *malla* a un circuito cerrado de elementos, tales como A B C E D A.

Algunas mallas se reconocen inmediatamente en el dibujo del circuito (*por ejemplo* B C E D B). Hay otras (*por ejemplo* B C F E D B) o la que determinan las componentes externas del dibujo: A B C F E D A, que son más difíciles de reconocer.

Leyes de Kirchhoff

Las leyes de Kirchhoff son dos:

1) *Ley de los nudos*: En cada nudo la suma de las corrientes que llegan al nudo es igual a la suma de las corrientes que salen.

$$\text{En la figura 5: } i_1 + i_3 = i_2 + i_4$$

De no cumplirse esta ley, en el nudo se produciría una acumulación o desaparición de cargas eléctricas.

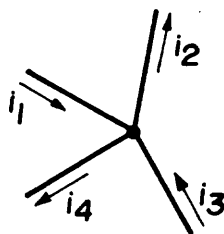


Fig. 5

2) *Ley de las mallas*: Sea la malla BCEDB de la figura 4. Esta malla se compone de cuatro elementos: BC, CE, ED y DB. Medimos con un voltímetro las diferencias de potencial en cada uno de estos elementos *con su signo correspondiente*. Esto quiere decir, por ejemplo, que si se toma como positiva la diferencia de potencial cuando el borne positivo del voltímetro se encuentra en el primer nudo del elemento y negativa en el caso contrario, cuando se hace la siguiente medición es necesario invertir los bornes del voltímetro.

La ley de las mallas dice que la suma de las diferencias de potencial positivas coincide con la suma de las negativas para cualquier malla del circuito. También puede decirse que la suma *algebraica* de las diferencias de potencial, medidas ordenadamente en la malla, es cero.

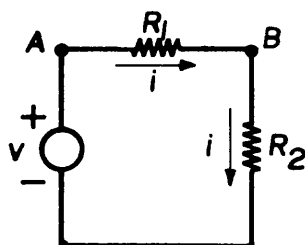


Fig. 6

Ejemplo: El circuito de la figura 6 consta de una única malla ABCA y de tres elementos. Un voltímetro conectado ordenadamente en la malla (el borne + en el primer nudo y el borne - en el segundo) mediría:

elemento	componente	diferencia de potencial
AB	R_1	$+ R_1 i$
BC	R_2	$+ R_2 i$
CA	generador V	$- V$

Vale la pena observar que en el elemento CA, para tener la lectura V se debe conectar el voltímetro con el borne + en A y el - en C, lo cual significa invertir el orden de conexión que se seguía en los elementos anteriores. Por esta razón, la diferencia de potencial es negativa.-

La ley de mallas dice, igualando las diferencias de potencial positivas con las negativas:

$$R_1 i + R_2 i = V$$

o bien, tomando la suma algebraica:

$$R_1 i + R_2 i - v = 0$$

Resulta equivalente escribir la diferencia de potencial entre los bornes de la fuente: $v = R_1 i + R_2 i = (R_1 + R_2) i$

Conocida la tensión v del generador, queda determinada la corriente del circuito: $i = \frac{v}{R_1 + R_2}$

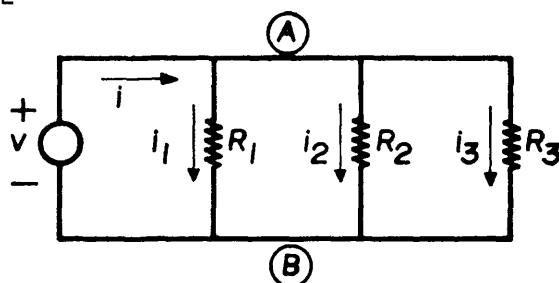


Fig. 7

Ejemplo: En el circuito de la Fig. 7, un generador alimenta un paralelo de tres resistores.

Quedan determinadas numerosas mallas, pero sólo dos nudos: A y B.

La ley de Kirchoff de nudos aplicada al nudo A dice:

$$i = i_1 + i_2 + i_3$$

En el nudo B se obtiene la misma relación. El análisis del circuito queda completado, pues se conocen, por la ley de Ohm, las corrientes en cada resistor:

$$i_1 = \frac{v}{R_1} \quad i_2 = \frac{v}{R_2} \quad i_3 = \frac{v}{R_3}$$

y por la ley de Kirchoff de nudos, la corriente que suministra la fuente:

$$i = i_1 + i_2 + i_3 = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) v$$

Ejemplo: El circuito de la figura 8 está armado con resistencias de valores:

$$R = 50 \, \Omega$$

$$R_1 = R_2 = 100 \, \Omega$$

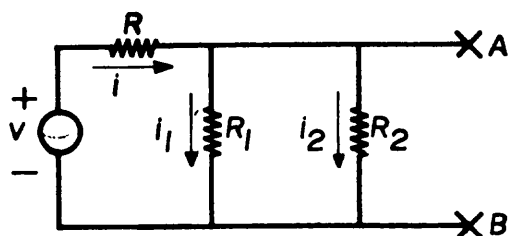


Fig. 8

El generador E mide 10 V y la tensión entre A y B mide 8 V. Con estas medidas se pueden calcular las corrientes del nudo A:

$$i = \frac{10 - 8}{50} = 40 \text{ mA}$$

$$i_1 = \frac{8}{100} = 80 \text{ mA}$$

$$i_2 = \frac{8}{100} = 80 \text{ mA}$$

Como es inmediato, no se cumple con la ley de nudos en A; $i = i_1 + i_2$. Como conclusión, se obtiene que alguna de las resistencias del circuito no posee el valor indicado. La resistencia R puede poseer un valor más pequeño o R_1 y R_2 un valor más alto. Un análisis cuidadoso mostraría en este caso que es R la resistencia defectuosa.

Este tipo de análisis corrientes de nudo se puede llevar a cabo mediante un voltímetro solamente y permite identificar zonas defectuosas en un circuito. Una vez identificados los principales culpables de la falla, se puede analizar una por una estas componentes.

El resultado conocido como teorema de Thévenin suministra un método útil y práctico para analizar, interpretar la conducta y diseñar circuitos.

Caracteriza el circuito *visto desde dos nudos*. Esto quiere decir: el circuito que resulta de considerar dos bornes cualesquiera de un circuito complejo como *una nueva componente de circuito*.

En general, entre dos bornes de un circuito existe una diferencia de potencial. Por esta razón, el circuito visto desde esos bornes se presenta como un *cierto generador*.

Si se coloca una resistencia entre los bornes elegidos, *una carga para el generador*, se alteran las corrientes del circuito y la tensión en los bornes cambia. El generador considerado posee resistencia interna.

El teorema de Thévenin permite caracterizar este generador.

Resistencia vista

Supongamos una red de resistores, *red resistiva*, interconectados de cualquier manera. Fijados dos puntos A, B de la red, en general se reducirá a un conjunto de conexiones típicas (series, paralelos, etc.) que permiten definir un valor de resistencia equivalente.

A esa resistencia equivalente se le llama *resistencia vista* desde los terminales A y B: R_{AB} .

En la fig. 1, desde los terminales A y B se ve una resistencia que se puede calcular por transformaciones sucesivas.

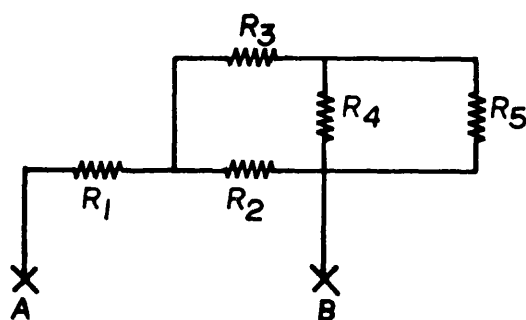


Fig. 1

En las sucesivas figuras (2, 3 y 4) se ilustra la transformación del circuito suponiendo que todos los resistores valen $1\text{ K}\Omega$.

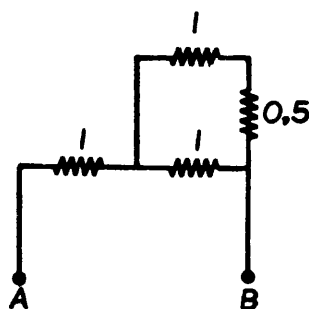


Fig. 2

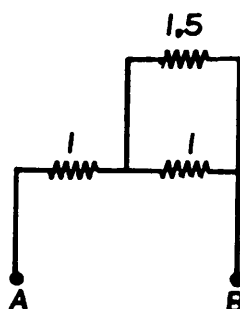


Fig. 3

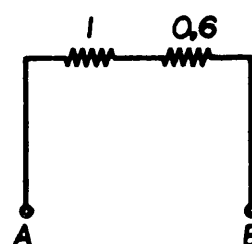


Fig. 4

Pese a su complejidad, desde los terminales A B esa red se comporta como un resistor, de $1,6\text{ K}\Omega$.

Si conectamos A B a un generador de 10V podemos afirmar que la corriente que extraerá del mismo será $i = \frac{10}{1,6} = 6,25\text{ mA}$.

El circuito de la figura 5 no puede ser transformado por este sistema, y no se reduce a sucesivas operaciones de serie y paralelo.

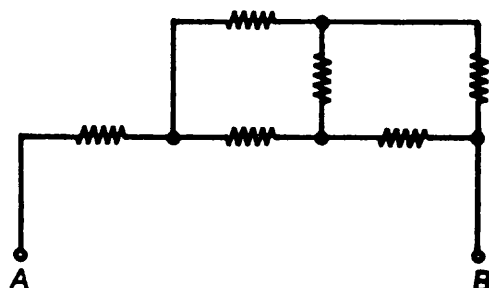


Fig. 5

En los casos en que la red resistiva no pueda reducirse a una combinación de series y paralelos, siempre se puede calcular la resistencia vista R_{AB} .

Imaginando (Fig. 6) una fuente de voltaje E conectada a sus terminales, si la corriente que ella suministra es i , resulta $R_{AB} = \frac{E}{i}$

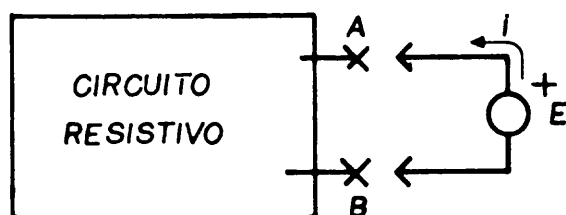


Fig. 6

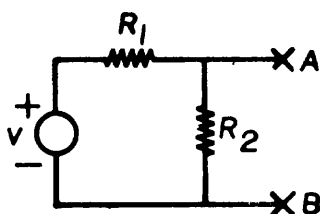
Voltaje visto

Supongamos un circuito formado por generadores de continua y resistores. Muchas veces interesa analizar el circuito desde los nudos del mismo.

Al voltaje que existe entre esos nudos cuando no se conecta a ellos ninguna resistencia de carga externa se le llama voltaje visto.

Por ejemplo: en el divisor resistivo (fig. 7), el voltaje visto entre los terminales A y B es:

$$v_{AB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v$$



Circuito equivalente de Thévenin

Los conceptos de resistencia vista y voltaje visto nos permiten dar un paso de gran importancia para el estudio de los circuitos. Dado un circuito con generadores y resistores interconectados de cualquier manera, desde dos nudos del mismo, la conducta del circuito queda caracterizada por dos magnitudes: el voltaje visto y la resistencia vista.

Queda así definido el *circuito equivalente de Thévenin* (fig. 8).

Para estudiar lo que pasa cuando entre A y B se conecta un resistor de carga externa, resulta mucho más cómodo prescindir del circuito original y trabajar con su equivalente Thévenin.

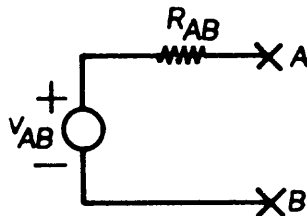


Fig. 8

Ejemplo: Volvamos al caso del divisor resistivo (Fig. 7). Vimos que el voltaje de vacío desde A B es:

$$v_{AB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v$$

Para hallar la resistencia vista desde A B debemos considerar la red puramente resistiva. Para ello *anulamos la fuente*, sustituyéndola por su resistencia propia. En una fuente ideal, la resistencia propia es cero, por lo que sustituimos la fuente por un conductor de resistencia 0 (fig. 9).

En la red resistiva que resulta, es evidente que la resistencia vista desde A B es el paralelo de R_1 y R_2 :

$$R_{AB} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

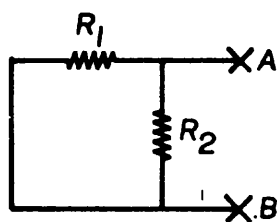


Fig. 9

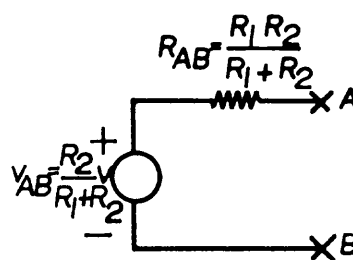


Fig. 10

Queda pues definido el equivalente Thévenin (fig. 10).

Si entre los terminales A B del circuito original se conecta un resistor exterior, R_L , será mucho más sencillo el análisis empleando el equivalente Thévenin:

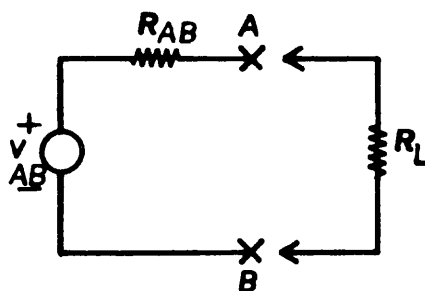


Fig. 11

Si por ejemplo: $v = 10 \text{ V}$. $R_1 = R_2 = 1 \text{ K}\Omega$, el equivalente Thévenin consta de una fuente $v_{AB} = 5 \text{ V}$. en serie con una resistencia $R_{AB} = 500 \Omega = 0,5 \text{ K}\Omega$

Si conectamos una resistencia de carga R_L , circulará una corriente:

$$i = \frac{V_{AB}}{R_L + R_{AB}} = \frac{5}{R_L + 0,5}$$

La tensión entre A y B, será:

$$v = V_{AB} \frac{R_L}{R_L + R_{AB}} = 5 \times \frac{R_L}{R_L + 0,5}$$

Para diferentes valores de R_L se tiene:

R_L	i	v
0	10 mA	0
10	9,8 mA	0,098 V
100	8,3 mA	0,83 V
500	5 mA	2,5 V
1 K	3,3 mA	3,33 V
10 K	0,47mA	4,75 V
100K	0,049mA	4,97 V

Podemos afirmar que si la resistencia R_L es mucho mayor que R_{AB} , sobre R_L se tendrá un voltaje próximo a 5 V. (Se dice que R_L *no carga* al circuito.) Con una R_L chica frente a R_{AB} , el voltaje en R_L es mucho menor que V. (R_L *carga* al circuito.)

Un *generador real* puede representarse por medio del equivalente Thévenin como un generador *ideal* y una resistencia R_{AB} interna.

Este ejemplo ilustra sobre un criterio general: un generador de voltaje *real* se aproximará tanto mejor a un modelo *ideal* cuanto *menor sea su resistencia propia frente a la carga a la que se conecte*.

Sabemos que en todo circuito de continua se cumplen leyes de Ohm en los resistores y leyes de Kirchhoff de nudos y mallas.

La aplicación sistemática de estas ecuaciones permite analizar los circuitos y determinar las corrientes y tensiones en cada componente.

Existen diversos métodos sistemáticos. Las ventajas de cada uno depende de los resultados que se desean obtener.

Antes de la aplicación de los métodos sistemáticos, es necesario definir una orientación para la corriente y un signo para la caída de tensión.

En cada elemento del circuito, tomamos un *sentido de referencia* para medir la corriente, que no tiene por qué coincidir con el *sentido real* de la misma; es sólo una convención que permite afirmar que si la corriente es positiva, el sentido de referencia elegido coincide con el sentido real, y si es negativa, el sentido real es opuesto al de referencia.

Llamamos *caída de tensión* entre dos puntos del circuito, recorridos en cierto sentido, a la diferencia de potencial: potencial inicial menos potencial final.

De acuerdo con la ley de Ohm, en un resistor recorrido en el mismo sentido de la corriente (Fig. 1) :

se cumple $V = V_1 - V_2 = Ri$; y

cambiando el sentido del recorrido: $V_2 - V_1 = - Ri$

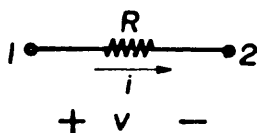


Fig. 1

1) *Ley de los nudos*. En cada nudo de un circuito, la suma algebraica de las corrientes que a él llegan y de las que de él salen, es cero.

De otra manera: la suma de las corrientes que llegan, es igual a la suma de las que salen.

2) *Ley de las mallas*. En cada malla de un circuito, la suma algebraica de las caídas de potencial vale cero.

Método de nudos

Elegimos como variables los *voltajes de cada nudo*, referidos al de un nudo *base*, que es usualmente la *tierra* del circuito.

En la Fig. 2, tomamos los voltajes V_{AC} , V_{BC} de los nudos A y B referidos al nudo C.

$$V_{AC} = v_A - v_C \quad V_{BC} = v_B - v_C$$

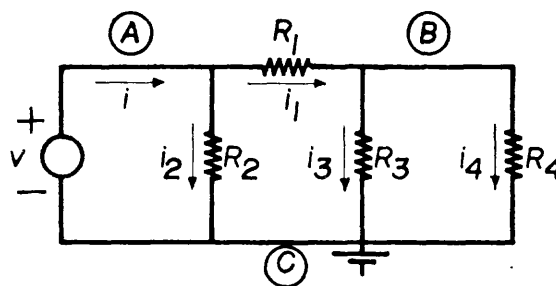


Fig. 2

Al trabajar con esos voltajes, las ecuaciones de Kirchhoff de mallas se cumplen automáticamente: en efecto, en la malla central por ejemplo:

$$(v_A - v_B) + (v_B - v_C) + (v_C - v_A) = 0$$

Por lo tanto, la propia elección de las variables voltajes de nudo asegura el cumplimiento de las leyes de Kirchoff de mallas. Basta plantear las leyes de Kirchoff de nudos, en los distintos nudos.

$$\text{Nudo A : } i = i_1 + i_2$$

$$\text{Nudo B : } i_1 = i_3 + i_4$$

Para el nudo base C, la ecuación que resulta:

$$i_2 + i_3 + i_4 = i,$$

no aporta nada nuevo. Es una consecuencia de las dos anteriores (resulta de sumarlas), por lo que no es necesario plantearla.

Las corrientes pueden ser expresadas en función de los voltajes de nudos, por medio de la ley de Ohm:

$$i_1 = \frac{v_A - v_B}{R} ; \quad i_2 = \frac{v_A}{R_2} ; \text{ etc.}$$

El voltaje del nudo A es un dato: es el voltaje de la fuente.

Queda un único voltaje incógnito: v_B

$$\text{Nudo B: } i_1 = i_3 + i_4 \text{ o sea: } \frac{v - v_B}{R_1} = \frac{v_B}{R_3} + \frac{v_B}{R_4}$$

De esta ecuación se obtiene el valor de v_B . Resulta:

$$v_B = \frac{R_3 R_4}{R_3 R_4 + R_1 (R_3 + R_4)} v$$

La ecuación del nudo A permite determinar la corriente que suministra la fuente:

Nudo A:

$$i = i_1 + i_2 = \frac{v - v_B}{R_1} + \frac{v}{R_2}$$

Ejemplo : Calcular el circuito equivalente Thévenin entre A B, del circuito de la figura 3.

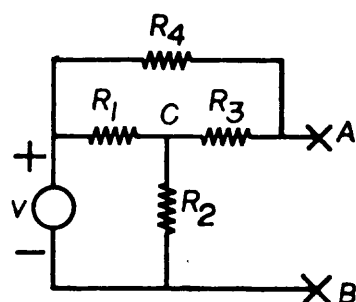


Fig. 3

1) Voltaje de vacío

Tomando B como nudo base, los voltajes de nudos son: v , v_C y v_A .

Nudo C :

$$\frac{v - v_C}{R_1} + \frac{v_A - v_C}{R_3} = \frac{v_C}{R_2}$$

Nudo A :

$$\frac{v_A - v_C}{R_1} + \frac{v_A - v}{R_4} = 0$$

De este sistema de ecuaciones con dos incógnitas, v_C y v_A despejamos la que interesa:

$$V_A = \frac{R_1(R_2 + R_3) + R_2(R_3 + R_4)}{R_1R_2 + (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \cdot V$$

2) *Resistencia vista*. Para calcularla, anulamos la fuente de voltaje y miramos la red resultante desde AB (figura 4), que se puede dibujar, como en la figura 5, con R_4 a tierra.

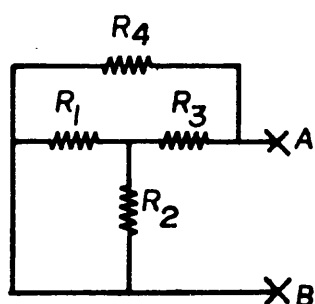


Fig. 4

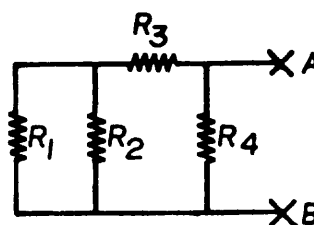


Fig. 5

Desde A B, se ve el paralelo de R_4 con la serie de R_3 y el paralelo $R_1 R_2$.

$$R_{AB} = \frac{R_4 \times R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}{R_4 + R_3 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{R_4 (R_1 + R_2) R_3 + R_1 R_2}{R_1 R_2 + (R_1 + R_2)(R_3 + R_4)}$$

Método de mallas.

El método de los nudos consiste en elegir variables (voltajes de nudos) que cumplen automáticamente las leyes de Kirchhoff de mallas y plantear las leyes de Kirchhoff de nudos como ecuaciones.

Se puede proceder al revés: elegir variables (corrientes de mallas) que cumplen automáticamente las leyes de Kirchhoff de nudos y plantear como ecuaciones las leyes de Kirchhoff de mallas.



En esto consiste el método de mallas para el análisis de circuitos.

Si bien éste es el método tradicional de resolución de circuitos, omitimos aquí su tratamiento por considerar que el método de nudos es preferible. En efecto:

- mientras las corrientes de mallas son variables ficticias, los voltajes de nudos son variables reales.

- las variables que interesa determinar en un circuito son usualmente voltajes y no corrientes.

- el instrumento fundamental de la electrónica (el osciloscopio) permite la observación directa de voltajes. Por otra parte, la observación de corriente exige abrir circuitos, operación por lo general difícil.

Así como se trabaja con fuentes de voltaje, nada impide a la teoría de circuitos considerar *fuentes de corriente*, es decir, dispositivos que suministren una corriente determinada, independientemente del circuito al que se conecten.

Las fuentes de corriente no tienen una implementación real tan conocida como las de voltaje (pilas), pero algunos fenómenos físicos (descarga eléctrica en gases) y dispositivos electrónicos (transistor) se comportan como generadores de corriente.

Por otro lado, podemos ver cómo un circuito real puede aproximarse a una fuente de corriente.

Sabemos que el circuito equivalente Thévenin consiste en una fuente de voltaje y una resistencia serie. Consideramos el caso de una resistencia serie muy grande frente a las posibles resistencias de carga (fig. 1).

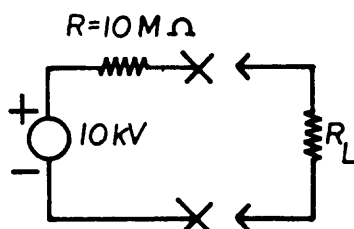


Fig. 1

Siempre que R_L sea mucho menor que R , la corriente que circula será esencialmente constante, y determinada por R :

$$i = \frac{V}{R + R_L} \approx \frac{V}{R} = \frac{10}{10^7} = 1\text{mA}$$

En general, dado el equivalente Thévenin de una fuente de voltaje real, podemos afirmar que:

- 1) Si R es mucho menor que R_L , se comporta como una fuente de voltaje (si $R = 0$, es una fuente ideal de voltaje).



2) Si R es mucho mayor que R_L , se comporta como una fuente de corriente (si $R = \infty$, es una fuente ideal de corriente).-

En el estudio de los circuitos eléctricos resulta de fundamental importancia la forma de onda *sinusoidal*.

En múltiples casos, es la forma de onda de voltaje y corrientes. En la distribución de energía domiciliar se emplean voltajes sinusoidales. La señal eléctrica correspondiente a un sonido puro es una senoide.

La señal sinusoidal tiene una significación teórica muy fuerte: la conducta de un circuito frente a una señal sinusoidal permite caracterizarlo con gran generalidad y prever su comportamiento frente a *señales periódicas cualesquiera*.

En la figura 1 vemos una forma de onda sinusoidal.

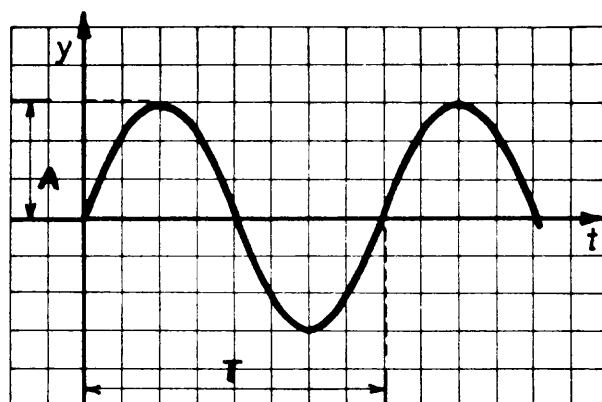


Fig. 1

En ordenadas se representa la magnitud y en abscisas se representa el tiempo t . El tamaño de la señal se mide por la *amplitud* A .

La variación con el tiempo se mide a través de:

- el *período* T , es decir el intervalo de tiempo a partir del cual se repiten los valores de la señal.
- la *frecuencia* f , es decir el número de ciclos o períodos que la onda cumple en la unidad de tiempo. Se mide en hercios (ciclos por segundo), cuya abreviatura es Hz.

Ejemplo: una senoide, o en general una función periódica de período $T = 0,25$ seg., tendrá una frecuencia $f = 4$ Hz.

En la Fig. 2 vemos dos señales de igual frecuencia y distinta amplitud.

En la Fig. 3 vemos dos señales de igual amplitud y distinta frecuencia.

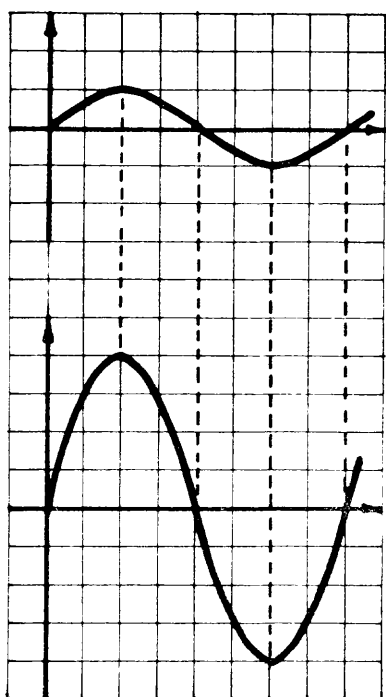


Fig. 2

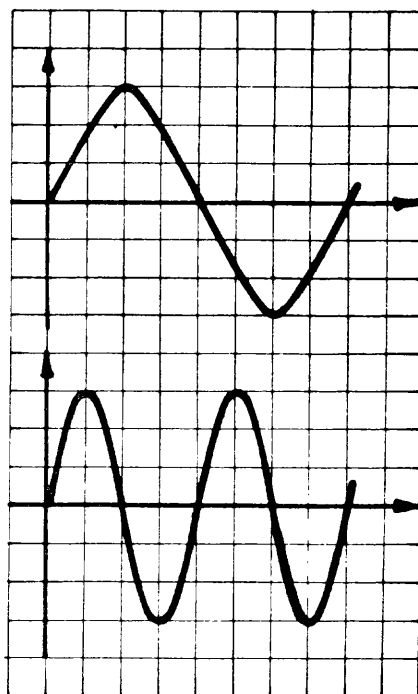


Fig. 3

Una tercera característica es la *fase*, que permite relacionar dos sinusoides respecto del tiempo. En la Fig. 4 vemos dos señales de amplitud y frecuencia iguales pero de distinta fase.-

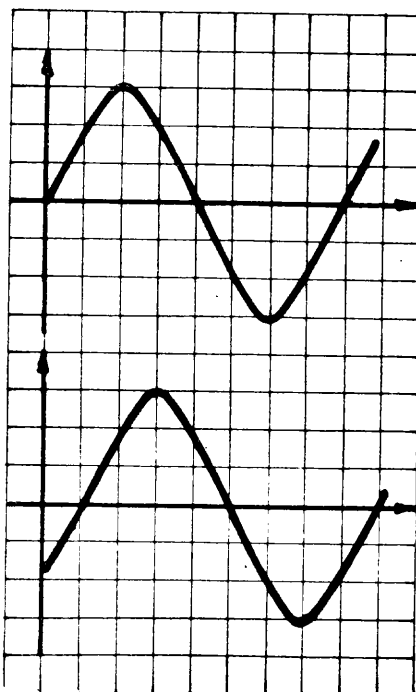


Fig. 4

Representación vectorial

La conducta de los circuitos eléctricos bajo la acción de excitaciones sinusoidales (circuitos en alterna) puede estudiarse con las formas de onda en función del tiempo.

Sin embargo, es más cómodo recurrir a la *representación vectorial*. Veamos su fundamento.

En la Fig. 5 se observa una circunferencia recorrida por el punto P a velocidad constante (movimiento circular uniforme).

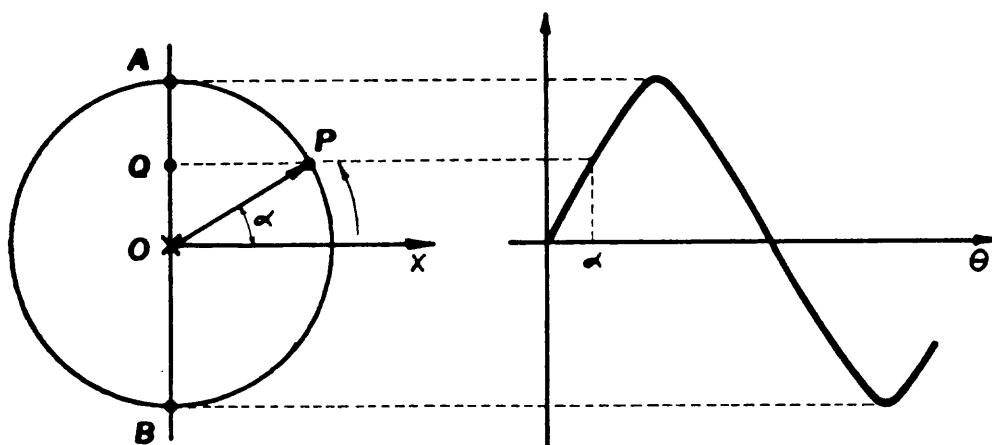


Fig. 5

En cada instante, la ubicación del punto P se define por el ángulo α que el radio OP forma con el eje OX. A medida que P se mueve sobre la circunferencia, el punto Q, proyección de P sobre el eje vertical, se mueve entre las posiciones extremas A y B.

Representando en correspondencia la posición de Q en función del ángulo α se tiene una forma de onda sinusoidal. La *amplitud* está dada por el radio de la circunferencia. El ángulo α varía linealmente con el tiempo, de modo

que P da una vuelta completa a la circunferencia (θ cambia 360° o 2π radianes) en el tiempo de un período T.

El número de vueltas que P da en la unidad de tiempo es la *frecuencia* f.

La posición inicial del punto P define la *fase*.

Como vemos, toda la información que caracteriza a una forma de onda sinusoidal se puede dar en forma equivalente definiendo el vector OP.

Dibujemos el vector en una posición fija. La senoide que representa se obtiene considerando su movimiento rotativo y la proyección sobre un eje. De esta manera alcanza con dar el vector fijo, como una fotografía del mismo, sorprendido en su movimiento.

Suma de dos senooides

Supongamos dos voltajes U y V de igual frecuencia, defasados 60° (fig. 6).

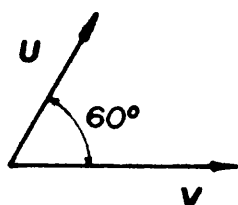


Fig. 6

Con esa representación vectorial está dada toda la información así.

Si se desea representar las evoluciones de U y V con el tiempo, basta reiterar el procedimiento conocido (fig. 7).

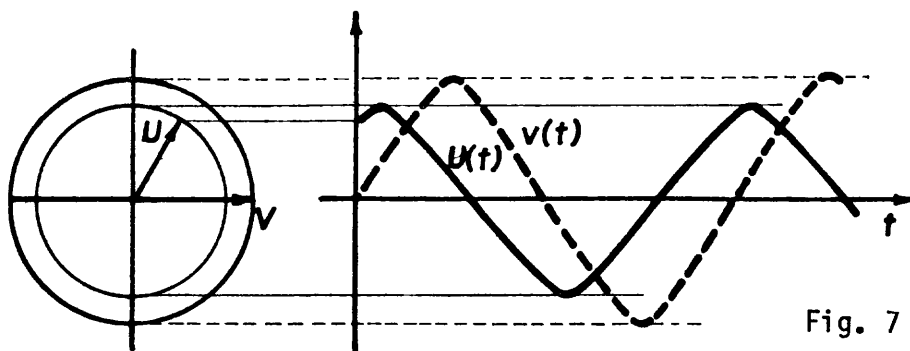


Fig. 7

Intentemos sumar ambas ondas. Esta operación interesa, por ejemplo, al aplicar la ley de Kirchhoff de mallas a un circuito en corriente alterna. En la figura 8 se reitera el diagrama de vectores y se agrega la señal W suma de las señales U y V. Esta señal se obtiene sumando el segmento OA de la señal U al segmento OB de la señal V en cada instante: $OA + OB = OC$. El resultado tiene el aspecto de una nueva senoide, de la misma frecuencia que U y V.

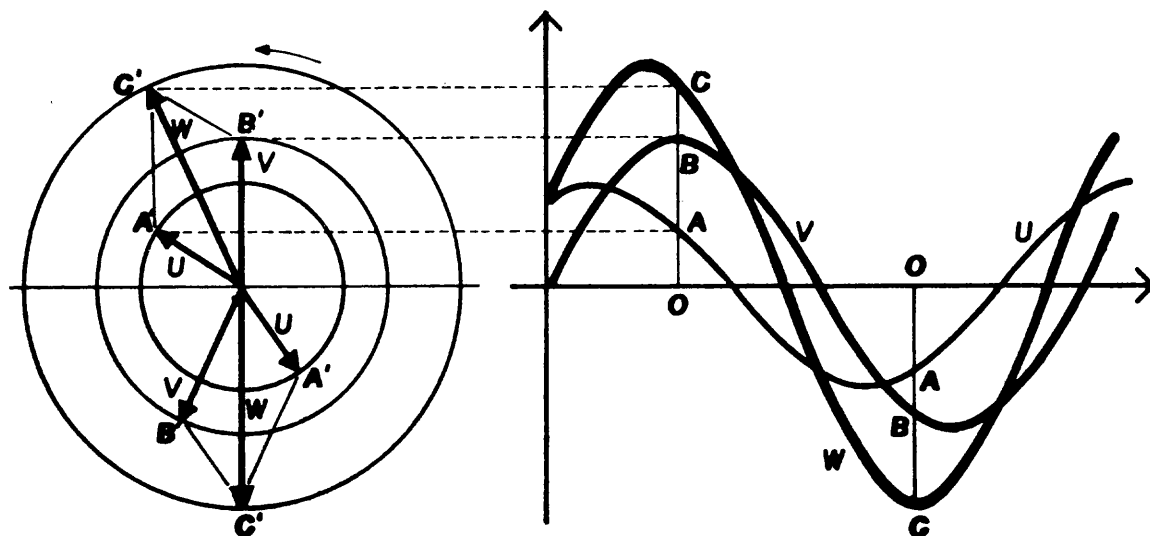


Fig. 8

Como corresponde con la representación vectorial, A es la proyección de A' (extremo de U) y B es la proyección de B' (extremo de V). Dibujemos el punto C', diagonal del paralelogramo construido sobre U y V. Se tiene entonces que B'C' es igual y paralelo a U y que A'C' es igual y paralelo a V. Como consecuencia, la proyección de B'C' es igual a OA y la proyección de A'C' es igual a OB. Como consecuencia, la proyección de C' es C.

La señal W es, en todo instante, la proyección del punto C', vértice del paralelogramo construido con los vectores U y V.

También se puede decir que la señal suma es la proyección del vector W , obtenido como diagonal del paralelogramo construido con los vectores U y V .

Con esta afirmación, queda demostrado el hecho fundamental que *la suma de dos sinusoides de la misma frecuencia es otra senoide de la misma frecuencia.*

También queda demostrado que *el vector W que genera la suma es la suma vectorial (o resultante) de los vectores U y V .* Este resultado repite una operación que aparece en otras oportunidades (velocidades, fuerzas, etc.).

Si se suma un vector V consigo mismo, se tiene el vector doble, ver figura 9, que puede escribirse $2V$. Así se puede formar cualquier múltiplo de una senoide, operación que cambia simplemente su amplitud.

Si se considera la senoide *opuesta* o de *signo contrario* de V , puede observarse que coincide con V girada 180° . Se obtiene así el vector $-V$ el cual permite restar vectores y sinusoides.

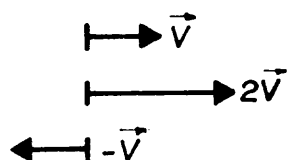


Fig. 9

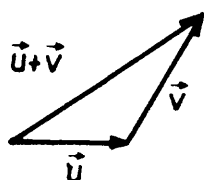


Fig. 10

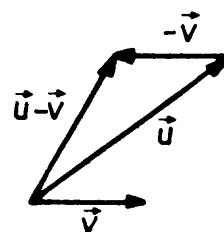


Fig. 11

En la figura 10 se muestra una construcción simplificada de la suma de dos vectores, en la cual se omite el dibujo completo del paralelogramo. Ésta es la manera usual de trabajar.

En la figura 11 se ilustra el procedimiento de resta de dos sinusoides.

Se forma el opuesto de V y luego se construye el triángulo que permite obtener la suma.

En muchas oportunidades interesa analizar *la relación* de dos magnitudes físicas, más que su comparación de tamaños. La relación de dos magnitudes permite fijar *tamaños relativos*.

Los órganos de los sentidos (y en particular el oído) identifican *relaciones* de magnitudes, más que magnitudes absolutas: *relación de intensidades* o *relación de frecuencias* de un sonido. En un instrumento de medida interesan sus *errores relativos*, la relación de cada rango de medida, etc.-

Una manera de expresar los cocientes de dos magnitudes es a través del *logaritmo*. En lugar de trabajar con la magnitud w se trabaja con la magnitud u :

$$u = \log w$$

De esta manera, la *relación* de dos magnitudes w , se convierte en *diferencia* de dos magnitudes u :

$$u_2 - u_1 = \log w_2 - \log w_1 = \log \frac{w_2}{w_1}$$

Magnitudes en *relación* constante se encuentran, en expresión logarítmica, a *distancia* constante.

Se llama *década* a la distancia entre dos magnitudes que corresponde a la *relación diez*: una magnitud es diez veces la otra, sus logaritmos difieren en 1. Se llama *octava* a la distancia que corresponde a la *relación dos*.

La octava proviene de la música y se aplica, casi exclusivamente, a relaciones de frecuencias. La distancia de la octava corresponde a 0,3 en unidades logarítmicas.

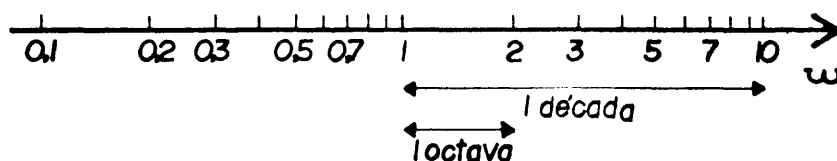


Fig. 1

Un segmento de longitud fija sobre este eje (por ejemplo un segmento de la octava), determina una relación constante para la variable w (en el caso de la década, esa relación es 10). En esta propiedad se basa la construcción de las reglas de cálculo.

La adopción de una escala logarítmica para la representación de una variable resulta cómoda para representar magnitudes con rangos de variación muy grandes (por ejemplo de tipo exponencial).

Vemos en la Fig. 2 una curva de tipo exponencial (curva característica de un diodo semiconductor de germanio representada en un diagrama convencional). En la Fig. 3 la misma función está representada con diagrama *semilogarítmico* (así llamado porque en el eje de ordenadas se adopta la escala logarítmica). Se observa que el crecimiento aparece como una recta en el diagrama semilogarítmico. En la misma longitud, el eje graduado en escala logarítmica cubre un rango de corriente de 1 a 100.000 y el lineal de 0 a 10.

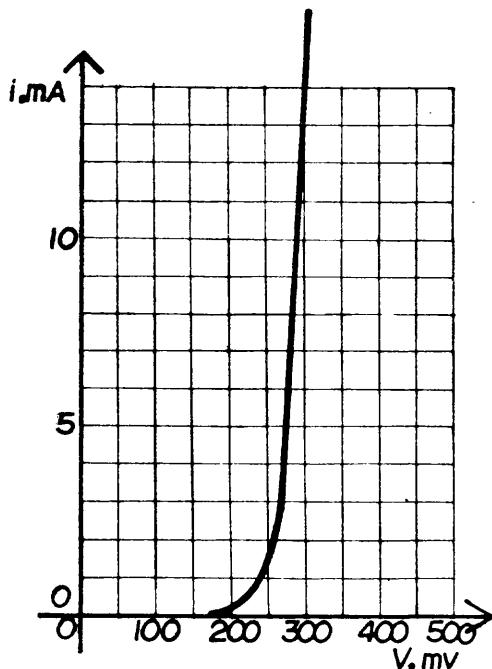


Fig. 2

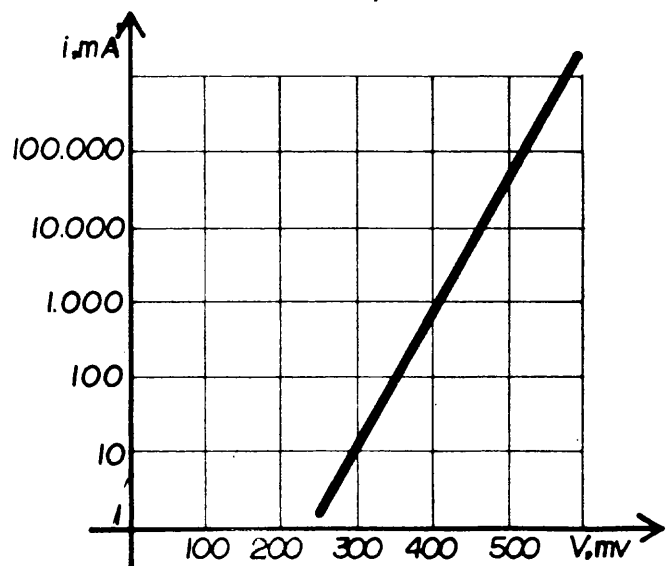


Fig. 3

A veces interesa representar las dos variables con escala logarítmica: es el caso de representar transferencias (medidas en decibeles) en función de la frecuencia. Se tienen así diagramas doblemente logarítmicos. (Fig. 4).

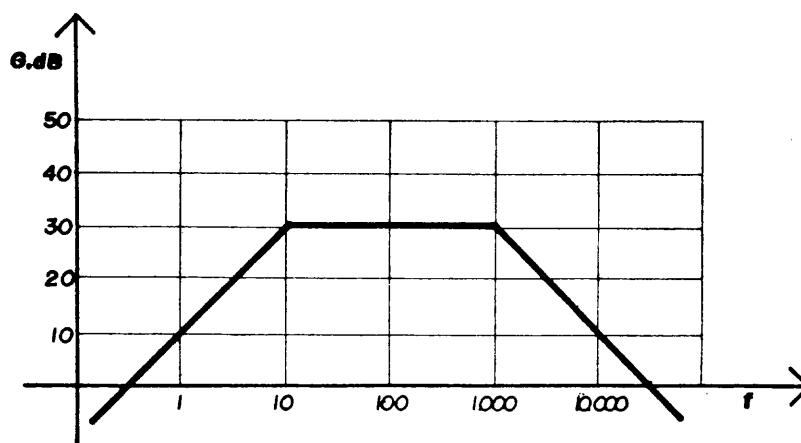


Fig. 4

En los casos en que el empleo de una medida logarítmica presenta ventajas (por ejemplo, para medir intensidades sonoras) se introduce la noción de *decibel*.

Esta noción se aplica para expresar la *relación* de dos magnitudes.

Los dos casos más interesantes de aplicación son para expresar *relaciones de potencia* o *relaciones de voltaje*.

Para dos potencias P_1 y P_2 , se define:

$$N = 10 \log \frac{P_2}{P_1}$$

el número de *decibeles* del cociente. Si las potencias se desarrollan sobre una misma resistencia son proporcionales al cuadrado de los voltajes:

$$P_1 = \frac{E_1^2}{R}$$

$$P_2 = \frac{E_2^2}{R}$$

$$N = 10 \log \frac{P_2}{P_1} = 10 \log \frac{E_2^2}{E_1^2} = 20 \log \frac{E_2}{E_1}$$

Esta última expresión es la que se usa para medir una relación de voltajes (ganancia) en decibeles (dB).

Las ventajas del uso de los decibeles en el manejo de las ganancias radica en su carácter logarítmico:

1) La respuesta del oído a excitaciones sonoras es aproximadamente logarítmica, por lo cual los decibeles son unidades ideales para la medida de intensidades de sonido.

2) Rangos muy amplios de ganancias se expresan en dB mediante valores razonables.

3) Dado un circuito en el que reconocemos terminales de entrada y de salida, llamamos *transferencia* de voltaje G a la relación (Fig. 1):

$$G = \frac{\text{voltaje de salida}}{\text{voltaje de entrada}} = \frac{V_o}{V_i}$$

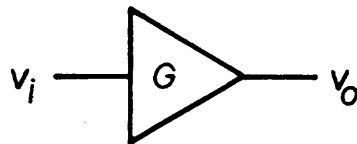


Fig. 1

Según que V_o sea mayor o menor que V_i esa transferencia será una *ganancia* ($G > 1$) o una *atenuación* ($G < 1$).

Un circuito complejo puede considerarse, muchas veces, dividido en varias etapas, en cada una de las cuales se tiene una transferencia. (Fig. 2)

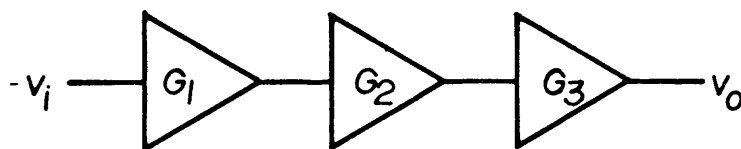


Fig. 2

La transferencia del circuito global se obtendrá como producto de las de las distintas etapas. Dado el carácter logarítmico de los decibels, la transferencia global en dB se obtiene sumando algebraicamente las transferencias en dB de las distintas etapas. Obsérvese que, medidas en dB, *las ganancias son positivas, y las atenuaciones son negativas.*



Ejemplo: Si G_1 es un amplificador de 20 dB G_2 un atenuador de 6 dB y G_3 un amplificador de 30 dB, el conjunto tendrá una relación de voltaje de:

$$G = 20 - 6 + 30 = 44 \text{ dB,}$$

que corresponde a un amplificador de ganancia próxima a 200.

Si G_2 fuera un atenuador de 60 dB: $G = 20 - 60 + 30 = 10 \text{ dB}$, lo cual corresponde a una atenuación próxima a 3.

TABLA DE VALORES

N dB	E_2/E_1	P_2/P_1
0	1	1
1	1,12	1,25
3	1,41	2
6	2	4
10	3,16	10
20	10	100
40	100	10.000
60	1.000	1.000.000
- 20	0,1	0,01
- 40	0,01	0,001
- 60	0,001	0,000.001

La suma de señales sinusoidales de la misma frecuencia es otra senoide de la misma frecuencia. Este resultado permite analizar los circuitos de corriente alterna.

La superposición de señales sinusoidales *de diferentes frecuencias* conduce a resultados muy diferentes según sean las frecuencias elegidas. La superposición de *un nivel de continua* B a una senoide se ilustra en la figura 1.

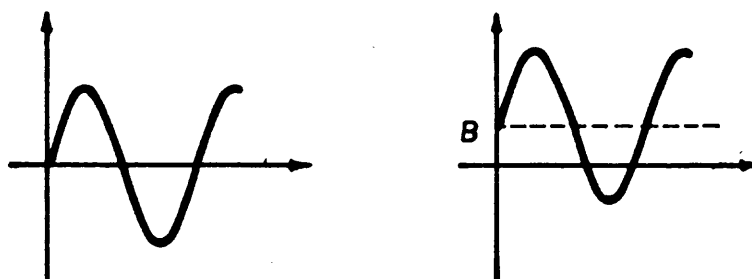


Fig. 1

En circuitos eléctricos con este tipo de señales, a B se le llama *valor medio* o *valor de continua* de la señal. La senoide es la *parte alterna* de la misma.

Consideramos ahora una señal compuesta por la superposición de señales sinusoidales de frecuencias distintas, *múltiplos de una frecuencia fundamental*:

$$y = A \sin \theta + B \sin 2\theta + C \sin 3\theta + \dots$$

Esa señal compuesta *es periódica* y tiene la misma frecuencia que su parte fundamental: $A \sin \theta$. Lo realmente importante de este tipo de sumas es que con ellas se llega a conformar ondas periódicas cualesquiera.

Veamos un ejemplo:

$$y = \cos \theta - \frac{1}{3} \cos 3\theta + \frac{1}{5} \cos 5\theta$$

En la Fig. 2 se dibujan los tres términos y el resultado de su superposición.

Se observa que este se aproxima a una forma de onda *rectangular*.

Una mejor aproximación se lograría agregando a la señal compuesta términos sucesivos:

$$- \frac{1}{7} \cos 7\theta + \frac{1}{9} \cos 9\theta \quad , \text{ etc.}$$

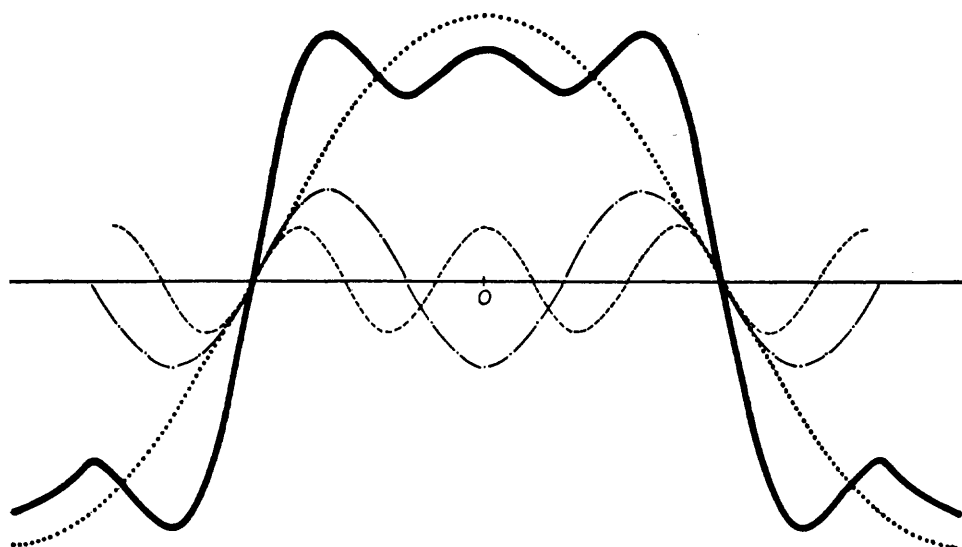


Fig. 2

En la Fig. 3 se dibuja la señal:

$$y = \cos \theta + \frac{1}{9} \cos 3\theta + \frac{1}{25} \cos 5\theta$$

que resulta una forma de onda aproximadamente *triangular*.

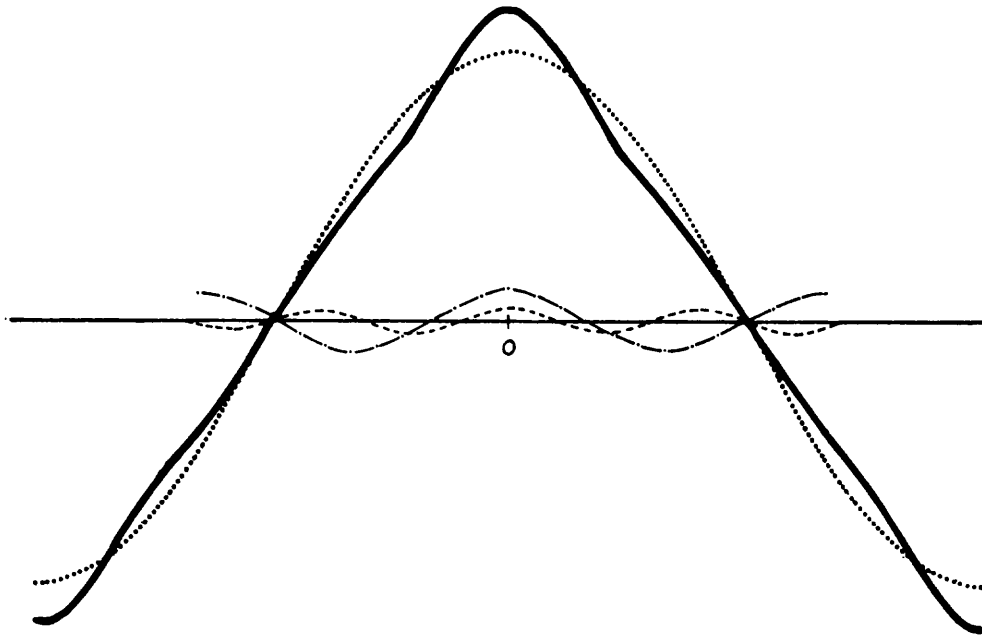


Fig. 3



En expresiones del tipo (llamadas *series de Fourier*) :

$$y = A + B \cos \theta + C \cos 2\theta + D \cos 3\theta + \dots$$

A se llama *valor medio o de continua*,

$B \cos \theta$ es el *valor fundamental*, y

$C \cos 2\theta$, $D \cos 3\theta$, etc. son las *componentes armónicas sucesivas*: 2a. armónica, 3a. armónica, etc.

Este resultado tiene un valor teórico muy fuerte: *cualquier forma de onda periódica puede considerarse como superposición de señales sinusoidales de ciertas frecuencias*. Esto da a la señal sinusoidal una importancia esencial. Conocer el comportamiento de un circuito eléctrico frente a una señal sinusoidal permitirá conocer su comportamiento frente a señales periódicas cualesquiera.

En corriente continua, los resistores poseen una propiedad sumamente simple que los caracteriza: la corriente es proporcional a la tensión aplicada en sus bornes. En corriente alterna no es tan sencillo vincular la corriente y la tensión en una componente.

Para caracterizar una componente en corriente alterna es necesario establecer la vinculación entre los vectores voltaje y los vectores corriente. Además de una relación entre amplitudes, es necesario establecer claramente la relación de fases entre V e I .

En un *resistor*, los vectores V e I son colineales (igual dirección y sentido) (Fig. 1).



Fig. 1

Las amplitudes cumplen la ley de Ohm.

En un *inductor*, los vectores están a 90° : I está 90° atrasado respecto de V (figura 2).

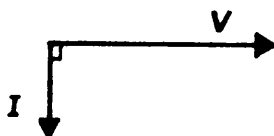


Fig. 2

En un *capacitor*, los vectores están también a 90° pero ahora I está 90° adelantado a V (figura 3).



Fig. 3

El hecho de que en un resistor, V e I están en fase, significa que, de acuerdo con lo visto, ambos presentan simultáneamente máximos, mínimos y ceros (figura 4).

En un inductor o capacitor, el defasaje de 90° se traduce en el hecho de que los extremos (máximo y mínimo) de V coinciden con los ceros de I y viceversa. En la figura 5 se representa el cero de un inductor y en la figura 6 el de un capacitor.

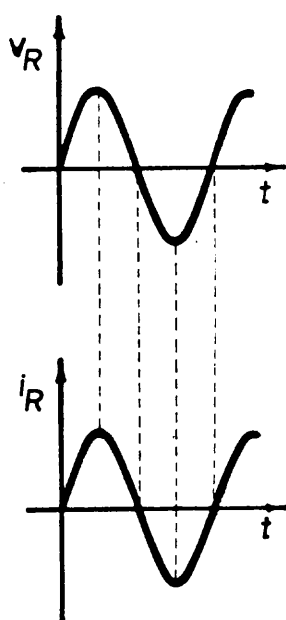


Fig. 4

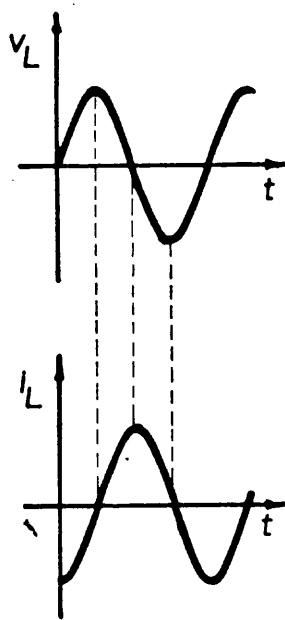


Fig. 5

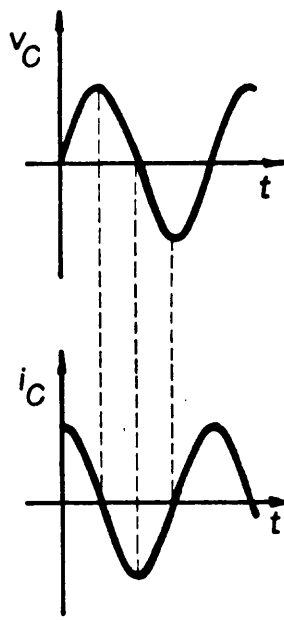


Fig. 6



En un resistor, la relación entre V e I es independiente de la frecuencia:

$$V = RI$$

En un inductor, si L es la *inductancia* y f la frecuencia:

$$V = L 2\pi f \cdot I$$

La expresión $L 2\pi f$ que vincula las magnitudes de voltaje y corriente se llama *reactancia inductiva*:

$$X_L = L 2\pi f$$

La reactancia inductiva crece proporcionalmente a la frecuencia. Si la frecuencia es muy chica, también lo es X_L y V para I dado.

En el caso límite $f = 0$, estamos en régimen de continua y $V = 0$, es decir que el inductor actúa como un cortocircuito.

En un capacitor, si C es la *capacidad* y f la frecuencia:

$$I = m C 2\pi f \cdot V$$

$$V = \frac{1}{C 2\pi f} \cdot I$$

$$X_C = \frac{1}{C 2\pi f}$$

La *reactancia capacitiva* X_C varía en forma inversamente proporcional a la frecuencia. A frecuencias muy chicas, la reactancia capacitiva es muy alta. Esto corresponde a la conducta de un capacitor en circuitos de continua, como una componente que bloquea el pasaje de la corriente. (Para V dado, al bajar f , X_C crece, e I baja.)

A frecuencias muy altas, la reactancia capacitiva es muy chica y el capacitor actúa como un cortocircuito.

Las *reactancias*, tanto inductivas como capacitivas, se miden en ohms. Este hecho es natural, puesto que son el cociente de un voltaje por una corriente. A diferencia de una resistencia, *la reactancia depende de la frecuencia a que trabaja la componente*.

Ejemplo: Un inductor de 2 henrios tiene a 50 Hz una reactancia de:

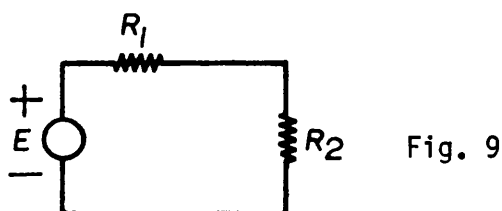
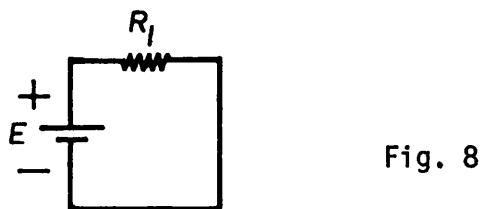
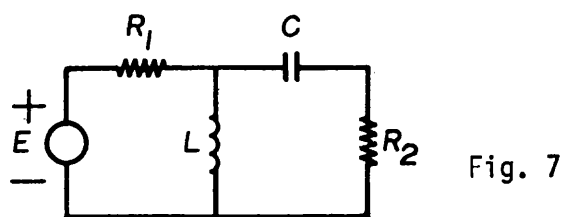
$$X_L = 2 \times 50 \times 2 = 628 \Omega$$

Si se aplica en sus bornes una tensión de 220 V. 50 Hz circula una corriente de:

$$I = \frac{V}{X_L} = \frac{220}{628} = 0,35 \text{ A.}$$

El mismo inductor en 500 Hz tendría 6,28 K Ω de reactancia y la corriente sería solamente 35 mA.

Ejemplo: El circuito de la Fig. 7 en continua se reduce al de la Fig. 8 (capacitores son circuitos abiertos e inductores son cortocircuitos). En frecuencias muy altas, el circuito se reduce al de la Fig. 9 (capacitores son cortocircuitos e inductores son circuitos abiertos).



Las leyes de Kirchoff se cumplen cualesquiera sean las formas de onda de voltajes y corrientes.

Los métodos de análisis de circuitos aplicados a los circuitos de continua son también aplicables a los circuitos de alterna. La única diferencia está en que en cada componente, las relaciones voltaje-corriente serán las impedancias que correspondan a esa componente.

Ejemplo: Sea el paralelo L, C, R de la figura 1.

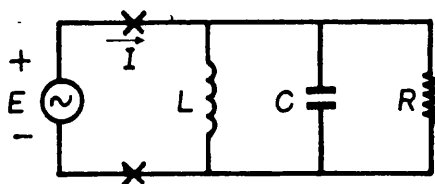


Fig. 1

$$I = \frac{E}{Lwj} + CwjE + \frac{E}{R} = E \left[-\frac{1}{R} + Cwj - \frac{1}{Lwj} \right]$$

La admitancia del paralelo es:

$$Y_P = \frac{I}{E} = \frac{1}{R} + Cwj - \frac{1}{Lwj} = \frac{1}{R} + \frac{1 - LCw^2}{Lwj}$$

La admitancia tiene una parte real fija y otra, imaginaria, que es función de w y que se anula cuando $1 - LCw^2 = 0$. En este caso, la magnitud de la admitancia es mínima; es decir que la impedancia es máxima. Decimos que, en ese caso, el circuito está en *resonancia*. La condición de resonancia es:

$$LCw^2 = 1$$

Ejemplo:

Si $L = 1m \text{ Hy.}$ $C = \mu F$, calcular la frecuencia de resonancia.

$$w^2 = \frac{1}{LC} = 10^{10}$$

$$\omega = 10^5$$

$$f = \frac{10^5}{2\pi} = 15,9 \text{ KHz}$$

Ejemplo: En el circuito de la Fig. 2 calcular la tensión de salida V_o .

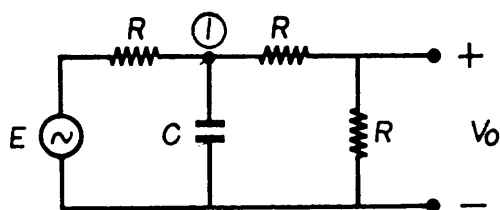


Fig. 2

Llamando V_1 a la tensión del nudo 1 y escribiendo la ecuación de ese nudo:

$$\frac{E - V_1}{R} = C\omega j \cdot V_1 + \frac{V_1}{2R}$$

$$2(E - V_1) = 2RC\omega j V_1 + V_1$$

$$2E = (3 + 2RC\omega j) V_1$$

$$V_1 = \frac{2E}{3 + 2RC\omega j}$$

$$V_o = \frac{V_1}{2} = \frac{E}{3 + 2RC\omega j}$$

Ejemplo: En el circuito de la Fig. 3, calcular el equivalente Thévenin entre A, B. Hallar las condiciones en las que la impedancia vista es una resistencia pura.

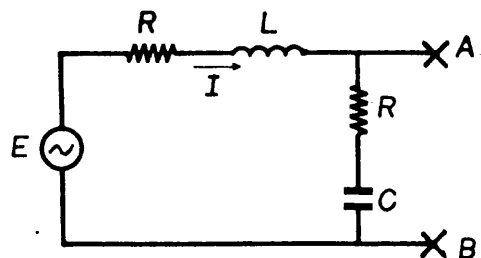


Fig. 3

$$I = \frac{E}{2R + Lw j + \frac{1}{Cw j}} = \frac{Cw j}{1 - LCw^2 + 2RCw j} E$$

$$V_{AB} = \left(R + \frac{1}{Cw j} \right) I = \frac{1 + RCw j}{1 - LCw^2 + 2RCw j} E.$$

La impedancia vista es el paralelo de las series $R - C$ y $R - L$.

$$Z_{AB} = \frac{R + \frac{1}{Cw j}}{2R + Lw j + \frac{1}{Cw j}} (R + Lw j) = \frac{R(1 - LCw^2) + (L + R^2C)w j}{1 - LCw^2 + 2RCw j}$$

para que sea real: $\frac{a + b j}{c + d j}$

debe ocurrir alguna de las alternativas

- 1) $a = c = 0$
- 2) $b = d = 0$
- 3) $\frac{b}{a} = \frac{d}{c}$

En nuestro caso:

1) $1 - LCw^2 = 0$ o sea: $LCw^2 = 1$

$$Z_{AB} = \frac{L + R^2C}{2RC}$$

2) $w = 0$

$$Z_{AB} = R$$

3) $L + R^2C = 2RC$ o sea: $L = R^2C$

$$Z_{AB} = R \text{ cualquiera sea la frecuencia.}$$

La *impedancia* generaliza, en corriente alterna, la noción de resistencia. El estudio de las componentes en forma vectorial permite introducir esta noción.

Las relaciones entre tensión y corriente en los componentes R, L, C, se pueden escribir, en forma vectorial:

En un resistor : $V = R I$

En un inductor : $V = L\omega j I$

En un capacitor: $I = C\omega j V$

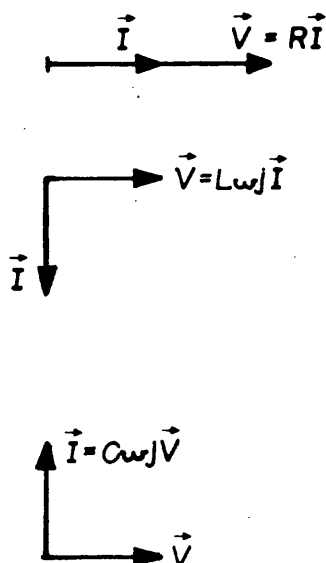


Fig. 1

La aplicación sistemática de estas expresiones nos permite analizar los circuitos en régimen de corriente alterna.

Ejemplo: En la Fig. 2 se tiene una fuente de tensión: $E \cos \omega t$. Aplicando la ley de Kirchhoff de mallas y el método vectorial:

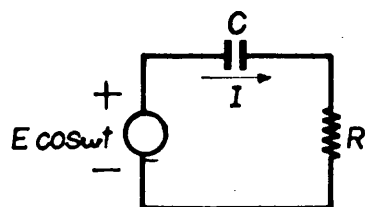


Fig. 2

$$E = \frac{1}{C\omega j} I + R I = \frac{(1 + RC\omega j)}{C\omega j} I$$

Esta expresión se puede representar gráficamente como indica la figura 3.

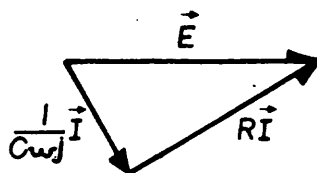


Fig. 3

El voltaje en bornes de R está representado por el vector RI :

$$V = RI = \frac{RC\omega j}{1 + RC\omega j} E$$

Los voltajes instantáneos en las componentes se obtienen considerando la rotación de los vectores con pulsación ω y el movimiento de su proyección.

Si a partir de las relaciones de las componentes R, L, C, despejamos el cociente $\frac{V}{I}$, resulta respectivamente:

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

$$\frac{V}{I} = L\omega j$$

$$\frac{V}{I} = \frac{1}{C\omega j}$$



Estas relaciones deben interpretarse con cuidado. En un caso es un número R ; los vectores V e I son colineales. En los otros casos reúne información *numérica*, de las amplitudes de los vectores y de *posición*, a través del operador j .

En general, la relación $\frac{V}{I}$ se llama *impedancia* y caracteriza a la componente.

Para inductores y capacitores, el valor numérico de la impedancia recibe el nombre de *reactancia*. La reactancia de un capacitor, o reactancia capacitiva, es el número:

$$X_C = \frac{1}{C\omega}$$

La reactancia de un inductor, o reactancia inductiva o *sélfica*, es el número:

$$X_L = L\omega$$

La noción de impedancia, que vimos para las componentes elementales, se puede generalizar.

Toda vez que en un conjunto de componentes interconectadas se llegue a una relación V/I que caracteriza a esa estructura, le llamaremos *impedancia* Z de la misma.

En la Fig. 2, la impedancia del circuito al que se conecta la fuente es:

$$Z = \frac{E}{I} = \frac{1}{C\omega j} + R$$

Las propiedades que cumplen las resistencias en los circuitos de continua se generalizan para las impedancias en los circuitos de alterna.

La serie de dos impedancias Z_1 y Z_2 es:

$$Z = Z_1 + Z_2$$

El paralelo de Z_1 y Z_2 es:

$$Z = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Ejemplo: Calcular en alterna el paralelo de la figura 4.

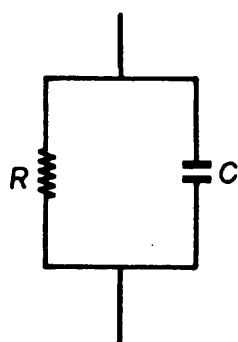


Fig. 4

$$Z = \frac{R \cdot \frac{1}{C\omega j}}{R + \frac{1}{C\omega j}} = \frac{R}{1 + RC\omega j}$$

Es frecuente la aparición de expresiones combinadas de números y operadores j . Para interpretar el sentido de una expresión del tipo:

$$\frac{1}{a+bj}$$

en la que j aparece en el denominador, conviene multiplicar numerador y denominador por $a-bj$ (llamada *conjugada* de $a + bj$).

Ejemplo: Dado el vector \vec{V} (Fig. 5) dibujar el vector $\vec{u} = \frac{1}{1+j} \vec{V}$

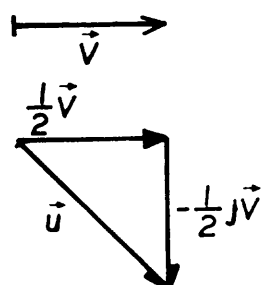


Fig.5



$$\frac{1}{1+j} V = \frac{1}{1+j} \cdot \frac{1-j}{1-j} V = \frac{1-j}{2} V = \frac{1}{2} V - \frac{j}{2} V$$

Esta expresión se interpreta como un número y una combinación número-operador.

A la inversa de una impedancia Z se le llama *admitancia* Y .

La admitancia de una componente es la relación entre corriente y voltaje en sus bornes.

Para las componentes básicas R , L , C , las admitancias son, respectivamente:

$$Y_R = \frac{1}{R} \quad Y_L = \frac{1}{L\omega j} \quad Y_C = C\omega j$$

El *capacitor* es una de las componentes básicas de los circuitos eléctricos (Fig. 1). Su propiedad fundamental es la *capacidad para almacenar carga eléctrica*. Por esta razón, las propiedades de carga y descarga son las fundamentales.

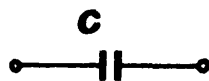


Fig. 1

Si en el circuito de la Fig. 2 cerramos la llave S y observamos en un osciloscopio el voltaje en bornes del capacitor C, se tendrá la forma de onda dibujada en la Fig. 3.

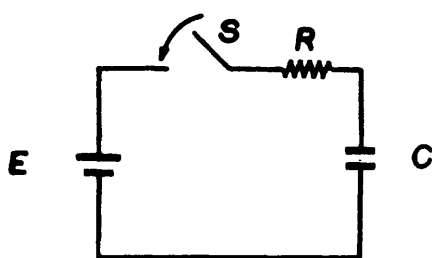


Fig. 2

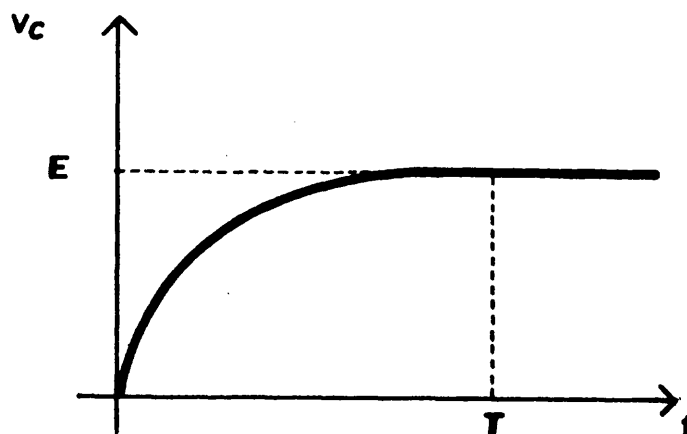


Fig. 3

En el instante inicial ese voltaje es cero, y crece hasta alcanzar el valor E del voltaje de la fuente.

Este es el proceso de *carga de un capacitor*.

A partir de un instante (tal como T) el voltaje del capacitor ha alcanzado prácticamente el valor E. Decimos que *el capacitor está cargado*. Se mantendrá cargado si lo retiramos del circuito (figura 4).

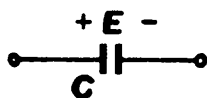


Fig. 4

En el circuito de la Fig. 5, conectamos el capacitor cargado C a un resistor R, por medio de una llave S.

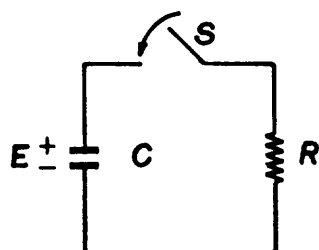


Fig. 5

Cerrando la llave S y observando el voltaje en el osciloscopio, se aprecia una forma de onda como la dibujada en la (figura 6).

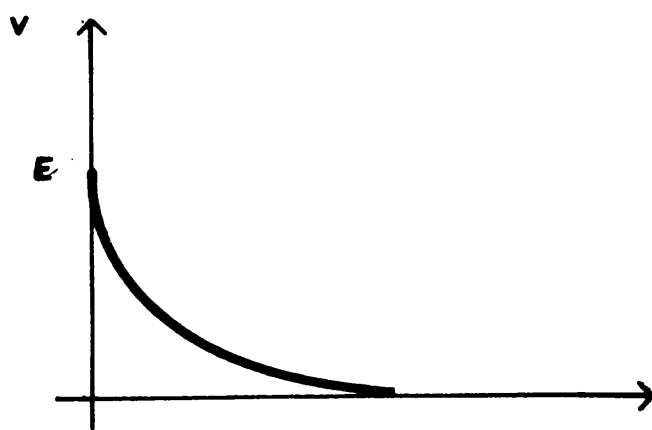


Fig. 6

El capacitor actúa como una fuente de voltaje. Ese voltaje, a diferencia de lo que sucede con un generador de continua, no es constante. Inicialmente es E y decae luego hasta cero.



Este es el proceso de *descarga de un capacitor*.

Los procesos de carga y descarga de un capacitor permiten enunciar las propiedades fundamentales de esta componente.

El capacitor es un *dispositivo que almacena carga eléctrica*. En el circuito de la Fig. 5, el único generador es el capacitor. La corriente que circula en ese circuito al cerrar la llave -que puede ser detectada intercalando un amperímetro- es causada por el movimiento de las cargas almacenadas previamente en el capacitor.

La relación entre la carga almacenada Q y el voltaje adquirido V es una constante que caracteriza al capacitor, llamada *capacidad* C :

$$C = \frac{Q}{V}$$

La carga Q almacenada en el capacitor es proporcional al voltaje V :

$$Q = CV$$

La diferencia de potencial V se mide en Voltios.

La carga eléctrica Q se mide en *Coulomb*.

La unidad de capacidad se llama *Faradio*.

$$1 \text{ Faradio} = \frac{1 \text{ Coulomb}}{1 \text{ Voltio}}$$

En las aplicaciones usuales se manejan capacidades de valores mucho menores que 1 Faradio y por eso se miden en submúltiplos adecuados:

$$1 \text{ microfaradio } (\mu F) = 10^{-6} F$$

$$1 \text{ nanofaradio } (n F) = 10^{-9} F$$

$$1 \text{ picofaradio } (p F) = 10^{-12} F$$

El proceso de carga y descarga de un capacitor caracteriza en forma completa su conducta como componente eléctrica. A su vez, la relación:

$$Q = C V$$

que vincula la tensión V , la carga Q y la capacidad C es su ecuación fundamental.

En el caso de la descarga de un capacitor inicialmente cargado (Fig. 1), al cerrar la llave, la corriente que circula corresponde a la disminución de la carga almacenada.

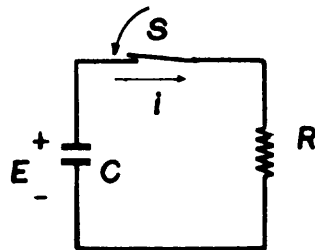


Fig. 1

El capacitor funciona como un generador de voltaje, pero el voltaje que suministra cae a expensas de la corriente. Al anularse la carga almacenada, no circula más corriente: el capacitor se ha descargado.

En el caso de la carga de un capacitor (Fig. 2) la corriente circula en sentido inverso, aportando cargas que se almacenan en el capacitor.

La corriente se anula cuando se iguala el voltaje de C con el del generador E .

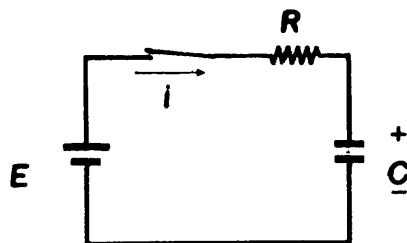


Fig. 2

Circuitos de continua

En *circuitos de continua*, podemos afirmar que después de transcurrido un cierto tiempo, que llamamos *transitorio*, los capacitores quedan cargados al valor que corresponda, comportándose, a los efectos del análisis del circuito, como circuitos abiertos.

Ejemplo: En el circuito de la Fig. 3, $E = 10 \text{ V}$. $R_1 = R_2 = 1 \text{ K} \Omega$ $C = 1 \mu \text{F}$

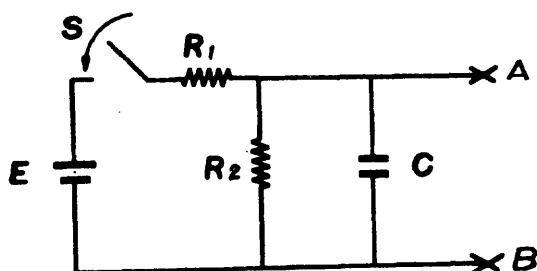


Fig. 3

Pasado el *transitorio de carga* de C , podemos ignorar su presencia para determinar el voltaje entre A y B.

$$V_{AB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E = 5 \text{ V}$$

La carga que ha adquirido el capacitor vale:

$$Q = C V = 5 \text{ Coulomb}$$

Ejemplo: En el circuito de la Fig. 4 $E = 10 \text{ V}$ $R_1 = R_2 = R_3 = 1 \text{ k} \Omega$ $C = 1 \mu \text{F}$

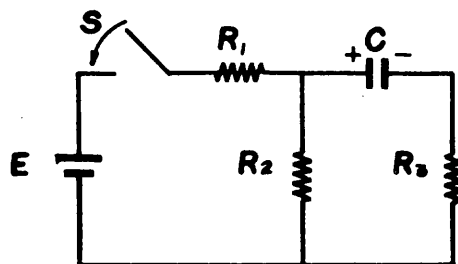


Fig. 4

Pasado el transitorio, C queda cargado a 5 V con la polaridad que se indica. Una vez cargado, se comporta como un *circuito abierto*, de modo que seguirá circulando corriente por R_1 y R_2 , pero no por R_3 .

Se dice que el capacitor *bloquea el pasaje de la corriente continua*.

El *resultado final* en los circuitos de las figuras 3 y 4 *es el mismo*. Circula la misma corriente por las resistencias R_1 y R_2 y el capacitor posee la tensión de 5 V y la carga de 5 Coulomb. La única diferencia existe *durante el transitorio*. El proceso de carga en el segundo caso *es más lento* que en el primero.

Transitorios en circuitos

Del estudio del transitorio de carga (Fig. 5) podemos extraer conclusiones que permiten caracterizar la conducta de un capacitor en todo transitorio.

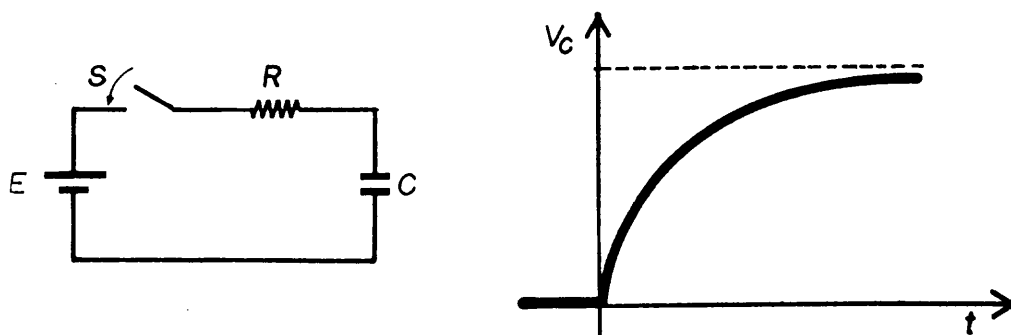


Fig. 5

El voltaje en bornes del capacitor no experimenta saltos. Era cero antes de cerrar la llave, lo es en el instante inmediatamente siguiente. Este resultado se expresa diciendo que el capacitor es, inicialmente, un *cortocircuito*.

Este resultado permite calcular la corriente que circula por el capacitor en el instante de cerrar la llave: coincide con la corriente que circula si se reemplaza el capacitor por un cortocircuito.

Ejemplo: En el circuito de la figura 5, la corriente *inicial* de carga vale:

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

En el circuito de la figura 3 la corriente inicial de carga vale 10 mA (corriente que aplica E sobre R_1 , con C en cortocircuito); en el circuito de la figura 4 vale 3,33 mA solamente.

En el estado inicial del transitorio, los capacitores actúan como *cortocircuito*. En el estado final, actúan como *circuitos abiertos*. Durante el transitorio, los voltajes evolucionan entre los valores correspondientes a los estados inicial y final.

La velocidad a que ocurre la carga o la descarga de un capacitor en un circuito queda caracterizada por la *constante de tiempo del circuito*.

La constante de tiempo es el producto de la capacidad por la resistencia que carga al capacitor. En el circuito de la figura 5, se tiene:

$$T = R C$$

Esta constante se mide en segundos, pero es necesario emplear correctamente las unidades de R y de C:

$$\text{Si } R = 100 \, \Omega \text{ y } C = 0,01 \, \mu\text{F}, \quad T = 100 \times 0,01 = 1 \, \mu\text{seg.}$$

$$\text{Si } R = 1 \, \text{K} \, \Omega \text{ y } C = 1 \, \mu\text{F}, \quad T = 10^3 \times 10^{-6} = 1 \, \text{m seg.}$$

En el segundo caso, el transitorio es mucho más lento que el primero.

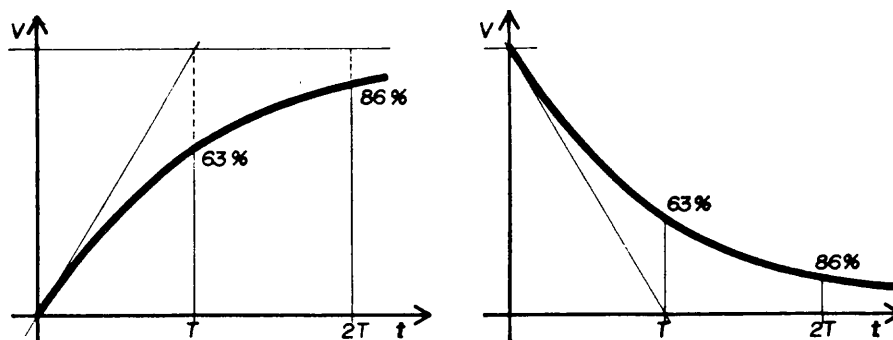


Fig. 6

En la figura 6 se relaciona el valor de la constante de tiempo con la curva de carga o de descarga de un capacitor. Como puede apreciarse, en el tiempo de una constante de tiempo se llega al 63% del valor final; en dos constantes de tiempo se alcanza el 86%. En tres constantes de tiempos prácticamente el transitorio ha terminado.

La constante de tiempo se vincula con la tangente inicial de la curva de carga o de descarga, como muestra también la figura 6.

Ejemplo: En el circuito de la figura 3, si se aplica el teorema de Thévenin, coincide con la figura 5. R será la resistencia vista desde A y B, o sea, el paralelo de R_1 y R_2 . Se tiene entonces:

$$R = 0,5 \text{ K}\Omega$$

$$T = 0,5 \times 10^3 \times 10^{-6} = 0,5 \text{ milisegundos.}$$

Este valor de la constante de tiempo muestra que en pocos décimos de segundo ha terminado completamente el transitorio.

Ejemplo: En el circuito de la figura 4, la resistencia vista por el capacitor está formada por la suma de R_3 y el paralelo de R_1 y R_2 . Se tiene entonces:

$$R = 1,5 \text{ K}\Omega$$

$$T = 1,5 \times 10^3 \times 10^{-6} = 1,5 \text{ milisegundos.}$$

El transitorio ocurre más lento que en el circuito de la figura 3.

Circuitos de alterna

Supongamos que el voltaje aplicado a un capacitor es variable con el tiempo (figura 7).

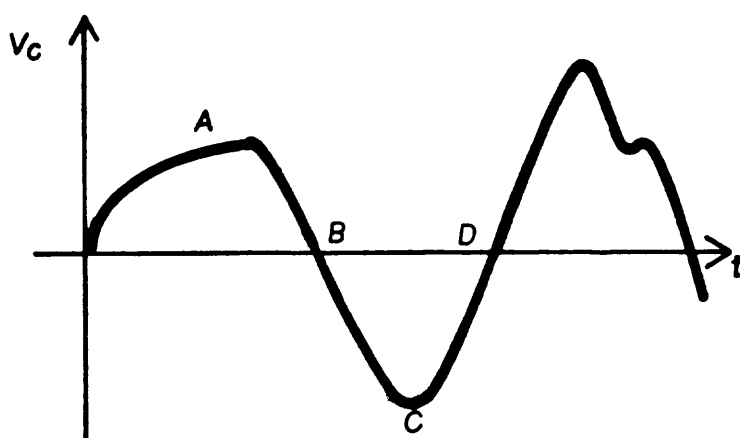


Fig. 7

En una zona como la A o C, en que ese voltaje se mantiene casi constante, la carga almacenada no varía y por lo tanto la corriente debe ser cero.

En una zona como B, en la que el voltaje está variando rápidamente con descarga, la disminución de cargas que eso implica se logra mediante una corriente tanto más grande cuanto más rápida sea la disminución de voltaje.

En una zona como D, la corriente será también grande, pero de sentido contrario, pues corresponde a un proceso de carga.

En el caso de un voltaje aplicado sinusoidal (Fig. 8), la corriente resulta también sinusoidal.

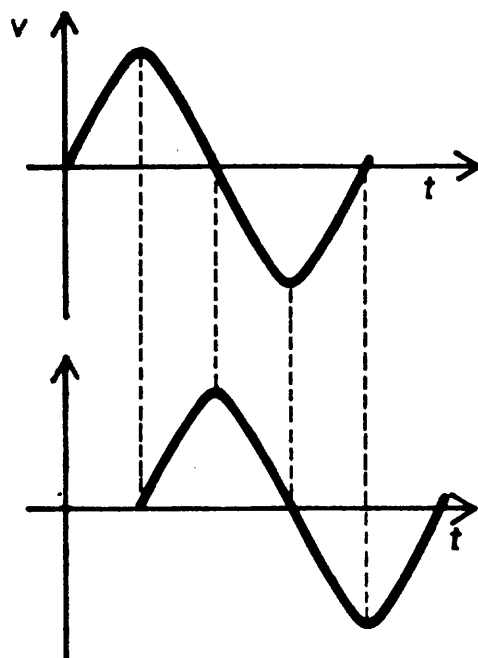


Fig. 8

De acuerdo con lo estudiado en la figura 7, los ceros de la corriente coinciden con los máximos y mínimos del voltaje. Los máximos de corriente coinciden con los ceros de descarga del voltaje. Los mínimos de corriente corresponden a los ceros de carga del voltaje.

La relación entre voltaje y corriente se traduce en un defasaje de 90° en los vectores correspondientes: *el vector corriente I está 90° adelantado al vector voltaje V (figura 9).*



Fig. 9

La amplitud de la corriente que circula es proporcional a la amplitud del

voltaje aplicado al capacitor: la corriente es la carga que circula en la unidad de tiempo; siendo la carga proporcional a la capacidad C y al voltaje V aplicado, lo mismo ocurrirá para la corriente.

La frecuencia de la corriente alterna interviene en la relación entre voltaje y corriente. En la figura 10 se presentan dos voltajes sinusoidales de diferente frecuencia.

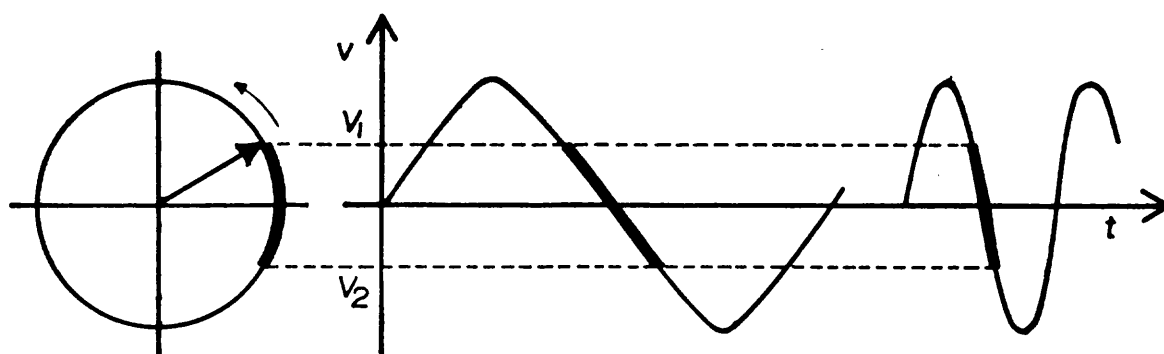


Fig. 10

Entre los mismos valores, V_1 y V_2 , la variación del voltaje será más rápida en el de mayor frecuencia. Una variación de voltaje más rápida implica una corriente más grande, ya que la corriente debe extraer la misma carga en un intervalo de tiempo menor. El tiempo que se emplea en pasar de V_1 a V_2 es inversamente proporcional a la frecuencia de la onda. Se tiene entonces que *la amplitud de la corriente es proporcional a la frecuencia*.

En definitiva: si la forma de onda del voltaje aplicado a un capacitor es sinusoidal, también lo es la de la corriente, y su amplitud cumple la relación:

$$I = C \cdot 2\pi f \cdot V \quad V = \frac{1}{C \cdot 2\pi f} \cdot I$$

A la expresión que relaciona ambas amplitudes se le llama *reactancia capacitiva* X_C :

$$X_C = \frac{1}{C \cdot 2\pi f}$$



La reactancia capacitiva se mide en ohms. Este hecho es natural, puesto que es el cociente de un voltaje y una corriente. A diferencia de una resistencia, la reactancia capacitiva depende de la frecuencia de trabajo.

Ejemplo: Un capacitor de $1 \mu F$ posee en 50 Hz una reactancia capacitiva de:

$$X_C = \frac{1}{2 \times 50 \times 10^{-6}} = 3,18 \text{ K } \Omega$$



Los circuitos impresos (*printed circuits*) son conductores eléctricos con forma de lámina, adheridos a una chapa aislante. Esta disposición suministra simultáneamente el mecanismo de montaje de las componentes de un circuito así como la interconexión y, a veces, el blindaje u otros elementos propios del circuito.

Las ventajas del empleo de circuitos impresos frente a los montajes y cableados convencionales son múltiples:

1. Suministra una posición precisa de las componentes, lo cual permite automatizar los métodos de fabricación y la intercambiabilidad de partes.
2. Permiten realizar en forma muy simple la operación de cableado, usualmente la más lenta de todo el armado de equipos electrónicos.
3. Simplifican la inspección y el mantenimiento.
4. Reducen considerablemente el volumen ocupado por un circuito.
5. Permiten integrar en el circuito inductores pequeños, capacitores, llaves selectoras, blindajes, líneas distribuidas, conectores, etc.

El conductor que se emplea en forma universal es el *cobre*, al cual se lo somete, en algunos casos, a un tratamiento final de plateado, dorado, etc.

La chapa aislante puede ser una resina *fenólica o epoxi*. Existen circuitos impresos de una y de dos caras.

El material de un circuito impreso posee dimensiones normalizadas. El espesor más empleado es de 1/16 de pulgada (1,6 mm. aproximadamente) y es apropiado para la mayoría de los conectores comerciales para circuito impreso. También se fabrican de 1/32 y de 3/32 de pulgada.

El espesor de la lámina de cobre se especifica por el *número de onzas de cobre* necesarias para cubrir *un pie cuadrado* de conductor.

1 onza 0,0012 a 0,0018 de pulgada (3 a 4,5 centésimos de milímetro)

2 onzas 0,0025 a 0,0035 de pulgada (6 a 9 centésimos de milímetro)

También se fabrican láminas tan finas como 1/2 onza o tan gruesas como 4 onzas.

Procedimientos de fabricación.

Los circuitos impresos se fabrican por dos procedimientos básicos:

- 1) por depósito de las zonas conductoras;
- 2) por atacado químico de una plancha enteramente cubierta de conductor.

En algunas ocasiones se emplean procedimientos combinados de fabricación.

La fabricación de un circuito impreso comienza con la preparación de un dibujo, realizado a escala, que se corresponde con la distribución de conductores. Este dibujo es convertido en una *máscara* apropiada para depositar o atacar el circuito, según sea el caso.

El dibujo del circuito se puede convertir en una máscara por varios procedimientos:

- 1) En forma manual, por copia del dibujo, mediante una pintura adecuada o mediante dibujos transferibles por contacto.
- 2) Por un procedimiento fotográfico mediante una pintura sensible que puede ser impresionada por la luz y quitada por un solvente según sea la exposición recibida.
- 3) Por un procedimiento de serigrafía, mediante el cual se aplica una pintura protectora de acuerdo con una malla de tela que corresponde al dibujo deseado. Esta malla suele fabricarse por un procedimiento fotográfico.

Cuando se trabaja por depósito se aplica la máscara sobre una lámina conductora y a través de las aberturas (ver figura 1) se realiza el depósito del material. Finalmente se ataca en forma química y se quita la base aislante.

Cuando se trabaja por atacado, en la zona sin protección, se disuelve el conductor y se forman así los trozos libres.

Para el atacado del cobre se emplea solución de *cloruro férrico*.

La elección del método de máscara a emplear se vincula con el volumen de producción que se desea. En circuitos impresos de prueba, es conveniente trabajar en forma manual. Cuando se desea construir pocos ejemplares, se suele trabajar en forma fotográfica. En una línea de producción es necesario emplear serigrafía.

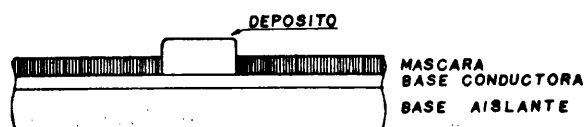


Fig. 1



Fig. 2

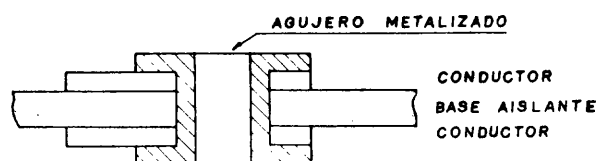


Fig. 3

En la fabricación de circuitos impresos de doble cara se presentan algunas dificultades adicionales.

Por un lado es necesario que los dibujos de ambas caras se correspondan perfectamente y que las máscaras generadas sobre el material coincidan exactamente; de otro modo no existirá correspondencia en los agujeros realizados en el material de base.

Por otro lado, los circuitos de doble cara exigen agujeros metalizados de modo de establecer contacto eléctrico entre conductores de ambos lados del material aislante: ver figura 3. Las paredes metalizadas tienen además, la propiedad de evitar que cada componente deba ser soldada en ambas caras.

Armado y reparación de circuitos impresos

Las componentes a instalar en un circuito impreso se fabrican especialmente con esta finalidad, con patas adecuadas para soldar, en distancias adecuadas.

En la figura 4 se ilustran diversos métodos de colocación de una componente electrónica en un circuito impreso. En todos los casos se desea evitar que las componentes se puedan mover y, en particular, puedan desprender el conductor de la base aislante.

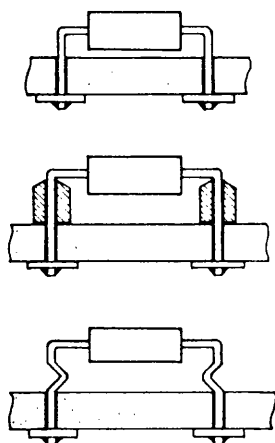


Fig. 4

El armado manual de los circuitos impresos se realiza en forma directa mediante soldadores de potencia reducida (30 e. máximo) con puntas de diámetro adecuado y con estaño también de diámetro adecuado. Debe evitarse prolongar el calentamiento de la soldadura para evitar el desprendimiento del conductor.

En una línea de montaje, se realizan las soldaduras mediante un baño de estaño: todas las componentes son colocadas en su posición y se aplica el circuito sobre la superficie de estaño fundido.

Los instrumentos de medida se pueden clasificar según distintos criterios.

Por la forma en que procesan la magnitud a medir se los clasifica en *analógicos* y *digitales*.

Por la forma en que presentan la medida, se los divide en *indicadores* y *registradores*.

Por la magnitud que miden, en amperímetros, voltímetros, óhmetros, vatímetros, frecuencímetros, termómetros, medidores de pH, etc.

Instrumentos analógicos

Los instrumentos analógicos están compuestos de tres elementos básicos, (ver figura 1):

- *Transductor* que transforma la magnitud a medir en una corriente o en un voltaje (a veces en resistencia, capacidad, etc.).
- *Procesador de la señal eléctrica*. En general es un amplificador.
- *Transductor* que transforma la señal de corriente en una indicación o un registro de la magnitud medida.

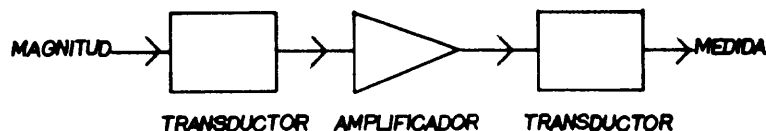


Fig. 1

Ejemplo: Un termómetro electrónico está constituido por los tres bloques básicos de un instrumento analógico. Posee un transductor que transforma la temperatura en una señal eléctrica. Esa señal es amplificada y transformada en una corriente. Esta corriente es transformada en movimiento de una aguja indicadora (transductor mecánico) sobre una escala de medida.

Ejemplo: El osciloscopio cuenta con un amplificador y un transductor. Este último transforma la señal eléctrica en el movimiento continuo de un haz de electrones que se proyecta sobre una pantalla sensible.

Instrumentos digitales

Los instrumentos digitales están compuestos por los siguientes elementos básicos, (figura 2):

- *Transductor* que transforma la magnitud a medir en una señal eléctrica.
- *Procesador de la señal eléctrica*. En general es un amplificador.
- *Convertor* a dígitos numéricos (*convertor analógico-digital*).
- *Procesador digital* (puede ser de distinta complejidad según los casos: contadores digitales, calculadora, computadora, etc.).
- *Dispositivo de presentación* o de registro numérico.

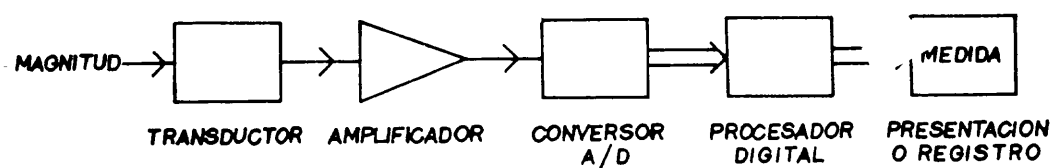


Fig. 2

Ejemplo: Un voltímetro digital está constituido por un amplificador que lleva la señal a niveles adecuados para su procesamiento. El convertor analógico digital transforma la señal en números. El procesador digital, en este caso, es elemental y realiza la ubicación del punto decimal. La medida del voltímetro es presentada en dígitos utilizando diversos sistemas. Los más conocidos utilizan la representación por *siete segmentos*. En los tubos de descarga (nixie) se superponen cátodos con las formas correspondientes a los diez dígitos.



Instrumentos digitales

Ejemplo: Un termómetro digital tiene los mismos elementos que el voltímetro, precedidos por un transductor que transforma la temperatura en un voltaje.-

Los instrumentos analógicos son los de uso más generalizado, por razones de costo. Sin embargo, cada vez más se utilizan instrumentos digitales, que tienen como ventaja la reducción del error humano en la lectura, eliminar el error de paralaje de las agujas indicadoras y aumentar la velocidad de lectura.

Instrumentos indicadores e instrumentos registradores

Los instrumentos indicadores se caracterizan porque la lectura permanece siempre que esté presente la magnitud a medir. El voltímetro (analógico) de aguja y el voltímetro digital son ejemplos de instrumentos indicadores.

Los instrumentos registradores permiten registrar la medida de la magnitud. Ese registro se puede realizar sobre papel mediante distintos procedimientos. En algunos casos el mecanismo inscriptor utiliza tinta, en otros se usan papeles *termosensibles*, el registro se realiza mediante estilos calientes.

Existen registradores con papeles *fotosensibles* en que el mecanismo inscriptor mueve un haz de luz.

Otro ejemplo de registrador lo constituye el *osciloscopio con memoria*.

Utilizan pantallas de persistencia controlada.

Son excelentes registradores de fenómenos transitorios rápidos y de corta duración.

El grabador de cinta magnética es otro ejemplo de registrador analógico.

Si bien hemos mencionado hasta el momento sólo ejemplos de registradores de tipo analógico, también existen registradores digitales. Es posible re-



gistrar las lecturas de instrumentos digitales sobre impresoras, banda perforada, cinta magnética, discos magnéticos, etc. Este tipo de elementos abren un nuevo horizonte en materia de instrumentación al permitir el procesamiento directo, por computadores, de las medidas realizadas.

Clasificación por la magnitud medida

Según la magnitud medida los instrumentos se pueden clasificar en:

- | | |
|-------------------|-------------------------------------|
| - Amperímetros | miden la intensidad de la corriente |
| - Voltímetros | que miden voltajes |
| - Watímetros | que miden potencia |
| - Ohmímetros | que miden resistencia |
| - Frecuencímetros | que miden frecuencia |
| - Fasímetros | que miden la fase entre dos señales |
| - Termómetros | miden temperatura |
| - Medidor de pH | miden el pH de soluciones |
| - Higrómetros | miden humedad |
| etc. | |



Todo instrumento de medida posee un conjunto de especificaciones técnicas que definen su campo de aplicación. Tanto en el manejo como en la selección del equipo de medida es necesario tener presentes algunas de las características que se analizan a continuación.

Rango de medida

Indica los valores *mínimos* y *máximos* que puede leer el instrumento así como el tipo de magnitud a medir.

Ejemplo: Voltímetro de corriente alterna de 50 a 60 Hz con escala de 0 V a 300V.

Ejemplo : Voltímetro con un rango en voltaje de 1mV a 300V (valor eficaz) y rango en frecuencia de 10 Hz a 10MHz.

Precisión:

Debido a la imperfección de las componentes y de las influencias de factores externos (temperatura, campo magnético y eléctrico, humedad, etc.), la lectura de los instrumentos es distinta del valor real de la magnitud que se mide. La diferencia entre la lectura del instrumento y el valor real se denomina *error absoluto*.

El error absoluto se expresa en las unidades de la magnitud medida. En general, el error absoluto no es suficiente para caracterizar la precisión de un instrumento o de una medida. Medir en un amperímetro 10A con un error absoluto de 0,1 A y medir 1A con el mismo error absoluto *no se pueden considerar como medidas de la misma precisión*.

Para definir la precisión de un instrumento se utilizan los *errores relativos*. El error relativo es el cociente entre el error absoluto y la medida realizada.



En los casos mencionados el error relativo es, expresado en %:

$$\epsilon = \frac{0,1}{10} \times 100 = 1\%$$

Para caracterizar la *precisión* del instrumento de medida en toda su escala se utiliza el error relativo expresado en tanto por ciento del alcance del instrumento.

Ejemplo: Un voltímetro con alcance de medida 150 V y error 0,2% tiene un error absoluto máximo E max:

$$\frac{E \text{ max}}{150} \times 100 = 0,2$$

$$E \text{ max} = 0,3 \text{ V}$$

En los instrumentos analógicos mecánicos las lecturas de mayor precisión (en el caso de trabajar con escalas lineales) ocurren en los 2/3 de la escala.

Sensibilidad

Da una idea de la mínima señal que es capaz de detectar un instrumento.

En general se la expresa en los instrumentos analógicos como la variación de lectura del instrumento (desplazamiento angular o lineal del indicador dividido por la magnitud que provoca esa variación).

Ejemplo: Se dice que un galvanómetro tiene una sensibilidad de:

$$\frac{10 \text{ mm}}{1 \text{ } \mu\text{A}}$$

Muchas veces se utiliza la inversa de esta expresión.

Ejemplo: Se dice que un osciloscopio tiene una sensibilidad de:

$$\frac{10 \text{ m V}}{\text{división}}$$

Estabilidad

Las propiedades de los materiales con que se elaboran los instrumentos varían con el tiempo. Debido a esto, la indicación del instrumento de medida puede variar para iguales valores de la magnitud medida.

En el caso de instrumentos de alta calidad el fabricante indica la estabilidad por la precisión que asegura en un período dado de tiempo y a una temperatura determinada.

Todos los instrumentos en que la precisión es importante *deben ser calibrados periódicamente* por comparación con patrones de medida.

Modificación que introduce un instrumento.

Toda medida exige vincular de alguna manera el instrumento de medida con el fenómeno a medir. Esta vinculación *modifica* en algo el fenómeno en estudio.

Un instrumento de medida debe indicar qué modificación introduce al realizar la medida. Según sea el caso, esta información acerca del instrumento se suministra de diferentes maneras.

Ejemplo: La conexión de un amperímetro en un circuito implica el aumento de la resistencia total y un cambio en la corriente. Ver figura 1.

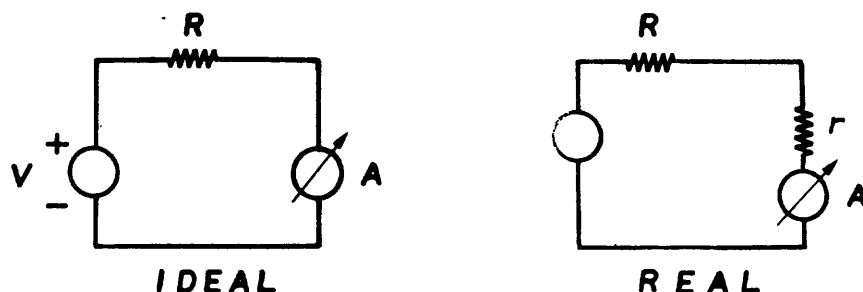


Fig. 1



Amperímetro ideal

Resistencia propia 0

$$\text{Lectura } I = \frac{V}{R}$$

Amperímetro real

Resistencia propia r

$$\text{Lectura } I = \frac{V}{R + r}$$

En este caso el grado de influencia se determina por la relación de su resistencia y la resistencia del circuito estudiado.

Ejemplo: La conexión de un voltímetro conduce a un cambio de la corriente del circuito en una magnitud igual a la corriente que consume el voltímetro.

Es común dar en los voltímetros la resistencia interna que poseen.

Cuanto mayor sea la resistencia interna, menor será la modificación que se introduce en la lectura y mejor el voltímetro, desde este punto de vista.

Un voltímetro electrónico puede tener decenas o cientos de $M\Omega$. de resistencia interna.

En los voltímetros de cuadro móvil es frecuente indicar la corriente que consumen por el *número de ohms por voltio* de plena escala que poseen. Si un voltímetro posee 20.000 ohms por voltio, en la escala de 100 V se tiene una resistencia interna de:

$$20.000 \times 100 = 2 M\Omega$$

en tanto que en la escala de 10 V posee solamente 0,2 $M\Omega$. La corriente que consume el instrumento en plena escala es la inversa de este número; los voltios por ohms es la corriente que circula:

$$\frac{1}{20.000} = 50\mu A$$



Ejemplo: En un voltímetro de corriente alterna se suele indicar, además de la resistencia interna, la reactancia que posee. En particular, un osciloscopio suele indicar la resistencia y la capacidad de entrada. Se tiene así, como valores típicos, $1\text{ M}\Omega$ en paralelo con 30 pF .

Capacidad de sobrecarga

Los distintos elementos que componen un instrumento se diseñan para trabajar con determinados rangos de medida. En los casos en que se *superen estos valores nominales* se trabaja en *sobrecarga*.

Un instrumento posee capacidad para soportar cierta sobrecarga sin daños permanentes. Es importante conocer esta información para un uso correcto del instrumento.

Pasados los límites de sobrecarga admisible, pueden producirse aumentos de temperatura, fallas de aislación u otro tipo de alteraciones capaces de provocar un daño permanente.

Aislación

Todos los instrumentos de medida deben tener una aislación suficientemente segura. La insuficiencia de aislación puede conducir a errores en las medidas por la existencia de corrientes parásitas. También tiene un significado importantísimo la aislación necesaria para la seguridad del personal que maneja los instrumentos.

Medio ambiente que soportan

Las características del medio ambiente en el que se realizan las medidas condicionan la precisión de las mismas. Los fabricantes establecen el rango de temperatura y humedad que aseguran las especificaciones técnicas.

Fuentes de poder

Según el tipo de instrumento se utilizan varios tipos de fuentes de poder.

En algunos casos se usan pilas (pilas secas), baterías recargables o alimentación por la red de distribución de energía. En algunos casos el *instrumento cuenta con una fuente de poder regulada electrónicamente.*

Hay instrumentos que no utilizan fuentes de poder, como es el caso de los amperímetros y voltímetros de aguja.

Símbolos

Dada la variedad de instrumentos que existen se ha establecido un sistema de símbolos que tienen como objeto definir características del instrumento. Algunas de las más usuales para interpretación de cuadros son las siguientes:

~	Instrumento para corriente alterna
—	Instrumento para corriente continua
⌒	Instrumento de cuadro móvil
⌚	Instrumento de hierro móvil
⊕	Instrumento electrodinámico
→	Instrumento con rectificador
┌	Posición horizontal
└	Posición vertical
☆ 2	Aislación: el número interior indica los kilovoltios que soporta



Voltímetros de continua

Entre el amperímetro y el voltímetro no existe una diferencia de principio. Las indicaciones de ambos instrumentos son funciones de la corriente que circula por ellos.

Sin embargo, según sea su aplicación deben satisfacer exigencias distintas. El amperímetro debe poseer la resistencia *más baja posible*; el voltímetro en cambio, una resistencia lo *más alta posible*.

Por esto en los voltímetros se conecta, en serie con el instrumento, una resistencia adicional.

Para ampliar el alcance del voltímetro bastará conectar en serie otras resistencias.

Ejemplo: Sea un instrumento de continua de $50\mu\text{A}$ en plena escala.

Supongamos que queremos medir, con ese instrumento, 250 voltios en plena escala. Ver figura 1.

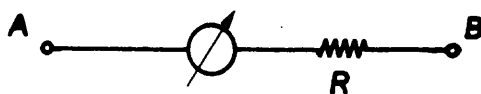


Fig. 1

Si aplicamos entre A y B 250 voltios de continua queremos en el instrumento la indicación de corriente máxima. En ese momento deberán circular $50\mu\text{A}$, es decir:

$$250 \text{ V} = R \times 50 \times 10^{-6}$$



De donde:

$$R = \frac{250}{50} = 5 \text{ M}\Omega$$

Como vemos, la resistencia interna del voltímetro será, en esta escala, 5 M Ω .

La relación entre la resistencia interna del voltímetro y el voltaje de plena escala es en este caso:

$$\frac{5 \times 10^6}{250\text{V}} \Omega = 20.000 \Omega/\text{V}$$

Esta relación, que será válida para las distintas escalas del voltímetro, es una característica muy importante en la medida de voltajes. *Es la resistencia que incluimos en el circuito cuando realizamos la medida.*

En la escala de 50 V el voltímetro de 20.000 Ω/V tiene como resistencia interna 1 M Ω .

Escala de los voltímetros de continua

En los voltímetros de continua contruidos sobre la base de instrumentos de cuadro móvil la escala es *lineal*. La desviación de la aguja es proporcional al voltaje.

No sucede lo mismo en los casos en que el voltímetro está contruido sobre la base de instrumentos electrodinámicos o de hierro móvil.

En estos casos la escala es no lineal. La desviación de la aguja es proporcional al cuadrado del voltaje. Por esa razón la escala del voltímetro aparecerá comprimida en la zona correspondiente a voltajes bajos y se expande en la zona de voltajes mayores.



Voltímetro de alterna

Los instrumentos de hierro móvil y electrodinámicos pueden ser usados como voltímetros de alterna. Por el tipo de fuerzas que se desarrollan en la parte móvil de estos instrumentos la desviación de la aguja es proporcional al cuadrado del valor eficaz del voltaje. La escala de estos instrumentos se calibra en valor eficaz del voltaje.

Esta escala es *no lineal*: al duplicarse el voltaje la desviación de la aguja aumentará con el cuadrado de ese voltaje.

Si a estos instrumentos les aplicamos un voltaje de continua se tiene la desviación correcta.

De ahí que estos instrumentos *pueden medir indistintamente continua y alterna usando la misma escala*.

Voltímetro con rectificador

Si a un voltímetro de cuadro móvil se le aplica una corriente sinusoidal (de frecuencia mayor que la frecuencia propia del instrumento) la lectura que se obtiene es cero. Por lo tanto un instrumento de cuadro móvil, por sí solo, no es capaz de medir voltajes de alterna.

Para lograr fuerzas que provoquen una desviación, es necesario que la corriente que lo recorre tenga siempre el mismo sentido.

Se utilizan, para esto, circuitos con diodos rectificadores (figura 1).

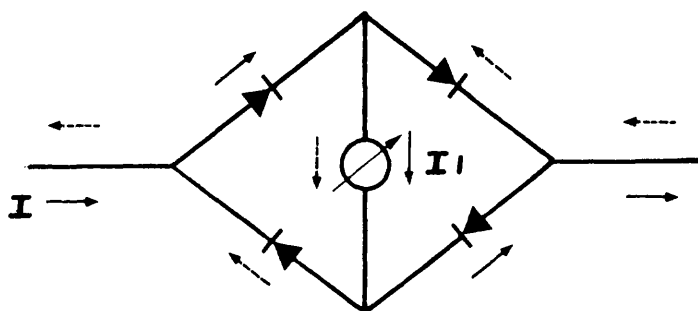


Fig. 1

Si el voltaje V aplicado al voltímetro es una senoide (Fig. 2), la corriente I que atraviesa al instrumento tendrá la forma indicada en la figura.

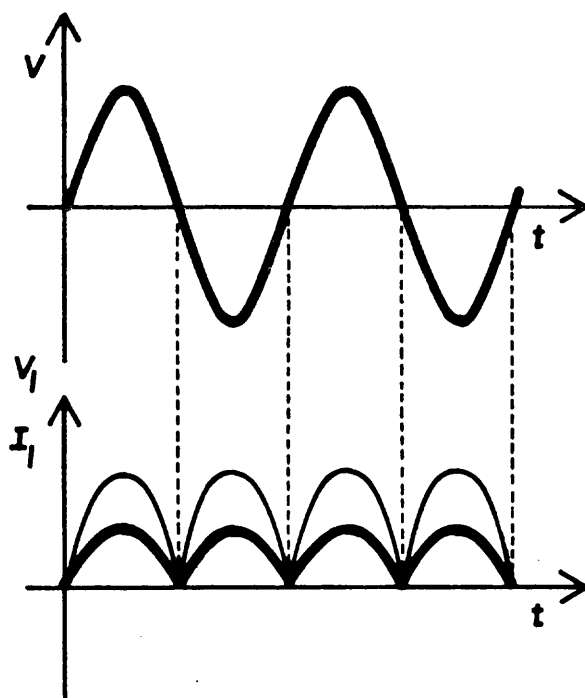


Fig. 2

El instrumento actuará como si circulara una corriente continua I_C de valor igual al valor medio de la corriente I_1 .

El valor medio corresponde a un valor I_C tal que, en un período T , el área de la media senoide es igual al área del rectángulo de lados I_C y T (ver figura 3).

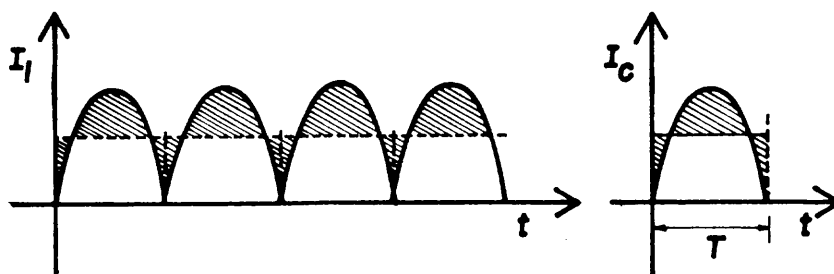


Fig. 3



La desviación del instrumento es proporcional al valor medio de la corriente rectificada que pasa por él y, por lo tanto, al valor medio del voltaje rectificado.

Como se trata de un instrumento de alterna interesa obtener la lectura del *valor eficaz* del voltaje.

La relación entre el valor eficaz del voltaje y el valor medio del voltaje rectificado es lo que se denomina *factor de forma* FF:

$$FF = \frac{I_{ef}}{I_C}$$

Para las sinusoides ese factor de forma vale 1,11. Mediante este factor se realiza la calibración del instrumento en valor eficaz.

Un instrumento de cuadro móvil con rectificador *con la escala calibrada para voltaje sinusoidal*, al medir un voltaje con otra forma de onda (por ejemplo rectangular) *dará una lectura errónea*.

La característica no lineal del diodo y la necesidad de superar un voltaje mínimo para conducir (0,2 a 0,3 V en diodos de germanio, 0,5 a 0,6 en diodos de silicio) hace que la escala de estos instrumentos no sea lineal en las escalas de medida de pocos voltios.

Rango de los voltímetros de alterna

Los instrumentos electrodinámicos y de hierro móvil se construyen para distintos rangos de voltaje según la aplicación que se prevea para ellos.

Para modificar el rango es común utilizar en estos instrumentos transformadores de voltaje. Estos pueden ser *externos* o *internos* con una perilla que permite cambiar el rango de medida.



El rango de frecuencia en que funcionan, normalmente, es cercano a la red (45 Hz. a 65 Hz.). Al aumentar la frecuencia aparecen efectos parásitos que desvirtúan la medida.

En el caso de instrumentos con rectificador el alcance se modifica (al igual que en los instrumentos de continua) por el agregado de resistencias en serie. La respuesta en frecuencia de este tipo de instrumentos es mejor y llega a algunos miles de hercios.

Amperímetro de continua

Los instrumentos de aguja son un amperímetro pero admiten un rango limitado de corrientes a medir. Un amperímetro de continua debe ser capaz de medir en varias escalas de corriente.

Para ampliar el alcance de los amperímetros de continua se utilizan resistencias en paralelo (shunt) con el instrumento (ver figura 1).

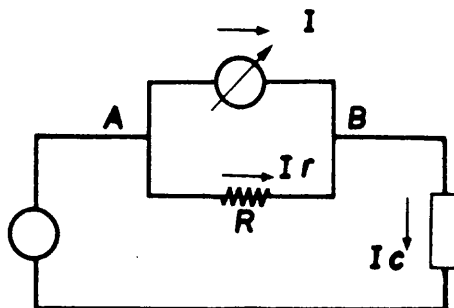


Fig. 1

Ejemplo: Sea un amperímetro cuyo rango de corriente es de 50 mA y que tiene una resistencia interna de 10Ω . Calcular la resistencia R necesaria, en paralelo con el instrumento, para poder medir una corriente máxima de 50 amperes. En la figura 1 se tiene:

I corriente por el instrumento

I_R corriente en la resistencia R (shunt)

I_C corriente en la carga: 50 A.

Aplicando la ley de Kirchoff de los nudos tenemos:

$$I_C = I_R + I$$

La corriente que deseamos medir es $I_C = 50A$. En ese momento nos interesa que el instrumento indique la desviación máxima de su aguja, por lo tanto $I = 50$ m A.

$$I_R = 50 - 0,05 = 49,95 A.$$

El voltaje entre A y B debe ser el mismo calculado en el amperímetro o en la resistencia R. Se debe cumplir:

$$r I = R I_R$$

$$10 \times 0,05 = R \times 49,95$$

De donde resulta:

$$R = \frac{0,5}{49,95} \approx 0,01\Omega$$

Según el alcance deseado para el instrumento se seleccionará el shunt correspondiente. Se construye de resistencias de precisión, estables con la temperatura (por ejemplo resistencias de manganina).

Los shunts pueden ir ubicados en el interior o en la parte exterior de los instrumentos. Los primeros se utilizan para corrientes de hasta algunas decenas de amperes; los externos se usan cuando se manejan corrientes muy altas y la disipación de calor puede ser grande.

La figura 2 nos muestra el esquema de un amperímetro que cubre varias escalas.

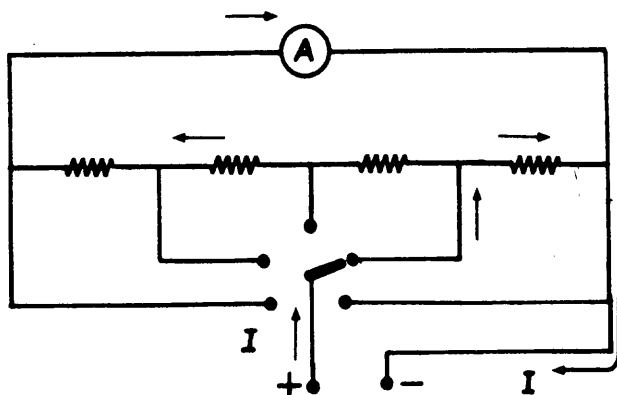


Fig. 2



La llave permite seleccionar los shunts y de esa manera definir para cada posición de la llave el alcance del amperímetro.

Escala de los amperímetros de continua

En los amperímetros de continua contruidos sobre la base de instrumentos de cuadro móvil la escala es *lineal*. La desviación de la aguja es proporcional a la corriente.

No sucede lo mismo en los casos en que el amperímetro de continua está contruido sobre la base de instrumentos electrodinámicos o de hierro móvil. En estos casos la escala es *no lineal*.

La desviación de la aguja es proporcional al cuadrado de la corriente.

Por esa razón la escala del amperímetro aparecerá comprimida en la zona correspondiente a bajas corrientes y se expande en la zona de corrientes mayores.

Por ejemplo si en un instrumento de hierro móvil una corriente de 1 ampere produce una deflexión de 10° , una corriente de 2 amperes provocará 40° de desviación.



Amperímetros de alterna

Los instrumentos de hierro móvil y electrodinámicos pueden ser usados como amperímetros de corriente alterna. Por el tipo de fuerzas que se desarrollan en el sistema móvil de estos instrumentos la desviación de la aguja es proporcional al cuadrado del valor eficaz de la corriente.

Por lo tanto la escala de estos instrumentos se calibra en el *valor eficaz* de la corriente. Esta escala será *no lineal*.

Si a estos instrumentos se les aplica una corriente continua se tiene la desviación correcta. *Pueden medir indistintamente corriente continua y corriente alterna utilizando la misma escala.*

Amperímetro con rectificador.

Si a un instrumento de cuadro móvil se le aplica una corriente sinusoidal (de frecuencia mayor que la frecuencia propia del instrumento) la lectura que se obtiene es cero.

Por lo tanto un instrumento de cuadro móvil por sí solo no es capaz de medir corriente alterna.

Para lograr fuerzas que provoquen una desviación es necesario que la corriente que lo recorre tenga siempre el mismo sentido.

Se utilizan, para esto, circuitos con diodos rectificadores (figura 1).

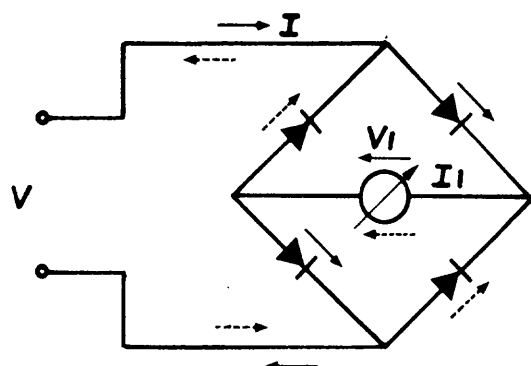


Fig. 1

Si la corriente I cuya intensidad se desea medir es una senoide (figura 2) la corriente I_1 que atraviesa el instrumento tendrá la forma indicada.

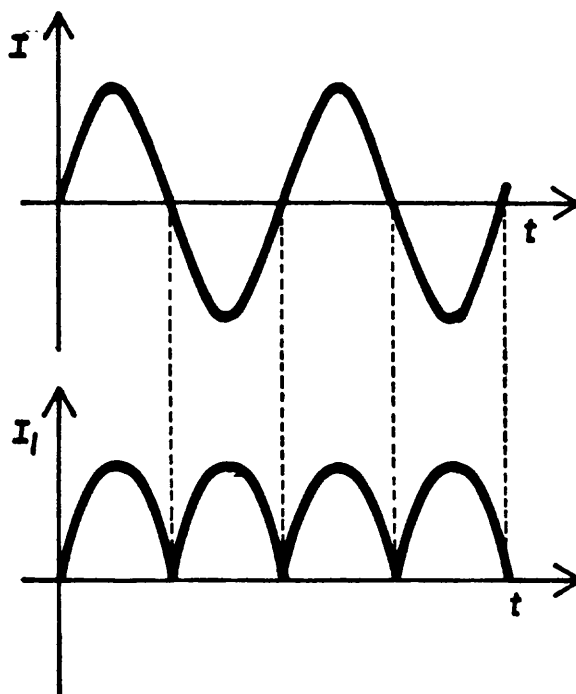


Fig. 2

El instrumento actuará como si por él circulara una corriente continua I_C de valor igual al valor medio de la corriente I_1 .

El valor medio corresponde al valor I_C tal que, en un período T , el área de la media senoide es igual al área del rectángulo de lados I_C y T .

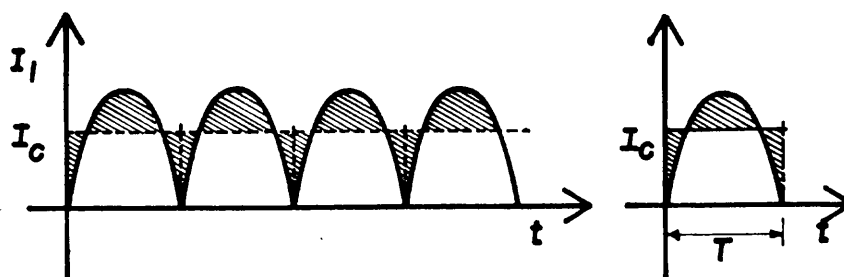


Fig. 3

La desviación de la aguja será proporcional a esa corriente media. Como se trata de un instrumento de alterna interesa obtener la lectura del valor eficaz de la corriente.

La relación entre el valor eficaz de la corriente y el valor medio de la corriente rectificada es lo que se denomina factor de forma FF.

$$FF = \frac{I_{ef.}}{I_c}$$

Para las sinusoides ese factor de forma vale 1,11.

Mediante este factor de forma se realiza la calibración del instrumento en valor eficaz.

Un instrumento de cuadro móvil con rectificador, con la escala calibrada para corriente sinusoidal, midiendo una corriente con otra forma de onda (por ejemplo rectangular) da una lectura errónea.

La característica no lineal del diodo y la necesidad de superar un voltaje mínimo para conducir (0,2 a 0,3 V en diodos de germanio; 0,5 a 0,6 V en diodos de silicio) hace que la escala de estos instrumentos no sea lineal.

Rango de los instrumentos de alterna

Los instrumentos electrodinámicos y de hierro móvil se construyen en distintos rangos de corriente según la aplicación que se prevea para ellos.



A diferencia de lo que ocurre en los instrumentos de continua, en alterna no siempre se utilizan shunts para modificar el alcance de la corriente del instrumento.

En su lugar se utilizan *transformadores de intensidad*.

Estos pueden ser externos (en el caso de medida de corrientes muy altas) o - pueden ser internos.

Un ejemplo de uso muy corriente de instrumento que utiliza un transformador de intensidad lo constituye la *pinza amperimétrica* que permite realizar medidas de corriente sin interrumpir el circuito.

Los amperímetros de corriente alterna están previstos para funcionar en rangos de frecuencia cercanos a los de la red (45 Hz a 65Hz). Al aumentar la frecuencia aparecen efectos parásitos que desvirtúan la medida.

En el caso de instrumentos con rectificador, el alcance en corriente se modifica igual que en los instrumentos de continua, mediante shunts.

La respuesta en frecuencia de este tipo de instrumentos es algo mejor y llega a algunos miles de hercios.



El diseño de conductores en un circuito impreso exige cuidar algunos detalles. Si es necesario manejar corrientes que superan 1 a 0 tensiones de cientos de voltios, el ancho y la separación de los conductores debe cumplir exigencias mínimas.

Si un conductor impreso debe transportar una corriente I , se debe dimensionar su ancho teniendo en cuenta la *resistencia total* que tendrá el conductor y la *elevación de temperatura* que experimentará.

La resistencia de un trozo de conductor impreso se puede obtener a partir de sus dimensiones y de la resistividad del cobre. Si se tiene que l es el largo del conductor, a su ancho y e el espesor del conductor del circuito impreso, la resistencia está dada por:

$$R = \rho \frac{l}{ea} = r \frac{l}{a}$$

En esta expresión, r es una resistencia propia del tipo de circuito impreso y depende solamente del número de onzas del material. Se tiene aproximadamente:

Impreso de 1 onza $r = 0,5 \text{ m}\Omega$

Impreso de 2 onzas $r = 0,25 \text{ m}\Omega$

La elevación de temperatura de un conductor impreso se puede calcular, a partir del ancho a y de la corriente que transporta, mediante las curvas de la figura 1. Estas curvas se han trazado para un impreso de 1 onza; para otros espesores se puede estimar un ancho de conductor a' :

$$a' = \frac{a}{n}$$

donde n es el número de onzas del impreso.

La diferencia de potencial entre dos conductores próximos determina distancias mínimas de trabajo. Existen muchos criterios para estimar la separación de seguridad, pero puede tomarse como regla práctica que es necesario un *milímetro de separación cada 200 voltios de diferencia de potencial*, entre conductores próximos.

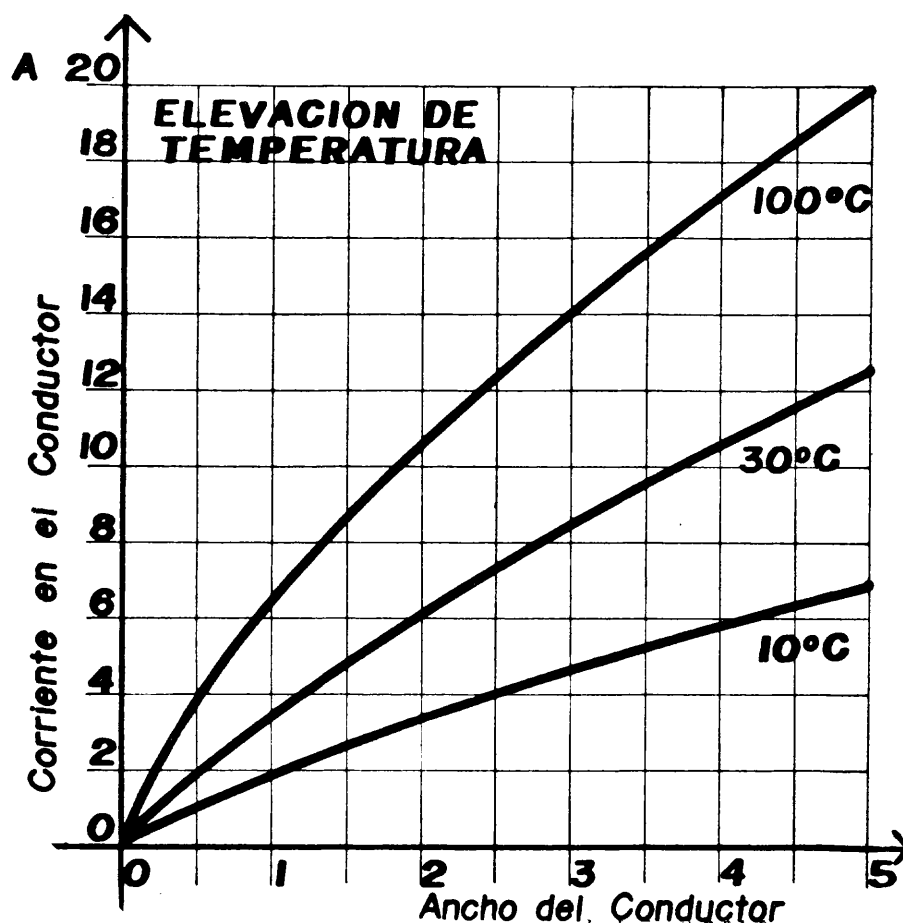


Fig. 1

Ejemplo: Para un circuito impreso es necesario distribuir 4 A a una tensión nominal de 5 V; no se aceptan caídas de tensión por debajo de 4,75 V. Se manejan distancias de 10 cm.

En el presente caso, no existen restricciones por el lado de la aislación entre conductores porque la tensión es muy pequeña.

Las condiciones de diseño provienen de la resistencia total y de la elevación de temperatura. La resistencia máxima admisible que provoca una caída de 0,25 V es de:

$$R = \frac{250}{4} = 62 \text{ m } \Omega$$



Aceptaremos como criterio de diseño, una resistencia de solamente 10 Ω para un circuito impreso de 1 onza; con $l = 10$ cm. se tiene para el ancho del conductor:

$$a = \frac{r}{R} \quad l = \frac{0,5}{10} \times 100 = 5 \text{ mm}$$

La figura 1 nos muestra que con 4 A y una elevación de 10 grados centígrados en la temperatura por encima del ambiente, es suficiente un ancho de 2,5 mm. La elevación de temperatura no impone ninguna condición en este caso.

Ejemplo: En un rectificador que trabaja con 220 V eficaces, se tienen tensiones máximas de 310 V. La *separación mínima* de conductores debe ser, entonces, 1,5 mm. Este resultado es importante en el diseño de circuitos impresos que emplean *tiristores*.

En un capacitor real, hay pérdidas de la energía almacenada que responden a diversas causas. Las más importantes son las corrientes de fuga en el dieléctrico, que no es un aislante perfecto.

En régimen de corriente alterna, el valor de esas pérdidas suele expresarse de diversas maneras:

a) A través de un *resistor equivalente de pérdidas*, que se puede dar como resistor *serie* o *paralelo* (Fig. 1).

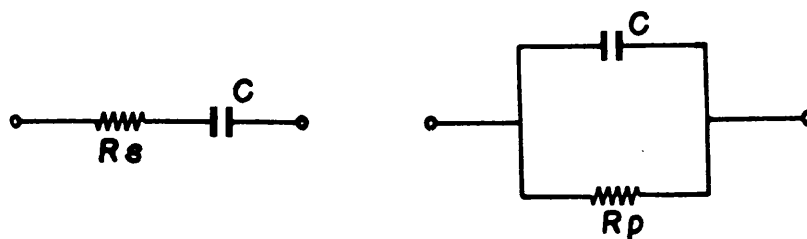


Fig. 1

b) Por medio del *factor de potencia*.

La existencia de pérdidas trae como consecuencia que en un capacitor real los vectores representativos de corriente y voltaje no sean exactamente perpendiculares (Fig. 2).

El vector voltaje posee una pequeña componente activa, en fase con la corriente.

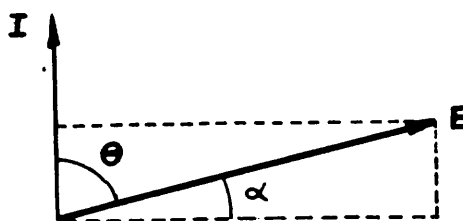


Fig. 2

El *factor de potencia* es el coseno del ángulo θ (algo menor que 90°) que forman los vectores corriente y voltaje.

Factor de potencia = $\cos \theta = \sin \alpha$

a) La tangente del ángulo α se llama *factor de disipación D*.

Su inversa, es decir la tangente del ángulo θ es el *factor de calidad Q*.

$$Q = \operatorname{tg} \theta = \frac{1}{D}$$

Vinculación entre los factores de pérdidas.

Todos los factores de pérdidas están vinculados entre sí.

En la representación de las pérdidas por un resistor serie (figura 3),

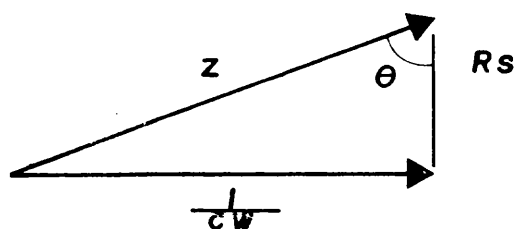


Fig. 3

$$Z = R_s + \frac{1}{cwj}$$

$$Q = \operatorname{tg} \theta = \frac{1}{R_s cw}$$

Análogamente, para el resistor paralelo se cumple:

$$Q = R_p Cw$$

Si las pérdidas son bajas (ángulo α pequeño):

$$\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = \frac{1}{Q}$$

Es decir que el factor de potencia es la inversa del factor de calidad.



El factor de calidad Q mide la relación entre la energía almacenada por el capacitor y las pérdidas.

La máxima energía almacenada por el capacitor es:

$$C = V_{ef}^2$$

La energía perdida en un ciclo es, empleando la resistencia equivalente paralelo:

$$T = \frac{V_{ef}^2}{R} \cdot \frac{2\pi}{\omega}$$

La relación entre ambas es:

$$\frac{R\omega}{2\pi}$$

Es decir que:

$$Q = 2\pi \frac{\text{Máxima energía almacenada}}{\text{Energía perdida por ciclo}}$$

En los circuitos electrónicos es muy frecuente la conexión de capacitores en serie y paralelo.

En ambos casos, se puede trabajar con un capacitor equivalente.

Dados dos capacitores C_1 y C_2 en paralelo (Fig. 1), el voltaje V es común para ambos. Se cumple:

$$Q_1 = C_1 V$$

$$Q_2 = C_2 V$$

Entonces:

$$Q_1 + Q_2 = (C_1 + C_2) V$$

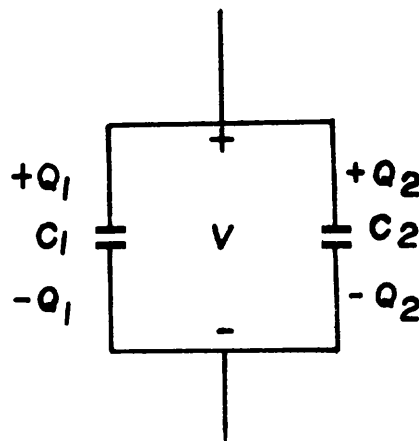


Fig. 1

El conjunto almacena una carga $Q_1 + Q_2$ con un voltaje V .

$$Q = Q_1 + Q_2 = (C_1 + C_2)V$$

$$Q = CV$$

La capacidad equivalente al paralelo es la suma de ambas:

$$C = C_1 + C_2$$

Esta propiedad se usa para alcanzar valores no normalizados de capacidad, conectando varios capacitores en paralelo.

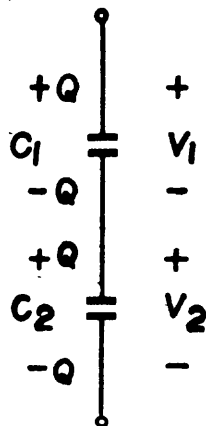


Fig. 2

Dados dos capacitores en serie (Fig. 2), la carga Q suministrada es común para ambos:

$$Q = C_1 V_1 = C_2 V_2$$

La caída de voltaje total es la suma de las caídas en cada capacitor:

$$V = V_1 + V_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = Q \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right)$$

La capacidad equivalente a la serie cumple:

$$V = \frac{Q}{C}$$

Entonces:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}$$

Esta expresión equivale a:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Se observa que esta capacidad es menor que cualquiera de las dos puestas en serie.

Cuando se desea conectar un capacitor entre dos puntos de un circuito, y el límite de voltaje de los capacitores disponibles es menor que el voltaje que existe entre esos puntos, se recurre a la conexión en serie de dos o más capacitores. Para asegurar que éstos se repartan adecuadamente el voltaje, es necesario conectarles en paralelo resistores de ecualización.

En la conexión en serie de dos capacitores el voltaje resultante en bornes de cada uno de ellos es:

$$V_1 = \frac{Q}{C_1} = \frac{C_2 V}{C_1 + C_2}$$

$$V_2 = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V$$

Se observa que estos valores son inversamente proporcionales a los valores de la capacidad.-

Ejemplo: si $C_1 = 0,1\mu F$ y $C_2 = 1\mu F$,

C_1 absorbe un voltaje diez veces mayor (aproximadamente) que C_2 .



El análisis teórico de un sistema de dos conductores cargados, de los factores que influyen sobre la capacidad C del mismo, y las relaciones entre voltaje, fuerzas eléctricas, campo eléctrico y energía almacenada, conducen a resultados de permanente aplicación en el uso práctico de los capacitores.

Supongamos un sistema constituido por dos placas conductoras separadas por una distancia d , pequeña frente a las dimensiones de las placas (Fig. 1).

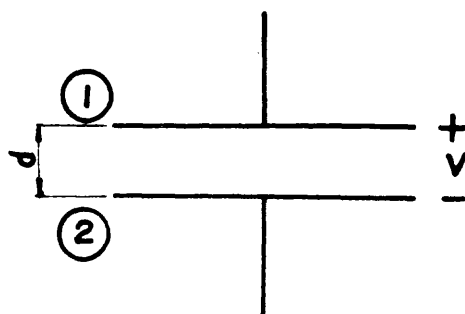


Fig. 1

Si ese sistema, llamado *capacitor* está cargado; C es su capacidad, V su voltaje y Q su carga:

$$Q = C V$$

La capacidad C depende de las dimensiones del capacitor y del aislante que separa ambas placas.

Se cumple:
$$C = \frac{S\epsilon}{d}$$

S es el área de las placas enfrentadas;

d es la distancia que las separa;

ϵ es la *constante dieléctrica* del medio aislante interpuesto entre las placas. Es un número que caracteriza a cada material aislante. Está vinculado con la manera en que cada aislante reacciona ante la aplicación de fuerzas eléctricas.

La constante dieléctrica del aire o del vacío vale, en unidades MKS:

$$\epsilon_0 = 0,88542 \times 10^{-11} \approx \frac{1}{36\pi} \times 10^{-9}$$

En los demás aislantes se suele trabajar con la *constante dieléctrica relativa* K:

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}$$

Ejemplo: En un capacitor plano, con $S = 1\text{m}^2$, $d = 1\text{ mm}$, dieléctrico aire, la capacidad es:

$$C = \frac{S\epsilon}{d} = \frac{1 \times 0,8854 \times 10^{-11}}{10^{-3}} = 8854 \text{ p F}$$

Para implementar una capacidad de 1 faradio, con $d = 1\text{ mm}$ y dieléctrico aire se requeriría una superficie

$$S = \frac{C d}{\epsilon} \approx 1 \times 10^{-3} \times 36\pi \times 10^9 = 36\pi \times 10^6 \text{ m}^2$$

Es decir, placas de aproximadamente 10 Km. de lado.

Campo eléctrico

En el capacitor cargado de la Fig. 1, entre dos puntos de una misma placa no hay diferencia de potencial..

Entre las dos placas, el potencial cae V voltios en una distancia d.

La caída de potencial por unidad de longitud es el *campo eléctrico* E.

$$E = \frac{V}{d}$$

Se mide en $\frac{\text{voltios}}{\text{metro}}$

Si consideramos una carga eléctrica positiva q (Fig. 2), la fuerza eléctrica que actúa sobre ella es proporcional a q y a E :

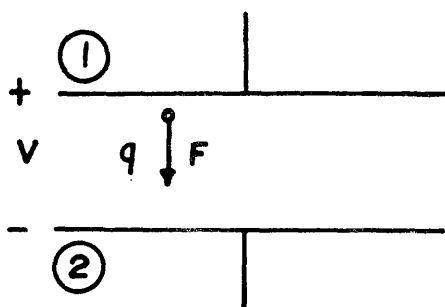


Fig. 2

$$F = q E = \frac{q V}{d}$$

Si esa carga es abandonada en las proximidades de la placa (1), se moverá, bajo la acción del campo eléctrico, hacia la placa (2).

Si llevamos esa carga, en sentido contrario, de la placa (2) a la placa (1), será necesario realizar un trabajo exterior para vencer al campo eléctrico.

Ese trabajo será:

$$T = Fd = q V$$

Ese trabajo es almacenado como energía por el capacitor.

La extensión de este razonamiento nos permitirá calcular la energía almacenada en un capacitor cargado.

Energía almacenada en un capacitor

Supongamos que el capacitor de la figura 2 está inicialmente descargado.

En esas condiciones, llevar una pequeña carga positiva q de (2) a (1) no requiere realizar trabajo exterior ya que si no hay voltaje, no hay que vencer ningún campo.

Como resultado de esta operación queda el capacitor cargado con una carga q y una diferencia de potencial entre placas:

$$v = \frac{q}{c}$$

Como paso siguiente, llevamos una segunda carga q de (2) a (1). Ahora sí, el trabajo que es necesario realizar es $q v$. Como consecuencia de esta segunda operación se tendrá una carga resultante: $2 q$ y una diferencia de potencial:

$$\frac{2q}{c} = 2 v$$

La secuencia descrita puede proseguirse. En cada paso, la carga y voltaje inicial, el trabajo realizado, y la carga y voltaje resultante se dan en la siguiente tabla.-

Paso	Carga almacenada	Diferencia de potencial	Trabajo para llevar q	Carga resultante	Diferencia de potencial resultante
1	0	0	0	q	$v = \frac{q}{c}$
2	q	v	qv	$2q$	$2v = \frac{2q}{c}$
3	$2q$	$2v$	$q(2v)$	$3q$	$3v$
4	$3q$	$3v$	$q(3v)$	$4q$	$4v$

Después de un gran número N de pasos, la carga y diferencia de potencial resultantes serán:

$$Q = Nq$$

$$V = Nv$$

El trabajo total realizado para cargar el capacitor será:

$$T = qv + 2qv + 3qv + \dots + \frac{(N-1)}{2} qv = \frac{N(N-1)}{2} qv \approx N^2 qv = \frac{QV}{2}$$

El trabajo realizado queda disponible como energía almacenada en el capacitor.

El valor de la energía almacenada es entonces:

$$E = \frac{QV}{2} = \frac{C V^2}{2}$$

Ejemplo: Un capacitor electrolítico de $c = 1000 \mu F$. cargado a un voltaje $V = 10 V$. La energía almacenada en esas condiciones es:

$$E = \frac{CV^2}{2} = \frac{10^{-3} \times 100}{2} = 50 \text{ m Joule}$$

Para tener idea del valor se puede ver que es la energía que se disipa en un resistor de $1 k \Omega$ recorrido por una corriente de $1 m A$ durante 50 segundos. En efecto:

$$E = RI^2t = 10^3 \times 10^{-6} \times 50 = 50 \text{ m Joule}$$

Energía almacenada en corriente alterna

En régimen de corriente *alterna*, al variar el voltaje instantáneo en el capacitor, la energía almacenada también varía.

Si el voltaje aplicado al capacitor es:

$$v = V \cos wt = \sqrt{2} V_{ef} \cos wt$$

la energía almacenada será:

$$E = \frac{Cv^2}{2} = \frac{CV^2}{2} \cos^2 wt = \frac{CV^2}{2} \frac{(1+\cos 2wt)}{2} = \frac{CV_{ef}^2}{2} (1 + \cos 2wt)$$

Se observa que la energía almacenada es pulsante, con valor medio $\frac{C V_{ef}^2}{2}$ y con frecuencia de variación doble que la del voltaje (Fig. 3)

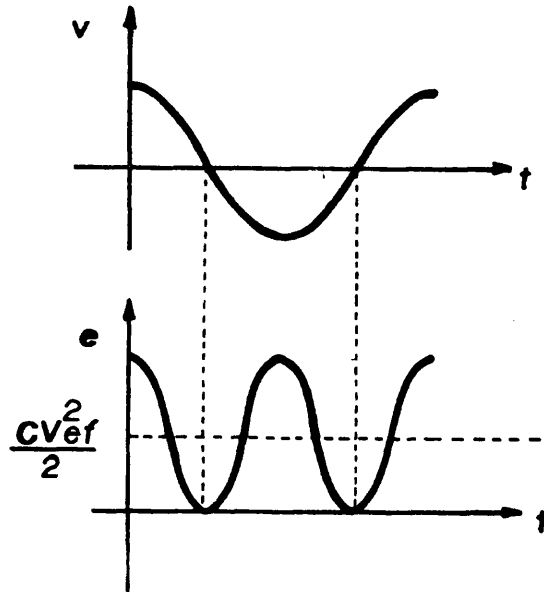


Fig. 3



Una carga alimentada con tensión alterna es recorrida por una corriente que cambia de sentido. En algunos casos interesa que la corriente *no cambie de sentido, pero que continúe empleando una tensión alterna como alimentación principal.*

Esta situación ocurre, por ejemplo, en los cargadores de baterías, en la electrólisis industrial, en las fuentes de poder de los equipos electrónicos, etc.

Para realizar esta función se emplean *circuitos rectificadores*. La componente principal de estos circuitos es el *diodo*.

Supondremos que los diodos rectificadores son ideales, es decir que actúan como cortocircuitos en el sentido de conducción y como circuitos abiertos en el sentido inverso.

También supondremos que la carga posee una resistencia R_L y que la alimentación de corriente alterna ocurre a través de un transformador.

Rectificador de media onda

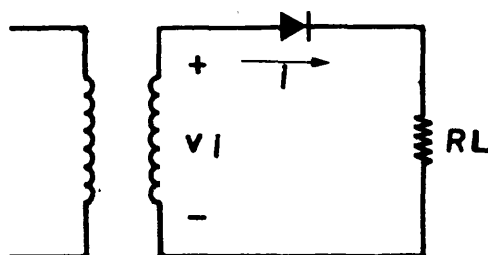


Fig. 1

Responde al esquema de la figura 1.

En la figura 2 se representa la tensión alterna de entrada al rectificador, V_i y en correspondencia la forma de onda de la corriente i que circula.

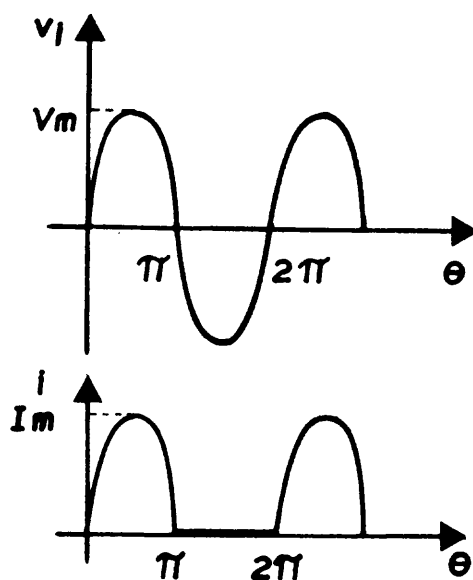


Fig. 2

Si la tensión de entrada es:

$$v_i = V_m \sen \theta$$

la expresión para la corriente i que circula tiene dos formas completamente distintas, según el diodo conduzca o no.

Cuando v_i es positiva, el diodo queda polarizado en sentido *directo* y por tanto *conduce*. Como suponemos que es ideal, al conducir actúa como un cortocircuito; es decir que no hay caída de tensión en sus bornes. Sobre la carga R_L aparece toda la tensión del transformador. Esto sucede durante el intervalo $0 < \theta < \pi$ y en todos los semiciclos en que v_i es positiva.-

Cuando v_i es negativa, el diodo queda polarizado en sentido *inverso* y por tanto *no conduce*.

Como suponemos que es ideal, actúa como un circuito abierto, desconectando la carga R_L del transformador. Sobre R_L no hay entonces tensión aplicada. Esto sucede durante el intervalo $\pi < \theta < 2\pi$ y en todos los semiciclos en que v_i es negativa.

Los razonamientos precedentes son típicos del análisis de un circuito no lineal, cuya configuración cambia según sus elementos estén en una u otra zona de sus características. En el circuito estudiado, la configuración del circuito cambia según que el diodo conduzca o esté cortado.

La corriente i que circula por la carga fluye en pulsos cuyo valor de pico es:

$$I_m = \frac{V_m}{R_L}$$

Esta forma de onda posee un valor medio I_{dc} que es distinto de cero. Este es el valor que lee un amperímetro de continua interpuesto en el circuito, y es tal que el área que determina respecto al eje horizontal en un período es igual al área encerrada por la curva en un ciclo.

I_{dc} se puede calcular planteando la igualdad de las áreas indicadas en la figura 3.

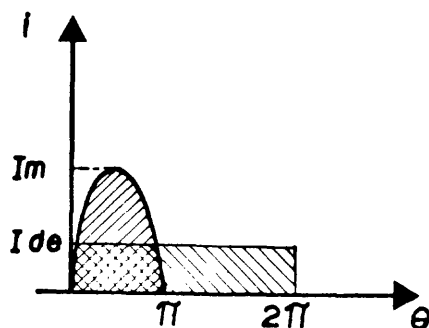


Fig. 3

El área del rectángulo de altura I_{dc} y un período de base es $2 \pi I_{dc}$

El área encerrada bajo un pulso de la senoide es $2 I_m$.

Iguando áreas resulta:

$$2 \pi I_{dc} = 2 I_m$$

$$I_{dc} = \frac{I_m}{\pi}$$

En todo circuito rectificador interesa determinar el máximo voltaje inverso que se aplica al diodo. Este valor se llama *voltaje de pico inverso* (Peak Inverse Voltage PIV).

En el rectificador de media onda, se produce cuando el diodo está cortado y la tensión llega su máximo valor V_m .

Al armar el circuito, el diodo que se emplee debe soportar los valores máximos de corriente de pico, corriente media y voltaje de pico inverso.

Para el rectificador de media onda, esos valores son:

Corriente de pico:
$$I_m = \frac{V_m}{R_L}$$

Corriente media:
$$I_{dc} = \frac{I_m}{\pi} = \frac{V_m}{\pi R_L}$$

Voltaje de pico inverso: V_m

Factor de ripple

Si en la carga intercalamos un amperímetro de alterna, que mida valor eficaz de la corriente, su lectura en este circuito resulta:

$$I_{ef} = \frac{I_m}{2}$$

El análisis de Fourier permite considerar a la corriente como suma del valor medio, I_{dc} , y de sucesivas armónicas, que constituyen la parte alterna de la corriente, I_{ac} .

Los valores eficaz, de continua y alterna están vinculados por la relación:

$$I_{ef}^2 = I_{dc}^2 + I_{ac}^2$$

Cuanto mejor sea la rectificación, más pequeña será I_{ac} respecto a I_{dc} , es decir que la corriente presentará menos ondulaciones (*ripple*).



La bondad del rectificador, en este aspecto, se mide por el *factor de ripple* γ , definido como relación entre la parte alterna y la continua de la corriente:

$$\gamma = \frac{I_{ac}}{I_{dc}}$$

Para el rectificador de media onda:

$$\gamma = 1,21$$

Este valor es demasiado alto; la parte alterna es mayor que la continua. En otras configuraciones rectificadoras se logra mejorar esta situación.



El circuito rectificador de media onda realiza la conversión de alterna en continua en forma bastante pobre, como se refleja en el alto valor de la ondulación (ripple) de la corriente.

Para mejorar la forma de onda obtenida se recurre a aprovechar los dos semiciclos del voltaje de entrada en un rectificador de onda completa.

Rectificador simétrico

En la Fig. 1 se muestra un rectificador de onda completa simétrico. Puede considerarse una pareja de rectificadores de media onda que trabajan sobre el mismo transformador.

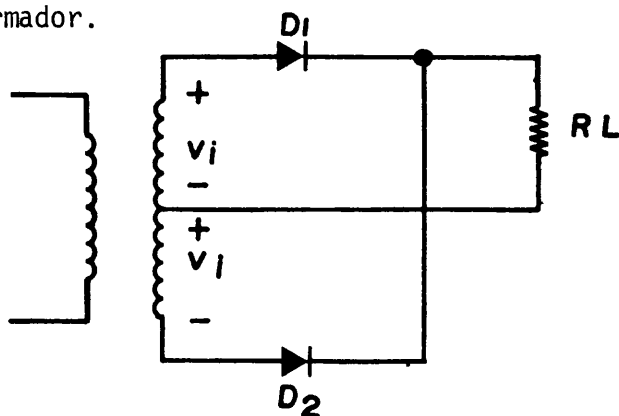


Fig. 1

En los semiciclos impares, v_i es positivo. D_1 está polarizado en sentido directo y D_2 en sentido inverso.

Durante esos semiciclos la corriente circula por D_1 , R_L y retorna a la mitad superior del devanado.

En los semiciclos pares v_i es negativo, D_2 está polarizado en sentido directo y D_1 en sentido inverso. La corriente circula entonces por D_2 , R_L y retorna a la mitad inferior del devanado (figura 2).

Se consigue así que por la carga R_L circule una corriente pulsante, del mismo sentido tanto para los semiciclos positivos como para los negativos del voltaje de entrada.

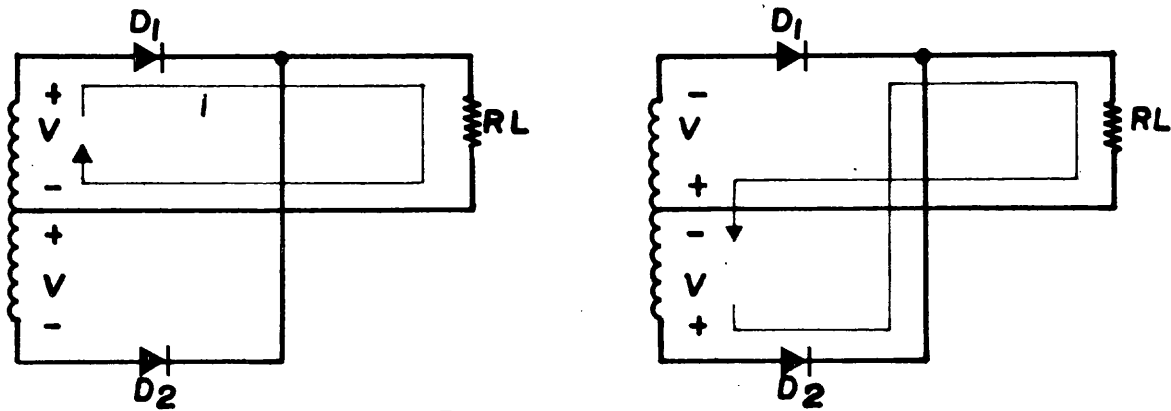


Fig. 2

En la Fig. 3 se representa el voltaje v_i entre el extremo y el punto medio del transformador. En correspondencia la corriente i que circula por carga R_L .

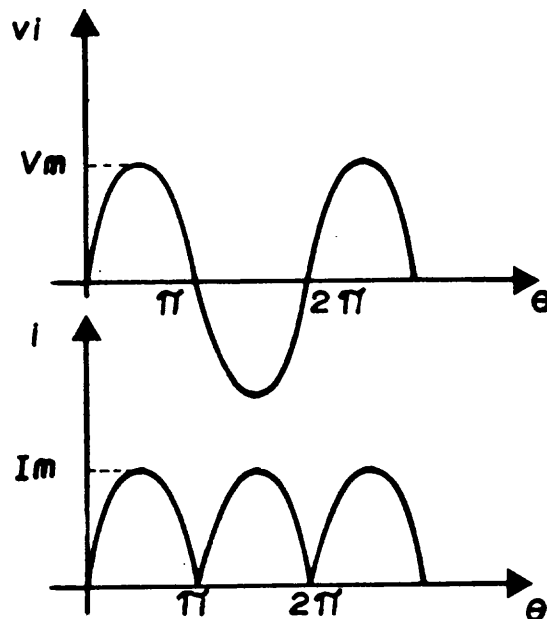


Fig. 3

Este rectificador tiene el mismo valor de pico de la corriente que el rectificador de media onda:

$$I_m = \frac{V_m}{R_L}$$

y una corriente media doble (es doble el área encerrada por los pulsos en los un ciclo completo:

$$I_{dc} = \frac{2I_m}{\pi}$$

Intercalando un amperímetro que mida el valor eficaz de la corriente, se lee

$$I_{ef} = \frac{I_m}{2}$$

El factor de ripple resulta entonces:

$$\gamma = 0,48$$

Con esta configuración, la parte alterna de la corriente es aproximadamente la mitad de su valor promedio. Es una mejora grande con respecto al rectificador de media onda.

El voltaje de pico inverso máximo que debe soportar D_2 , por ejemplo, se produce cuando v_i es positivo y máximo. En ese instante (Fig. 2) se observa que D_1 conduce, D_2 está cortado, y sobre D_2 queda aplicado un voltaje $2 V_m$ igual al máximo voltaje entre los extremos de bobinado secundario:

$$PIV = 2 V_m$$

Rectificador puente

En la Fig. 4 se representa el esquema de un rectificador en puente de diodos. La conducta de este circuito es similar a la del rectificador simétrico pero emplea cuatro diodos y no requiere punto medio del transformador.

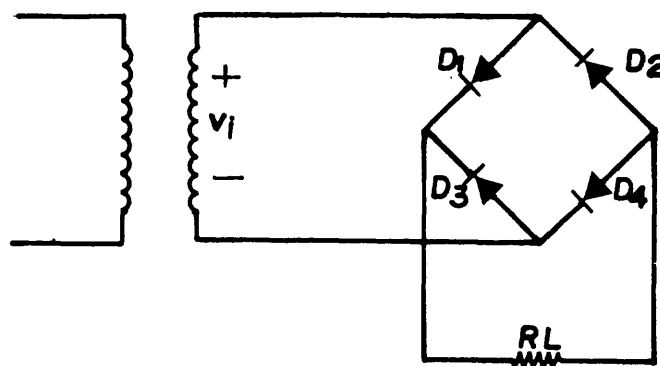


Fig. 4

En la Fig. 5 se ilustra la circulación de corriente en los semiciclos de voltaje v_i positivo; D_1 y D_4 conducen; D_2 y D_3 están cortados; en el semiciclo negativo ocurre a la inversa.

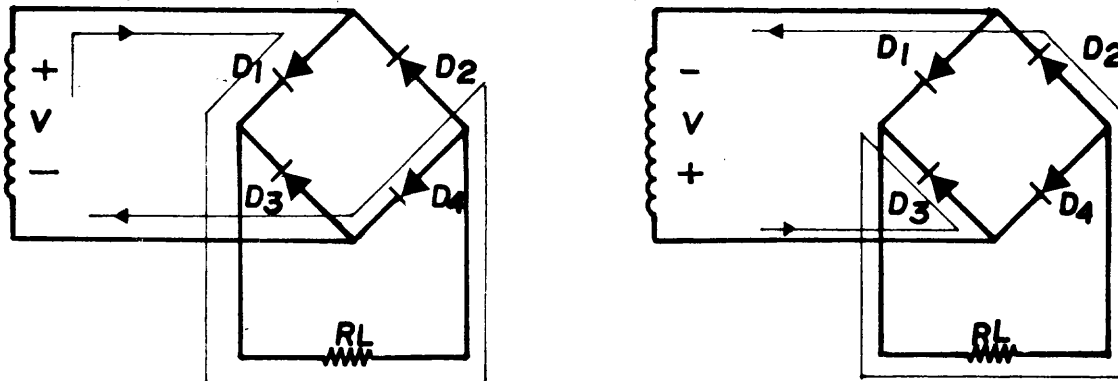


Fig. 5

Se observa que sobre la carga R_L la corriente siempre circula en el mismo sentido.

Suponiendo diodos ideales, la forma de onda de la corriente es exactamente la misma que para el caso del rectificador de onda completa. Los valores de las diversas corrientes coinciden.

$$I_m = \frac{V_m}{R_L}$$

$$I_{dc} = \frac{2I_m}{\pi}$$

$$I_{ef} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

$$\gamma = 0,48$$

El voltaje de pico inverso es V_m , como resulta de examinar, por ejemplo, la situación de D_3 en la figura 5.

Este valor del PIV *es la mitad* del que se tiene en la configuración equivalente del rectificador de onda completa simétrico. Por esta razón, la configuración puente se emplea en aplicaciones de alto voltaje.

En algunas oportunidades y especialmente cuando se trabaja con tensiones altas, se emplean rectificadores *dobladores de tensión*.

En estos circuitos se puede obtener tensiones más altas que las obtenidas por rectificadores de media onda o de onda completa.

El circuito doblador más sencillo consiste en un doble rectificador de media onda que arma una fuente positiva y una negativa, figura 1.

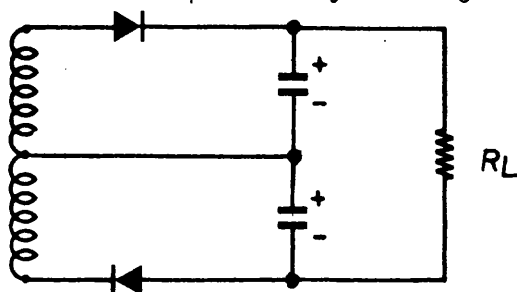


Fig. 1

Si cada uno de los rectificadores de media onda se convierten en onda completa se tiene el circuito doblador de la figura 2.

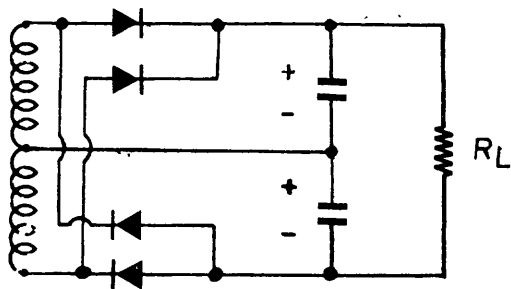


Fig. 2

Se puede construir también un doblador de media onda sin necesidad de un transformador doble.

En el circuito de la Fig. 3, durante los picos positivos de voltaje de entrada v_i , el diodo D1 carga a C1 el valor de pico.

En los semiciclos negativos de v_i , D2 carga a C2 al mismo valor con la polaridad indicada.

Entre los bornes de R_L se obtiene así un voltaje de continua, de valor doble de la amplitud del voltaje alterno de entrada v_i .

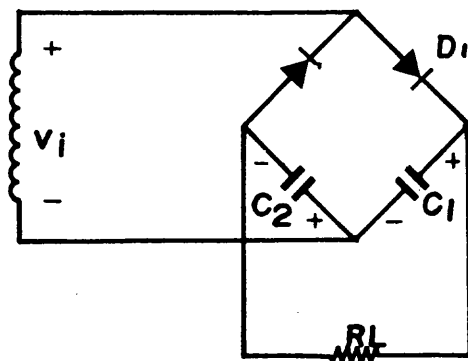


Fig. 3

El circuito descrito es, por esa razón, *doblador de voltaje*. Hay diversos circuitos multiplicadores de voltaje, similares al descrito. En todos ellos la regulación es pobre, es decir que el voltaje continuo que suministran disminuye al aumentar la carga.



En muchas aplicaciones es necesario disponer de tensión continua a partir de la red de distribución de corriente alterna.

Este equipo se llama *fuentes de poder* o *fuentes de continua*.

En una fuente de poder típica, se pueden distinguir tres unidades que cumplen funciones bien definidas:

- *transformador*, que convierte la tensión alterna de la red en otra del valor apropiado:
- *rectificador*, que transforma la tensión alterna en una tensión continua y una tensión alterna superpuesta; y
- *filtro*, que reduce la tensión alterna que suministra el rectificador, aproximando la tensión de salida a un voltaje de continua.

Con los circuitos rectificadores básicos (de media onda u onda completa) se obtienen formas de onda que distan bastante de ser puramente continuas.

Los factores de ondulación (ripple), que miden la relación de la parte alterna con la continua en la corriente de carga, son respectivamente 1,21 y 0,48.

Una mejora sustancial se consigue por medio de circuitos de filtro.

Filtro capacitivo

El filtrado elemental se obtiene conectando un capacitor en paralelo con la carga R_L .

La idea consiste en cargar al capacitor durante el período de conducción de los diodos y aprovechar la energía así almacenada en el capacitor para suministrar corriente a la carga en los períodos de corte de los diodos.

En la Fig. 1 se presenta un circuito rectificador de media onda con un filtro de capacitor.

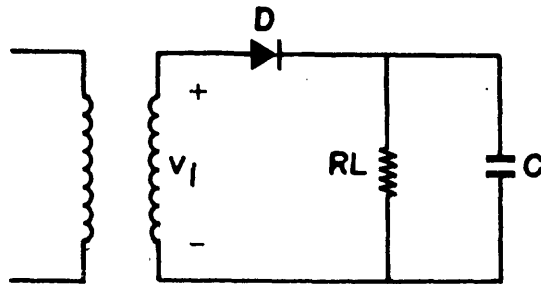


Fig. 1

Supongamos primero que la resistencia de carga R_L es muy grande. En la Fig. 2 se tiene el circuito para este caso límite.

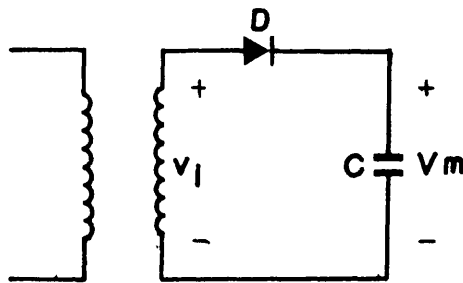


Fig. 2

Con un voltaje de entrada alterno el capacitor adquiere el voltaje V_m , valor máximo de la senoide, con la polaridad indicada (figura 3).

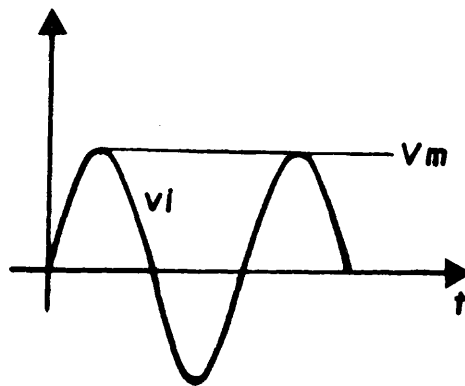


Fig. 3

El diodo permite la circulación de corriente únicamente en el sentido de carga del capacitor. La corriente circulará siempre que v_i tenga valores mayores que el voltaje de capacitor. El capacitor se cargará hasta alcanzar el valor V_m y el capacitor conservará ese voltaje ya que no hay en el circuito ningún camino de descarga para la corriente.

El capacitor se supone ideal, sin pérdidas.

En este caso, el capacitor actúa como un filtro ideal. En sus bornes se tiene una tensión continua V_m igual al máximo del voltaje alterno de entrada.

Obsérvese que con este filtro ideal, el voltaje inverso de pico del diodo se tiene cuando el voltaje de entrada es negativo y máximo y vale en ese caso: $2 V_m$. Este valor es el doble del que se tiene en ausencia del capacitor de filtro.

La existencia de una carga R_L que consume corriente (Fig. 1) cambia la situación descrita para el filtro ideal.

En ese caso el diodo no queda permanentemente cortado sino que se distingue un período de corte T_1 y otro de conducción T_2 . En la Fig. 4 se representa el voltaje de salida en correspondencia con el de entrada.

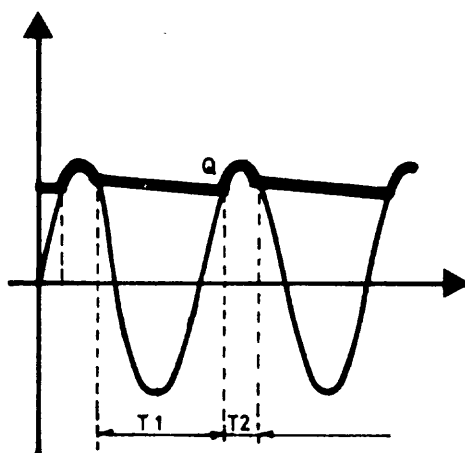


Fig. 4

Cuando el voltaje de entrada es alto, el diodo conduce y recarga, en cada ciclo, el capacitor a su máximo voltaje. Gracias al capacitor, el voltaje en bornes de la carga disminuye más lentamente que el voltaje de entrada. De esa manera, durante el período T_1 , de corte, el voltaje en la carga está gobernado por la *constante de tiempo* $T = R_L C$. Si este valor es grande frente al período del voltaje de entrada, se consigue que el voltaje de la carga no disminuya demasiado hasta que en el ciclo siguiente el voltaje de entrada vuelva a alcanzarlo (punto Q) y el diodo vuelva nuevamente a conducir.

Este análisis muestra que la ondulación de la forma de onda de salida es tanto más pequeña cuanto mayor sea la constante de tiempo $R_L C$ frente al período del voltaje de entrada.

El período de conducción del diodo es muy breve comparado con el de corte. Como el capacitor debe ser recargado durante ese breve intervalo de tiempo, por el diodo circula una corriente, en forma de pulsos breves, de alto valor. Esto es importante pues el diodo debe soportar no sólo el valor medio de la corriente, sino *el valor de pico de la misma*, tanto mayor cuanto más breve sea el intervalo de conducción.

En el caso de un rectificador de onda completa, el filtro de capacitor actúa de manera análoga al caso de media onda, obteniéndose ondulaciones menores, al aprovechar todos los semiciclos del voltaje de entrada.

Filtro inductivo

La idea de almacenar energía en una componente para entregarla luego a la carga se puede poner en ejecución también con un filtro *inductivo*.

En la Fig. 5 se representa un rectificador de onda completa con un filtro inductivo, un inductor L en serie con la carga R_L .

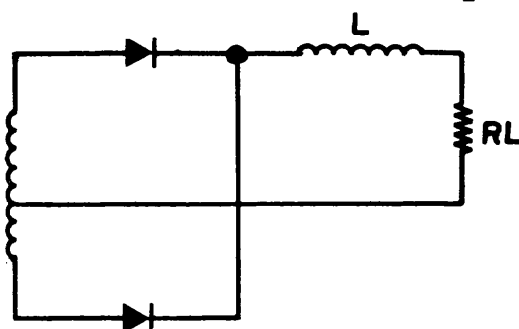


Fig. 5

La propiedad de la inductancia de mantener corriente, se traduce en la acción de filtrado. Este fenómeno se analiza con el circuito de la Fig. 6.

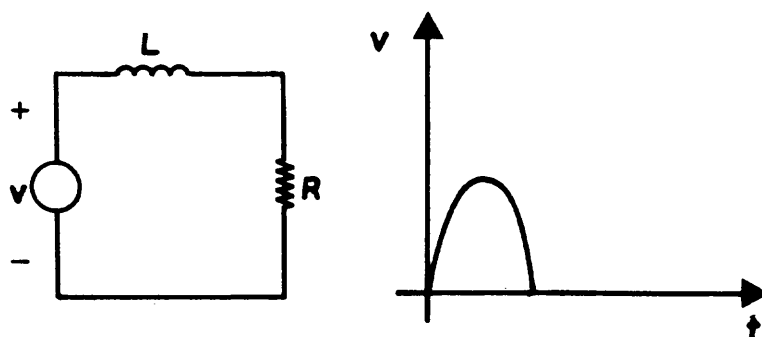


Fig. 6

Se aplica un voltaje igual a un semiciclo sinusoidal a una serie L-R.

La corriente que circula se representa en correspondencia con ese voltaje en la figura 7.

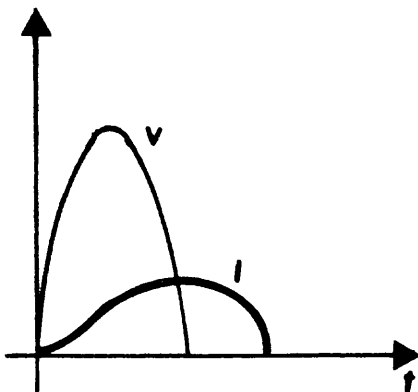


Fig. 7

Debido al inductor, la corriente continúa circulando aun después que el voltaje se anula.

En la Fig. 8 se representan, para el caso del rectificador de onda completa con filtro inductivo, las formas de onda del voltaje aplicado al filtro y la corriente en la carga, suma de las corrientes generadas por cada semiciclo de conducción (representadas en punteado).

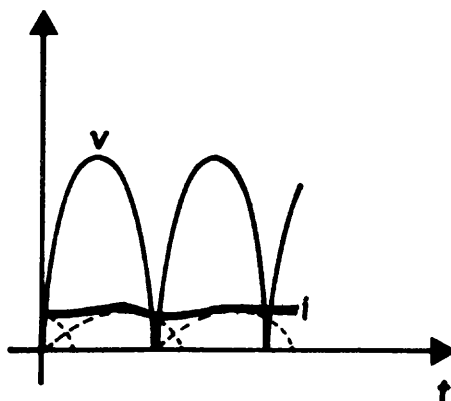


Fig. 8

Filtros L - C

Las características de los filtros descritos se pueden combinar en un filtro L-C como el representado en la figura 9.

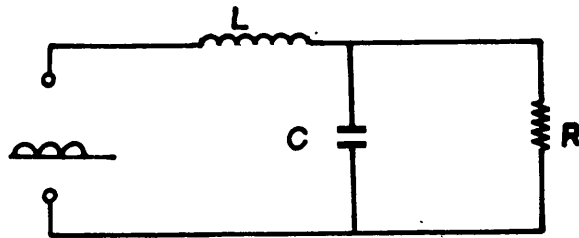


Fig. 9

El voltaje rectificado de entrada posee una parte continua (el valor medio) y otra alterna (las sucesivas armónicas) causante de la ondulación (ripple).

Para las componentes alternas, el inductor L representa una alta impedancia en serie y el capacitor C una baja impedancia en paralelo con la carga. Ambos factores contribuyen a reducir el voltaje alterno en la carga.

En el estudio de *sistemas* -y particularmente en sistemas eléctricos y electrónicos- es útil considerarlos como agrupación de *subsistemas*. Para esto, es conveniente introducir la noción de *bloque* y de *diagramas de bloques*.

Llamaremos *bloque* a un conjunto de elementos en el que tiene lugar un cierto *proceso*. Este proceso consiste en transformar una magnitud en otra. Se puede interpretar la primera magnitud como *señal de entrada* al sistema y la magnitud transformada, como *señal de salida*.

En la Fig. 1 se representa un *sistema* A en el que aparecen las señales de entrada X_i y de salida X_o . El sistema se dibuja como un bloque. Internamente podrá ser sencillo o muy complejo, pero nos interesa hacer abstracción de su constitución interna y caracterizarlo solamente como procesador que transforma la señal de entrada X_i en la señal de salida X_o .

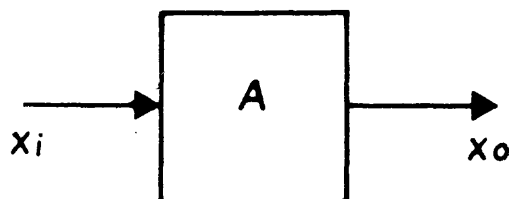


Fig. 1

En este sentido, se habla del bloque como *caja negra* (black box). Si la señal de salida se puede expresar en la forma:

$$X_o = F(X_i)$$

la función F se llama *función de transferencia* del bloque.

Dentro de un mismo sistema se pueden distinguir diversos bloques. El estudio de un circuito electrónico complejo se simplifica notablemente si se considera como *diagrama de bloques* que permite seguir el flujo de las señales y sus sucesivas transformaciones.

Los conceptos vistos son absolutamente generales. Veamos distintos ejemplos.

- Una componente elemental como el resistor (Fig. 2) puede interpretarse como un bloque en el que la señal de entrada es la corriente i , la señal de salida el voltaje v . La transferencia es en este caso la resistencia R : $v= Ri$.

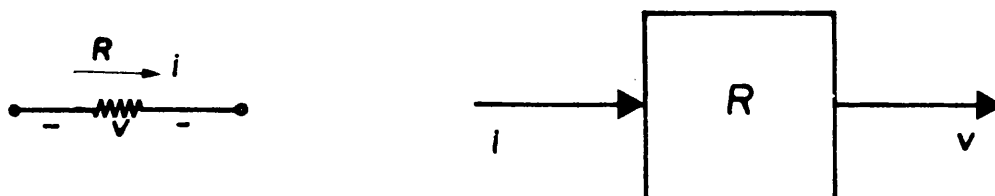


Fig. 2

- Un amplificador electrónico que convierte la pequeña señal de entrada proveniente de un micrófono en una señal de salida para alimentar un parlante, es un bloque en el que la transferencia es la ganancia del amplificador.

- El micrófono puede considerarse como un bloque que transforma la señal de sonido en una señal eléctrica de salida que será procesada por el amplificador.

- El parlante es un bloque que realiza la transformación inversa: a partir de una señal de entrada eléctrica, entrega una señal de salida sonora.

En la Fig. 3 se representa el diagrama en bloques del sistema constituido por el micrófono M, el amplificador A y el parlante P.-

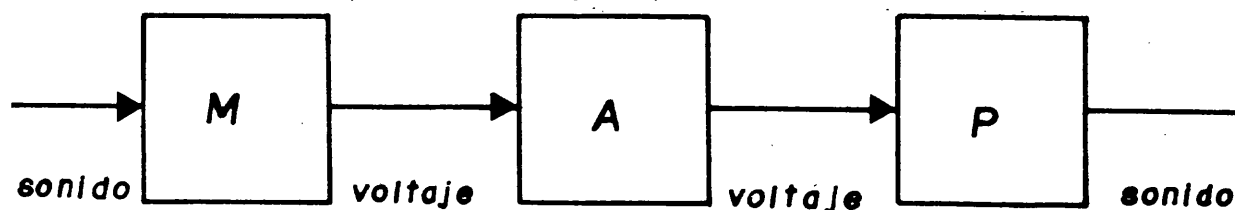


Fig. 3

Como se aprecia en el ejemplo precedente, es posible distinguir dos tipos de bloques:

- los que procesan señales eléctricas;
- los que convierten señales eléctricas en magnitudes no eléctricas o a la inversa.



Cuando las señales de entrada y salida son eléctricas, el bloque es un procesador electrónico. El amplificador es uno de los ejemplos más sencillos y se emplea para aumentar el voltaje, la corriente o la potencia de la señal de entrada.

Cuando una señal es eléctrica, y la otra no, el bloque se llama *transductor*. Es el caso del micrófono y el parlante.

El transductor que convierte una magnitud física en una señal eléctrica se llama *transductor de entrada*. El que convierte una señal eléctrica en otra magnitud física se llama *transductor de salida*.

Los transductores se pueden clasificar según la magnitud física que convierten. Se habla así de transductores térmicos, ópticos, acústicos, etc.

Transferencia lineal

En general, cada bloque se caracteriza por una función transferencia F que determina para cada señal de entrada, cuál es la señal de salida correspondiente:

$$X_o = F(X_i)$$

Ejemplo: Una transferencia puede ser la función de segundo grado:

$$a x^2 + bx + c$$

Para cada valor de la señal de entrada X_i se tiene un valor de la señal de salida X_o dado por la expresión:

$$X_o = a X_i^2 + b X_i + c$$

Interesa especialmente considerar el caso en que la transferencia es una función *lineal*:

$$X_o = A X_i$$



En un bloque con transferencia lineal, a la suma de señales en la entrada corresponde la suma en la salida.

En general, si:

$$X_i = X_1 + X_2$$

entonces:

$$X_o = A(X_1 + X_2) = AX_1 + AX_2$$

Esta propiedad se conoce como principio de *superposición*.

Un sistema formado solamente por bloques lineales permite un análisis completo y constituye uno de los casos de sistema más importantes.

El amplificador es uno de los ejemplos más sencillos y más importantes de procesador electrónico. Se aplica para aumentar el voltaje, la corriente o la potencia de la señal de entrada.

Según el tipo de señales eléctricas que se tengan como entrada y salida, se reconocen diversos tipos de amplificadores; voltaje-voltaje, voltaje-corriente, corriente-voltaje, corriente-corriente.

En los casos de amplificadores voltaje-voltaje y corriente-corriente, la transferencia es un número, llamado *ganancia* del amplificador.

En la Fig. 1 se representa un amplificador voltaje-voltaje de ganancia 10, con el esquema de triángulo empleado usualmente como símbolo del amplificador.

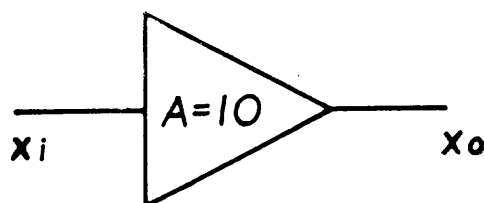


Fig. 1

Si la entrada X_i es una señal sinusoidal de amplitud 1 V (Fig. 2), la salida será una señal sinusoidal de la misma frecuencia y amplitud 10 veces mayor.

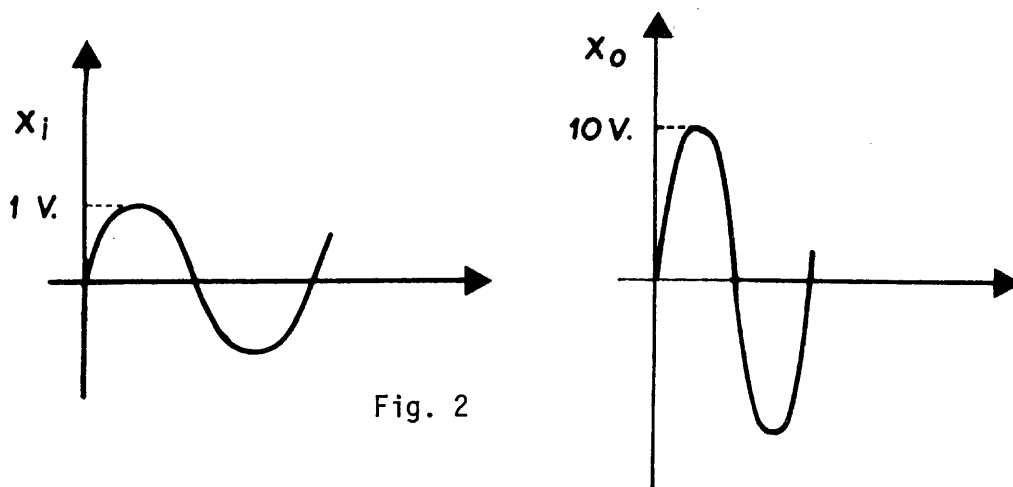


Fig. 2



En el caso de amplificador corriente-voltaje, la transferencia es una resistencia y en el caso voltaje-corriente, la transferencia es una conductancia.

Ejemplo: Supongamos un amplificador que transforma una corriente de 1 mA. en una señal de 1V. En ese caso la transferencia es una resistencia, llamada a veces *transresistencia*, de valor $1k\Omega$.

Un amplificador que realice la transformación inversa, es decir que convierta 1V. en 1mA. tiene como transferencia una conductancia de valor 1m Siemens (también llamado m mho o mA/V.) Esta transferencia se llama *transconductancia*.

En general, interesa construir amplificadores lineales, en los que la salida es una señal proporcional a la señal de entrada. En estos amplificadores se cumple el *principio de superposición*.

Ejemplo: la transferencia lineal de un amplificador de voltaje vale 1000.

Si la entrada es una señal de 1mV, la salida será una señal de 1 V.

Si la entrada es doble: $X_i = 2mV$, la salida también es doble: $X_o = 2 V$.

Si en la entrada tenemos una señal continua de 1mV y una alterna de 3mV de amplitud y frecuencia 10 KHz, se tendrá como señal de salida una parte continua de 1 V y una alterna de 3 V de amplitud y 10 KHz.

Amplificador diferencial

El amplificador elemental tiene una única señal de entrada X_i y la salida es proporcional a ella.

Muchas veces interesa amplificar *la diferencia de tensión entre dos puntos*.

Se tienen entonces dos terminales de entrada X_1 , X_2 y el amplificador diferencial (Fig. 3) se caracteriza por la transferencia o ganancia diferencial A , de modo que:

$$V_o = A (X_1 - X_2)$$

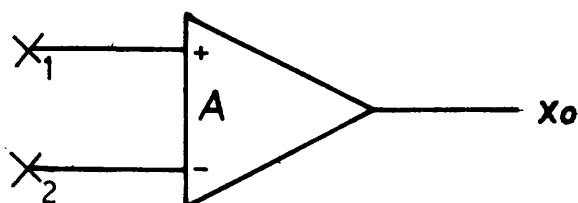


Fig. 3

En un amplificador diferencial ideal, si las señales de entrada son iguales, la salida es nula.

Los amplificadores diferenciales reales no cumplen tal condición, y con señales idénticas de entrada, es decir con entrada diferencial nula, presentan una pequeña señal de salida.

Se llama señal de *modo común* V_c (common-mode) al promedio de las señales de entrada:

$$V_c = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

La señal diferencia es:

$$V_d = V_1 - V_2$$

Para el amplificador diferencial ideal:

$$V_o = A_d \cdot V_d$$

Para un amplificador diferencial real:

$$V_o = A_d \cdot V_d + A_c \cdot V_c$$



A la relación entre ambas ganancias se le llama *relación de rechazo de modo común* ρ . (common mode rejection ratio)

$$\rho = \frac{A_d}{A_c}$$

En un caso típico, un amplificador diferencial integrado tiene:

$$A_d = 100 \text{ db} = 100.000$$

$$\rho = 80 \text{ db} = 10.000$$

Cuanto mayor sea la relación de rechazo, menor será el efecto en la salida de la entrada de modo común frente a la diferencia y más se acercará el amplificador al caso ideal.

La caracterización de un amplificador por su ganancia A , independientemente de la señal de entrada, sólo puede hacerse en un caso ideal.

En un amplificador real, *la ganancia es una función de la frecuencia de la señal de entrada.*

La ganancia se representa en función de la frecuencia, en un diagrama simple o doble logarítmico. Se obtienen gráficos similares a la figura 1.

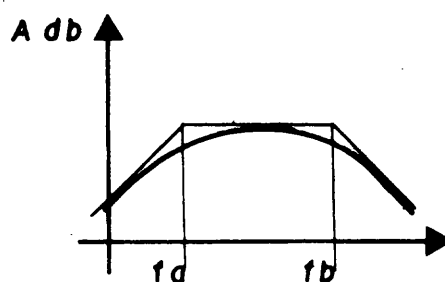


Fig. 1

Se distingue un rango de *frecuencias medias*, entre f_a y f_b , en que *la ganancia es aproximadamente constante e independiente de la frecuencia.*

Fuera del intervalo de frecuencias medias, la ganancia del amplificador disminuye. En un diagrama logarítmico *doble*, se puede aproximar con rectas la respuesta del amplificador, figura 2.

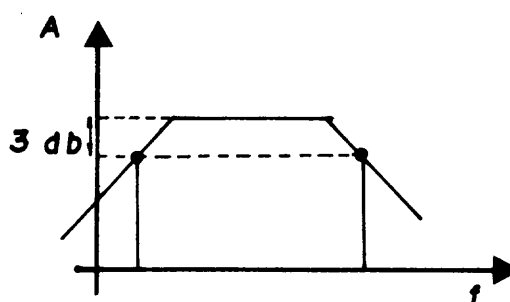


Fig. 2

Este diagrama formado por rectas se llama *diagrama asintótico*.

Convencionalmente, se llama *ancho de banda* al intervalo de frecuencias determinado por los puntos de caída 3 db. de la ganancia (Fig. 3). El ancho de banda es una propiedad que se vincula directamente con la aplicación del amplificador.



Los amplificadores se clasifican según su ancho de banda en función del tipo de señales que deben procesar. Se habla de amplificadores de:

- *Continua*, para señales continuas y de frecuencias bajas.
- *Audio*, para señales de frecuencias audibles (100 Hz a 10 KHz).
- *Video*, para señales de televisión (50 Hz a 4 MHz).
- *Radio frecuencia*, para señales empleadas en radiocomunicaciones (por ejemplo 535 a 1600 KHz).

Si un amplificador maneja señales sinusoidales de distintas frecuencias, para que todas ellas sean amplificadas en la misma magnitud el ancho de banda del amplificador deberá cubrir el conjunto de frecuencias (*espectro*) de las señales de entrada.

Un amplificador de audio, que deberá procesar con igual ganancia señales desde 100 Hz a 10 KHz, debe tener un ancho de banda igual o mayor a ese intervalo.

Cuando las señales de entrada no son sinusoidales, el análisis debe ser más cuidadoso.

Una *onda cuadrada* de frecuencia $f = 1\text{KHz}$ se puede considerar, según el *análisis de Fourier*, como la suma de señales sinusoidales: de frecuencia fundamental f y armónicas sucesivas de frecuencias $3f$, $5f$, etc.

Para que la onda cuadrada sea amplificada sin excesiva deformación, *no alcanza con que el ancho de banda contenga a la frecuencia fundamental. Deberá cubrir el mayor número de armónicas posible.* En la medida que existan diferencias entre *la amplitud o la fase* de la fundamental y sus armónicas, la onda cuadrada no será reproducida exactamente igual.

El tamaño de la señal de salida que un amplificador puede manejar está limitado por su estructura interna y por la tensión de las fuentes de continua que lo alimentan.

Supongamos un amplificador de ganancia $A = 10$ (Fig. 1) que limita con una salida de 12 V.

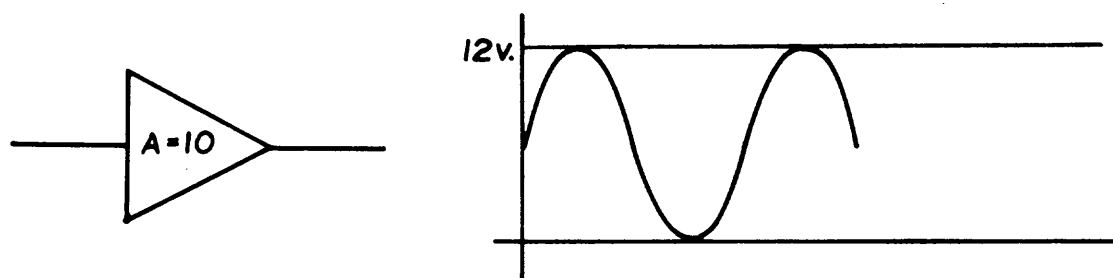


Fig. 1

En ausencia de señal de entrada, la salida estará a un cierto voltaje de continua.

Llamamos *punto de operación* o de *reposo* Q (Quiescent) de un amplificador al punto de funcionamiento del mismo *en ausencia de señal*. La determinación de este punto por parte del circuito se llama *polarización*.

Para cada punto de reposo Q el tamaño de las señales que puede manejar está fijado por uno de los dos límites máximos donde se encuentra la salida (figura 2).

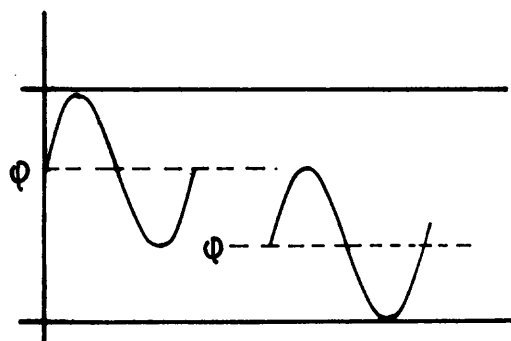


Fig. 2

Si el punto de reposo se encuentra en la mitad el amplificador podrá entregar una señal de salida máxima de 12 V de amplitud pico a pico.

Como la ganancia es 10, la señal de entrada no podrá ser mayor de 1,2 V. pico a pico; de lo contrario la señal de salida resultará fuertemente deformada (figura 3).

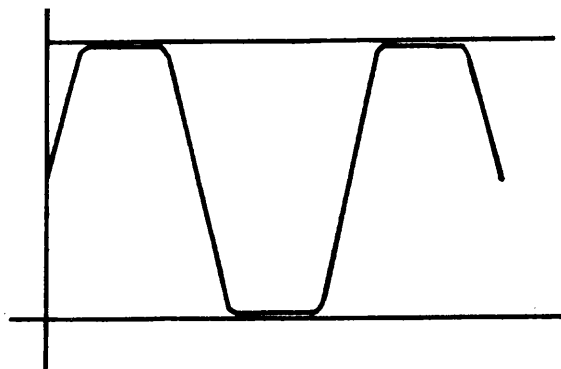


Fig. 3

Desde el punto de vista de la polarización, los amplificadores se clasifican, convencionalmente, en cinco clases:

Clase A : El punto de operación y la señal de entrada son tales que la corriente en la salida fluye permanentemente. Es el caso de las figuras 1 y 2.
Un amplificador clase A es lineal.

Clase B: El punto de operación está en el extremo del rango de tensiones disponible (figura 4).

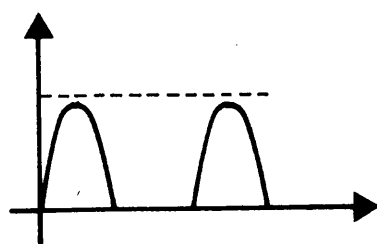


Fig. 4

Un amplificador Clase B sólo amplificará semiciclos si maneja señales sinusoidales.

La operación es claramente *no lineal* y su conducta se asemeja a un *rectificador*.

Clase AB: La polarización es intermedia a la de los casos anteriores y el tamaño de la señal es tal que la salida es cero en una parte de un semiciclo (figura 5).

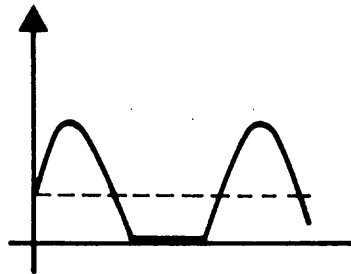


Fig. 5

Clase C: La polarización es tal que el voltaje de salida es nulo durante más de un semiciclo (figura 6).

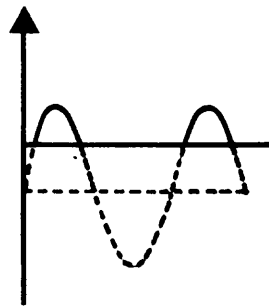


Fig. 6

Un amplificador Clase C es absolutamente no lineal; para entrada sinusoidal entrega pulsos de salida; solamente conserva *la frecuencia* de la señal de entrada.

Clase D: (Amplificadores de nivel o digitales) Trabajan con salidas fuertemente deformadas, Fig. 3. Convierten una senoide en una *onda* prácticamente *cuadrada*.

Los amplificadores *no lineales* se aplican cuando no interesa que la salida sea una réplica de la entrada. Cuando se desea conservar solamente *la frecuencia* o *la fase* de una señal o cuando se reconstruye la salida con un filtro, se pueden emplear amplificadores no lineales.

Tienen, frente a las otras configuraciones, un excelente rendimiento en potencia.

Cuando un bloque electrónico se interconecta con otros bloques de un sistema, es importante conocer las *impedancias vistas desde sus terminales de entrada y de salida.* -

Tratándose de un amplificador, la entrada es alimentada por una fuente de señal (la salida de un transductor o de otro procesador electrónico). En cualquier caso, el sistema que alimenta el amplificador se caracteriza por un equivalente de Thévenin.

En la Fig. 1 se representa la entrada del amplificador de impedancia Z_i , alimentado por un circuito de Thévenin de impedancia Z_s (source).

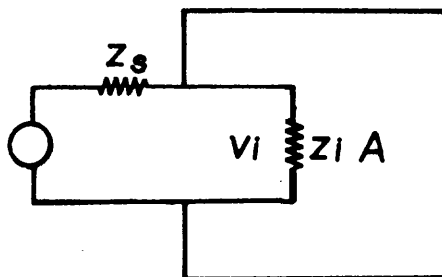


Fig. 1

El voltaje efectivamente aplicado a la entrada del amplificador no es E , sino que este valor es atenuado en la relación

$$V_i = \frac{Z_i}{Z_i + Z_s} E$$

No habrá prácticamente atenuación si la impedancia de entrada Z_i es mucho mayor que la de la fuente Z_s .

En la Fig. 2 se representa la salida del amplificador por su equivalente Thévenin.

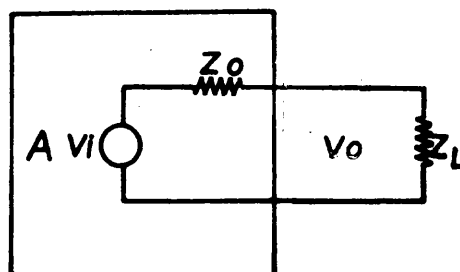


Fig. 2

La salida está conectada a una impedancia de carga Z_L (que puede ser la entrada a una etapa adicional de amplificación). Como consecuencia, la tensión en la carga no es AV_i , sino que es atenuada en la relación

$$V_o = A V_i \frac{Z_L}{Z_o + Z_L}$$

Esta atenuación será despreciable en la medida que Z_o sea mucho menor que Z_L .

Ejemplo: Dos etapas idénticas de amplificación tienen impedancia de salida de 100Ω y de entrada $100 K \Omega$,

Al conectarlas en forma sucesiva no ocurre ninguna atenuación apreciable.

Combinando las características de niveles de impedancia de entrada y salida de un amplificador (Fig. 3) se puede clasificar los amplificadores en cuatro categorías extremas:

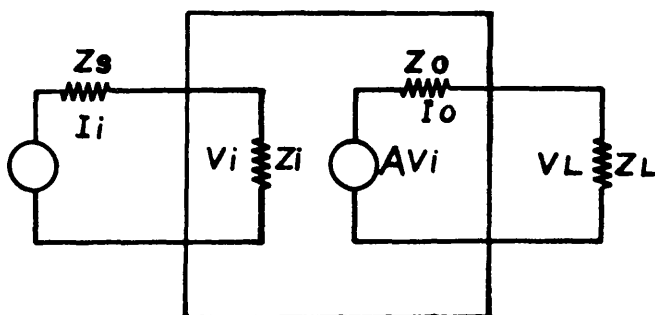


Fig. 3

1) Amplificador voltaje - voltaje.

La transferencia de voltaje de entrada a voltaje de salida es independiente de las impedancias de la fuente y de la carga. Este caso se tiene cuando se cumplen las condiciones:

Z_s mucho menor que Z_i (la señal se aplica con una fuente de voltaje)

Z_o mucho menor que Z_L (el amplificador es una fuente de voltaje)

En ese caso:

$$V_i = E$$

$$V_o = A V_i = A E$$



2) *Amplificador corriente-corriente.*

La transferencia de corriente de entrada a corriente de salida es independiente de las impedancias de la fuente y de la carga. Se tiene con las condiciones opuestas al caso anterior:

Z_s mucho mayor que Z_i (la señal se aplica con una fuente de corriente)

Z_o mucho mayor que Z_L (el amplificador es una fuente de corriente)

En ese caso:

$$V_i = Z_i i_i$$

$$i_o = \frac{A v_i}{Z_o} = \frac{A Z_i}{Z_o} i_i$$

la *amplificación de corriente*:

$$\beta = \frac{A Z_i}{Z_o}$$

es independiente de Z_s y Z_L .

3) *Amplificador corriente-voltaje.*

La transferencia de corriente de entrada a voltaje de salida es independiente de Z_s y Z_L . Se cumple cuando:

Z_s mucho mayor que Z_i (la señal se aplica con una fuente de corriente)

Z_o mucho menor que Z_L (el amplificador es una fuente de voltaje).

Entonces:

$$V_i = Z_i i_i$$

$$V_o = A Z_i i_i$$

la *transresistencia*:

$$R_m = A Z_i$$

es independiente de Z_s y Z_L .

4) Amplificador voltaje - corriente.

La transferencia de voltaje de entrada a corriente de salida es independiente de Z_s y Z_L . Se cumple cuando:

Z_s mucho menor que Z_i (la señal se aplica con una fuente de tensión)

Z_o mucho mayor que Z_L (el amplificador es una fuente de corriente).

En ese caso:

$$i_o = \frac{A V_i}{Z_o}$$

la *transconductancia*:

$$G_m = \frac{A}{Z_o}$$

es independiente de Z_s y Z_L .



Para medir resistencias se pueden utilizar instrumentos, llamados *óhmetros*, cuyas escalas se gradúan en unidades de resistencias.

Los óhmetros más corrientes constan de una fuente de alimentación, resistencias calibradas y un instrumento de cuadro móvil conectados como en la figura 1.

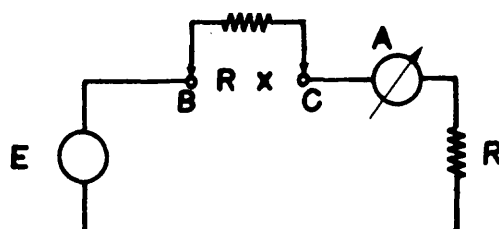


Fig. 1

E fuente de voltaje

R resistencia calibrada

Rx resistencia cuyo valor se desea averiguar

A instrumento de cuadro móvil

La corriente que mide el instrumento es:

$$I = \frac{E}{R + R_x}$$

Cuando entre B y C no colocamos ninguna resistencia, el circuito queda abierto (R_x infinita) y la corriente ($I = 0$) no desvía la aguja del instrumento.

Si unimos con un cable B y C. ($R_x = 0$), la corriente es máxima y por lo tanto será máxima la desviación de la aguja del instrumento.

En ese caso:

$$I_M = \frac{E}{R}$$

La relación entre la corriente I y la corriente máxima es:

$$\frac{I}{I_M} = \frac{R}{R + R_x}$$



ÓHMETRO

Esta relación da la desviación de la aguja del instrumento (con relación a la desviación máxima) para los distintos valores de Rx. De esta manera se calibra la escala definitiva del óhmetro.

Supongamos que elegimos los valores de E y R de modo que la corriente máxima I_M corresponde a la corriente de plena escala.

Cuando $R_x = 0$ tendremos la corriente de plena escala y el instrumento marcará su desviación máxima. Allí se colocará *cero* resistencia.

Cuando $R_x = R$:

$$I = I_M \frac{R}{R+R} = \frac{I_M}{2}$$

la aguja del instrumento marcará la mitad de la escala y allí se colocará el valor R.

Si $R_x = 2R$:

$$I = I_M \frac{1}{3}$$

la aguja marcará el primer tercio de la escala y allí se colocará el valor 2R.

Ejemplo: Analizaremos la calibración de un óhmetro que posee una resistencia $R = 100\Omega$.- En la Fig. 2 se muestra la escala de corrientes I/I_M .

Para $R_x = 600\Omega$ se tiene una desviación de 0,5

Para $R_x = 100\Omega$ se tiene una desviación de:

$$\frac{600}{700} = 0.857$$

Siguiendo un razonamiento similar se puede calibrar la escala del instrumento en valores de resistencias.

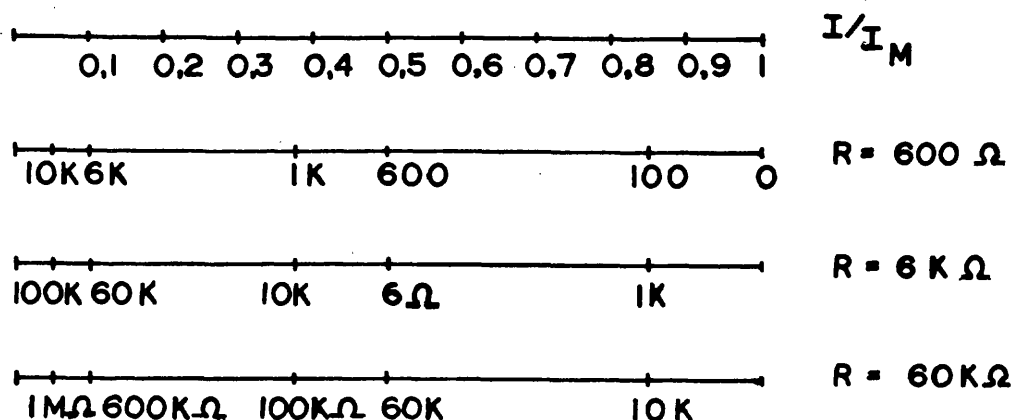


Fig. 2

Como vemos esa escala es *no lineal*. Hay zonas donde la lectura no es muy buena pues los valores de la lectura se juntan excesivamente.

Para cada valor de R podemos obtener una escala de resistencias distinta. Por eso los óhmetros utilizan varios valores de R . De esa manera se logra cubrir distintos rangos de medida de resistencias con comodidad; ver Fig.2.

Los óhmetros usan pilas como fuente de alimentación. Con el uso, las pilas se descargan y el valor de E varía.

Eso hace que la indicación de resistencia:

$$I = \frac{E}{R + R_x}$$

varíe. Para evitar este problema, R es una resistencia ajustable.

De esta manera se puede lograr que I_M se mantenga. Sin embargo, *la lectura de resistencias altera algo* al ajustar el valor de R .

Usualmente se usa un instrumento de cuadro móvil para construir un óhmetro. Para poder cubrir distintos rangos de resistencia será necesario que el instrumento marque la corriente de plena escala para los distintos valores de R cuando la resistencia a medir es $R_x = 0$.



Eso requiere que se cuente con shunts que permitan medir distintos rangos de corriente.

Ejemplo: Un instrumento de cuadro móvil de $50\mu\text{A}$ de corriente máxima y 5000Ω de resistencia interna se utiliza para construir un óhmetro.

Supongamos que se trabaja con dos pilas de 1,5 voltios y que la resistencia R tiene 3 rangos de 600Ω , $6\text{ K}\Omega$ y $60\text{ K}\Omega$.

La corriente máxima para $R = 60\text{ K}\Omega$ es $I_M = 50\mu\text{A}$.

En este caso no se requiere shunt para el amperímetro.

Para $R = 600\Omega$ y $R = 6\text{ K}\Omega$ la corriente I_M es respectivamente 5mA y 95mA ; por lo tanto se necesitan shunts distintos para cada escala.

Decimos que una *componente* electrónica es *lineal* si las magnitudes de voltaje y corriente en esa componente son proporcionales.

Un resistor, por la ley de Ohm $v = Ri$, relación lineal entre voltaje y corriente (Fig. 1), es una componente lineal.

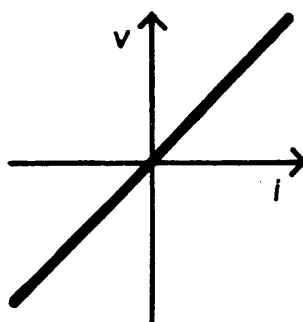


Fig. 1

Un *circuito* formado por componentes lineales se llama *lineal* y tiene una serie de importantes propiedades. En un circuito lineal, provisto de uno o más generadores (v_1, v_2 , etc.), el voltaje v_0 entre dos puntos cualesquiera es una función lineal de voltaje de los generadores ($v_0 = a v_1 + b v_2 + \dots$).

Si el circuito posee una sola fuente v_1 , v_0 es proporcional a v_1 .

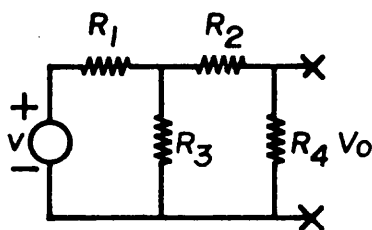


Fig. 2

En el circuito de la Fig. 2, se sabe que para $v = 10V$, el voltaje v_0 es $8V$. Podemos afirmar que:

$$\text{si } v = 20 \text{ V, } v_0 = \frac{20}{10} \times 8 = 16 \text{ V}$$

$$\text{si } v = -5 \text{ V, } v_0 = -4 \text{ V.}$$

El teorema de Thévenin, que permite caracterizar el circuito visto desde dos puntos por un circuito equivalente, es válido solamente para circuitos lineales.

Un ejemplo de componente no lineal es el *diodo*, que ofrece resistencias distintas según el sentido del voltaje que se le aplica (figura 3).

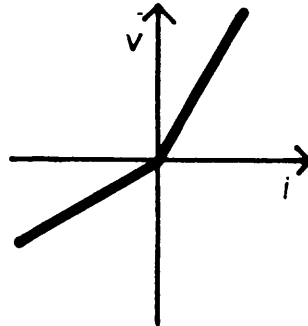


Fig. 3

En un circuito con resistores y diodos, no podemos aplicar el equivalente Thévenin.

Tripolos y cuadripolos

Muchas veces, en el circuito que se estudia, se reconocen terminales de *entrada*, donde se aplica la fuente, y terminales de *salida*, donde se desea determinar el voltaje que aparece.

Cuando la entrada y la salida tienen un terminal común: la tierra, el circuito se llama tripolo (Fig. 4). Dibujamos el circuito representado por un rectángulo o "caja negra", sin detallar las conexiones de la red interna, para enfatizar la caracterización del mismo desde el exterior.

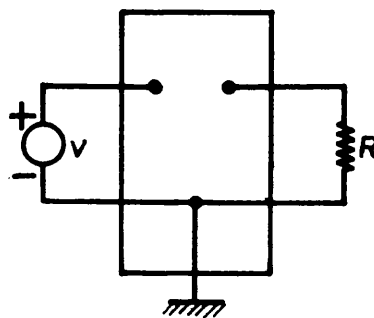


Fig. 4

Al voltaje de entrada se le llama también *excitación* y se suele representar por v_e o v_i (input) o v_s (source).

El voltaje de salida se llama también *respuesta* a aquella excitación y se representa por v_s o v_o (output) o v_L (load).

Si el circuito es lineal, sabemos que v_o resulta proporcional a v_i :

$$v_o = G v_i$$

El factor G , que depende del circuito, se llama *transferencia* o *ganancia de voltaje*.

Ejemplo: En el circuito de la Fig. 5 consideramos el tripolo cuyos terminales de entrada son AC y los de salida son BC. Una fuente E se conecta a los terminales de entrada y un resistor de carga R_L se conecta a los de salida.

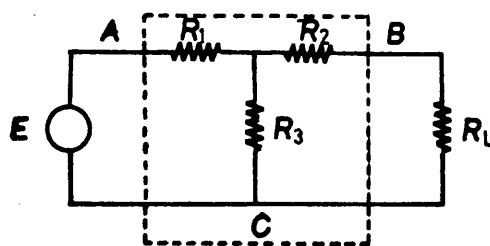


Fig. 5

La transferencia de voltaje para este circuito, resulta:

$$G = \frac{R_3 R_1}{(R_1 + R_3)(R_2 + R_1) + R_1 R_3}$$

La descripción de la "caja negra" desde el exterior se completa mediante otros parámetros: las resistencias de entrada y salida.

La resistencia vista desde los terminales BC, con los terminales AC en cortocircuito, se llama *resistencia de salida* R_o (output).

En el circuito de la figura 5 resulta:

$$R_o = R_2 + \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_3}$$

La resistencia vista desde los terminales de entrada AC, se llama *resistencia de entrada* R_i (input).

En el circuito de la Fig. 5, con la carga R_L conectada, resulta:

$$R_1 + \frac{R_3(R_2 + R_L)}{R_3 + R_2 + R_L}$$

Este valor *depende de la carga* R_L . Del mismo modo, si el generador E tuviera resistencia interna, la resistencia de salida dependería de esta resistencia. Por esta razón, en algunas oportunidades conviene estudiar tripolos y cuadripolos de otra manera.

Parámetros de un cuadripolo

En un cuadripolo se definen voltajes y corrientes de entrada y salida con polaridades convencionales como se indica en la Fig. 6. No es necesario que exista un borne común como ocurre en un tripolo.

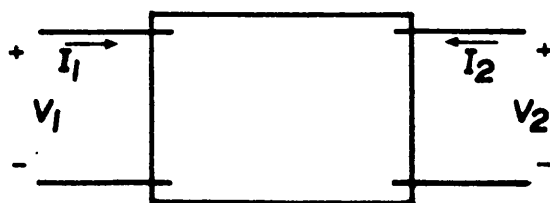


Fig. 6

Las ecuaciones que permiten el análisis del circuito son un sistema de ecuaciones lineales y se pueden transformar de modo de reducirse a un par de ecuaciones. Las demás variables se expresan en función de dos incógnitas elegidas.

Según sea la elección de esas variables, resultan distintos *parámetros del cuadripolo*.

Si se despejan los voltajes V_1 y V_2 :

$$V_1 = Z_{11} I_1 + Z_{12} I_2$$

$$V_2 = Z_{21} I_1 + Z_{22} I_2$$

Los parámetros Z así definidos se llaman *impedancias de circuito abierto*.

El nombre se justifica ya que para determinar Z_{11} basta abrir la salida y calcular en esa condición la impedancia de entrada .

Con $I_2 = 0$ se tiene:

$$Z_{11} = \frac{V_1}{I_1}$$

Del mismo modo se obtienen las restantes.

Entre las posibles elecciones de variables, una de particular interés es la que resulta de despejar V_1 e I_2 :

$$V_1 = h_{11} I_1 + h_{12} V_2$$

$$I_2 = h_{21} I_1 + h_{22} V_2$$

Los parámetros así definidos, llamados parámetros h , encuentran particular utilidad en el estudio de *amplificadores*.

h_{11} es la impedancia de entrada con la salida en cortocircuito ($V_2=0$)

h_{12} es la inversa de la ganancia en voltaje con la entrada abierta ($I_1=0$)

h_{21} es la ganancia en corriente con la salida en cortocircuito ($V_2=0$)

h_{22} es la admitancia de salida con la entrada abierta ($I_1=0$)

Ejemplo: En el circuito de la Fig. 5 suponemos que los tres resistores son de $1K\Omega$. Se tiene como parámetros del cuadripolo:

$$Z_{11} = 2K\Omega$$

$$Z_{12} = 1K\Omega$$

$$Z_{21} = 1K\Omega$$

$$Z_{22} = 2K\Omega$$

$$h_{11} = 1,5 K\Omega$$

$$h_{12} = 0,5$$

$$h_{21} = 0,5$$

$$h_{22} = 0,5mS = \frac{1}{2K\Omega}$$



El empleo de diagramas de vectores para estudiar tensiones y corrientes sinusoidales conduce a formular las leyes de circuitos en una forma coincidente en corriente continua y en corriente alterna.-

Para poder extender esta ventajosa coincidencia es necesario poder extender también el concepto de *resistencia* a la corriente alterna. La *impedancia* generaliza este concepto.-

Una expresión del tipo:

$$V = Z I$$

generaliza completamente la Ley de Ohm de los resistores, si tuviera significado en el caso en que V e I son vectores que representan sinusoides.-

Existen diversas maneras de trabajar con vectores. Dentro de las maneras posibles, la más útil en la electrotécnica es mediante *números complejos*.-

La razón se encuentra en que los números complejos suministran mecanismos para trabajar con diagramas de vectores y para interpretar la ecuación de impedancias.-

Propiedades de los números complejos.

Recapitularemos algunas propiedades de los números complejos, haciendo especial énfasis en sus aplicaciones en electrotécnica.

Los libros y manuales no emplean una notación uniforme. A menudo un mismo libro emplea notaciones iguales para referirse a vectores, complejos, amplitudes, etc. En cada caso deberá interpretarse con cuidado el significado de las distintas fórmulas.-

Un número complejo se escribe en la forma *binómica* como:

$$a + bi$$

En que a es la *parte real*, b es la *parte imaginaria* e i es la *unidad imaginaria*, que cumple la propiedad fundamental:

$$i^2 = -1$$

En la Fig. 1 vemos la representación del complejo $3 + 2i$

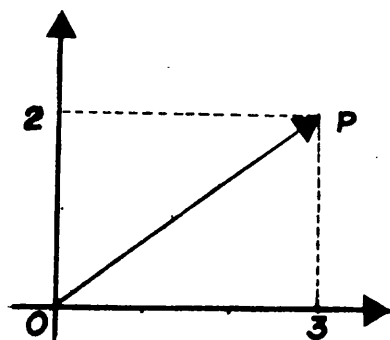


Fig. 1

El vector OP tiene como proyecciones sobre los ejes la parte real 3 y la parte imaginaria 2.-

La notación usual en electrotécnica presenta algunas diferencias:

- 1.- A la *unidad imaginaria*, que en la notación matemática se representa por i (de imaginario), se le representa por j para evitar confusión con la *corriente i*.
- 2.- La parte real se llama parte resistiva o activa y se representa usualmente por R .-
- 3.- La parte imaginaria se llama parte reactiva y se representa por X . Es decir que el complejo se escribe como:

$$R + j X$$

Se cumple que:

$$j^2 = -1$$

Un complejo admite también la notación *polar*:

$$Z \angle \phi$$

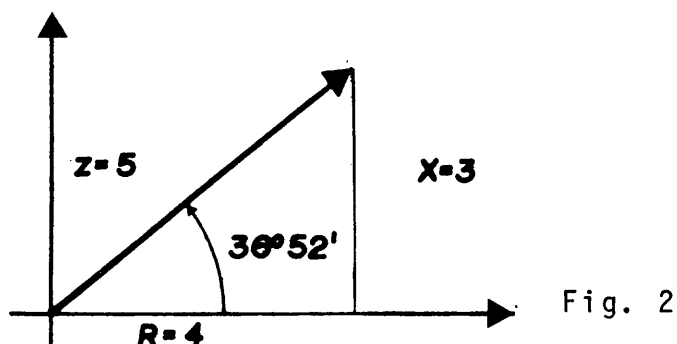
En lo que Z es el *módulo*, (amplitud del vector) y ϕ es el *argumento* (ángulo que el vector forma con el eje real positivo).-

Ambas notaciones están vinculadas por las relaciones:

$$Z^2 = R^2 + X^2$$

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{X}{R}$$

En la Fig. 2 se representa el complejo $4 + 3j$.-



En notación polar:

$$\begin{aligned} Z^2 &= 16 + 9 = 25 & Z &= 5 \\ \operatorname{tg} \phi &= \frac{3}{4} \quad 0,75 & \phi &= 36^\circ 52' \end{aligned}$$

Si el complejo representa una senoide, el módulo informa sobre su amplitud y el argumento sobre su fase.-

La *suma de complejos* se hace sumando por separado partes reales y partes imaginarias.-

En la Fig. 3 se representa la suma de los complejos $4 + j$ y $2 + 3j$

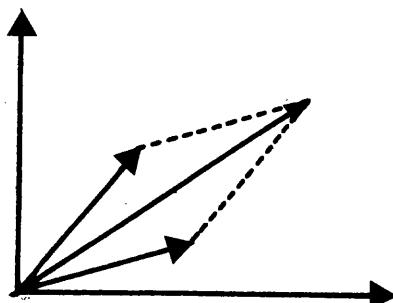


Fig. 3

$$(4+j) + (2+3j) = 6 + 4j$$

El complejo suma representa el vector suma de los vectores sumandos.-

Producto de complejos.

El producto de complejos puede hacerse en la notación binómica, recordando la propiedad $j^2 = -1$.-

Ejemplo:

$$(3 + j) (1 - 2j) = 3 - 6j + j - 2j^2 = 5 - 5j$$

Se obtiene un resultado más expresivo haciendo el producto con la notación polar. El complejo producto tiene como módulo, *el producto de los módulos* de los factores, y como argumento, *la suma algebraica de los argumentos*.

En la Fig. 4 se representa el producto de los complejos: $3\angle 20^\circ$ y $2\angle 45^\circ$.-

El producto es: $6\angle 65^\circ$

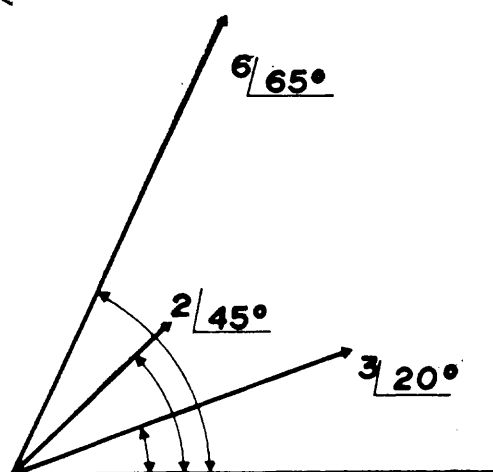


Fig. 4

Si un factor es la unidad imaginaria, j , el producto por cualquier complejo conserva el módulo y el argumento suma 90° .-

El factor j actúa como un *operador de rotación*: aplicado a cualquier complejo, lo gira un ángulo recto en sentido *antihorario*. (Fig. 5).-

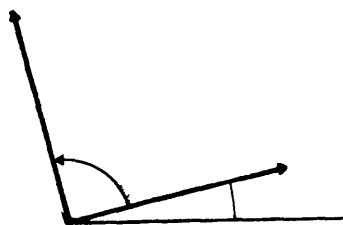


Fig. 5

Si un factor es de módulo 1: $1 \angle \phi$, el producto por cualquier complejo tendrá el mismo módulo y la suma de los argumentos.

Es decir que el factor $1 \angle \phi$ actúa como un operador de rotación de ángulo ϕ :

Si el complejo representa una senoide, al multiplicarla por este factor se desplaza *la fase* de la senoide correspondiente.

Si un factor es real, es decir de argumento cero, el producto por cualquier complejo tendrá el argumento de este. Un factor real actúa como un operador que magnifica un vector sin girarlo, fig. 6.-

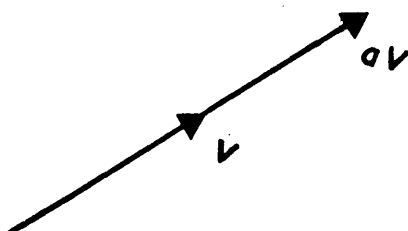


Fig. 6

En general, cualquier complejo $Z \angle \phi$ puede interpretarse a su vez como producto de un número real Z y uno complejo de módulo 1: $1 \angle \phi$. - En un producto, someterá al otro factor a dos operaciones sucesivas: *una magnificación de valor Z y una rotación de ángulo ϕ .*

Una expresión $V = Z I$ se puede interpretar como dos sinusoides la corriente y el voltaje, y un factor Z que modifica *la amplitud y la fase* de la corriente.-

Cuando los rectificadores deben suministrar potencias grandes, resulta conveniente construirlos a partir de un sistema de alimentación de alterna trifásico. Se obtiene de esa manera un mejor aprovechamiento de la potencia, - Mejora el rendimiento en la conversión de potencia alterna a potencia de continua entregada a la carga respecto al rectificador monofásico. - La ondulación se reduce sensiblemente en comparación a los rectificadores monofásicos (disminuye el ripple). -

En un sistema trifásico, se tienen tres líneas cuyos voltajes son sinusoides de igual amplitud y frecuencia, defasadas entre sí un tercio de ciclo (120°).

En la Fig. 1 se representan las tensiones de las líneas A, B, C, respecto al neutro N y en la Fig. 2 el diagrama vectorial correspondiente. -

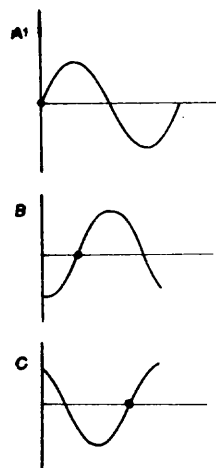


Fig. 1

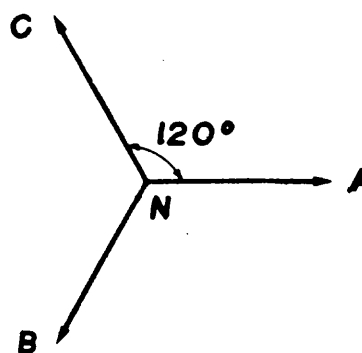


Fig. 2

Supongamos un transformador trifásico cuyos secundarios poseen un borne común, configuración *estrella*.

En la Fig. 3 se representa un circuito rectificador de *media onda* armado a partir de ese sistema de alimentación, -

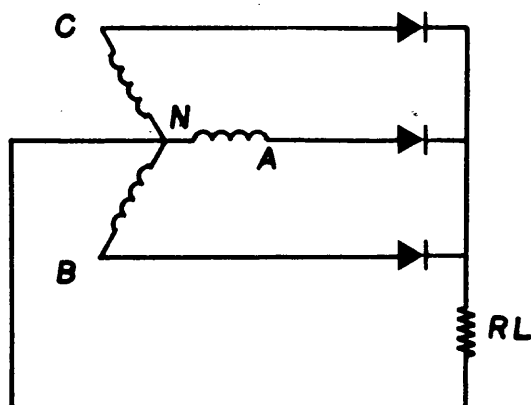


Fig. 3

Para analizar la conducción de los tres diodos es necesario superponer las tres sinusoides. En cada momento, *la mayor tensión provocará la conducción de un diodo y el corte de los dos restantes.*-

En la Fig. 4 se observan la forma de onda del voltaje. Para la rectificación, cada fase actúa solamente durante un tercio del ciclo (120°).-

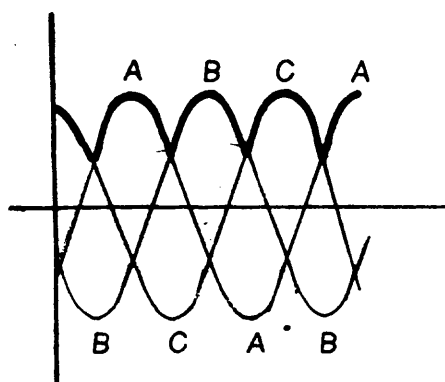


Fig. 4

Puede apreciarse que el voltaje rectificado es menos variable que el del rectificador monofásico. La tensión no llega nunca a cero.-

En la Fig. 5 se representa un rectificador trifásico de onda completa. Se emplea el mismo diagrama para analizar las ondas. En este caso se agrega a la Fig. 4, la conducción de la fase C entre los picos de las fases A y B y así sucesivamente.-

Un análisis cuidadoso del mismo muestra que los caminos de circulación de la corriente cambian seis veces por ciclo, según los valores relativos que tengan las tensiones en las distintas fases.-

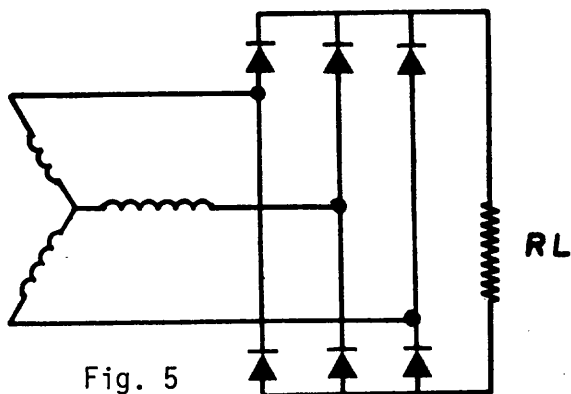


Fig. 5

En la Fig. 6 se representa la forma de onda del voltaje rectificado.

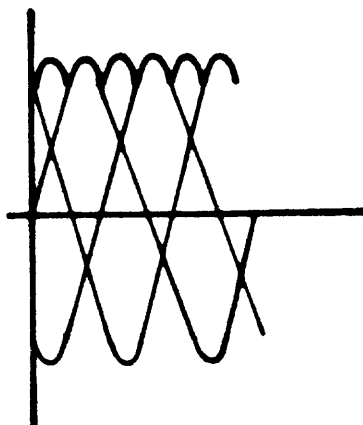


Fig. 6

Con esta configuración, se consigue un ripple de 4,2%.-

El diseño de una fuente de poder debe comenzar por la configuración.

La elección de una configuración para el rectificador debe satisfacer condiciones electrónicas y económicas.

En fuentes que deben suministrar valores elevados de potencia, conviene recurrir a rectificadores trifásicos. En aplicaciones de pequeña potencia se emplean rectificadores monofásicos. El rectificador de media onda constituye una solución de bajo costo, adecuada en aquellos casos que toleran ondulación.

Cuando se exige ondulación mínima, se recurre a las configuraciones de onda completa.

Una vez elegida la configuración se procede a diseñar el rectificador y el filtro para obtener la tensión, corriente y ondulación deseada.

Dadas las características no lineales de los circuitos rectificadores, el análisis exacto es demasiado complejo. Para el estudio y diseño se recurre a curvas que vinculan los distintos parámetros.

Analizaremos el caso del rectificador de onda completa con filtro capacitivo (Fig. 1) por considerarlo el más empleado.

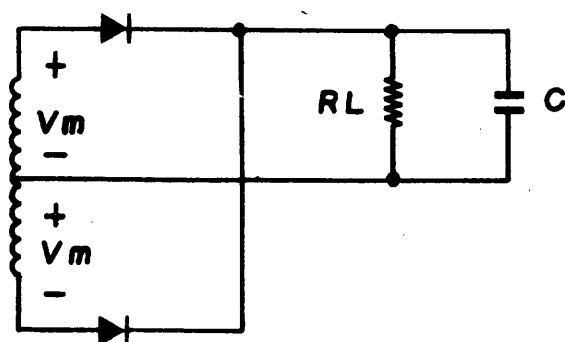
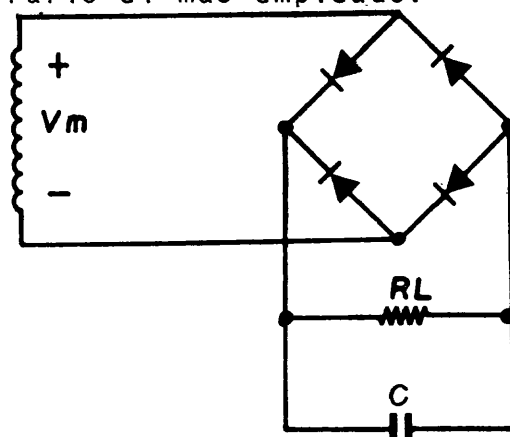


Fig. 1



En la Fig. 2 se reproduce la familia de curvas que dan la relación entre el voltaje de continua en la carga V_o y la amplitud del V_m del voltaje de alterna suministrado por el transformador.

en función de $R_L C \omega$ (ω es la pulsación del voltaje de alimentación).

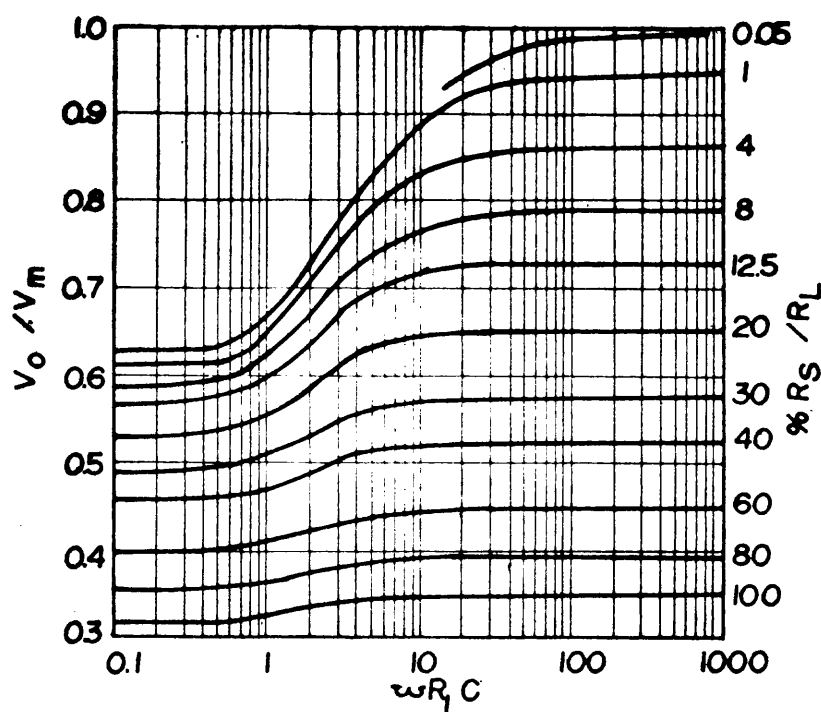


Fig. 2

Como parámetro de estas curvas se tiene la relación porcentual entre la resistencia R_s del devanado del transformador y la resistencia de carga R_L :

$$100 \frac{R_s}{R_L}$$

La resistencia R_s del transformador consta de la resistencia del devanado secundario y la reflejada por el primario.

Ejemplo : Diseñar una fuente para obtener un voltaje continuo $V_o = 12V$ y un consumo de 600 mA.

La resistencia R_L que expresa este consumo es:

$$R_L = \frac{12}{0,6} = 20\Omega$$

Para que al variar la carga la tensión de la fuente no varíe demasiado (es decir para tener buena *regulación*), la Fig. 2 muestra que conviene trabajar con valores altos del producto $R_L C_w$. Surge de las curvas que la condición:

$$R_L C_w > 10$$

es adecuada.

En el ejemplo, con un capacitor de filtro de $C = 2000 \mu F$, se tiene:

$$R_L C_w = 12,56 \quad (f = 50 \text{ Hz})$$

Supongamos que se tiene un valor de $R_s = 1 \Omega$ para la resistencia del transformador (devanado secundario más lo reflejado por el primario). Entonces:

$$100 \frac{R_s}{R_L} = 5 \%$$

La Fig. 2 permite determinar entonces:

$$\frac{V_o}{V_m} = 0,82$$

El transformador deberá suministrar un voltaje alterno:

$$V_m = \frac{12}{0,82} = 14,6 \text{ V}$$

Debe tenerse presente que cada diodo de silicio implica una caída en conducción del orden de 0,6 a 1V, que no puede despreciarse en este caso. Según sea el rectificador empleado se tendrá:

$$V_m = 15,3 \text{ V} \quad (\text{rectificador simétrico})$$

$$V_m = 16 \text{ V} \quad (\text{rectificador puente})$$

El transformador debe suministrar entonces 10,8 u 11,4 V eficaces respectivamente.

La curva de la Fig. 3 (caso capacitivo) permite determinar la ondulación (*ripple*) de donde se obtiene:

$$\gamma = 7\%$$

Esta cifra quiere decir que el valor eficaz de la ondulación es:

$$0,07 \times 12 = 0,84 \text{ V.}$$

Si se considera alto este valor, se debe *aumentar C*, se debe emplear *filtros - adicionales* o se debe emplear un *regulador electrónico*.

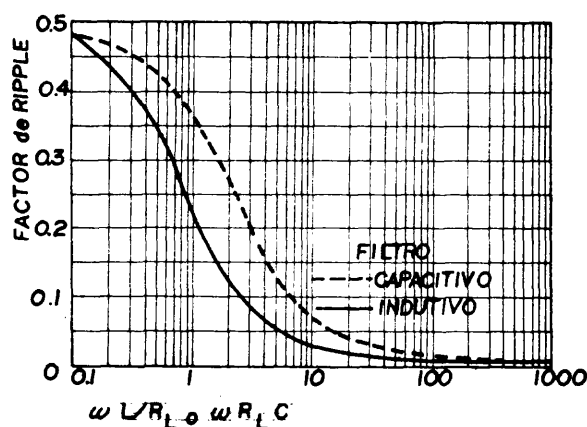


Fig. 3

Los diodos rectificadores deben cumplir las condiciones:

- el voltaje de pico inverso será 14,6 V en la configuración puente y 29,2V en la de rectificador simétrico.
- La corriente media será en ambos casos 300 mA, ya que cada diodo aporta la mitad de la que circula por la carga.
- la corriente de pico puede determinarse a partir de tablas. Se obtienen corrientes de pico que llegan a 8 ó 10 veces el valor de la corriente media. Los diodos rectificadores de silicio toleran, en general, valores de pico mayores, por lo que esta condición no es crítica.
- Al encender la fuente de poder, la carga del capacitor de filtro no es instantánea. Demorará tanto más cuanto mayor sea este capacitor. Esto implica que durante los primeros ciclos de funcionamiento, la corriente por los diodos será mucho mayor que en régimen.



gimen. Está limitada por la resistencia serie de los devanados del transformador o por un resistor colocado a estos efectos.

Los diodos de silicio poseen un límite de corriente de encendido (Peak Surge Current) mayor que el pico repetitivo.

En el ejemplo analizado la corriente inicial alcanza el valor de pico de:

$$\frac{V_m}{R_s} = 14,6A$$

En un amplificador lineal ideal una señal de entrada sinusoidal genera una señal de salida también sinusoidal. Cuando se implementan amplificadores reales, se observa que la señal que se obtiene a la salida *no es una réplica fiel de la señal de entrada*.

Se distinguen distintos orígenes de la *deformación o distorsión*: transferencia no lineal y distorsión de frecuencia o de fase.

Transferencia no lineal

En la medida en que el amplificador real está construido con dispositivos que no son absolutamente lineales, la transferencia del circuito no es lineal.

En este caso *aparecen*, en la señal de salida, *frecuencias que no están presentes en la señal de entrada*.

En un amplificador lineal de ganancia A, la señal de salida es proporcional a la entrada:

$$X_o = A X_i$$

relación que se representa en la recta de la figura 1.

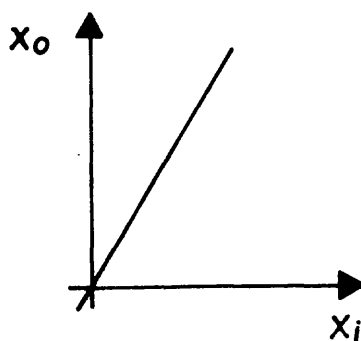


Fig. 1

Si la señal de entrada es sinusoidal, $X_i = X \cos wt$, la salida es una senoide proporcional:

$$X_o = A X_i = A X \cos wt.$$

Si la ganancia es $A = 10$ y la amplitud es $X = 1$ V., la salida es una señal de forma idéntica a la de entrada y de amplitud 10 V.

En un amplificador real no se obtiene una relación lineal. La curva de transferencia en función de la amplitud se aparta de una recta y tiene, por ejemplo, el aspecto señalado en la figura 2.

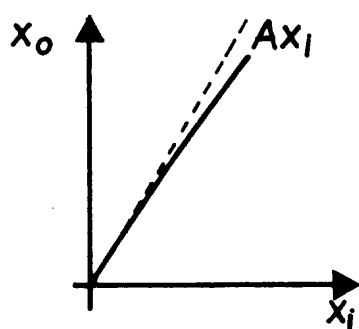


Fig. 2

Distorsión armónica.

Supongamos que la curva real se puede representar aproximadamente por una relación de tipo parabólico:

$$X_o = AX_i - B X_i^2$$

A partir de una señal de entrada sinusoidal $X_i = X \cos wt$, resultará una salida:

$$X_o = A X \cos wt - BX^2 \cos^2 wt = A X \cos wt - \frac{B X^2}{2} - \frac{BX^2}{2} \cos 2wt$$

Se observa que a la señal amplificada linealmente, se agregan dos componentes no deseadas:

- una señal de frecuencia doble: $2wt$. Por esta causa, se habla de *distorsión armónica*.
- una señal de continua, que altera el valor fijado por el circuito de polarización. En otras palabras, la distorsión no lineal trae aparejada una *rectificación*.

Supongamos que la ganancia lineal es $A = 10$ y que con una señal de entrada sinusoidal de amplitud $X = 1$ V. La amplitud máxima de la señal de salida no es 10 V. En este caso $B = 1$.

En la Fig. 3 se dibuja la señal de salida resultante. Se observan los efectos de la distorsión no lineal: corrimiento de la continua en 0,5 V y aparición de una señal de segunda armónica de 0,5 V de amplitud.

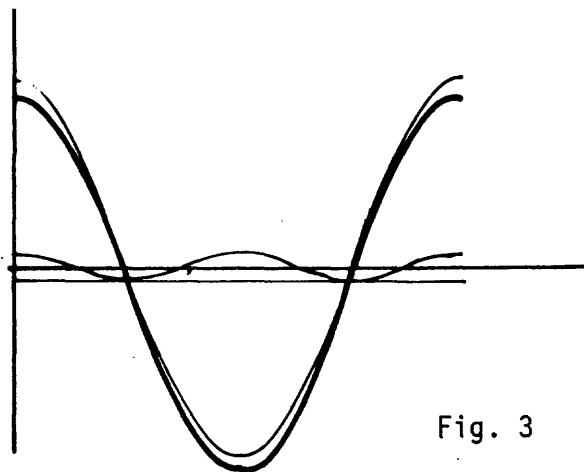


Fig. 3

Se mide la distorsión armónica por el cociente entre las señales agregadas y la señal conecta (a veces expresado en porcentaje):

$$\text{distorsión} = \frac{\frac{BX^2}{2}}{AX} = \frac{BX}{2A} = 100 \frac{BX}{2A} \%$$

En el caso analizado se tiene:

$$\text{distorsión} = 0,05 = 5\%$$

Como se aprecia cualitativamente en la Fig. 2, y cuantitativamente en la expresión de la distorsión, la distorsión será *tanto mayor cuanto más grande sea la señal de entrada*. Con señales muy pequeñas, la curva real se aproxima bien por la representación lineal y la distorsión es poco importante. En el caso analizado se tiene:

X = 0,1 V.	distorsión = 0,5 %
X = 1 V.	distorsión = 5 %
X = 2 V.	distorsión = 10 %

En casos más complejos, la curva real de la transferencia tendrá más términos en la serie de potencias:

$$X_o = A X_i + B X_i^2 + C X_i^3 + \dots$$

La representación parabólica corresponde a tomar dos términos de esta serie. El análisis es igual al ya realizado. Aparecen ahora señales de frecuencia 2ω , 3ω , etc.

Intermodulación

Si la señal de entrada a una transferencia no lineal es la suma de dos señales sinusoidales de distinta frecuencia: ω_1 y ω_2 , a los efectos analizados anteriormente (rectificación y distorsión armónica) se agrega la presencia de nuevas señales. Si la entrada es:

$$x_i = X_1 \sin \omega_1 t + X_2 \sin \omega_2 t$$

la transferencia no lineal da lugar a términos de la forma:

$$2X_1X_2 B \sin \omega_1 t \sin \omega_2 t = X_1X_2B \cos (\omega_1 - \omega_2)t - X_1X_2B \cos (\omega_1 + \omega_2)t$$

A este fenómeno de aparición de señales de frecuencia suma y diferencia de las frecuencias de las señales de entrada, se le llama *intermodulación*.

Ejemplo : Si a la entrada se tienen señales de frecuencia 1000 Hz y 1005 Hz, por intermodulación se tendrán en la salida señales de frecuencias 2005 Hz y 5 Hz, además de las señales de 2000 Hz y 2010 Hz por distorsión armónica.-

Distorsión en frecuencia y fase.

La transferencia de un amplificador varía con la frecuencia de la señal aplicada. En un cierto rango de frecuencias, esta ganancia es constante. Pero en altas y bajas frecuencias, la ganancia cae (Fig. 4) debido a limitaciones inherentes a las componentes o al circuito. En altas frecuencias, la caída puede deberse a capacidades de los elementos activos, capacidades parásitas, o circuitos de acoplamiento y compensación deliberadamente incluidos en el amplificador.

DISTORSIÓN

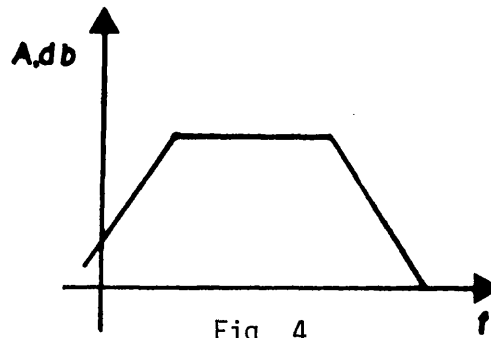


Fig. 4

Si la ganancia se expresa como un número complejo, su módulo y su fase variarán con la frecuencia al apartarse del rango de frecuencias para el cual se ha diseñado el amplificador.

Esta variación se representa usualmente por *diagramas de Bode*, que son diagramas doblemente logarítmicos para la ganancia (dB y frecuencia en escala logarítmica) y simplemente logarítmicas para la fase (ángulo de fase y frecuencia en escala logarítmica).

En la Fig. 5 se representan los diagramas reales y sus aproximaciones por rectas quebradas para el caso de un circuito RC pasabajos, que en muchos casos comanda la conducta de un amplificador en alta frecuencia.

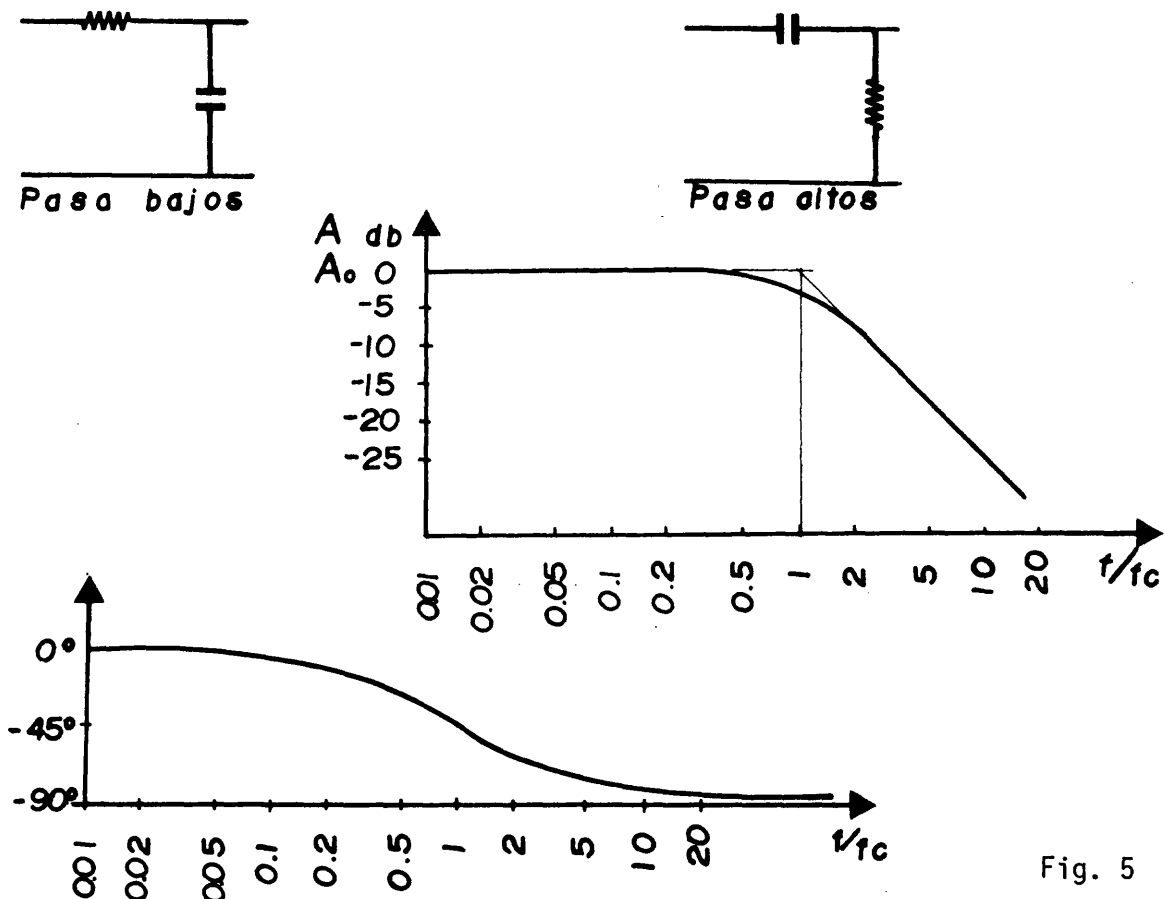


Fig. 5

Si se aplican a un amplificador señales ubicadas en la zona de caída de la ganancia del amplificador, resultarán amplificadas en diversa magnitud y con distinto defasaje. Resultan, en la señal de salida, deformaciones llamadas respectivamente *distorsión de frecuencia y de fase*.

Para tener a la salida una señal que conserve la forma de la señal de entrada, todas las componentes de la señal de entrada deberán ser amplificadas en la misma magnitud y defasadas en el mismo ángulo.

En general, para cada frecuencia se tiene una ganancia y una fase. En la figura 6 se representa un amplificador con distorsión en fase, mediante una ganancia compleja A/θ .

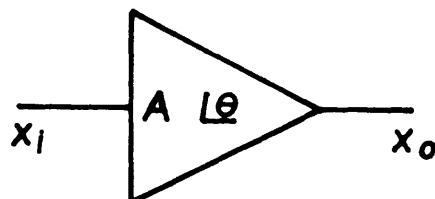


Fig. 6



Los amplificadores reales constituyen aproximaciones buenas al modelo ideal. Los distintos tipos de distorsión introducen deformaciones en las señales que son procesadas.

Hay otro tipo de limitación que caracteriza a los amplificadores reales.

En ausencia de señal de entrada, se tiene una pequeña señal de salida, llamada *ruido*.

Esa salida es, en general, de muy bajo nivel, pero *pone un límite al tamaño de las señales que se pueden procesar*. En efecto, cuando se deben simplificar señales muy pequeñas, resulta difícil distinguirlas del ruido. Tal es el caso de señales débiles procedentes, por ejemplo, de estaciones de radio muy lejanas.

Diversas son las causas que generan el ruido en un amplificador.

Se llama ruido *térmico* al originado por las fluctuaciones de energía de los portadores con un conductor o un semiconductor.

Ejemplo: En un resistor de $1\text{ M}\Omega$, a la temperatura ambiente, sobre un ancho de banda de 10 KHz , se desarrolla un voltaje de ruido término de $13\mu\text{V}$. Si un amplificador de audio posee a la entrada un resistor de esta magnitud y posee ganancia 1000, a la salida, *exista o no señal aplicada*, aparecerá una señal de ruido de 13mV .

Para caracterizar la conducta de un amplificador desde el punto de vista del ruido, se define un *número de ruido* (noise figure) NR, como cociente entre la potencia de ruido de salida del amplificador y la potencia de ruido que se tendría a la salida si la única fuente de ruido fuera el resistor R_s del generador. Es decir que el número de ruido compara el ruido de un amplificador real con el de un amplificador ideal que no genera ruido. Se mide en decibels.

Si un amplificador cuya ganancia en potencia es A , debe procesar una señal cuya potencia de entrada es S_i :

$$S_o = A S_i$$

Sea R_i la potencia de ruido presente a la entrada (asociada a la resistor R_s del generador).

$$NR = 10 \log \frac{R_o}{A R_i} = 10 \log \frac{S_i R_o}{S_o R_i} = 10 \log \frac{S_i / R_i}{S_o / R_o}$$

La relación S/R entre potencias de señal y de ruido, se llama *relación señal-ruido*.

Resulta entonces que el número de ruido es el cociente de las relaciones señal-ruido a la entrada y a la salida. En decibels, es la diferencia de las relaciones señal-ruido a la entrada y a la salida.

Ejemplo: En el amplificador mencionado, si se aplica una señal de 0,13 mV se tiene a la salida una señal de 0,13 V. El ruido a la salida será de 13mV por causa del amplificador. La relación señal-ruido a la salida es de *diez veces* o 20 dB.

En la práctica, el ruido de un amplificador está determinado por su etapa de entrada (preamplificador) ya que el ruido introducido en las etapas siguientes experimenta una amplificación mucho menor.

Las máquinas de corriente continua están constituidas por las siguientes partes fundamentales desde el punto de vista electromagnético: los devanados, el circuito magnético y el colector.

En la figura 1, se ve un corte de una máquina de corriente continua por un plano perpendicular a su eje donde se indican los devanados y los polos.

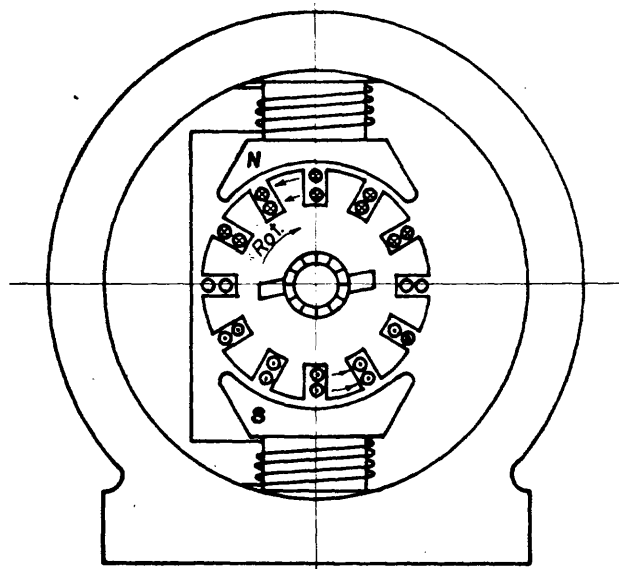


Fig. 1

Los polos están en la parte fija, llamada *estator*, y sobre los mismos se coloca el devanado de *excitación*, llamado también *campo*.

La parte giratoria, llamada *rotor*, es ranurada. El devanado se coloca en las ranuras, debidamente acunado y zunchado para evitar que se desplace cuando gira la máquina.

Las bobinas están conectadas entre sí y con el colector. Este último realiza la rectificación de la corriente y, además, permite el pasaje de la misma desde el rotor, que está en movimiento, al estator.

En la figura 2 se ve el circuito magnético de una de estas máquinas con el flujo principal en un corte análogo al de la figura 1.

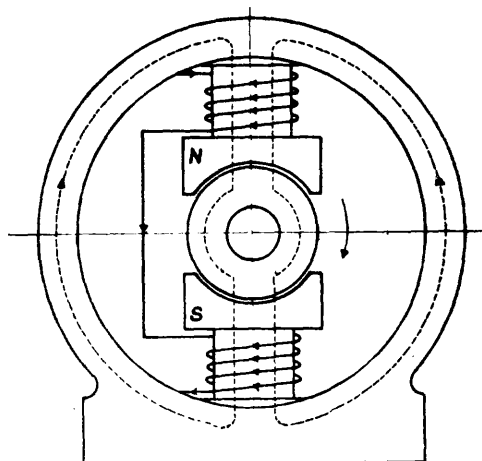


Fig. 2

Se observa que esta máquina tiene dos polos, pero es habitual que se construyan máquinas con dos o más pares de polos.

En la Fig. 3 se ve el corte de una máquina con tres pares de polos en la que se indican los flujos principales.

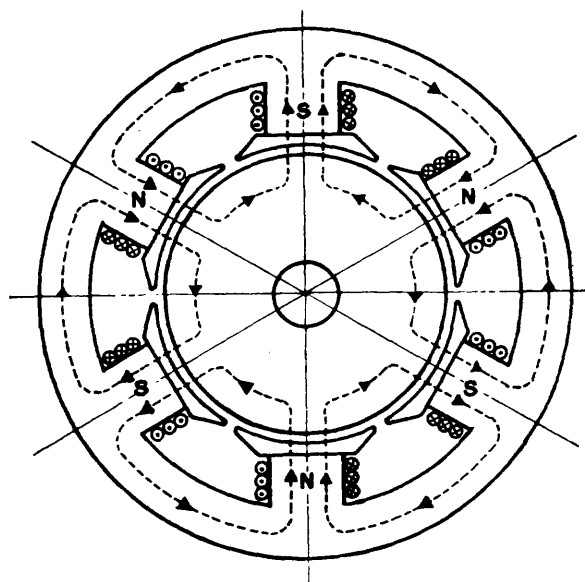


Fig. 3

En la figura 4 se ve un rotor. Sobre el núcleo magnético ranurado está colocado el devanado. Las cabezas de las bobinas están situadas fuera del circuito magnético y se ven en ambos extremos.

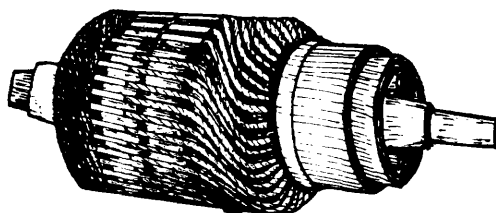


Fig. 4

El colector está situado en uno de los extremos de la máquina y las bobinas se conectan a las *delgas* del mismo.

Las escobillas fijas y soportadas por portaescobillas se deslizan sobre las delgas del colector en movimiento.

El núcleo magnético ranurado situado en el rotor se construye laminado para reducir las pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault.

En la figura 5 se ve una bobina. Estas se preparan previamente. Se moldean y aíslan y luego se colocan en las ranuras. El metal conductor es cobre y se emplean distintas clases de aislaciones que están normalizadas. Cada clase tiene una temperatura máxima de funcionamiento admisible en servicio continuo.

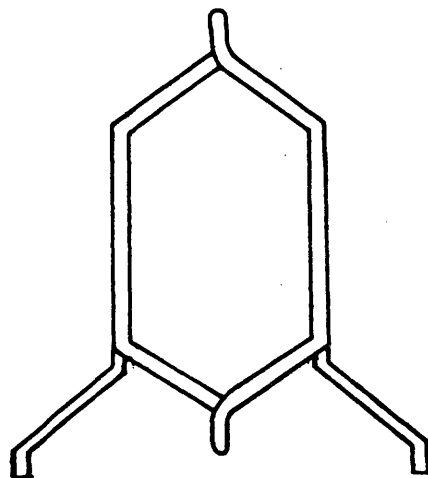


Fig. 5

Uno de los lados de bobina se coloca en la parte superior de la ranura y el otro en la inferior, lo que hace que las cabezas de las mismas queden bien encajadas y se logre un devanado bien simétrico desde los puntos de vista eléctrico y mecánico.

Como ya se indicó, es indispensable asegurar bien el devanado para impedir que se desplace por acción de la fuerza centrífuga.

El colector está formado por delgas aisladas entre sí. Los materiales usados en los colectores son, por ejemplo, cobre para las delgas y mica para la aislación.

Las escobillas son de carbón amorfo, de carbón grafitado, de grafito, de electrografito o de metalgrafito.

Las de electrografito tienen gran resistencia mecánica, óptima conductividad y buena lubricación.

Las de metalgrafito son blandas, muy conductoras, de baja caída de tensión en el contacto y poco desgaste.

Conexión de las máquinas de corriente continua

Una máquina de este tipo tiene cuatro terminales: dos correspondientes al devanado inductor y dos al inducido.

Se dice que un dínamo tiene excitación independiente cuando su inductor está conectado a una fuente separada de corriente continua. En la figura 1, se ve el esquema de conexión correspondiente. Se agrega un reóstato para cambiar la corriente de excitación.

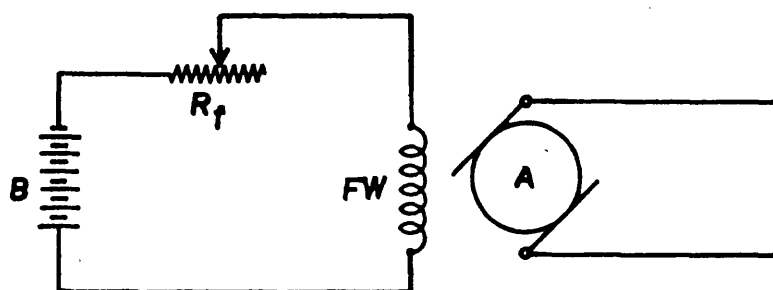


Fig. 1

En general, los dínamos funcionan auto-excitados, es decir, que su inductor no se conecta a una fuente separada sino que se conecta al inducido.

Existen dos conexiones fundamentales: la *paralelo (shunt)* y la *serie*.

En las figuras 2 y 3 se esquematizan ambas. El devanado inductor está, en la primera, conectado en paralelo a través de un reóstato y en la segunda, en serie

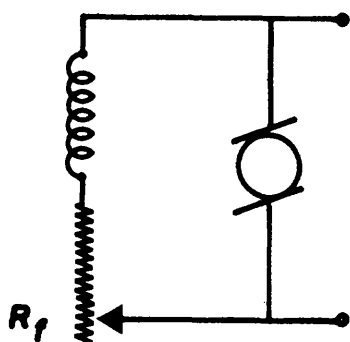


Fig. 2

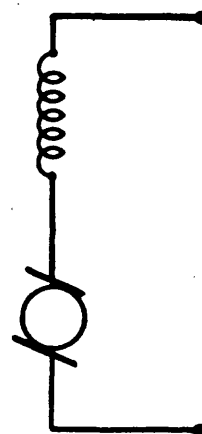


Fig. 3

La máquina compuesta (*compound*) tiene dos devanados inductores, uno de los cuales se conecta en serie y el otro en paralelo.

Un devanado inductor de tipo paralelo se conecta bajo la tensión nominal de la máquina. La corriente que pasa por el mismo es del orden de 5-10% de la nominal de la máquina. -

Un devanado de tipo serie es recorrido por la corriente nominal y tiene una pequeña caída de tensión entre sus bornes.

Esto condiciona el diseño del devanado inductor. Entre otras cosas, las secciones del conductor que se usa en ambos casos y el número de vueltas.

Característica en vacío

Se supone que el dínamo es arrastrado a velocidad constante y tiene excitación independiente. Su inducido no tiene conectada ninguna carga. Se mide la corriente en el inductor (i) y la tensión de salida en el inducido que coincide con la fuerza electromotriz de la máquina (E_o). Se obtiene una curva como la indicada en la figura 4. La curva (a) corresponde a la variación de la corriente del inductor entre 0 e i_m y la (b), entre i_m y 0.

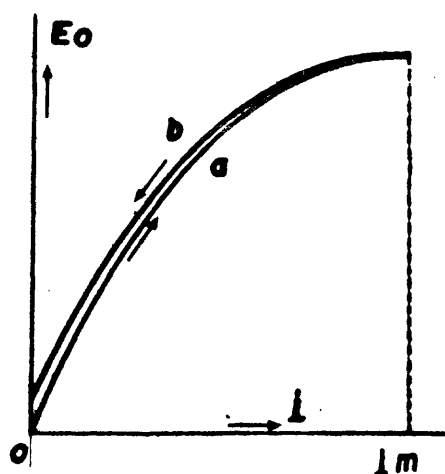


Fig. 4

Las dos curvas no coinciden debido a la histéresis y el valor de E_0 para $i = 0$ no es nulo debido al magnetismo remanente.

$$E_0 = An\phi$$

donde A es una constante propia del devanado inducido,

n es la velocidad de rotación de la máquina (en rpm), y

ϕ es el flujo de la máquina que depende de i y sigue la característica $B(H)$ de los hierros.

Cuando se realiza el ensayo en vacío de una máquina, para determinar esta característica $E_0(i)$ se trata de conectar su devanado inductor en forma independiente empleando una fuente adecuada al mismo, ya que puede ser tipo serie o paralelo, y tal que permita variar la corriente en el rango 0- i_m donde i_m es del orden del valor nominal.

Característica externa del generador paralelo

Esta característica de la máquina permite conocer la tensión en bornes de la máquina (V) en función de la corriente de carga (I).

Para determinar esta característica se emplea el circuito de la figura 5. La máquina a ensayar debe girar a velocidad constante ya que la fuerza electromotriz es proporcional a n y se desea prescindir de esta dependencia.

El reóstato R_f se coloca en cierta posición fijando la fem E_0 en vacío (circuito de carga abierto) y no se cambia durante el ensayo.

Se procede entonces a variar I a partir de cero y se miden los valores de V e I . En la figura 6, se representa una característica externa.

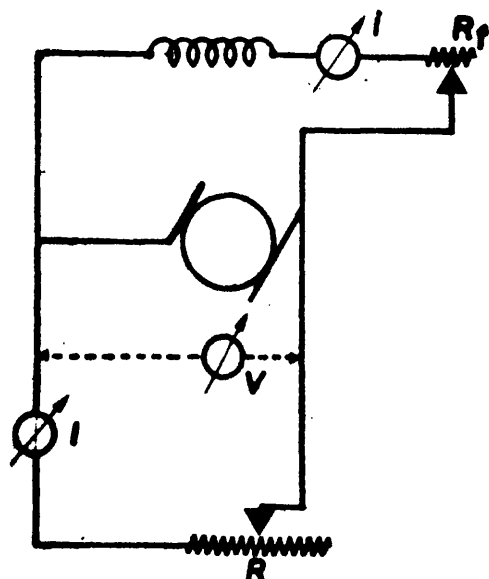


Fig. 5

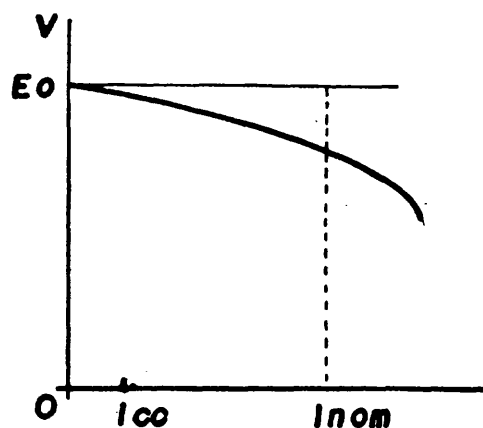


Fig. 6

Se observa que al aumentar I el valor de V disminuye, o sea que aumenta la caída de tensión ($E_0 - V$).

Esta caída de tensión se debe:

1o.-) A la resistencia propia del devanado inducido que da lugar a una caída $R_a I_a$.

2o.-) A la caída de tensión en el contacto entre colector y escobilla y en la escobilla.

3o.-) A la disminución de i debido a que la tensión en bornes del inductor (V) ha disminuido.

4o.-) El campo magnético está determinado por el campo proveniente del inductor y por el campo originado por la corriente en el inducido llamado reacción del inducido. El efecto de la reacción de inducido es disminuir el flujo y por lo tanto la fem.

En general, puede establecerse la siguiente relación:

$$E = V + RI + \epsilon(I)$$

donde: E es la fem para la corriente de excitación que corresponde,

R representa la resistencia de todo el devanado, incluyendo escobillas, y

$\epsilon(I)$ es la caída de tensión por reacción de inducido.

Si se desea que la tensión en bornes de la máquina se mantenga constante, independientemente de la corriente de carga, se puede variar la resistencia R_f compensando con un mayor valor de la corriente en el inductor, y por lo tanto de la fem, la caída de tensión. Este es el principio que usan los reguladores de tensión.

Se hace notar que un generador de conexión paralelo puesto en cortocircuito tiene una corriente I_{cc} sensiblemente inferior a la nominal.

Característica externa del generador serie

Para determinar esta característica se emplea el circuito indicado en la figura 7.

La máquina debe girar a velocidad constante.

La característica externa se ve en la figura 8.

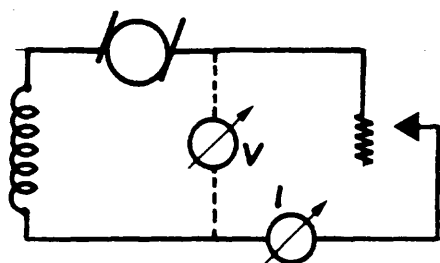


Fig. 7

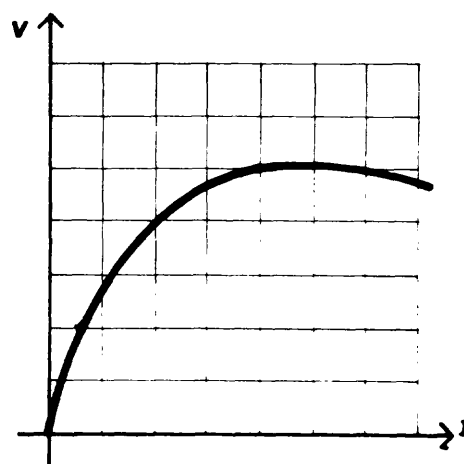


Fig. 8

Se hace notar que la tensión es esencialmente variable y, en la primera parte, tiene un andamio similar a la característica en vacío.

El cortocircuito de un generador de este tipo es peligroso y la corriente de cortocircuito muy elevada respecto de la nominal.

Aplicaciones de los distintos tipos de generador

Generador de excitación paralelo. Se ha visto que este generador tiene una característica externa con una caída de tensión entre vacío y plena carga moderada.

Se presta muy bien para funcionar a tensión constante en los casos en que la carga no está alejada de la máquina y por lo tanto no hay caída de tensión en la línea. Puede emplearse, por ejemplo, para cargar baterías, para calefacción, excitación de alternadores, etc.

Generador de excitación compuesta. Si un generador de tipo paralelo tiene además un inductor serie aditivo pueden lograrse características externas como las que se indican en la figura 9.

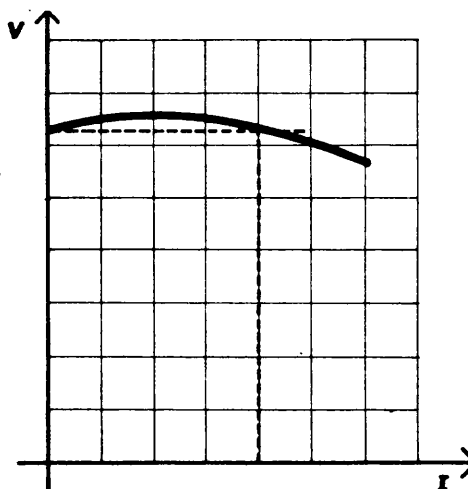


Fig. 9

Estos generadores, llamados compuestos (compound), son los más empleados y son especialmente adecuados para circuitos que requieren tensión constante en las cargas. Por ejemplo, se emplean para alimentar motores, sistemas de iluminación, etc.

Generador de conexión serie. Por ofrecer su tensión la característica de variar con la corriente de carga sólo se emplea para usos muy especiales.

A partir de la energía mecánica proveniente de un motor de arrastre, los generadores eléctricos suministran energía eléctrica.

Las máquinas que generan corriente continua se llaman *dinamos*. Las máquinas que generan corriente alterna se llaman *alternadores*.

Se estudiará el comportamiento de una máquina de corriente continua acoplada a un motor de arrastre.

Se supone que el rotor está girando a una velocidad constante y que el devanado del estator, *inductor*, ha sido conectado a una fuente de corriente continua. Se establece así un campo magnético en el cual se desplazan los conductores del devanado del rotor, inducido.

Si se considera una de las bobinas de dicho devanado se generará en ella una fem de tipo alterna que cumplirá un ciclo cuando la bobina recorra un par de polos.

Para lograr que la corriente sea continua se debe rectificar, para lo cual puede emplearse un par de escobillas.

En la figura 1, se muestra una bobina y un colector elemental para explicar cómo se realiza la rectificación.

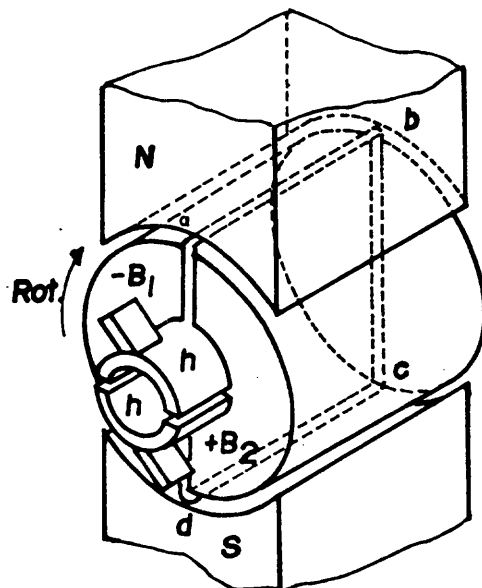


Fig. 1

Cada extremo de la bobina está conectado a una delga (h) que en este caso tiene una amplitud angular que no es la real. Las escobillas fijas en el espacio, deslizan sobre las delgas y llevan a las conexiones exteriores una corriente unidireccional, quedando fija la polaridad de cada una de las escobillas (B1 y B2).

Devanado inducido

Ya se mostró un devanado elemental constituido por una sola bobina.

En las máquinas reales se emplea el llamado inducido de tambor, formado por bobinas que se alojan en las ranuras del rotor.

Las bobinas, conectadas eléctricamente en serie, se agrupan en vías. Una máquina tiene dos o más vías en paralelo según sea la conexión elegida.

En lo que sigue, por razones de simplicidad, se considerará exclusivamente la conexión llamada imbricada.

En la figura 2 se ve un corte de una máquina de cuatro polos que muestra los conductores en las ranuras, en la disposición llamada a dos haces por ranura. Se ven además las cabezas de las bobinas para indicar qué haces corresponden a cada una y las bajadas a las delgas.

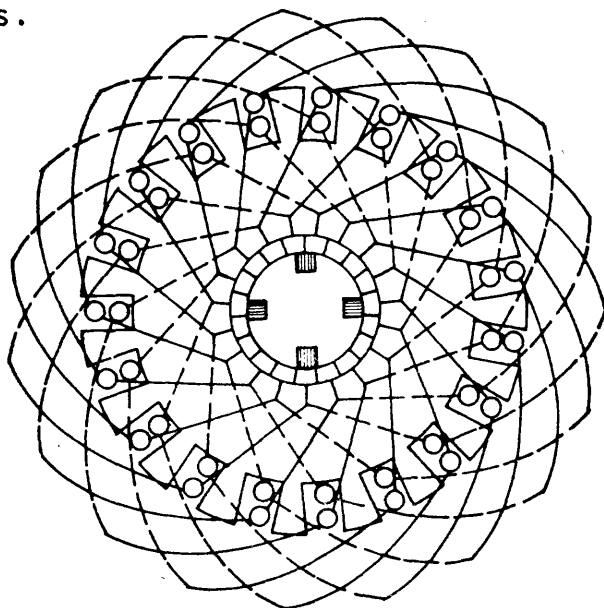


Fig. 2

El devanado está dispuesto en 20 ranuras numeradas y tiene 20 delgas en el colector. Lleva cuatro escobillas unidas eléctricamente de a pares.

En la figura 3, se ve un desarrollo de la superficie cilíndrica del rotor de la máquina de la figura 2. El devanado está esquematizado a la manera convencional. Se indican sombreados los cuatro polos.

El haz situado en la parte superior de la ranura se indica en lleno y el situado en la parte inferior en punteado.

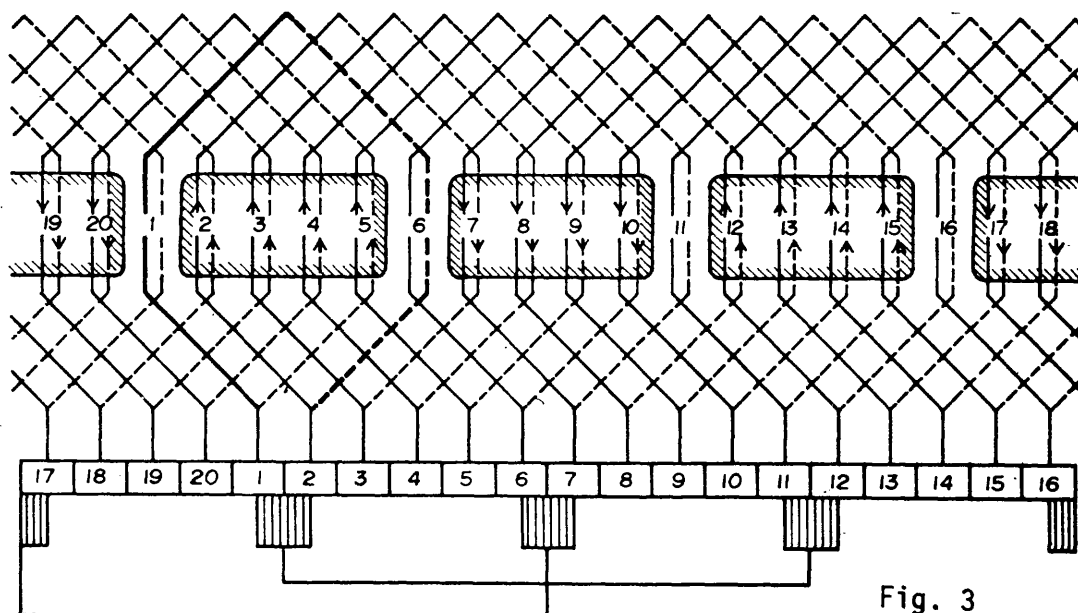


Fig. 3

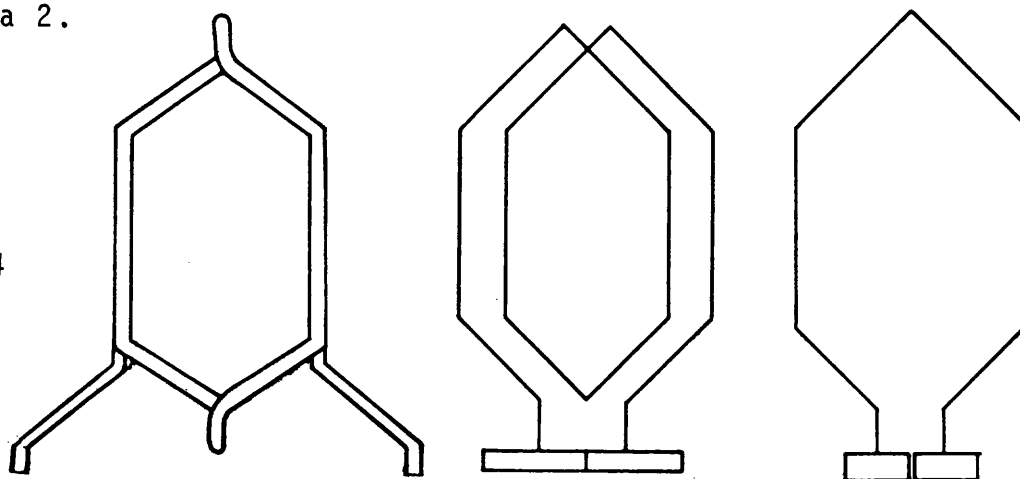
Desarrollo de un devanado de 4 polos, dos haces por ranura, imbricado, 20 ranuras.

Se emplea la misma numeración de las ranuras para facilitar la comprensión.

Como ejemplo, se hará referencia a la bobina 1-6 que tiene un lado en la parte superior de la ranura 1 y el otro en la parte inferior de la ranura 6. Esta bobina tiene más de una vuelta y por lo tanto dos cabezas. En la Figura 3, se indica en la parte superior una de las cabezas y en la inferior las bajadas a las delgas. La bobina 1-6 está conectada a las delgas 1 y 2.

En la figura 4 se muestra una bobina completa con sus conexiones, el esquema eléctrico en el caso de dos vueltas y el que le correspondería en un esquema convencional como el indicado en la figura 2.

Fig. 4



El devanado esquematizado tiene cuatro vías que se conectan en paralelo a través de las escobillas conectadas de a pares.

Para la posición relativa de rotor y escobillas de la figura 3, las bobinas de una de las vías son: 1-6, 2-7, 3-8, 4-9, 5-10.

Dado que el devanado gira, las bobinas de una vía van cambiando con la posición relativa del rotor y las escobillas. Se observa que todas las bobinas de una vía están, en este caso, bajo el mismo par de polos.

Al guiar el rotor con el campo conectado a una fuente de continua, se genera a cada lado de bobina una fem cuyo sentido depende del sentido del campo y de la velocidad de rotación.

Su valor es proporcional a la velocidad de rotación y a la intensidad del campo magnético B . Esta fem se suma a la del otro lado de la bobina, que tiene sentido contrario por estar debajo de otro polo (ver, por ejemplo, bobina 4-9 en la figura 3).



Cada bobina está conectada en serie con todas las de la misma vía y se suman las fems de todas.

Se obtiene así una fem en bornes del devanado inducido que vale:

$$E = A n \phi$$

donde: A es una constante que depende de la máquina y en particular del número de vueltas de cada vía, n es el número de revoluciones por minuto y ϕ es el flujo magnético que depende de la corriente de excitación de la máquina de acuerdo con las características B(H) de los hierros.

En un motor de corriente continua, *se produce*, por la rotación de los conductores en el campo, *una fuerza electromotriz* cuyo valor se calcula como la fem de los generadores.



Todas las instalaciones eléctricas están dimensionadas para condiciones normales de funcionamiento.

En lo que se refiere a intensidades de corriente, existe un valor nominal que puede ser soportado por la instalación indefinidamente, produciendo en la misma elevaciones de temperatura compatibles con una vida razonablemente larga de los distintos materiales que la componen.

Toda instalación puede tener sobrecorrientes importantes por las causas que se analizarán a continuación.

1.- Si la instalación comprende, por ejemplo, motores, las corrientes de arranque son del orden de 2 a 5 veces las nominales. Estas sobrecorrientes son inherentes al funcionamiento de la instalación y tienen como característica un tiempo muy breve de duración.

2.- Por condiciones extraordinarias de funcionamiento, puede haber sobrecorrientes durante breves lapsos. Estas sobrecorrientes pueden ser de hasta 30% aproximadamente.

Cuanto mayor sea la sobrecorriente tanto menor es el tiempo que puede ser admitida en la instalación sin comprometerla ni resultar dañado el aparato que consume excesiva corriente.

3.- Por incorrecto funcionamiento o por cortocircuito pueden aparecer sobrecorrientes muy importantes que es necesario interrumpir rápidamente poniendo fuera de servicio la instalación para evitar el riesgo de incendio, o la destrucción de los aparatos afectados.

Protección contra las sobrecorrientes

Todas las instalaciones deben estar provistas de dispositivos que las protejan automáticamente de las sobrecorrientes, ya sea las de bajo valor porcentual o las de cortocircuito.



Esta protección se instala en todo tipo de instalación, tanto en una importante línea de transmisión o distribución como en una modesta instalación industrial o domiciliaria.

Desde luego, los dispositivos usados son muy diversos; son tanto más elaborados cuanto mayor es la importancia de la instalación y los valores probables de corrientes a interrumpir.

En el caso de cortocircuitos, la interrupción debe lograrse muy rápidamente. En corriente alterna, por ejemplo, ese tiempo es del orden de algunos ciclos.

Dado que el valor de la corriente a interrumpir es del orden de unas 50 veces la nominal en baja tensión, debe cuidarse especialmente el poder de ruptura del aparato empleado o sea la corriente que es capaz de interrumpir con seguridad sin que se produzcan daños en el mismo, salvo los previstos al diseñarlo.

Protección contra sobrecorrientes en las redes de baja tensión

En una instalación domiciliaria es habitual que la protección sea exclusivamente contra los cortocircuitos o sobreintensidades muy importantes y se realice mediante fusibles.

En las instalaciones industriales, que incluyen motores, es habitual incorporar la protección contra sobrecorrientes a los contactores o interruptores que se emplean para conectar o desconectar los circuitos. Esto se hace aun en las más sencillas instalaciones.

Los **contactores** llevan protectores para las sobrecorrientes de bajo valor porcentual. Estas protecciones son de acción diferida de tiempo inverso. A veces llevan, además, una protección instantánea para cortocircuitos.

Es muy frecuente que la protección contra cortocircuitos se realice mediante fusibles que se colocan en serie con los contactores.



Protección de los semiconductores

En las instalaciones en que existen semiconductores, la protección contra sobrecorriente es particularmente difícil. Una sobrecorriente de escasos milisegundos de duración puede destruir un semiconductor, antes de que actúe una protección convencional.

Para la protección de los semiconductores se emplean tres variantes principales:

- 1.- Elegir los semiconductores de modo que puedan soportar las sobrecorrientes posibles en el circuito. Este camino conduce a sobredimensionar los semiconductores, a un estudio muy cuidadoso de los regímenes de trabajo en transitorio y puede no suministrar una protección adecuada en todos los casos.
- 2.- Emplear fusibles u otro tipo de interruptores *especialmente fabricados para proteger semiconductores*.
- 3.- Emplear una *protección electrónica* que detecte la sobrecorriente y actúe a gran velocidad (en microsegundos) de modo de evitar el riesgo principal.

En cualquiera de los casos, la protección de semiconductores es cara y puede ser un elemento decisivo en el costo total de un equipo o de una instalación.

Los fusibles constituyen el medio más simple de interrumpir automáticamente un circuito bajo cortocircuito o sobrecorrientes elevadas.

Son conductores de metal especial (plomo, aluminio, plata, estaño, o aleaciones diversas) calibrados de manera que soportan sin calentamiento notable la corriente nominal y funden cuando la corriente alcanza un cierto valor.

En los casos de corriente nominal pequeña, el fusible está constituido simplemente por un alambre de plomo o de estaño (o una aleación de ambos) que se fija en un soporte y está conectado en serie con la instalación.

En la figura 1 se ven tres fusibles para 500 V y distintas corrientes nominales que se colocan, por ejemplo, en las cabezas del tipo de la que se ve en la figura 2.

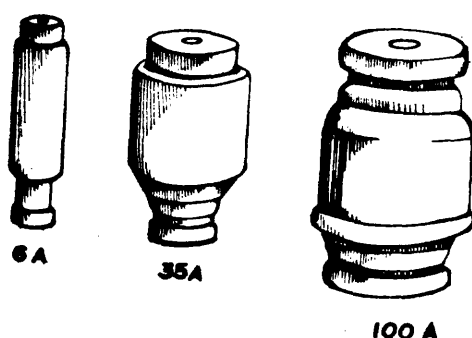


Fig. 1

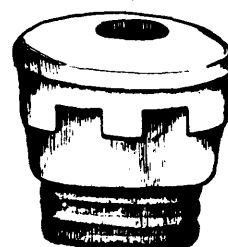


Fig. 2

En la figura 3 se ven las bases sobre las que se atornillan.

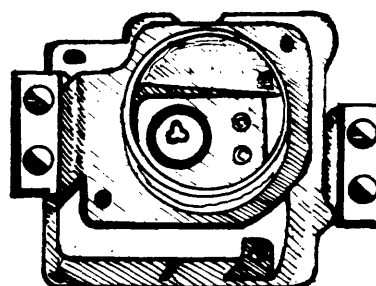
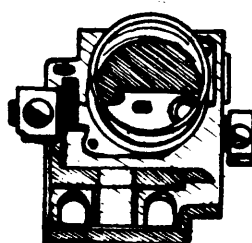


Fig. 3

Este tipo de fusible se emplea, por ejemplo, en instalaciones domiciliarias.

Para intensidades mayores se emplean láminas como la que se ve en la figura 4a.

Cada lámina se coloca en serie con una fase y se fija mediante tornillos.

A veces se emplean dos o tres láminas colocadas superpuestas, conectadas entre sí en paralelo.

Si se desean calibres intermedios se puede tallar ligeramente la parte central, como se ve en la figura 4b.

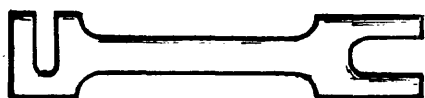


Fig. 4a



Fig. 4b

Otra construcción muy empleada para intensidades mayores es el cartucho fusible. En la figura 5 se muestra uno para corriente nominal 320 A.

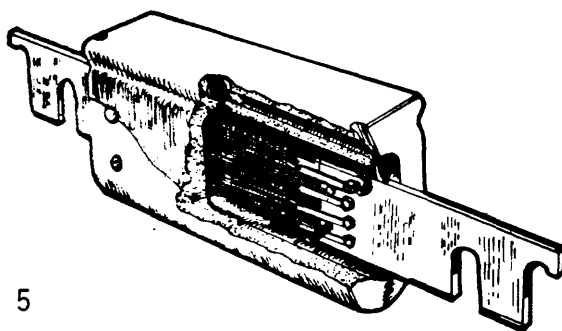


Fig. 5

El fusible propiamente dicho está constituido por varios alambres en paralelo soportados en material aislante, encerrados dentro de un cartucho fabricado de material cerámico, por ejemplo. La cámara está rellena de un material inerte pulverulento que puede ser arena y que ayuda a la extinción del arco que se forma al interrumpirse el circuito.

Estos cartuchos tienen en general una pequeña ventana por la que se ve un hilo de plata, llamado testigo, que permite comprobar si el fusible ha actuado.

Todas estas partes pueden verse en la figura 5 donde, además, se indican las barras de conexión con el circuito que permiten fijarlo al zócalo.

En la figura 6 se muestra un soporte y luego un cortocircuito a fusible trifásico con los cartuchos colocados en soportes del mismo tipo.

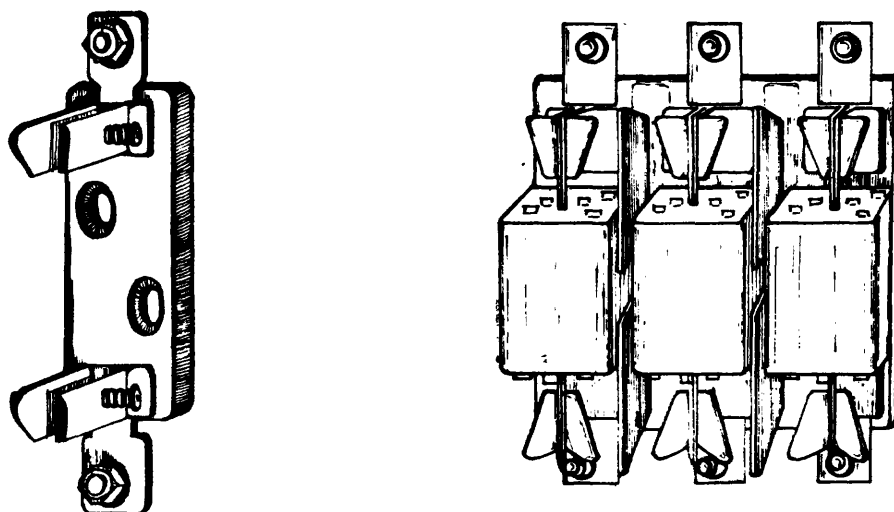


Fig. 6

Cuando el fusible ha actuado tiene que ser reemplazado. Los cartuchos son recargables pero la operación exige mucho cuidado y a veces sólo puede hacerlo el fabricante.



La medida *directa* de la temperatura de un devanado de una máquina o de un transformador es difícil de realizar. Por esta razón existen métodos industriales, normalizados, que permiten reemplazar la medida directa.

La resistencia de un conductor es función de la temperatura. En rangos de temperatura de interés, se linealiza esa dependencia.

$$R_T = R_0 \left[1 + a_0 (T - T_0) \right]$$

donde R_T es la resistencia a la temperatura T
 R_0 es la resistencia a la temperatura T_0
 a_0 es el coeficiente de temperatura a T_0

El coeficiente de temperatura *depende del rango de variación en que se aplique y se cumple:*

$$a_T = \frac{1}{1/a_0 + (T - T_0)}$$

Los valores de resistividad y del coeficiente de temperatura a_0 se dan siempre a una temperatura de referencia de 20°C (en general).

Cuando se desea medir la temperatura de un devanado, luego de un cierto tiempo de funcionamiento en las condiciones de interés de modo de estabilizar las temperaturas, se usa esta propiedad de los conductores.

Se mide como referencia la resistencia del devanado (R_0) a la temperatura ambiente (T_0) *después que se ha dejado sin funcionar un tiempo suficientemente largo como para lograr equilibrio térmico con el ambiente.*

Se mide la resistencia (R_T) que corresponde a la temperatura T alcanzada por el devanado *luego de estabilizada la temperatura de funcionamiento.*

La fórmula *normalizada* para devanados de cobre o aluminio es:

$$R_T/R_0 = (234,5 + T)/(234,5 + T_0)$$

Con esta fórmula se calcula el valor de T en °C.

Ejemplo: Un devanado posee una resistencia de 42Ω a la temperatura ambiente de 22°C . Luego de trabajar dos horas, su resistencia es de 46Ω . Se tiene entonces:

$$\frac{234,5 + T}{234,5 + 22} = \frac{46}{42}$$

De esta ecuación se despeja directamente T :

$$\begin{aligned} 234,5 + T &= 280,9 \\ T &= 46,4^\circ\text{C} \end{aligned}$$

La medida de R_T y R_0 como muestra el ejemplo, debe ser realizada con cierta precisión. Se emplean instrumentos adecuados al valor de la resistencia a medir (en general, es muy baja). Se emplean con éxito, en esos casos, óhmetros de tipo puente.

El método de medida de temperatura por variación de resistencia da una *medida global de la temperatura.*

En muchos casos, las normas de ensayo lo indican como único método de medida.

Una máquina que tiene que suministrar su propia excitación para generar debe cumplir con ciertas condiciones. Si cuando comienza a girar el flujo fuera nulo, esto no sería posible. En general existe un *flujo residual* que permite generar una pequeña fem. Esta da origen a una corriente de excitación i que, si la máquina gira en el sentido apropiado, refuerza el flujo y la máquina aumenta su fem hasta alcanzar el valor de trabajo.

Si la máquina no se cebara, se debe cambiar el sentido de giro o invertir las conexiones del devanado inductor.

El cebado también depende de la resistencia total del circuito inductor.

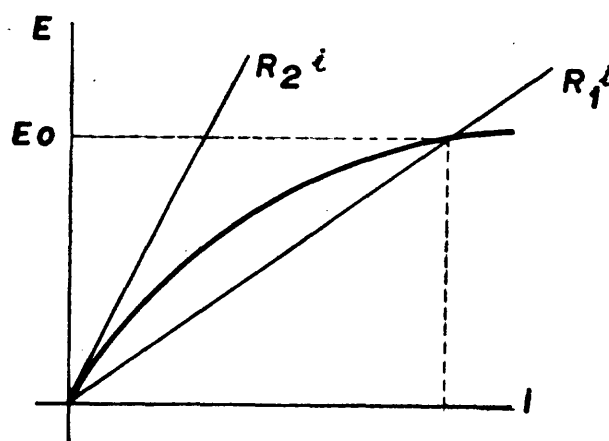


Fig. 1

En la figura 1, se representa la caracterización en vacío de una máquina y la recta R_1 i característica del inductor de resistencia total R_1 . La fem en vacío de esa máquina, una vez cebada, será E_0 .

Si la resistencia es superior a un valor crítico (por ejemplo vale R_2) la máquina no se ceba.

En un generador de alterna el problema es similar.

En estos casos la figura 1 representa la tensión de continua que entrega el dispositivo de excitación: rectificador o dínamo auxiliar.

Sea una bobina por la que circula una corriente i_a . Cuando la bobina llega a la posición en la cual va a cambiar de vía es cortocircuitada por la escobilla. En efecto, en la figura 1, las bobinas 1-6, 6-11, 11-16 y 16-1 están cortocircuitadas.

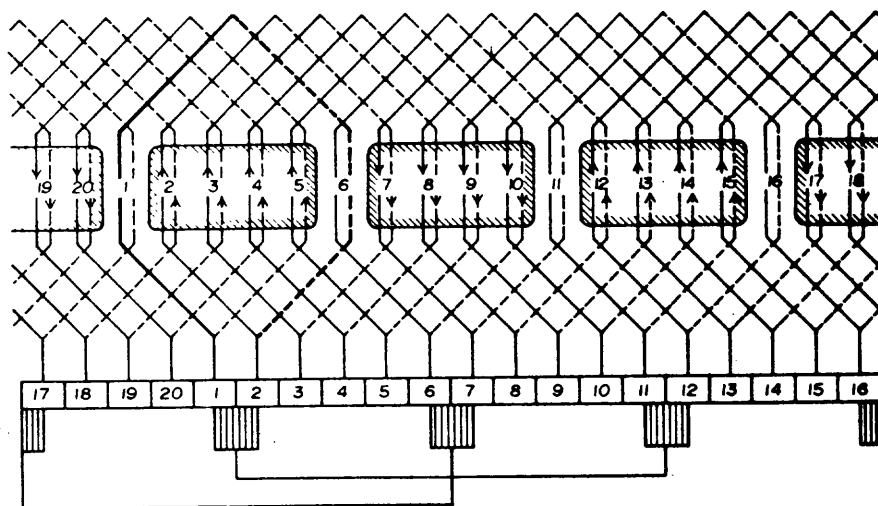


Fig. 1

Una vez que la delga a la cual está conectada la bobina se separa de la escobilla, la corriente en la bobina pasa a valer $-i_a$ o sea que se produjo un salto de amplitud $2 i_a$ en la corriente.

Este cambio y todos los fenómenos que lo acompañan, reciben el nombre de *conmutación*.

En la figura 2 se muestra un esquema de la bobina, las delgas y la escobilla.

Se indican los sentidos de las corrientes.

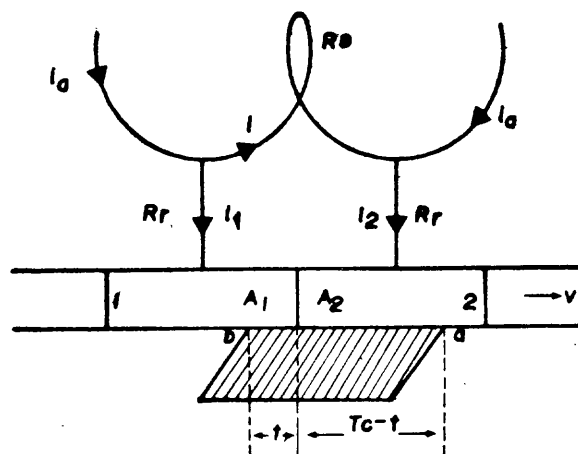


Fig. 2

En la figura 3 se representa la corriente que circula por una bobina en función del tiempo.

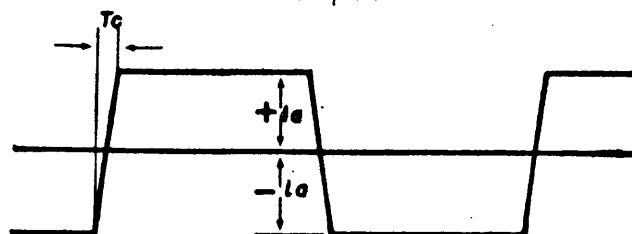


Fig. 3

El valor i de la corriente en la bobina durante el cortocircuito varía según el diseño de la máquina, la posición de las escobillas con respecto al estator, etc.

Al separarse la delga 1 (ver figura 2) de la escobilla, pueden producirse chispas; esto depende del valor de la corriente en la bobina cortocircuitada. Estas chispas pueden llegar a ser peligrosas para el colector.

Para mejorar la conmutación se emplean habitualmente *interpolos* que llevan un devanado de pocas vueltas, conectado en serie con el devanado inducido.

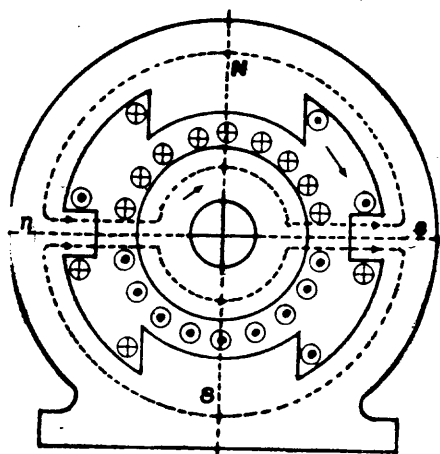


Fig. 4

En la figura 4 se ve un corte de la máquina en el que aparecen los interpolos con su flujo y los devanados. Se indican las polaridades de polos e interpolos.

Un rectificador ideal, con un filtro de capacitor, da como resultado un voltaje de continua igual al máximo del voltaje alterno de entrada.

Se puede emplear este circuito para medir el valor de pico de una forma de onda.

En un caso real, el voltaje de salida no es rigurosamente constante. Cae entre un ciclo y otro del voltaje de entrada (Fig. 1).

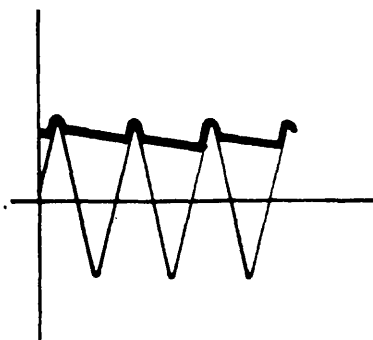


Fig. 1

Consideramos una senoide cuya amplitud varía lentamente en comparación con la frecuencia de la senoide (figura 2).

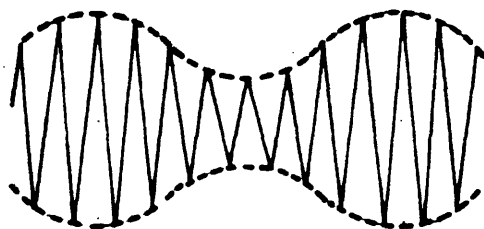


Fig. 2

Esta senoide está *modulada en amplitud*. Se reconocen dos frecuencias en esta forma de onda: la frecuencia de *la señal de alterna*, llamada *portadora*, y la frecuencia de *variación de la amplitud*, mucho menor que aquélla.

Si con esta señal se alimenta un rectificador con filtro de capacitor (Fig. 3) se tendrá como voltaje de salida una réplica de la variación lenta de la amplitud (Fig. 4).

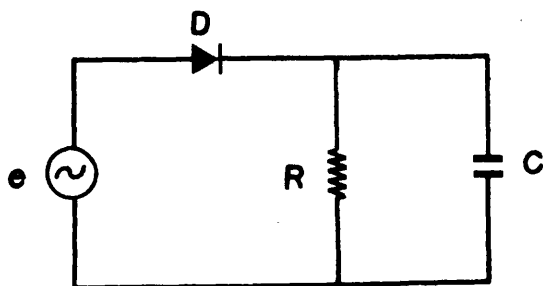


Fig. 3

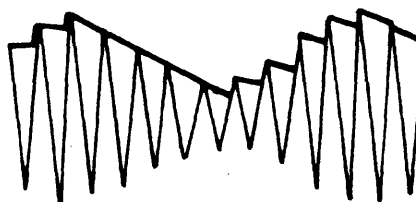


Fig. 4

El proceso descrito se llama *detención* o *demodulación* y tiene gran aplicación en las radiocomunicaciones.

En un caso típico, la frecuencia de la portadora es del orden del MHz y su amplitud varía de acuerdo con el sonido a transmitir (una frecuencia de audio).

En el receptor, la onda modulada en amplitud enviada por la estación transmisora se detecta, extrayéndose de ella la señal de audio para su ulterior procesamiento.



Las normas técnicas de cada país clasifican los aislantes en varias clases de temperatura, según los calentamientos que soportan.

Entre las principales clases encontramos:

En la *clase A*, que corresponde a los de uso general, se hallan los aislantes de origen orgánico: algodón, seda, fibras de acetato de celulosa, papel, madera, impregnados en barnices a base de resinas naturales y aceites, filmes de acetato de celulosa, telas o papeles barnizados.

La *clase B* está constituida por fibras de vidrio, amianto, mica con aglomerantes tales como barnices a base de resinas sintéticas y de aceite, goma laca, compuestos asfálticos o bituminosos, resinas sintéticas. Para la impregnación se emplea asfalto, resinas poliéster y epoxy, etc.

Vida de los aislantes

Estos materiales se hallan sometidos a diversos factores que determinan su deterioro, tales como temperatura, esfuerzos mecánicos, vibraciones, sollicitaciones eléctricas, humedad, polvos, aceite en los aparatos que trabajan sumergidos en él y hasta gases corrosivos.

El efecto de la temperatura y el tiempo que se hallen sometidos a ella, resultan factores decisivos en la vida de los aislantes.

Por ejemplo, a la temperatura constante de 105°C un aislante clase A tiene una vida de 7 años. Un aumento de 8° C disminuye esa vida a la mitad.

Elevación de la temperatura límite

Las normas de los distintos países establecen las elevaciones de temperatura admisibles en servicio continuo de acuerdo con una temperatura máxima del medio refrigerante a la entrada de 40°C si es gaseoso y de 25°C si es líquido y una temperatura máxima de 105°C para los de clase A.

La vida de un devanado puede resultar superior a la que le correspondería por la temperatura máxima, ya que el medio ambiente en muchos países puede considerarse más frío y además el régimen de carga de un devanado rara vez es un servicio continuo a plena carga.

En la Tabla I se dan los valores de elevación de temperatura admisibles en régimen de devanados para máquinas aislantes con clase A fijados por las distintas normas, así como el método de medida del calentamiento.

El método *Res* es el de *variación de resistencia del devanado*. El método *Ter* (por *termómetros*), realiza medidas de temperatura locales; pueden emplearse, por ejemplo, pares termoeléctricos o detectores por variación de resistencia.

TABLA I - *Elevación de temperatura límite para devanados clase A de máquinas eléctricas*

Norma	Elevación	Método de Medida	Observaciones
VDE C 530 7/55	60°	Ter y Res	Corresponde al mayor valor medio por los dos métodos
ASA C 50.2/1955	40°	Ter	Estos valores corresponden a motores de uso general.
	50°	Res	
	55°	Ter	Motores blindados
	65°	Res	
UTE C 51 100 1965	60°	Res	Cuando se realiza sólo por termómetros
	50°	Ter	

Para devanados pertenecientes a transformadores de potencia de tipo seco (no sumergidos en aceite), la norma CEI No. 76 *fija* las elevaciones de temperatura límites para las distintas clases de aislantes que se muestra en la tabla II. El método de medida es por variación de resistencia.



TABLA II - *Elevaciones de temperatura límites para devanados de transformadores secos enfriados por aire natural o forzado*

Clase	Elevación de temperatura °C
A	60
E	75
B	80
F	100
H	125

Clases de servicio

Un devanado que forma parte de un aparato eléctrico está sometido a un cierto servicio. Las normas fijan ciertas clases de servicio convencionales que los representan con buena aproximación.

Los más corrientemente usados son: el *servicio continuo*, el *intermitente periódico* y el *temporal*.

El *servicio continuo* es un servicio permanente a régimen constante. Se supone que la tensión, corriente y frecuencia en el devanado permanecen constantes. Se logra una elevación de temperatura de régimen que permanece constante.

El *servicio intermitente periódico* es una sucesión de ciclos idénticos que comprenden cada uno un tiempo de funcionamiento a régimen constante y un tiempo de reposo. Estos tiempos son insuficientes para lograr el equilibrio térmico ya sea en el período de calentamiento o en el de enfriamiento. Reposo significa supresión de todo movimiento y de toda alimentación eléctrica.

Servicio temporal es un servicio a régimen constante durante un tiempo determinado menor que el requerido para lograr el equilibrio térmico en servicio permanente a ese régimen, seguido de un reposo de duración suficiente como para restablecer la igualdad de temperatura con el medio refrigerante.



Entre los servicios temporales se encuentra el unihorario, en el que el tiempo de funcionamiento en régimen constante es de una hora.

Régimen nominal

Las máquinas, los transformadores o cualquier otro aparato eléctrico tienen una placa en la cual se indican los valores nominales de las magnitudes eléctricas o mecánicas (corriente, tensión, frecuencia, velocidad de rotación, etc.) que corresponden al servicio nominal que se ha fijado y que también se indica.

Por ejemplo, si se trata de un servicio continuo, el aparato debe poder funcionar en régimen constante bajo los valores nominales especificados.

La elevación de temperatura en régimen debe ser igual o inferior a los límites que fijan las normas para esos aparatos de acuerdo con la clase de temperatura a que pertenezcan.

Ensayos de calentamiento

Los devanados se hacen funcionar bajo los valores nominales establecidos en la placa con el servicio nominal y se mide el calentamiento.

Si el servicio es continuo, debe esperarse a que se establezca el régimen térmico.

Se miden en el aparato temperaturas locales donde sea posible y se releva la curva de calentamiento. Se supone que se ha alcanzado el régimen cuando el calentamiento no aumenta en más de 3°C por hora.

Teniendo en cuenta que se cumple una ley exponencial, debe emplearse un método adecuado para determinar la temperatura de régimen.

La elevación de temperatura de los devanados se mide por variación de resistencia efectuando las medidas inmediatamente después de cortar la alimentación o, sin interrumpirla, usando corriente continua superpuesta a la alimentación cuando sea posible. En este último caso, se puede relevar la curva de calentamiento.



En electrotécnica se emplean diversos tipos de capacitores. Todos ellos responden la construcción de la Fig. 1: dos placas conductoras (metálicas) separadas por un medio aislante llamado *dieléctrico*.

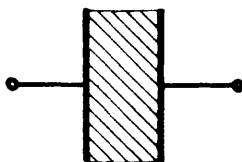


Fig. 1

Según las distintas tecnologías de fabricación y los dieléctricos empleados se tienen las diversas clases de capacitores.

La capacidad aumenta al aumentar el área de las placas enfrentadas y al disminuir su separación. Depende además del material dieléctrico usado.

Si entre las dos placas conductoras se aplica un voltaje, al llegar a cierto valor del mismo se produce la descarga o ruptura. La tensión de ruptura depende de la *rigidez dieléctrica* del material aislante.

Para aumentar la capacidad de un capacitor será preciso emplear áreas metálicas grandes y separaciones pequeñas. La rigidez dieléctrica del aislante pondrá un límite al voltaje máximo a aplicar.

El *límite de voltaje* se especifica por el máximo voltaje que se puede aplicar a la unidad. Está determinado por la rigidez dieléctrica del aislante. Depende además del tiempo de aplicación del voltaje. Se distingue un voltaje continuo máximo y otro valor, mayor, para picos breves de voltaje. La vida del capacitor se prolonga si se trabaja a voltajes menores que el límite.

El dieléctrico empleado determina, además, otras propiedades del capacitor: pérdidas; efectos de humedad, temperatura y frecuencia; estabilidad del valor de la capacidad, etc.

El efecto de la *temperatura* es muy variable en los distintos tipos de capacitores. La variación de la capacidad con la temperatura se mide en *partes por millón por grado centígrado* (ppm/°C) y puede ser de *signo positivo* (lo usual) o *negativo* (en algunos capacitores de cerámica).



Ejemplo: Un capacitor tiene un coeficiente de temperatura negativo de 1000 ppm/°C entre 25°C y 75°C, la disminución de capacidad será:

$$(75 - 25) \times 1000 \times 10^{-6} = 0,05 = 5\%$$

Midiendo entre terminales la resistencia del dieléctrico se tiene un valor muy grande, del orden de miles de MΩ, llamado *resistencia de aislación*. La resistencia de aislación caracteriza la conducta del capacitor con relación a las *fugas* de corriente. Su valor disminuye al aumentar la temperatura.

La resistencia de aislación es un parámetro muy importante en los capacitores empleados para aislar o bloquear la corriente continua.

Muchos capacitores, a efectos de disminuir su tamaño, se enrollan en forma muy *compacta*. Esto hace que se comporten, en alta frecuencia, *como una bobina*. Se agrega a este hecho que los bornes de conexión de un capacitor poseen inductancia.

Para cada capacitor se tiene una *frecuencia de resonancia*, cuyo valor depende del tipo de capacitor y de su conexión. En circuitos de alta frecuencia, es necesario elegir capacitor de alta frecuencia de resonancia y cuidar su conexión usando bornes cortos.

Aun a frecuencias bastante menores que la de resonancia el efecto inductivo altera el comportamiento de la componente.

Veamos algunos de los tipos de capacitores empleados en circuitos.

Las tecnologías de fabricación están en permanente evolución, por lo que continuamente surgen nuevos tipos o variantes perfeccionadas de los existentes.

Los capacitores se fabrican con valores de capacidad según series estándar similares a las empleadas en los resistores. A diferencia de éstos, no existe un único código de colores para representar valor y tolerancia de la capacidad.

La tendencia actual de los fabricantes es dar el valor de la capacidad directamente escrito sobre la componente, indicando además el límite de voltaje (Fig. 2).

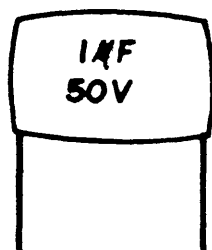


Fig. 2

Según el dieléctrico empleado, se tienen diversos tipos de capacitores.

Aire

Como el aire tiene constante dieléctrica baja, da lugar a capacitores voluminosos.

Tienen las ventajas de poseer muy bajas pérdidas y prestarse fácilmente para implementar capacidades variables. Girando un eje se varía el área enfrentada entre placas (Fig. 3). Para lograr valores de capacidad mayores se conectan en paralelo muchos juegos de placas.

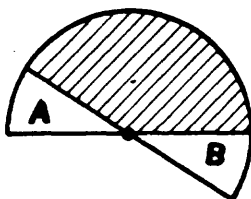


Fig. 3

Los capacitores de aire se emplean en *alta frecuencia*. Rara vez se construyen de valores superiores a 1000 pF.

Mica

Son capacitores de bajas pérdidas, buena estabilidad y límite alto de voltaje.

Se usan, sobre todo, en circuitos de radio frecuencia.



Los capacitores de *mica-plata* se construyen aplicando una película de plata sobre la superficie de mica (silver mica). Se caracterizan por su excelente estabilidad.

Papel y plásticos

Se fabrican enrollando dos hojas metálicas separadas por dos o tres hojas de aislante. La unidad así formada se seca al vacío y se impregna.

Es de fundamental importancia en la fabricación eliminar la humedad y emplear aislantes de alta calidad para tener unidades de buena resistencia de aislamiento.

Para evitar las pequeñas e inevitables imperfecciones en el papel se usan varias hojas. La impregnación del papel permite aumentar el voltaje de ruptura y la constante dieléctrica. Según el impregnante que se elija se obtienen distintas características de tamaño, factor de potencia, estabilidad, aislamiento, etc. Por esta razón los capacitores de papel son muy versátiles.

La aplicación de un voltaje excesivo o una imperfección del aislante da lugar a la perforación del dieléctrico. Las dos placas quedan, generalmente, en cortocircuito, inutilizándose el capacitor. En algunos tipos (capacitores de papel metalizado), las placas metálicas son tan delgadas que si se perfora el dieléctrico la película metálica se abre en ese punto y el capacitor puede seguir operando con un valor de capacidad algo menor.

El desarrollo de los plásticos ha dado lugar a un permanente surgimiento y evolución de diversos tipos de capacitores: *polietileno*, *poliestireno*, *poliester*, etc.

Cerámica

Se construyen depositando plata sobre una película de material cerámico. Pueden tener distinta forma: tubulares, disco, etc.

Como su dependencia con respecto a la temperatura es muy grande y se logran *coeficientes negativos*, se utilizan para compensar variaciones por temperatura de otras componentes.

Capacitores electrolíticos

Responden a un esquema de funcionamiento completamente distinto de todos los anteriores.

Permiten obtener los mayores valores de capacidad a menor costo y en el menor espacio, pero presentan valores altos de pérdidas.

En la Fig. 3 vemos los distintos elementos que constituyen un capacitor electrolítico.

El dieléctrico está constituido por una delgada capa de óxido situada sobre una de las superficies metálicas de *aluminio o tantalio*.

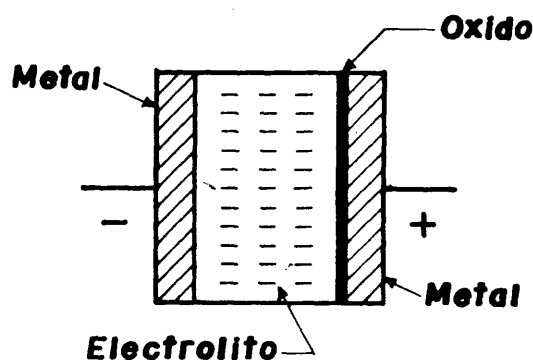


Fig. 3

La película de óxido permite alcanzar espesores muy finos, lo cual da lugar a los elevados valores de capacidad que se pueden obtener en este tipo de capacitor.

La juntura metal-óxido tiene propiedades rectificadoras: en un sentido conduce fácilmente y en el otro posee resistencia alta comportándose como un aislante o dieléctrico. Esto muestra el carácter esencialmente *polarizado* del capacitor electrolítico.

Al conectar un capacitor electrolítico en un circuito eléctrico deberá ponerse en el punto de voltaje más alto el terminal del capacitor marcado con un signo +.



El espesor del óxido determina el límite de voltaje. Operando muy por debajo de ese límite, el valor de la capacidad disminuye por deformación de la película de óxido. Cuando un capacitor electrolítico no se usa por mucho tiempo, la película se deteriora.

Se puede, en general, recuperar al aplicar nuevamente voltaje.

Si se invierte la polaridad puede producirse la *ruptura* de la película de óxido debido al pasaje de una corriente elevada (en ese sentido la juntura rectificadora conduce). Aunque no se produzca la ruptura, se forma una capa de óxido en la otra placa, lo cual reduce el valor de la capacidad.

Los capacitores electrolíticos *no polarizados* (sin distinción de polaridad entre bornes) poseen capas de óxido iguales sobre ambas placas metálicas. Son dos capacitores polarizados, puestos en serie, *con polaridades opuestas*.

En comparación con los otros tipos de capacitores, los electrolíticos permiten implementar unidades de valores mucho mayores de capacidad, pero tienen *corrientes de fuga grandes* que aumentan con la temperatura y el voltaje aplicado: *pérdidas elevadas y deriva grande en el valor de la capacidad*.

Los capacitores de *tantalio* poseen mejores propiedades de estabilidad que los de *aluminio*.

Las propiedades eléctricas de los semiconductores dan lugar a diversos dispositivos de *estado sólido*, que encuentran numerosas aplicaciones en electrónica. Estos dispositivos han desplazado a los tubos de vacío y de gas frente a los cuales tienen amplias ventajas:

- menor tamaño y peso;
- menor consumo de potencia (en particular, al no tener filamento, se ahorra potencia de calefacción y se elimina la demora de encendido);
- mayor confiabilidad.

Actualmente, el material semiconductor preferido es el *silicio*, debido a su buen comportamiento térmico y a que su tecnología de fabricación es más económica que la de otros semiconductores.

La conductividad de un semiconductor es intermedia entre la de metales y aisladores. Si la resistividad (inversa de la conductividad) de un conductor es del orden de $10^{-6} \Omega$ y la de un aislante es del orden de $10^6 \Omega \text{cm}$, la de un semiconductor está en el rango de decenas a miles de Ωcm .

Esta propiedad eléctrica es consecuencia de la naturaleza de la materia en estado sólido.

En un semiconductor, los átomos se organizan en estructuras cristalinas con redes fijas, en que los electrones están firmemente asociados a su núcleo.

Los electrones periféricos de los átomos (llamados electrones de *valencia*) son compartidos por los átomos vecinos de la red. Los átomos quedan asociados entre ellos por vínculos que llamamos *enlaces*. En la Fig. 1 se representa la estructura cristalina para el caso de cuatro electrones de valencia.

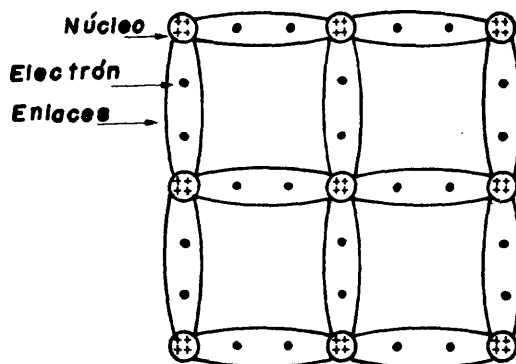


Fig. 1

En esas condiciones, no hay prácticamente electrones libres, aptos para desplazarse bajo la acción de fuerzas eléctricas. Eso explica la menor conductividad de estos elementos frente a los metales, que disponen de enormes cantidades de electrones aptos para la conducción de corriente eléctrica.

Para obtener en un semiconductor un mayor número de electrones utilizables como portadores de corriente, es preciso darles energía suficiente para romper los vínculos que los unen al núcleo.

Esto puede hacerse de varias formas, según la fuente de energía externa aplicada: calor, luz, campo eléctrico, entre otras. Estas distintas fuentes de energía dan lugar a fenómenos y dispositivos de muy importantes aplicaciones.

Los *termistores* son dispositivos semiconductores basados en la dependencia existente entre la *temperatura* y la *conductividad*.

Los *fotodiodos*, *fotorresistores*, *fototransistores*, en los que las propiedades electrónicas son controlados por el nivel de iluminación, han originado un área de aplicaciones llamada *optoelectrónica*.

Impurezas

Hay una manera de alterar la estructura cristalina en forma controlada, de modo de *aumentar el número de portadores* de un semiconductor. Agregando al semiconductor puro, llamado *intrínseco*, muy pequeñas cantidades de otro elemento, llamado *impureza*, con distinta estructura atómica, se logra modificar las propiedades eléctricas del semiconductor original.

La proporción de impureza agregada es usualmente muy baja, del orden de una parte cada diez millones del semiconductor base.

El semiconductor con impurezas se llama *extrínseco* y el proceso de agregado de impurezas se llama *envenenamiento (doping)*.

Debido a la baja proporción de impurezas, la estructura cristalina está determinada por el semiconductor original. En esa estructura se ubican los pocos átomos de impureza. Si estos átomos tienen el mismo número de electrones periféricos que el semiconductor intrínseco, las propiedades eléctricas de éste no sufren modificaciones.

Supongamos, en cambio, que los átomos de impureza tienen *un electrón exterior adicional*. Como la red de enlaces está determinada, *ese electrón queda prácticamente libre*. Sin necesidad de que se le suministre energía exterior (figura 2) el semiconductor ha adquirido *un portador*.

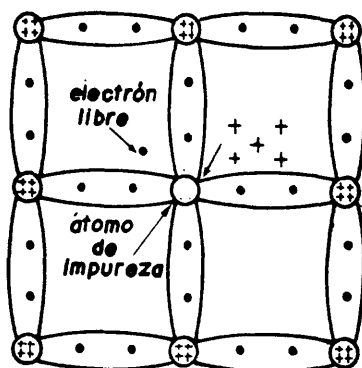


Fig.2

El material resultante se llama semiconductor extrínseco *tipo n*, ya que existe un exceso de electrones disponibles como portadores y *tienen carga negativa*.

La impureza se llama *donora* pues aporta electrones en exceso.

Obsérvese que se mantiene la neutralidad eléctrica, ya que el núcleo de la impureza posee una carga positiva adicional. No obstante, ésta es una carga positiva *fija*, que no interviene en el proceso de conducción.

Si por el contrario, la impureza posee *un electrón periférico menos* que el átomo del semiconductor intrínseco, al adaptarse el átomo de impureza a la estructura cristalina, uno de los enlaces interatómicos no estará completo. El átomo de impureza aporta tres electrones periféricos en una estructura que demanda cuatro (Fig. 3).

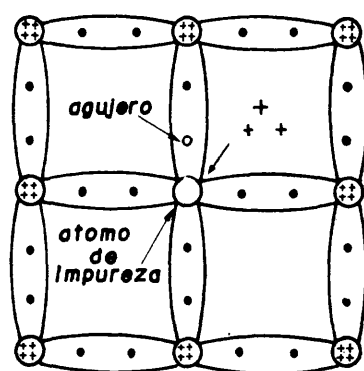


Fig. 3

Este hueco o *agujero* (ausencia de un electrón en la red) constituye un *portador de carga positiva*. Puede ser llenado por un electrón de un enlace vecino que, al moverse, da lugar a un movimiento del agujero en sentido contrario. De esa manera, el agujero puede desplazarse a través de la estructura del material y convertirse en un portador de carga positiva.

El semiconductor resultante se llama *tipo p*, ya que los portadores disponibles para la corriente son cargas positivas (agujeros). Quedan ancladas en la estructura las cargas negativas fijas del núcleo de la impureza. La impureza se llama *aceptora*, pues al aportar un número de electrones menor que el requerido por la red, puede captar electrones de ésta.

En el caso de un semiconductor intrínseco (Fig. 1), al subir la temperatura se aporta energía suficiente como para romper algún enlace. De esa manera se generan pares electrón-agujero. Se obtienen así portadores de ambos tipos en igual número.



El proceso de generación térmica de portadores se equilibra con el proceso de desaparición de los mismos por *recombinación* de una pareja electrón-agujero. Se llega así, a cada temperatura, a una cierta cantidad de portadores de cada tipo.

En un semiconductor extrínseco los portadores son predominantemente electrones o agujeros.

Se les llama por eso portadores *mayoritarios*.

En un semiconductor *tipo n*, los portadores mayoritarios son *electrones*.

También posee agujeros (*portadores minoritarios*) generados térmicamente.

La situación opuesta ocurre en los materiales *tipo p*.



El uso de las propiedades de conducción eléctrica de los semiconductores ha permitido construir distintos dispositivos de estado sólido. En todos ellos se trata de controlar los parámetros que gobiernan el proceso de conducción.

En un semiconductor *intrínseco*, la conducción está limitada por el escaso número de portadores disponibles. Este número puede aumentarse creando nuevos portadores, es decir liberando electrones de sus enlaces interatómicos, con lo cual se generan parejas de portadores de signos contrarios: electrones y agujeros. Este proceso de generación de portadores requiere un suministro de energía externo.

El aumento de portadores puede aumentarse de otra manera en los semiconductores *extrínsecos*. Afectando al semiconductor original con una proporción muy pequeña de una sustancia adecuada (impureza) se aumenta el número de uno de los portadores elementales sobre el otro. Se obtienen así semiconductores *tipo p*, en que los portadores mayoritarios son *agujeros*, y *tipo n*, en que los mayoritarios son *electrones*. Cuando el nivel de impurezas es muy elevado, el semiconductor extrínseco adquiere propiedades de conductor.

La proximidad de dos zonas extrínsecas opuestas de un mismo semiconductor da lugar a una estructura elemental de gran importancia: *la juntura p-n*.

La interacción de las estructuras atómicas vecinas produce diversos fenómenos. La desigual concentración de portadores libres de ambos lados de la juntura provoca la difusión de los mismos de una a otra zona.

Este movimiento de cargas deja cargas fijas no equilibradas en la juntura (zona de carga espacial, sin portadores). Estas cargas crean un campo eléctrico que se opone a la difusión. Se llega a un equilibrio entre ambos procesos, *la corriente de difusión de portadores mayoritarios es equilibrada por una corriente de campo, de portadores minoritarios*.

En la Fig. 1 se representa la juntura p-n, indicando el sentido de ambas corrientes para los portadores positivos.

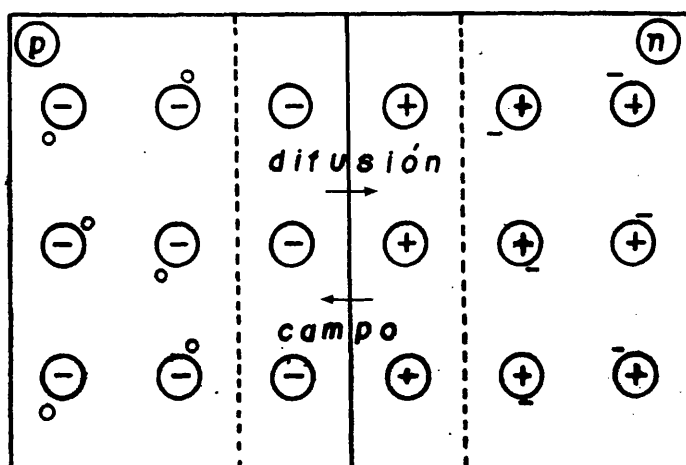


Fig. 1

La aplicación de un voltaje exterior a la juntura modifica esta situación de equilibrio.

Con polarización directa se reduce el límite del campo propio, permitiendo la difusión de un gran número de portadores mayoritarios en sentido directo.

Con polarización inversa, se aumenta el efecto del campo propio, por lo que la conducción queda limitada a la corriente de campo, en sentido inverso. Esta corriente es normalmente muy pequeña, pues es pequeño el número de portadores minoritarios generados térmicamente.

Microestructuras semiconductoras.

La aplicación técnica de los semiconductores se basa en la creación de estructuras formadas por zonas de semiconductor n y zonas de semiconductor p, convenientemente elegidas. Como las dimensiones de las zonas alcanza unas pocas micras, se habla de microestructuras.

El principio básico de funcionamiento de una microestructura consiste en modificar la conducción eléctrica de una zona semiconductor mediante algún procedimiento adecuado.

Los principales procedimientos empleados en las microestructuras son:

1. una juntura p-n;
2. la inyección de portadores a partir de una juntura próxima, polarizada directamente (efecto *transistor*);
3. la aplicación de un campo eléctrico, la elevación de temperatura, etc.;

4. la generación de portadores por avalancha en una juntura polarizada inversa, por ruptura de enlaces (efecto Zener).

Los diferentes procedimientos se combinan, con una geometría adecuada, para formar una microestructura capaz de realizar una función compleja.

Tecnologías de fabricación

El punto de partida es una oblea (*wafers*) de silicio tipo p que constituye el *substrato* sobre el que se construirá la microestructura. El espesor de este substrato es del orden de 200 micras.

Sobre este substrato se desarrolla una capa muy delgada de silicio tipo n. Esta capa, llamada *epitaxial*, tiene espesor muy pequeño (20 micras).

La estructura básica se completa con una delgada capa superficial de óxido que protege al silicio y que permite por posteriores procesos llegar a obtener microestructuras muy complejas.

En la Fig. 2 se representa esa estructura básica.

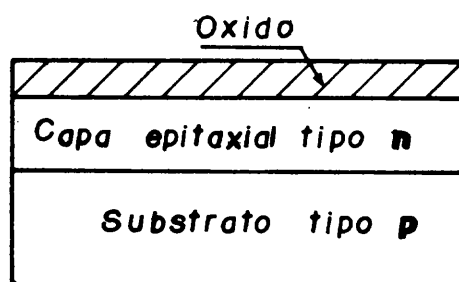


Fig. 2

La capa protectora de óxido puede quitarse parcialmente formando huecos o ventanas. Esto se lleva a cabo por medio de un proceso fotográfico: se cubre la oblea con un material fotosensible. Se dibuja la disposición de las aberturas deseadas y se reduce a un negativo fotográfico de las dimensiones de la oblea. Se coloca esta máscara sobre la emulsión fotosensible y se expone, generalmente, a la radiación ultravioleta (Fig. 3).

La exposición al ultravioleta produce una polimerización de la emulsión en las zonas expuestas (no protegidas por la máscara). Quitando la máscara y sometiendo la oblea al ataque de agentes químicos adecuados, las zonas no expuestas de la emulsión son quitadas, mientras las zonas expuestas son fijadas (Fig. 4).

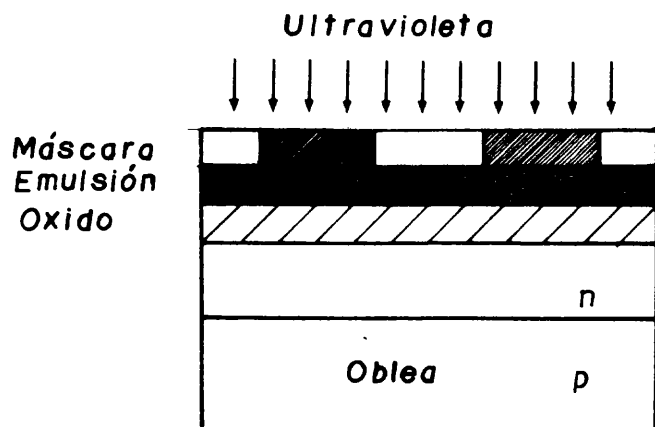


Fig. 3

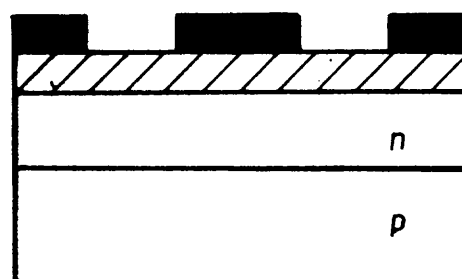


Fig. 4

Un ataque del óxido por agentes corrosivos destruye las áreas no protegidas. Se obtiene la disposición de ventanas, en el óxido, prevista en el dibujo original (Fig. 5).

Exponiendo esta estructura a una atmósfera enriquecida de impurezas, a elevada temperatura y por un período de tiempo adecuado, se consigue que esas impurezas difundan en la oblea semiconductora a través de las ventanas de la película de óxido protector.

Difundiendo impurezas tipo p hasta alcanzar el sustrato, se llega a una estructura como la representada en la figura 6.

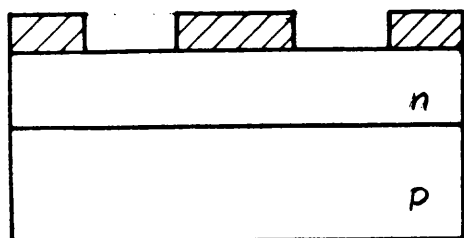


Fig. 5

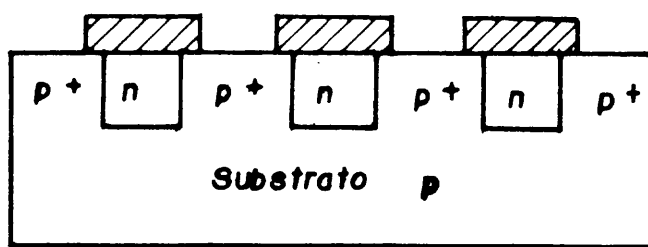


Fig. 6



Quedan determinadas así zonas n, aisladas, formando nodos. Dentro de cada nodo podrá construirse un dispositivo distinto. La estructura construida asegura la aislación eléctrica entre los distintos dispositivos de una misma oblea. En efecto, basta colocar el sustrato p a una *tensión negativa respecto a todos los nodos n*, para que todas las junturas p-n estén polarizadas *inversamente y aíslan eléctricamente los nodos entre sí*.

La aislación eléctrica entre nodos es más segura si los canales abiertos por la difusión, tienen fuerte proporción de impurezas (representados como p⁺ en la figura 6).

De esta manera es posible construir muchos dispositivos distintos en una misma oblea. Se crean así *circuitos integrados*.

Dentro de cada nodo se reiteran los procesos de difusión ya descritos. Nada impide recubrir la superficie con óxido y atacarlo según una nueva disposición de ventanas. Existe, sin embargo, un límite para el número de procesos a realizar, dado por la precisión de las máscaras y por la capacidad de controlar la penetración de impurezas.

Finalmente, procedimientos fotoquímicos similares permiten completar la estructura con conexiones metálicas para conectar los dispositivos entre sí y con terminales de salida.

Existen actualmente otros procedimientos tecnológicos además de los descritos.

En el sistema visto, la aislación entre nodos que da el sustrato polarizado implica la presencia de una capacidad de juntura que limita la velocidad de los dispositivos. Por esta razón, también se emplea un sustrato pasivo: óxido o material cerámico que aísla los nodos entre sí, física y eléctricamente.

La difusión de impurezas puede hacerse de otras formas. Por ejemplo, se emplea el procedimiento de implantación iónica, bombardeando la superficie no protegida con iones de impureza convenientemente acelerados.

*Limitación de las microestructuras*

Por combinación adecuada de junturas semiconductoras en una microestructura, se logra una enorme cantidad de dispositivos diferentes. A su vez, cada uno de estos dispositivos puede encerrarse en una cápsula con terminales o puede formar parte de una microestructura mayor como parte de un *circuito integrado*.

Por limitaciones de fabricación, a medida que aumenta el número de capas de semiconductor en una microestructura o a medida que aumenta el número de dispositivos que posee, es cada vez más difícil lograr éxito. Las variaciones, fuera de control, de la temperatura, la concentración de impurezas o la posición de las máscaras impide, desde el punto de vista industrial, fabricar dispositivos de complejidad muy grande. Sin embargo, los límites de complejidad de los circuitos, aumentan a medida que evolucionan las tecnologías de fabricación.-

En el momento actual, se logra fabricar microestructuras, en forma comercial, con *decenas de miles* de dispositivos interconectados.-



En su aplicación más sencilla, una barra de semiconductor se puede usar como resistor.

En la figura 1, se tiene una barra cuya resistencia es:

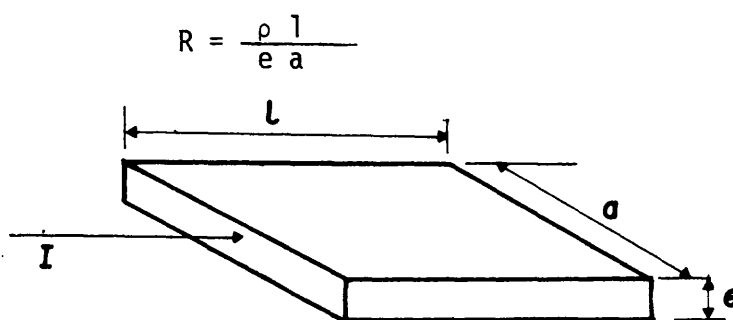


Fig. 1

La resistencia de la barra se puede expresar con auxilio de R_c :

$$R_c = \frac{\rho}{e}$$

$$R = R_c \frac{l}{a}$$

Los valores de resistividad y espesor típicos dan valores de R_c de 10 a 100 Ω . Para obtener los valores de resistencia deseados debe elegirse el largo y ancho de la barra. Estas variables están limitadas. No puede estrecharse el ancho más allá del límite puesto por la precisión del dibujo de la máscara y del proceso de difusión.

El rango de resistencias obtenidas con estos resistores de difusión va de decenas de ohms a decenas de miles de ohms.

Las tolerancias son bastante pobres (de alrededor de $\pm 30\%$). En cambio, *la relación entre resistencias* de dos resistores de difusión, contruidos en la misma pastilla, es muy precisa, porque depende solamente de relaciones entre dibujos. El diseño de circuitos se apoya en *relaciones de resistencias* más que en sus *valores absolutos*.

En la Fig. 2 se representa el esquema de un resistor integrado.

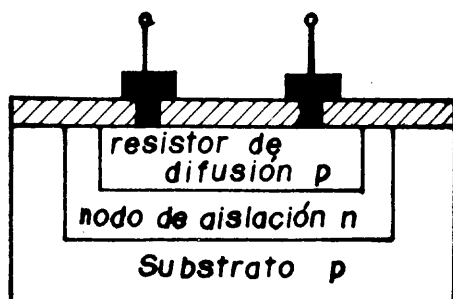


Fig. 2

Como puede apreciarse, un resistor es una componente compleja debido a la zona n de aislamiento que se debe construir.

Capacitor

La juntura p-n polarizada inversamente produce un ensanchamiento de la zona de carga espacial. La existencia de cargas fijas separadas, de signo opuesto, da lugar a una capacidad llamada capacidad de transición o de carga especial. Este efecto puede aprovecharse para implementar capacitores de junturas en un circuito integrado. Se obtienen valores de capacidad de decenas de picofaradios.

El efecto de variación de la capacidad de la juntura con la polarización se utiliza en *varactores*, diodos de capacidad variable.

Se puede construir capacitores integrados empleando la capa de óxido como dieléctrico. Como placas la película metálica superior y la zona n+ de alta concentración de impurezas en el nodo n (Fig. 3).

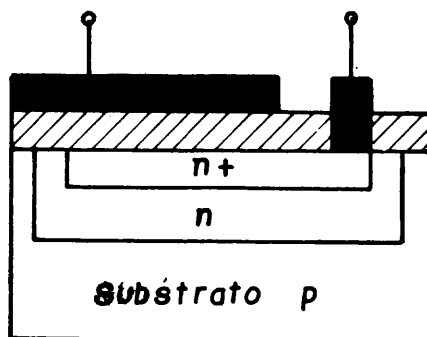


Fig. 3

La estructura recibe el nombre de MOS (Metal-Oxido-Semiconductor).



Los termistores son *resistores térmicos*, es decir, componentes cuya *resistencia es función de la temperatura*. Están constituidos por materiales semiconductores. Se emplea principalmente mezclas de óxidos de níquel y manganeso. El silicio no se emplea, pues sus características como termistor son demasiado sensibles a la presencia de impurezas.

La dependencia de la conductividad con la temperatura presenta características distintas en metales y semiconductores. En un metal, en general, *la conductividad disminuye al aumentar la temperatura*, alrededor de 0,4% por cada grado centígrado. En un semiconductor la variación es opuesta: *la conductividad aumenta junto con la temperatura* y en una proporción más alta, (alrededor de 8% por cada grado centígrado).

La variación en un semiconductor se explica por la creación de portadores. Al aumentar la temperatura se entrega energía que permite a algunos electrones romper los enlaces interatómicos. Se genera así parejas de portadores (electrones y agujeros) disponibles para la conducción de corriente. Este efecto aumenta cuando la temperatura se eleva.

En un metal la situación es distinta. A temperatura ambiente, ya existe enorme cantidad de portadores disponibles y al elevar la temperatura se introduce una agitación en la nube de electrones que dificulta el movimiento de los mismos en respuesta a la aplicación de un campo eléctrico. Por eso, en un metal la conductividad disminuye al aumentar la temperatura.

Un semiconductor fuertemente dopado puede adquirir propiedades de conductor. En ese caso, el termistor tiene un *coeficiente positivo de temperatura* (PTC). En el caso más usual, se tienen termistores de *coeficiente térmico negativo* (NTC). En ambas situaciones, el signo del coeficiente hace referencia a la *variación de resistencia*.

Curvas de un termistor

Las características de cada termistor se dan por medio de distintos tipos de curvas.

Estas curvas pueden ser datos del fabricante, o bien pueden determinarse experimentalmente.

Curva Resistencia - Temperatura

La relación más importante de un termistor es la curva Resistencia en función de la temperatura (Fig. 1).

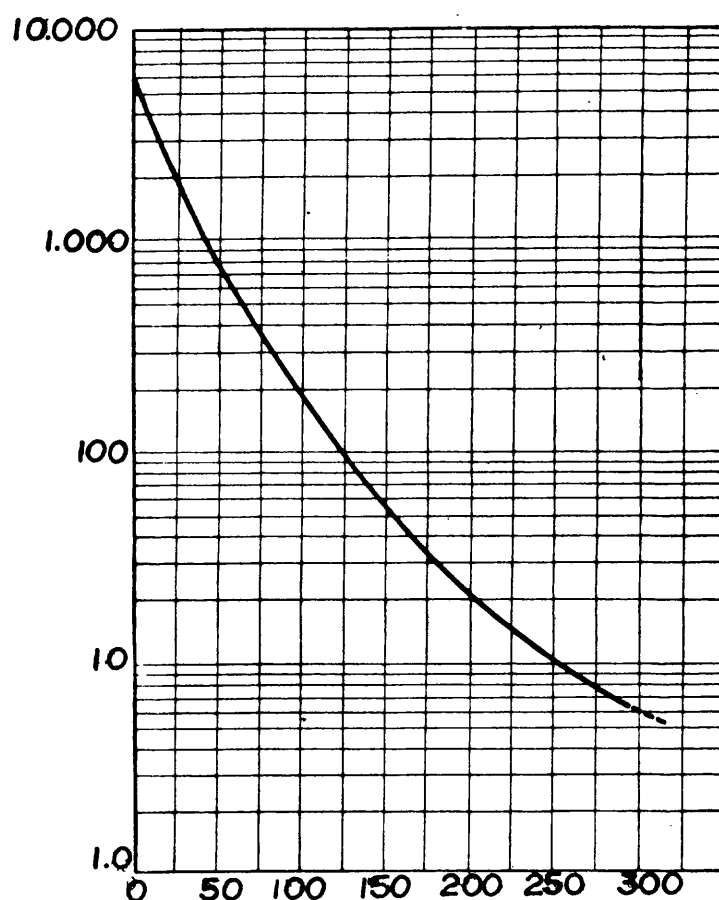


Fig. 1

Se observa en la curva la fuerte variación de la resistencia, que de 25°C a 200°C pasa de 2000Ω a solamente 25Ω. Hay un valor máximo para la temperatura que el termistor puede soportar (para el termistor de la Fig. 1 es de 300°C).

La información de esta curva debe manejarse con cuidado. En cada punto se supone que la temperatura es la del termistor y no la del ambiente.

Si se disipa potencia eléctrica en el termistor, éste *adquiere una temperatura superior a la ambiente*. La curva supone disipación nula de potencia en el termistor.

Curva Voltaje-Corriente

Si se aplica a un termistor un voltaje pequeño, de tal manera que la corriente que circula sea también pequeña y la potencia disipada sea despreciable, el termistor no se calentará por encima de la temperatura ambiente. En esas condiciones, la curva voltaje-corriente sigue la ley de Ohm. En la Fig. 2, corresponde a la zona recta para pequeños voltajes.

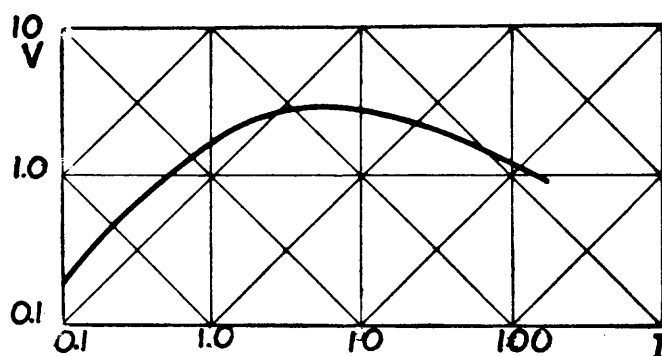


Fig. 2

Para voltajes mayores, la corriente que circula por el termistor eleva su temperatura sobre la ambiente. La resistencia del termistor disminuye y aumenta más la corriente.

A niveles mayores de voltaje, este efecto predomina a tal punto que nuevos incrementos de corriente disminuyen tan fuertemente la resistencia *que el voltaje necesario disminuye*. Eso explica el máximo que se observa en la curva Voltaje-Corriente y la zona de pendiente negativa que le sigue.

En esa zona el termistor *presenta una resistencia (incremental) negativa*: un *aumento* de corriente corresponde a una *disminución* de voltaje aplicado.

Al dar la característica V-I en un diagrama doblemente logarítmico (Fig.2) tanto la resistencia como la potencia disipada (producto V.I) se representan por rectas.

A veces, en lugar de la curva V-I se da como dato la *constante de disipación*, que da, a una cierta temperatura ambiente, la relación entre la potencia disipada y la elevación de temperatura resultante.

Aplicación

El circuito de la Fig. 3 puede emplearse para medir temperaturas.

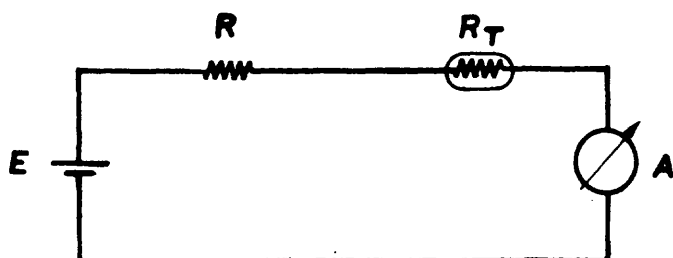


Fig. 3

Colocando el termistor R_T en el punto cuya temperatura se desea medir, la corriente que circula será función de esa temperatura. La lectura en el amperímetro indicará la temperatura correspondiente. El instrumento podrá calibrarse directamente en temperatura.

Supongamos que el termistor posee la curva $R_0(T)$ de la Fig. 1 y su constante de disipación es $0,4 \text{ mw}/^\circ\text{C}$. R no debe ser demasiado grande frente a R_T porque el instrumento no tendría sensibilidad. Sea $R = 100\Omega$.

E se elige de modo que el termistor no disipe una potencia que eleve su temperatura demasiado. Sea $E = 0,4 \text{ V}$.

En la tabla siguiente, se dan los valores de corriente y potencia disipada en el termistor, que corresponden a diversas temperaturas:

T	R_T	$i = \frac{E}{R + R_T}$	$V = R_T i$	$W = Vi$
25°C	2000Ω	$0,19 \text{ mA}$	$0,38 \text{ V}$	$0,07 \text{ mW}$
50	810	0,44	0,365	0,16
100	185	1,40	0,26	0,36
150	59	2,52	0,14	0,37
200	25	3,20	0,08	0,26

En la Fig. 4 se representa la curva de calibración $i(T)$. Se observa que no es lineal.

TERMISTORES

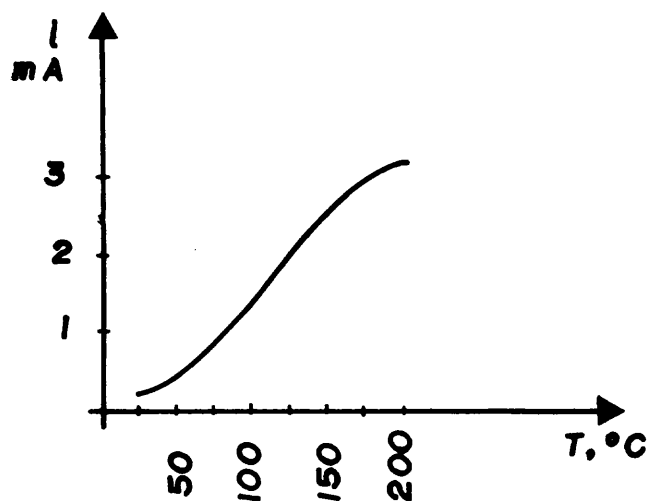


Fig. 4

Se obtiene mejor linealidad recurriendo a configuraciones en puente con el termistor en una de sus ramas.

En el rango de funcionamiento, la máxima potencia disipada es de 0,37 mW. Como la constante de disipación es 0,4 mW/°C, el termistor, *debido al calentamiento eléctrico*, elevará su temperatura menos de 1°C con respecto a T .

Juntura P-N

La presencia de dos materiales semiconductores adyacentes, tipos p y n, da lugar a una interacción entre ambos que otorga al sistema las características de un rectificador o diodo.

Las propiedades de esa juntura son fundamentales para comprender el funcionamiento de una gran cantidad de dispositivos de estado sólido.

En la Fig. 1 se representa una juntura p-n. Tal estructura resulta de introducir impurezas donoras y aceptoras en zonas opuestas de un mismo semiconductor.

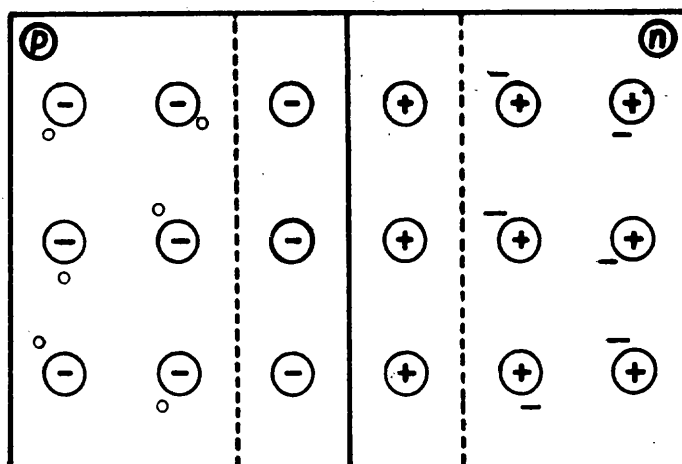


Fig. 1

Del lado p, se representan los núcleos con sus cargas ancladas negativas y los portadores positivos (agujeros).

Del lado n, las cargas ancladas son positivas y los portadores libres son electrones.

Se observa que los portadores libres de cada tipo abundan de un lado de la juntura. Los agujeros son numerosos en el lado p por lo que son atraídos hacia el lado n, donde se recombinan con algunos electrones. Análogamente, los electrones abundantes del lado n son atraídos hacia el lado p.

Como consecuencia de este proceso de *difusión*, la zona de la juntura (punteada en la Fig. 1) queda desprovista de portadores libres, por lo que las cargas fijas de los núcleos no están allí equilibradas por portadores de signo contrario. Por esa razón, se llama a esa zona, región de *carga espacial*.

También se la conoce como zona vaciada de portadores (depletion layer).

Al quedar cargas fijas no equilibradas (positivas del lado n, negativas del lado p), dan lugar a un *campo eléctrico* que se opone al proceso de difusión. Un agujero del lado p es *atraído* por los electrones del lado n y es rechazado por las cargas positivas fijas del lado n.

Se llega a un equilibrio entre dos procesos opuestos: la *corriente de difusión*, debida a la desigual concentración de portadores de ambos lados de la juntura, y la *corriente de campo* (drift), debida a las cargas fijas.

Para los agujeros, que en el lado p son portadores mayoritarios, la corriente de difusión se dirige de p a n. En el lado n, los agujeros son portadores minoritarios (generados térmicamente). Sobre ellos actúa el campo de las cargas fijas dando lugar a una corriente de campo que se dirige de la zona n a la zona p.

El equilibrio entre ambos procesos trae como consecuencia que la corriente neta sea nula. La corriente de difusión de mayoritarios iguala a la corriente de campo de minoritarios. De lo contrario, se produciría una acumulación ilimitada de portadores en un extremo del semiconductor, situación físicamente inadmisibles.

Polarización de la juntura

Supongamos que la juntura p-n se conecta a una batería con la polaridad indicada en la Fig. 2 (polarización *inversa*).

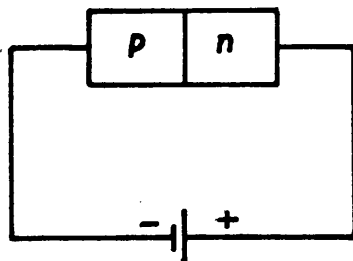


Fig. 2

El sentido de la tensión aplicada es tal que *contribuye a extraer los portadores de la zona de transición*. El polo negativo de la batería atrae a los agujeros de la zona p y el polo positivo atrae los electrones de la zona n. Como consecuencia, la zona de transición se extiende más que en el caso de la juntura no polarizada. Existe una mayor carga fija no balanceada, por lo que el efecto de campo predomina sobre el de difusión.

Por esta causa, circula una corriente de campo, *de portadores minoritarios*, en sentido inverso, *de zona n a zona p*.

Esta corriente *es muy pequeña*, pues está limitada por el escaso número de portadores minoritarios disponibles, y no varía al aumentar el voltaje aplicado, ya que este no tiene mayor efecto sobre la cantidad de portadores disponibles.

Como los escasos portadores minoritarios son generados térmicamente, esta corriente inversa depende de la temperatura de la juntura.

Supongamos ahora que la juntura se polariza en el sentido indicado en la figura 3 (polarización *directa*).

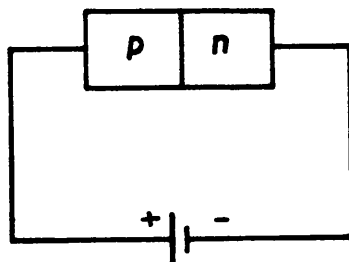


Fig. 3

El campo aplicado por la batería tiene sentido contrario al creado por las cargas fijas. Disminuye ahora el campo eléctrico en la juntura.

Al reducirse el límite puesto al proceso de difusión, la corriente de portadores mayoritarios predomina. Circula una importante corriente en el sentido de zona p a zona n (corriente *directa*) de portadores mayoritarios.

Esta corriente aumenta fuertemente al aumentar el voltaje aplicado, pues esto facilita la difusión de portadores mayoritarios.

La descripción anterior muestra el carácter de diodo que posee la juntura semiconductor p - n frente a un voltaje aplicado desde el exterior, al permitir el paso fácil de corriente en un sentido y restringirlo fuertemente en el sentido opuesto. En la Fig. 4 se representa el símbolo del diodo correspondiente a esa juntura.

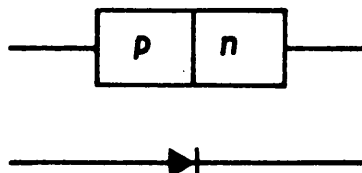


Fig. 4

La característica $V - I$ de una juntura p - n tiene el aspecto indicado en la figura 5.

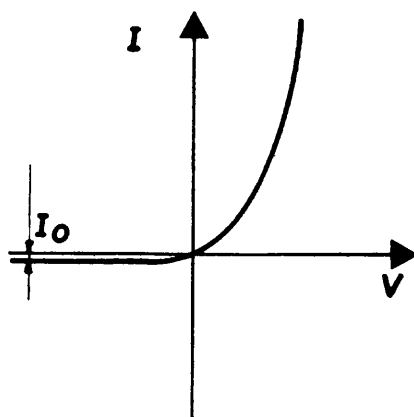


Fig. 5

En la zona de polarización inversa (V negativo) la corriente inversa, I_o , es muy pequeña y no varía con el voltaje. En la zona de polarización directa (V positivo) la corriente crece fuertemente al aumentar el voltaje aplicado.

En la Fig. 5 se ha exagerado la magnitud de la corriente inversa. Normalmente la relación de corrientes es mucho mayor que lo representado en la figura. Por su parte, la corriente inversa I_o es de distinto valor en distintas junturas (es mucho más pequeña en diodos de silicio que en diodos de germanio). En un dispositivo real, además, a la corriente inversa de portadores minoritarios se agrega una corriente de fugas, que aumenta con el voltaje inverso aplicado.

En la Fig. 6 se dan las características de diodos típicos de germanio y silicio, en análogos límites de corriente, para la conducción directa.

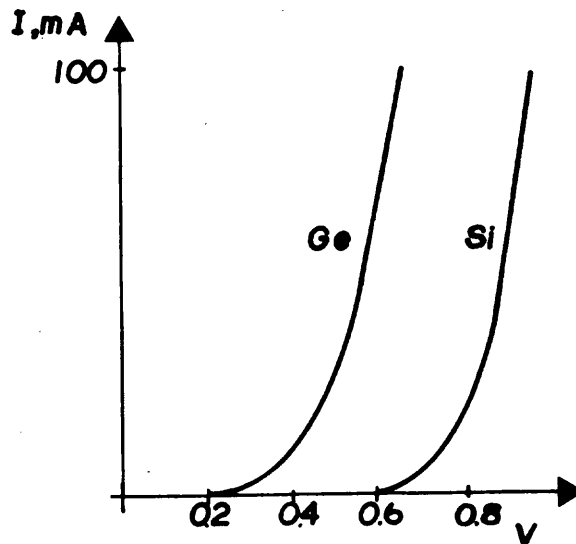


Fig. 6

Se observa la existencia de un voltaje de arranque o umbral V_Y (cut-in), que separa una zona de corriente muy pequeña de la zona en que la corriente crece rápidamente.

Este voltaje es del orden de 0,2 V para el germanio y de 0,6 V para el silicio.

Efecto Zener

En la Fig. 7 se ve la curva V - I de la juntura, completada con la zona de voltajes negativos. Se observa que para voltajes inversos suficientemente grandes, la corriente inversa aumenta bruscamente.

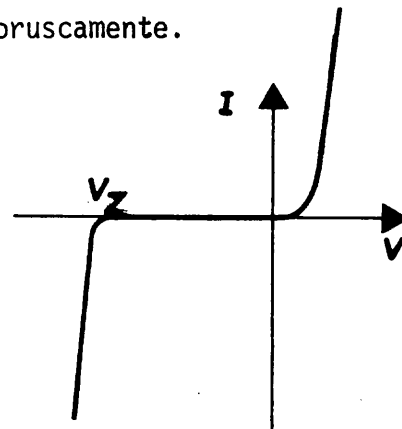


Fig. 7

Este fenómeno de *ruptura* (breakdown) es debido a que un gran voltaje aplicado consigue arrancar algunos electrones de sus enlaces y genera portadores nuevos.

A su vez, los portadores son energizados por el fuerte campo existente, a tal punto que por colisión pueden romper otros enlaces y generar nuevos portadores.

Este efecto de *multiplicación por avalancha* suministra, a determinado voltaje inverso V_z , los portadores que generan la alta corriente inversa. Esa corriente se desarrolla a un voltaje prácticamente constante y da lugar a una gran disipación de potencia que puede provocar la destrucción de la juntura. La tensión V_z de avalancha o de *efecto Zener*, limita la tensión de trabajo del diodo semiconductor.

Si el dispositivo se ha diseñado con capacidad de disipación adecuada, podrá operar en la zona de ruptura sin destruirse. La aplicación natural de ese diodo de ruptura, llamado *diodo Zener*, es la generación de voltajes constantes.

Juntura p + n

Si uno de los lados de la juntura posee un nivel de impurezas mucho mayor que el otro, la zona de carga espacial no se extiende por igual en ambos lados.

Una juntura en que la zona p está mucho más fuertemente dopada que la n (se la designa como p^+) está representada en la figura 7.

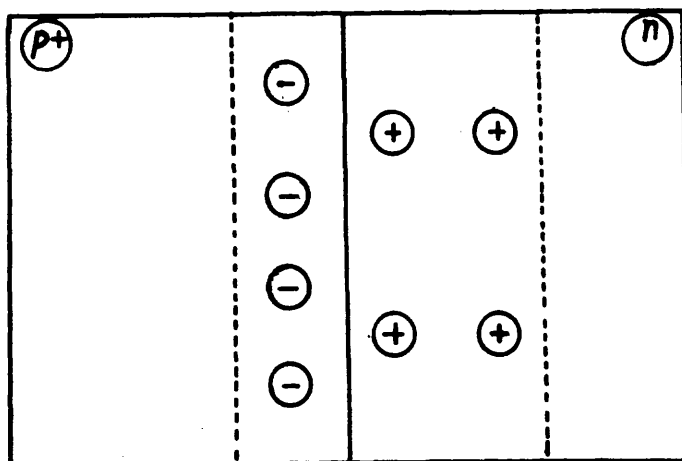


Fig. 7



La alta concentración de agujeros en la zona p^+ los hace difundir más profundamente en la zona n . Para que haya neutralidad eléctrica, las cargas fijas de signos opuestos deben equilibrarse y en la zona p^+ están más concentradas que en la n . Hace falta una mayor extensión en la zona n para lograr el equilibrio.

Cuando la juntura se polariza en sentido *directo*, la conducción tiene lugar por difusión de agujeros de p^+ a n y de electrones en sentido contrario, pero las desiguales concentraciones de ambos tipos de portadores hacen que la corriente preponderante sea de agujeros.

Este tipo de juntura tiene aplicación en algunos dispositivos semiconductores.

La microestructura formada por tres capas semiconductoras es, sin duda, uno de los grandes éxitos de la aplicación de los semiconductores.

La estructura de tres capas, el transistor, cuando se la construye con dimensiones adecuadas, posee un efecto que la diferencia de la simple conexión de dos diodos en oposición: el efecto de transferencia de portadores.

A partir de esta estructura se han construido una enorme cantidad de dispositivos (dispositivos *bipolares*) y de circuitos integrados.

Transistor

Supongamos que en un mismo semiconductor se tienen *tres zonas extrínsecas alternadas*. En la Fig. 1 se representa una estructura tipo PNP.

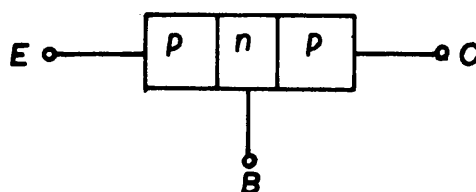


Fig. 1

Quedan determinadas dos junturas. Si el espesor de la *capa central n* es pequeño, las junturas no son totalmente independientes por ser muy próximas. Las tres zonas reciben el nombre de *emisor E*, *base B* y *colector C*.

Sin conexión externa, se establece en cada juntura un equilibrio entre los procesos de difusión y campo.

Supongamos que se conectan las terminales a fuentes de voltaje de modo de polarizar *directamente la juntura base-emisor* e *inversamente la base-colector* (figura 2).

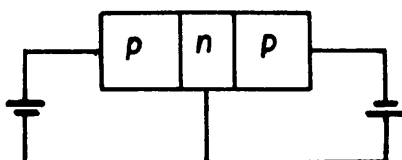


Fig. 2



En la juntura base-emisor, el equilibrio se altera y eso posibilita que un gran número de agujeros del emisor difundan a la base (también difunden electrones de la base al emisor pero en proporción mucho menor, si el doping del emisor es mucho más fuerte que el de la base).

Obsérvese que los agujeros que difundieron a la base *son, en la base, portadores minoritarios.*

La juntura base-colector está polarizada inversamente. La corriente que la atraviesa es una corriente de campo, de portadores minoritarios. Esta corriente, *que en una juntura aislada es pequeña pues hay pocos portadores minoritarios,* puede ser mucho más grande en el esquema visto.

En efecto, la base dispone de portadores minoritarios *p, inyectados desde el emisor,* en una proporción regulada por la corriente de la juntura base-emisor.

Estos portadores atraviesan la base y son recolectados por el colector (de ahí su nombre). En la medida en que la base sea estrecha, la mayor parte de los agujeros inyectados la recorren y llegan al colector. Algunos se recombinan con electrones, que son mayoritarios en la base.

Si la base fuera muy ancha, todos los portadores se recombinarían y no existiría transferencia de agujeros.

La corriente desarrollada por un pequeño voltaje directo (base-emisor) es recogida contra un mayor voltaje inverso (base-colector). Se obtiene así una ganancia de potencia apreciable: con la misma corriente, se logra un voltaje de salida grande a partir de un voltaje de entrada pequeño.

Dicho de otra manera, una resistencia de entrada pequeña da lugar a una resistencia de salida grande.

De ahí el nombre de *transistor* (transfer-resistor) dado al dispositivo.

Existen dos tipos de transistores, según sean las capas semiconductoras empleadas: NPN y PNP. En ambos casos, las letras designan las tres zonas de la estructura transistor correspondiente.

Transistores integrados

Hay muy variadas tecnologías de fabricación de transistores. En la Fig. 3 se representa el esquema de un transistor plano, de difusión NPN.

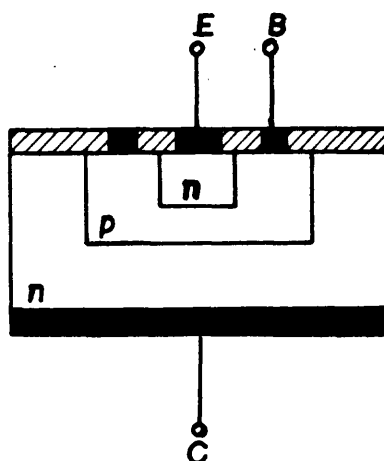


Fig. 3

Cuando el transistor es parte de un circuito integrado, el esquema cambia por la necesidad de aislar el colector del sustrato y la necesidad de una conexión del lado superior (figura 4).

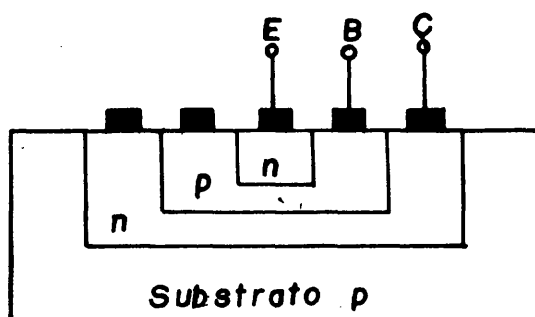


Fig. 4

Un transistor PNP exigiría *todavía una capa más*, de allí que sean algo más caros que los NPN.

En un circuito integrado, los diodos no se implementan como tales. Resulta más económico partir de la estructura básica del transistor y emplear una juntura como diodo, dejando el tercer terminal abierto.

En los hechos, el colector es la capa que aísla el diodo base-emisor del sustrato (ver figura 4).

Con el nombre de estructuras de *efecto de campo* se conocen un conjunto de dispositivos que se caracterizan por un mismo esquema de funcionamiento. En estos dispositivos, una barra de material semiconductor N o P es sometida a la acción de un *campo eléctrico*. Como resultado de esta acción, *cambia la conducción de la barra* semiconductor.

Con este efecto se logra construir dispositivos denominados FET (Field Effect Transistor) que poseen un electrodo de control, *Gate*, capaz de alterar un *ca*n*al* de conducción tipo P o tipo N. Estos dispositivos pueden cumplir la mayoría de las funciones de los transistores convencionales, en muchos casos con grandes ventajas.

Debido a que los dispositivos de efecto de campo, por razones históricas tam*bién* se llaman *transistores*, se suele emplear la palabra *bipolar* para designar a los *transistores de juntura convencionales*.

Las principales ventajas de los FETs se encuentra en que:

- a) el electrodo de control prácticamente no consume corriente;
- b) se pueden construir *con menos capas* que la estructura de transistor convencional y de allí que se puedan fabricar microestructuras mucho más complejas.

Los FETs presentan, en cambio, una menor velocidad de respuesta que los transistores bipolares, si bien esta diferencia tiende a disminuir a medida que mejoran las tecnologías de diseño y fabricación.

FET de juntura

Sea una barra de material semiconductor tipo N (figura 1).

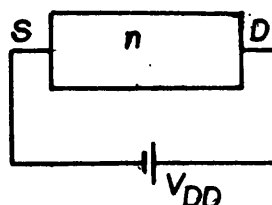


Fig. 1

Bajo la acción de un voltaje aplicado V_{DD} , circula corriente de portadores mayoritarios (electrones). La barra actúa como un resistor. Se llama Fuente S (*Source*) al terminal por donde entran a la barra los portadores mayoritarios y Drenador D (*Drain*) al terminal por el que salen.

Supongamos que sobre ambos lados de la barra se forman dos capas de semiconductores p+, fuertemente dopados, constituyendo un tercer terminal llamado Gate G. Quedan así determinadas dos junturas p-n que polarizamos inversamente (figura 2).

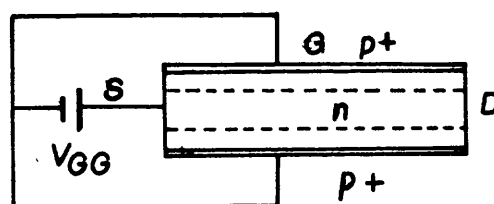


Fig. 2

De esa manera, se crea en ambas junturas una zona de carga espacial, desprovista de portadores. Se estrecha el canal N de que disponen los portadores para circular.

Si superponemos la acción de las dos fuentes de voltaje (Fig. 3), los portadores mayoritarios (electrones, en el ejemplo) atraviesan la barra de S a D.

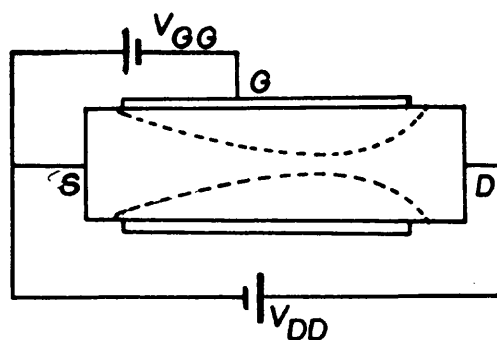


Fig. 3

A lo largo de la barra se produce una caída de voltaje. Como consecuencia, la tensión de la barra en el extremo D es más alta que en el S. La juntura Canal-Gate está más fuertemente cortada (polarizada inversamente) en el extremo D. La zona de carga espacial se ensancha cerca de D y se estrecha el canal donde existen portadores libres para conducir.

La aplicación de polarización inversa a la juntura GS limita la corriente que atraviesa la barra, por el mecanismo de quitar portadores en la zona

de carga espacial.-

La corriente es controlada por *el campo* asociado a la juntura polarizada inversamente. Este dispositivo se llama *transistor de efecto de campo* (Field Effect Transistor o FET) *de juntura*.

MOS - FET

El tipo de estructura MOS permite implementar FETs que han tenido un desarrollo mucho mayor que el de los FETs de juntura. En la Fig. 4 se representa un Mosfet canal P.

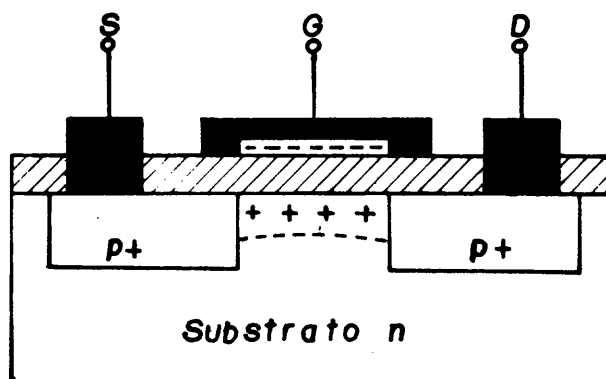


Fig. 4

Sobre un sustrato n se difunden dos zonas p+ que funcionarán como S y D. Sobre el óxido, una película metálica constituye el terminal G.

Aplicando un voltaje negativo a G, se desarrolla un campo eléctrico en el dieléctrico que atrae cargas positivas en el semiconductor.

De esa manera se induce un canal P que conecta S con D permitiendo el flujo de portadores.

Cuanto mayor sea el voltaje negativo aplicado a G, mayor será la corriente que circula.

La capa aislante de óxido otorga a este dispositivo muy elevada resistencia de entrada.



Diodo de cuatro capas

Sea la estructura de cuatro capas P-N-P-N de la figura 1.

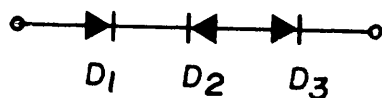
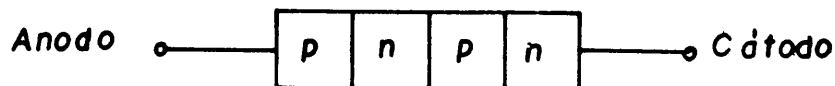


Fig. 1

En correspondencia, se representa en la figura los diodos de las distintas junturas. Con este esquema, parece que el dispositivo no puede conducir jamás. Aplicando un voltaje inverso (*ánodo negativo respecto al cátodo*), el dispositivo está cortado (D_1 y D_3 lo están). Aumentando el voltaje inverso, puede llegarse a la conducción por ruptura (breakdown) de las junturas D_1 y D_3 .

Aplicando un voltaje directo (*ánodo positivo respecto al cátodo*), las junturas D_1 y D_3 están polarizadas directamente pero D_2 lo está inversamente, por lo que el dispositivo está también cortado.

Aumentando el voltaje directo, se llega a un punto en que la juntura D_2 entra a conducir por efecto avalancha (breakover) y todo el dispositivo conduce. En esta condición la corriente sube abruptamente y debe ser limitada por el circuito exterior. Una vez en conducción, esta situación se mantiene mientras la corriente sea superior a un cierto valor, la *corriente de mantenimiento* (*holding o latching*).

Modificando la estructura de cuatro capas de modo de construir dos estructuras iguales y opuestas (Fig. 2), se consiguen dispositivos bilaterales, cuya conducta es *simétrica*.

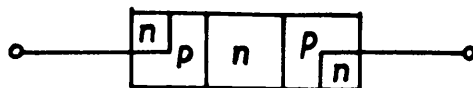
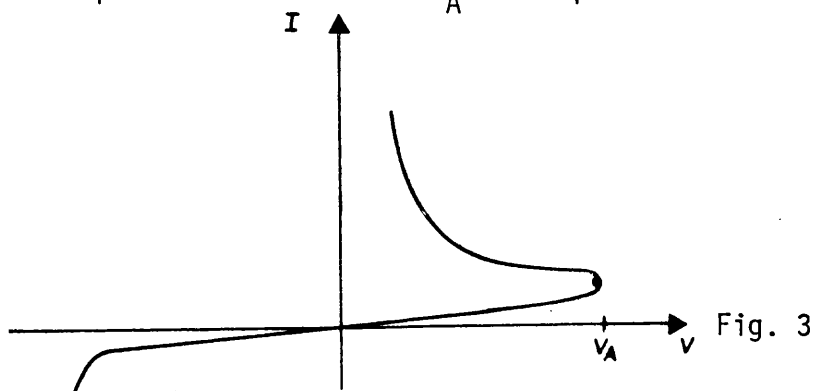


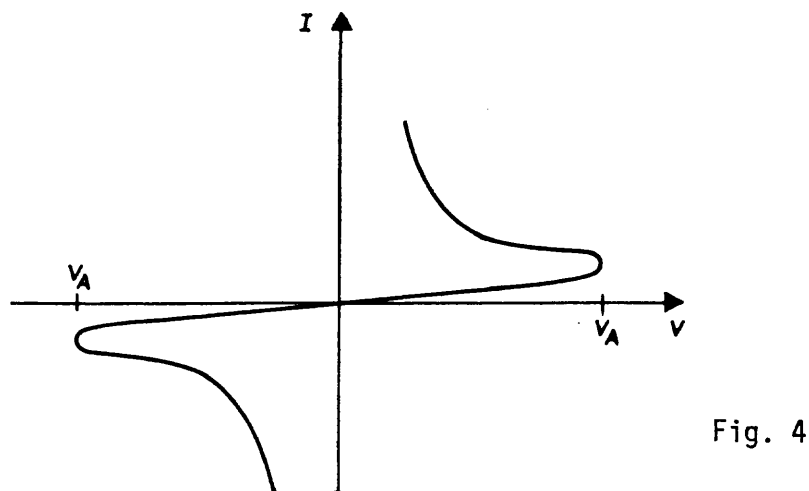
Fig. 2

Diac

El diodo de cuatro capas posee una curva de conducción dada por la figura 3. A partir de la tensión V_A el dispositivo entra en conducción.



La estructura *simétrica*, denominada *diac*, puede conducir en ambas direcciones, a partir de la tensión V_A , (figura 4).



Tiristor o *SCR* (Silicon Controlled Rectifier).

El *tiristor* es una estructura PNP en la que se tiene una conexión externa para la tercera capa: el *Gate G* (figura 5).

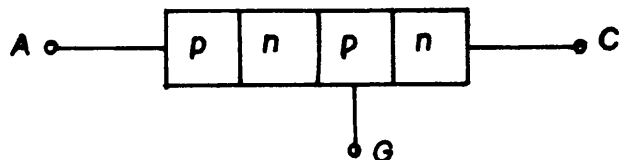


Fig. 5

Si no se emplea el terminal G, la curva de conducción es la indicada en la figura 3.



La inyección de una pequeña señal en el terminal G altera la situación y *permite encender a menor voltaje ánodo-cátodo*. De esta manera, el dispositivo es capaz de entrar en conducción a una tensión cualquiera, *inferior a V_A* .

Una pequeña señal de disparo permite controlar el instante en que el tiristor entra en conducción. El dispositivo conduce hasta que la corriente extraída por el circuito sea inferior a la *corriente de mantenimiento*.

Por esta manera de trabajar, se les denomina *rectificadores controlados (SCR)*

Triac

Con una estructura PNP de tipo bilateral, con electrodo de control, se obtienen dispositivos que controlan corrientes en ambos sentidos mediante las señales aplicadas a un terminal G.

Este dispositivo se llama *triac* y se emplea para controlar corrientes alternas mediante la elección del momento en que entra en conducción.



Supongamos que se tienen dos inductores próximos (Fig. 1).

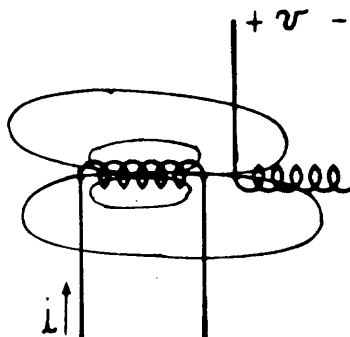


Fig. 1

El primero es recorrido por una corriente i y el segundo está abierto. Parte del flujo creado por la corriente i atraviesa el segundo inductor.

Se dice, en este caso, que ambos inductores están *acoplados*, o que existen entre ambos *inductancia mutua*, además de la inductancia de cada uno.

Si la corriente i *se modifica*, cambia el flujo en *ambos* inductores, en el primero por su inductancia propia, en el segundo por el acoplamiento.

Se tendrá entonces un voltaje *inducido* en el segundo por la variación del flujo del primero.

Ejemplo: En el circuito de la Fig. 2 se supone que en estado de régimen se abre la llave S .

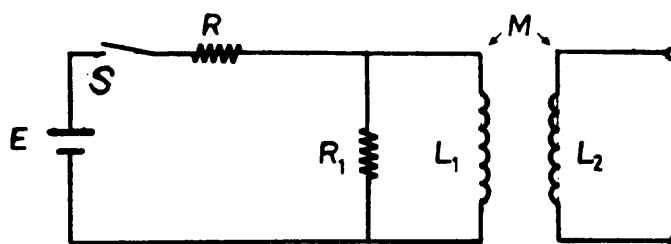


Fig. 2

Se indica con M el acoplamiento mutuo de los dos inductores.

Como el inductor L_2 está abierto, no circula corriente entre sus bornes.

Al abrir la llave, la corriente en L_1 , que valía:

$$\frac{E}{R}$$

no puede cambiar bruscamente y evoluciona con continuidad. A partir de ese valor caerá a cero con constante de tiempo L_1/R_1 (Fig. 3).

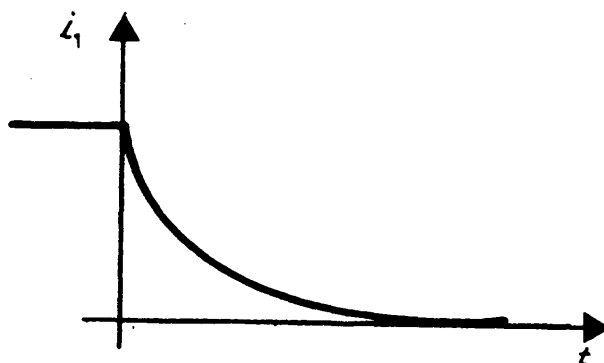


Fig. 3

Parte del flujo que esta corriente produce atraviesa al inductor L_2 , induciendo un voltaje. Inicialmente ese flujo tiene una variación grande, luego se va atenuando.

Observando en el osciloscopio la tensión en bornes de L_2 se puede apreciar una forma de onda como la indicada en la figura 4.

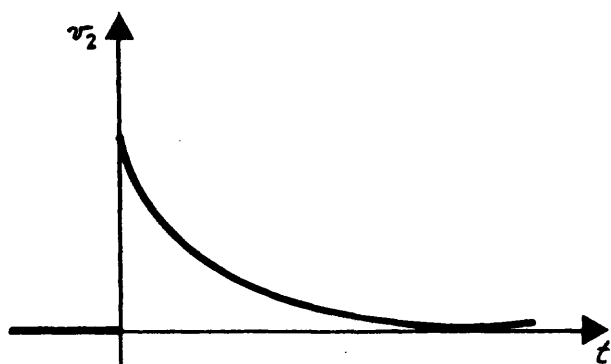


Fig. 4

En general, la variación de corriente en L_1 inducirá una tensión en L_2 . Si L_1 es recorrido por una corriente alterna, se genera en L_2 una tensión alterna de la misma frecuencia.



Cuando dos inductores *acoplados* están recorridos por corrientes i_1 e i_2 , el flujo en cada inductor resulta de la superposición de los flujos creados por cada corriente (figura 1).

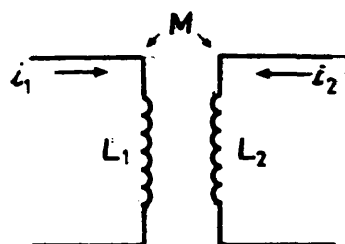


Fig. 1

Los razonamientos que permiten analizar el comportamiento de un inductor en circuitos pueden generalizarse para el caso de los circuitos con *mutuas*.

Para cada inductor se tiene una relación lineal entre el flujo y la corriente que lo produce:

$$\phi_1 = L_1 i_1$$

$$\phi_2 = L_2 i_2$$

Entre la corriente i_1 del primer inductor y el flujo ϕ_2 que atraviesa el segundo, existe una relación de la misma forma:

$$\phi_2 = M i_1$$

El factor M es el *coeficiente de inductancia mutua*, o simplemente la *mutua*. Se mide, como la inductancia, en Henrios.

El coeficiente de mutua es *único*. El flujo que crea L_2 en L_1 está dado por:

$$\phi_1 = M i_2$$

Se llama *coeficiente de acoplamiento* k a la relación:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

Este parámetro es siempre menor que 1. Su valor es tanto más próximo a 1 cuanto mayor sea la parte de cada flujo que atraviesa el otro inductor, es decir, cuanto mayor sea el acoplamiento.

Si se aplica corriente a ambos inductores, los flujos se obtienen por superposición. Los flujos respectivos serán:

$$\phi_1 = L_1 i_1 + M i_2$$

$$\phi_2 = L_2 i_2 + M i_1$$

Las expresiones de ϕ_1 y ϕ_2 son ambiguas. En cada inductor el flujo total resulta de la superposición de dos flujos que pueden ser del mismo sentido o de sentidos opuestos.

Físicamente esto dependerá del sentido de las corrientes, de la configuración de los inductores y de su posición relativa. (En particular, es importante el sentido en que están bobinados los inductores).

Desde el punto de vista del análisis de circuitos, esta ambigüedad se levanta completando la información con una pareja de puntos, en bornes de ambos inductores, en el esquema de los mismos (figura 2).

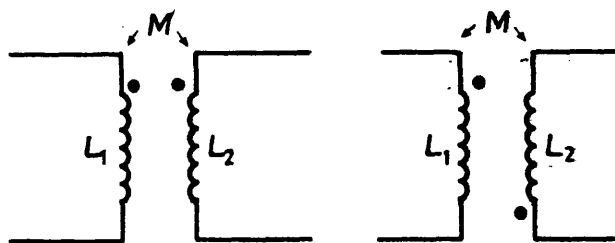


Fig.2

Con arreglo a esta convención, cuando los sentidos adoptados para las corrientes son tales que ellas entran en cada inductor por el terminal marcado, los flujos se suman. Cuando el sentido de referencia de una corriente cambia, los flujos se restan. En las figuras 3 y 4 se analizan dos casos posibles:

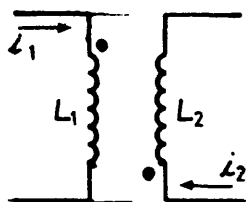


Fig. 3

$$\phi_1 = L_1 i_1 + M i_2$$

$$\phi_2 = L_2 i_2 + M i_1$$

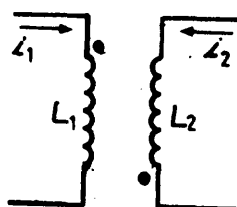


Fig. 4

$$\phi_1 = L_1 i_1 - M i_2$$

$$\phi_2 = L_2 i_2 + M i_1$$

Estas convenciones se aplican en las expresiones que vinculan voltaje y corriente. Tal es el caso del análisis de circuitos en régimen de *corriente alterna*. El vector voltaje en cada inductor será la suma de dos vectores, de las tensiones inducidas.

Nuevamente es preciso definir sin ambigüedad las relaciones voltaje-corriente. La convención adoptada es la indicada en la figura 5.

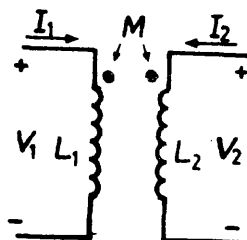


Fig. 5

Si los voltajes se toman con referencia a los terminales marcados y las corrientes entran por esos terminales, valen las expresiones siguientes:

$$V_1 = L_1 \omega j I_1 + M \omega j I_2$$

$$V_2 = M \omega j I_1 + L_2 \omega j I_2$$

Al cambiar el sentido de algunos de los voltajes o corrientes con respecto al convencional, cambiará su signo en la expresión correspondiente.

Las figuras 6, 7 y 8 ilustran algunos casos:

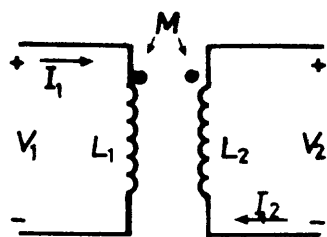


Fig. 6

$$V_1 = L_1 \omega j I_1 - M \omega j I_2$$

$$V_2 = M \omega j I_1 - L_2 \omega j I_2$$

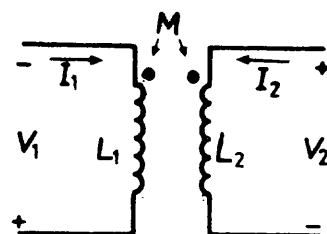


Fig. 7

$$V_1 = -L_1 \omega j I_1 - M \omega j I_2$$

$$V_2 = M \omega j I_1 + L_2 \omega j I_2$$

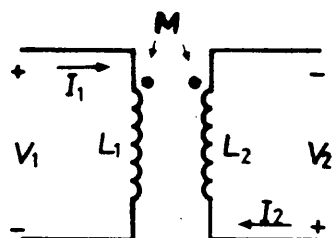


Fig. 8

$$V_1 = L_1 \omega j I_1 - M \omega j I_2$$

$$V_2 = -M \omega j I_1 + L_2 \omega j I_2$$

Un inductor es un dispositivo capaz de almacenar energía, bajo forma magnética.

Las características energéticas de un inductor permiten interpretar algunas de las propiedades circuitales de esta componente.

Energía almacenada en un inductor

Supongamos que el inductor de la Fig. 1 está inicialmente sin corriente.

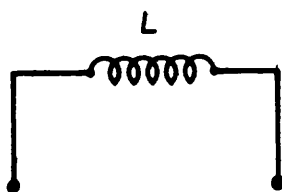


Fig. 1

Si alimentamos el inductor con una corriente i se creará un flujo:

$$\phi = Li$$

Si aplicamos una corriente adicional i , con lo que la corriente total pasa a valer $2i$, el flujo pasa a ser 2ϕ .

La variación del flujo desarrollará un voltaje inducido *que se opone al aumento de corriente*. Por esta razón, es necesario *suministrar energía para aumentar la corriente*: Esta energía es igual al producto de la corriente por la variación del flujo:

$$E = i \phi$$

La secuencia descrita puede continuarse. Cada aumento de corriente igual a i aumenta el flujo en ϕ y es necesario comunicar más energía.

Después de un número N de pasos, la corriente por el inductor es:

$$I = Ni$$

La energía que se suministra en todo el proceso será entonces:

$$E = i\phi + 2i\phi + \dots + Ni\phi = i\phi (1 + 2 + \dots + N) = \frac{N(N+1)}{2} i\phi$$

Si el número de pasos N es muy grande y la corriente i muy pequeña, se puede tomar:

$$E \approx \frac{N^2 i\phi}{2} = \frac{L N^2 i^2}{2} = \frac{L I^2}{2}$$

Esta energía queda disponible como *energía almacenada en el inductor bajo forma magnética*. Puede ser recuperada nuevamente en forma eléctrica.

Un inductor recorrido por una corriente almacena una energía de valor:

$$E = \frac{LI^2}{2}$$

en que I es el valor de la corriente.

Ejemplo: Supongamos un inductor de 100 mHy recorrido por una corriente de 100 mA. La energía almacenada es:

$$E = \frac{LI^2}{2} = \frac{100 \times 10^{-3} \times 10^4 \times 10^{-6}}{2} = \frac{1}{2} \text{ mJoule}$$

Para tener idea del valor de esa energía, se puede ver que es la energía que se disipa en un resistor de 1 KΩ recorrido por una corriente de 1mA durante medio segundo:

$$E = RI^2t = 10^3 \times 10^{-6} \times \frac{1}{2} = \frac{1}{2} \text{ mJoule}$$

En régimen de *corriente alterna*, al variar la corriente instantánea, la energía almacenada también varía. Si la corriente que circula es:

$$i = I \cos wt = \sqrt{2} I_{ef} \cos wt$$

la energía almacenada será:

$$e = \frac{Li^2}{2} = \frac{LI^2}{2} \cos^2 \omega t = \frac{LI^2}{2} \frac{(1 + \cos 2\omega t)}{2} = \frac{LI^2 e_f}{2} (1 + \cos 2\omega t)$$

Se observa que la energía almacenada es pulsante, con valor medio:

$$\frac{LIe_f^2}{2}$$

y con frecuencia de variación doble que la corriente (Fig. 2).

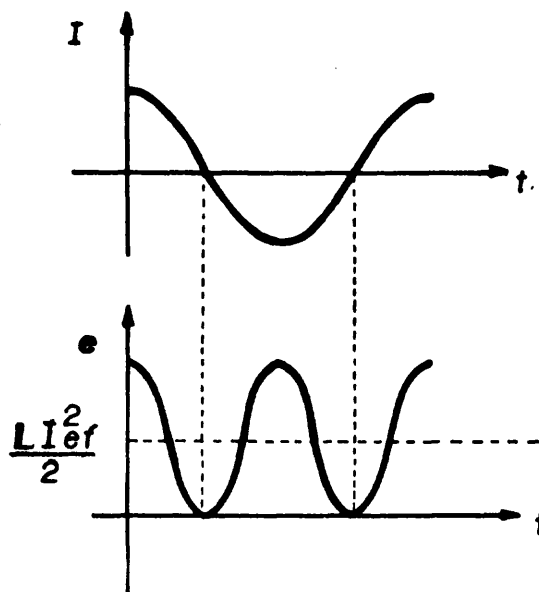


Fig. 2

Pérdidas de energía

En un inductor real, hay pérdidas de energía debidas a distintos tipos de disipación.

El alambre del devanado posee resistencia, por lo que el inductor real, además del almacenar energía en forma magnética, *disipa energía por efecto óhmico*.

Esta observación conduce, en forma natural, a la representación del inductor real indicada en la figura 3, con la resistencia del devanado representada por un resistor R_S .

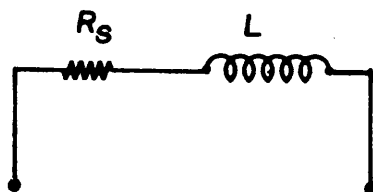


Fig. 3

Hay además otras posibles pérdidas de energía:

- a) pérdidas dieléctricas en el soporte de la bobina;
- b) pérdidas por corrientes parásitas inducidas en los alambres y masas metálicas próximas (corrientes de *Foucault*).

En el caso de inductores bobinados sobre *núcleos magnéticos*, se producen pérdidas de energía adicionales en la masa del núcleo que se manifiestan en el calentamiento del mismo. Se distinguen dos fenómenos principales:

- c) la tendencia del material de oponerse a un cambio de la magnetización, llamada *histéresis*. Al producirse campos magnéticos alternos, este fenómeno da lugar a pérdidas de energía que son proporcionales a la frecuencia.
- d) la existencia de un flujo variable en la masa del núcleo induce a voltajes. Circulan entonces corrientes, llamadas *corrientes de Foucault* (eddy currents), que producen una pérdida de energía de tipo óhmico en el núcleo. Para minimizar estas pérdidas se adoptan medidas tales como disponer el núcleo en forma de láminas para impedir que se establezca una corriente inducida importante. Las pérdidas de Foucault son proporcionales al cuadrado de la frecuencia.

Las pérdidas de energía *en el núcleo* (histéresis y Foucault) se expresan, usualmente, a través de un resistor equivalente *paralelo* mientras que las pérdidas *en el devanado* se representan por un resistor serie (figura 4).

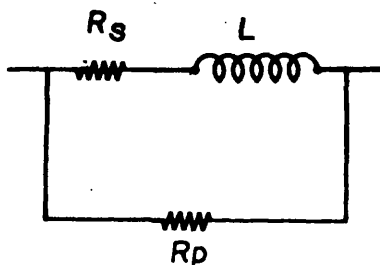


Fig. 4

Factor de calidad de un inductor

La manera más usual de expresar las pérdidas de un inductor es a través del llamado factor de calidad del inductor.

Se define como relación de la reactancia $L\omega$ a la resistencia serie R_s (figura 3).

$$Q = \frac{L\omega}{R_s}$$

Su valor será tanto mayor cuanto más se aproxime el inductor real a uno ideal sin pérdidas. Si el valor de Q es inferior a 10, el inductor no se asemeja a uno ideal. Con valores superiores a 100 ya se pueden considerar como inductores de alta calidad. Es muy difícil construir inductores con Q mayores de 300.

El factor de calidad Q varía con la frecuencia. Esto es debido a la variación de la reactancia $L\omega$ y a la variación de la resistencia de pérdidas R_s .

La resistencia del devanado varía con la frecuencia por efecto pelicular (skin): la resistencia aumenta como la raíz cuadrada de la frecuencia. Si consideramos solamente la pérdida óhmica del devanado, el Q del inductor crecerá como la raíz cuadrada de la frecuencia.

Por otra parte, las pérdidas del núcleo y las pérdidas por corrientes parásitas en el devanado crecen con la frecuencia. Por estas causas, disminuye el factor Q .

Se diferencian tres zonas en la conducta de un inductor:

- a) cuando predomina R_S , Q aumenta con la frecuencia;
- b) una zona en el cual el factor Q permanece constante;
- c) cuando predomina el núcleo y disminuye con la frecuencia.

Ejemplo: Un inductor de $L = 1 \text{ Hy}$ y $R_S = 10\Omega$. El factor Q vale:

$$f = 5 \text{ Hz} \quad Q = 3,14$$

$$f = 50 \text{ Hz} \quad Q = 31,4$$

$$f = 500 \text{ Hz} \quad Q = 314$$

Es posible que en 500 Hz dominen las pérdidas del núcleo y el valor real sea menor que el calculado con R_S .

Ejemplo: Sea un inductor de valor $L = 100\mu\text{Hy}$, con $Q = 100$ a $f = 1\text{MHz}$.

La resistencia equivalente serie de pérdidas es:

$$R_S = \frac{L\omega}{Q} = \frac{10^{-4} \times 2\pi \times 10^6}{100} = 6,28\Omega$$

Es preferible caracterizar el inductor, en esta frecuencia, por su Q que por su resistencia de pérdidas.

La Fig. 1 muestra el símbolo empleado para representar un *inductor* L en el dibujo de un circuito eléctrico.



Fig. 1

La unidad de inductancia es el Henrio (Hy).

A partir de la relación fundamental entre *flujo magnético*, *inductancia* y *corriente*:

$$\phi = Li$$

resulta la relación entre unidades:

$$1 \frac{\text{weber}}{\text{m}^2} = 1 \text{ Henrio} \times 1 \text{ Amperio}$$

En las aplicaciones técnicas se usan submúltiplos:

$$1 \text{ milihenrio (mHy)} = 10^{-3} \text{ Hy}$$

$$1 \text{ microhenrio (\mu Hy)} = 10^{-6} \text{ Hy}$$

El transitorio de un inductor

Si en el circuito de la Fig. 2 cerramos la llave S y observamos en el osciloscopio el voltaje en bornes del inductor L , se tendrá una forma de onda de transitorio como la dibujada en la figura 3.

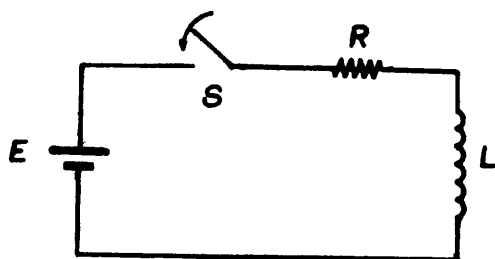


Fig. 2

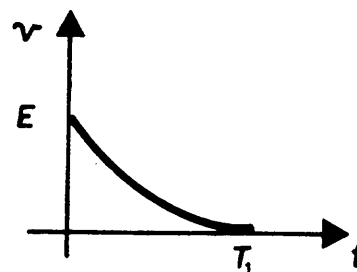


Fig. 3

La variación de la corriente con el tiempo puede observarse en el osciloscopio como el voltaje en bornes del resistor R (que es proporcional a esa corriente). Se tiene la forma de onda representada en la figura 4.

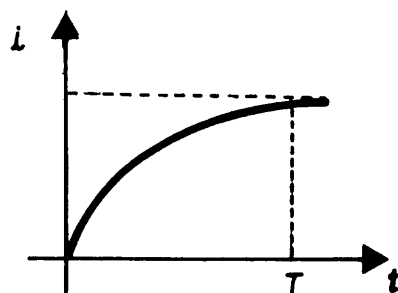


Fig. 4

A partir de un instante (tal como T) el voltaje en bornes del inductor es prácticamente cero y el inductor actúa como un cortocircuito. La corriente que lo recorre está determinada por el resistor R .

Esta observación es de carácter general. En el análisis de *circuitos de continua*, pasado el transitorio, podemos ignorar la presencia de los inductores y sustituirlos por cortocircuitos.

Ejemplo: En el circuito de la Fig. 5 al cerrar la llave S tendrá lugar un transitorio. Una vez finalizado, L_1 y L_2 se comportan como cortocircuitos. El circuito resultante es el de la figura 6.

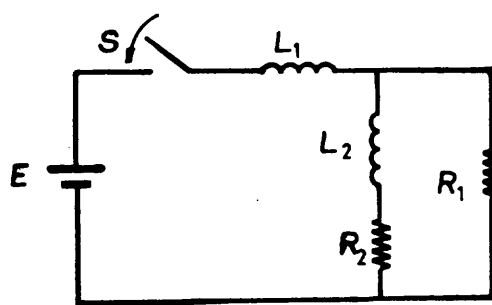


Fig. 5

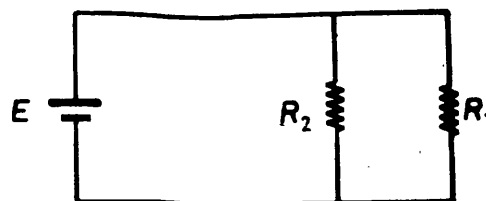


Fig. 6

Constante de tiempo de un circuito con inductor

La observación de las formas de onda de voltaje y corriente en el circuito de la figura 2 permite extraer conclusiones sobre la conducta eléctrica del inductor en un *transitorio*.

Se observa que al cerrar la llave S, el voltaje experimenta un salto (de 0 a E) pero la corriente no. Antes de cerrar la llave la corriente es cero y continúa cero en el instante siguiente. Crece luego, *con continuidad*, hasta alcanzar su valor de régimen. Podemos expresar este resultado diciendo que *el inductor se comporta en el instante inicial como un circuito abierto. En el estado final (es decir, pasado el transitorio), se comporta como un cortocircuito.*

Durante el transitorio, voltaje y corriente evolucionan entre los valores correspondientes a ambos estados. Esa evolución se caracteriza por medio de la *constante de tiempo*, cuyo valor mide la rapidez de la misma.

Para el circuito de la Fig. 2 la constante de tiempo es:

$$T = \frac{L}{R}$$

Con:

$$E = 10V$$

$$R = 1K\Omega$$

$$L = 1mH$$

$$T = \frac{10^{-3}}{10^3} = 1\mu\text{seg.}$$

En la Fig. 7 se representa la forma de onda de la corriente.-

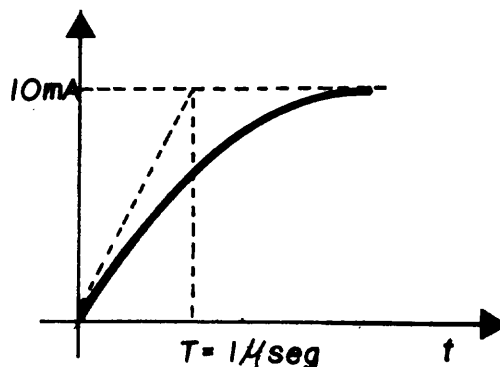


Fig. 7

Su valor final es:

$$i = \frac{E}{R} = \frac{10}{1} = 10 \text{ mA}$$

En un tiempo igual a una constante de tiempo, se llega al 63 % del valor final de la corriente. En el ejemplo, para $T = 1\mu\text{seg}$. La corriente será 6,3mA.

En dos veces la constante de tiempo, se llega al 86% del valor final.

El inductor en alterna

Supongamos que un inductor se alimenta con una corriente variable con el tiempo (figura 8).

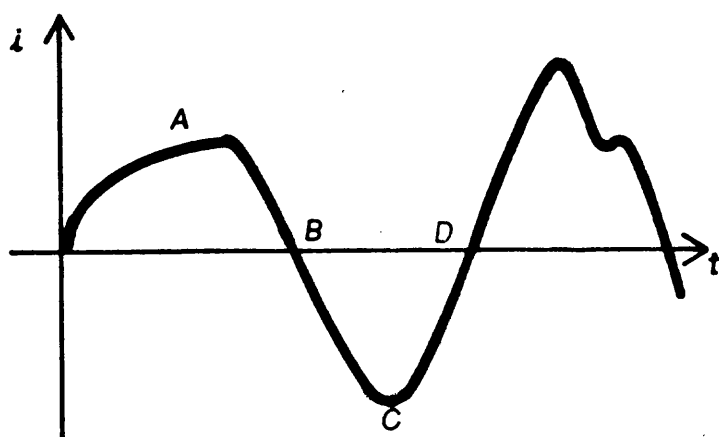


Fig.8

En una zona como la A o C, en que la corriente se mantiene esencialmente constante, el flujo magnético no varía y por lo tanto no hay voltaje inducido entre los bornes del inductor.

En una zona como D, en la que la corriente está creciendo rápidamente, la fuerte variación de flujo que eso implica se traduce en un voltaje en bornes del inductor tanto mayor cuanto más rápida sea la variación de corriente.

En una zona como B, el voltaje también es grande pero de sentido contrario, pues corresponde a una variación de flujo en sentido inverso.

En el caso de aplicar una corriente sinusoidal (Fig. 9) el voltaje resulta también sinusoidal.

De acuerdo a lo observado, los ceros del voltaje coinciden con los máximos y mínimos de la corriente. Los máximos de voltaje coinciden con los ceros en un sentido de la corriente. Los mínimos de voltaje corresponden a los ceros de sentido contrario de la corriente.

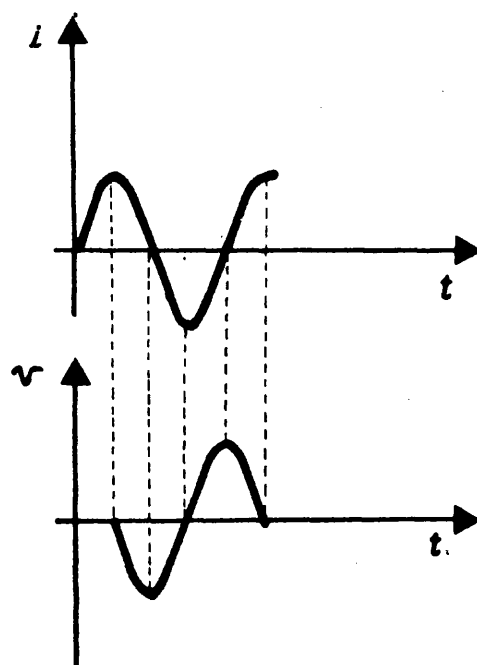


Fig. 9

Esta relación de voltaje y corriente se traduce en la representación vectorial en un defasaje de 90° en los vectores correspondientes: el vector voltaje V está 90° adelantado al vector corriente I (figura 10).

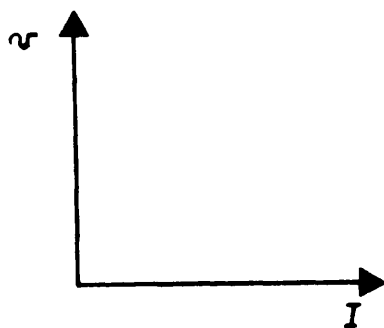


Fig. 10

Para relacionar las amplitudes de corriente y voltaje, debemos tener en cuenta:

- 1) El voltaje es la variación de flujo en la unidad de tiempo. Siendo el flujo proporcional a la inductancia L y a la corriente I , también lo será el voltaje.~
- 2) Considerando corrientes sinusoidales de igual amplitud pero distintas frecuencias (Fig. 11). Entre los mismos valores, I_1 e I_2 la variación de la corriente será más rápida en el caso de mayor frecuencia. Una variación de corriente más rápida implica un voltaje inducido más grande. El tiempo que se emplea en pasar de I_1 a I_2 es inversamente proporcional a la frecuencia

de la corriente. Por tanto, *la amplitud del voltaje sobre el inductor es proporcional a la frecuencia.*

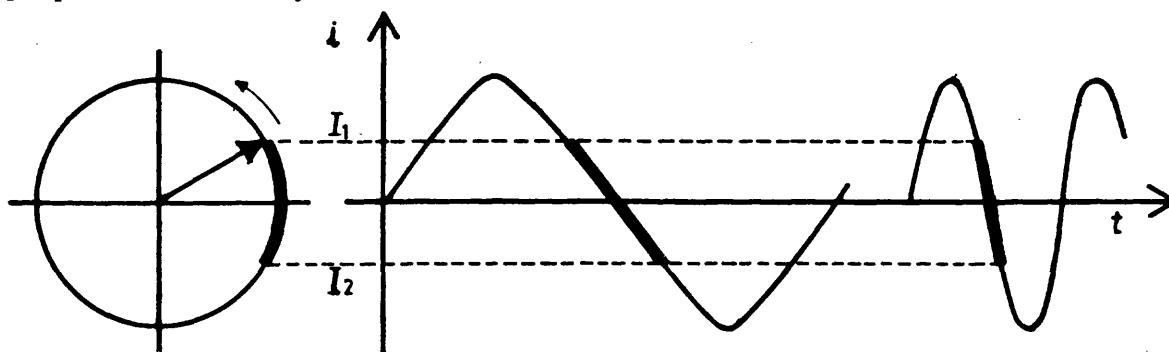


Fig. 11

En resumen: si la forma de onda de la corriente aplicada a un inductor es sinusoidal, también lo es la del voltaje y sus amplitudes cumplen las relaciones:

$$V = L \cdot 2 \pi f \cdot I$$

$$I = \frac{1}{L 2 \pi f} \cdot V$$

A la relación de amplitudes se le llama *reactancia inductiva* X_L :

$$X_L = L \cdot 2 \pi f$$

Ejemplo: Una inductancia $L = 1 \text{ mH}$ a la frecuencia $f = 100 \text{ Hz}$ representa una reactancia:

$$X_L = 10^{-3} \times 2 \pi \times 100 = 0,628 \Omega$$

La misma inductancia, a la frecuencia de 1 MHz , posee una reactancia de $6,28 \text{ K}\Omega$.

El empleo de realimentación en un sistema está directamente asociado con su estabilidad. Dependiendo del tipo de realimentación usado, la estabilidad del sistema puede mejorar o empeorar. Ajustando los parámetros de la realimentación, puede lograrse una conducta oscilante. Para ilustrar las distintas situaciones posibles, vamos a analizar el sistema realimentado de la figura 1.

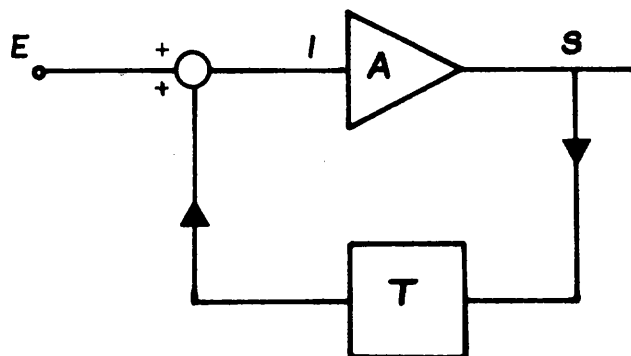


Fig. 1

El sistema consta de un amplificador ideal de ganancia A . La realimentación se realiza a través de un bloque que introduce un *retardo* (delay) T en el tiempo entre la entrada y la salida. En la Fig. 2 se representa la señal de salida x_o que el bloque T entrega a partir de una señal de entrada x_i .

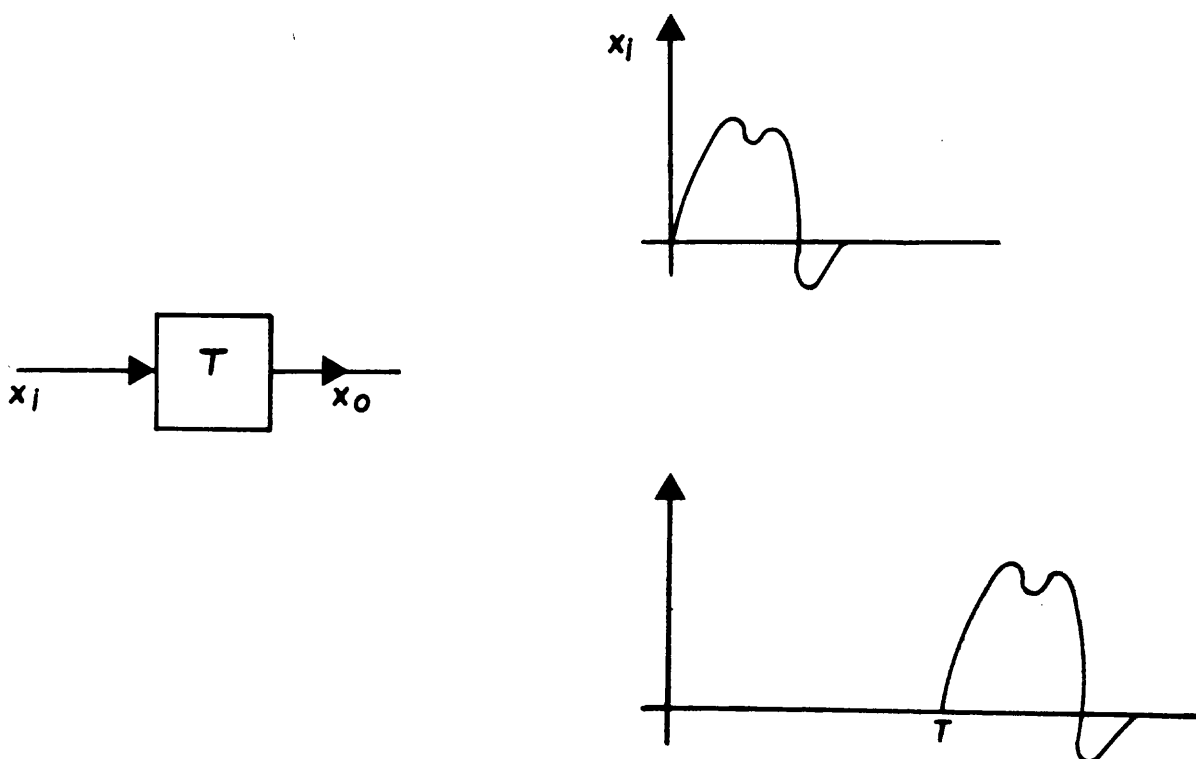


Fig. 2

En la Fig. 1, la señal que entrega el circuito de retardo se suma a la señal existente en el terminal de entrada al sistema (E) para generar la señal que se aplica a la entrada (I) del amplificador.

Supongamos que en el sistema de la Fig. 1 se aplica inicialmente una señal constante de 1 V en la entrada E. Esta señal aparece amplificada por A a la salida del sistema.

Cumplido un intervalo de tiempo T, el bloque de realimentación lo entrega nuevamente a la entrada del amplificador. Esta nueva señal es procesada por el amplificador y nuevamente entregada a la entrada por el circuito de retardo.

Se establece así una secuencia que puede dar lugar a situaciones muy distintas. Veamos los diversos casos.

Ganancia A = 1

Al aplicar a la entrada E del sistema una señal de valor 1, aparece en la salida S una señal 1. Transcurrido un intervalo T, se agrega 1 a la entrada del amplificador, dando lugar a una señal de valor 2 en I. Aparece a la salida S una señal igual y se repite así la secuencia de hechos que se analiza en la tabla siguiente:

Tiempo	E	I	S
0	1	1	1
T	1	2	2
2T	1	3	3
3T	1	4	4
4T	1	5	5

En la Fig. 3 se representa la evolución de la salida del sistema a partir de la señal de 1 V aplicada en la entrada.

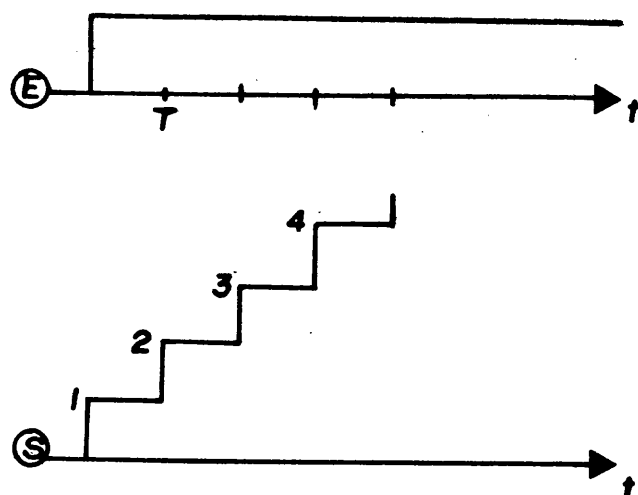


Fig. 3

Se tiene un sistema inestable. La aplicación de una tensión constante a la entrada trae aparejada, a través de la realimentación, una serie de saltos en la salida que la hacen *crecer sin límite*. Naturalmente, en un caso real, esta salida está limitada por las fuentes que alimentan el circuito y por las limitaciones de amplitud del amplificador.

Ganancia $A = -2$

Al aplicar una señal de 1 V en la entrada E, se tiene una señal en S de -2 V. Esta salida, luego de pasar por el retardo, se convierte en una entrada $I = 1 - 2 = -1$ V.-

Reiterando el análisis anterior con este otro valor la respuesta del sistema es la indicada en la tabla siguiente, y representada en la figura 4.

Tiempo	E	I	S
0	1	1	-2
T	1	-1	2
2T	1	3	-6
3T	1	-5	10
4T	1	11	-22

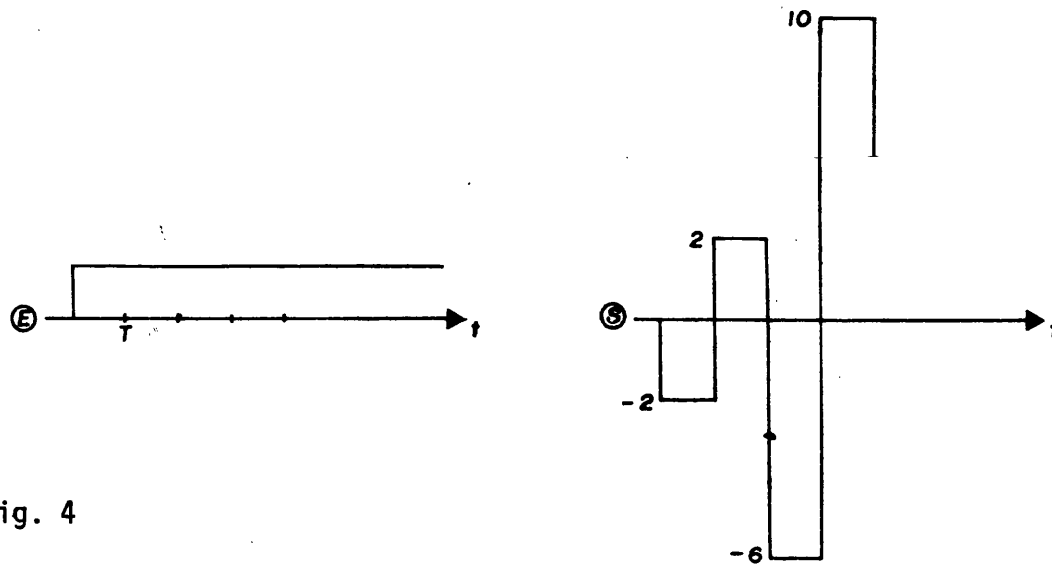


Fig. 4

El sistema es inestable. La aplicación de una señal constante en la entrada da lugar a una salida de tipo *oscilatorio*, de amplitud creciente.

Ganancia $A = -1/2$

Con este valor de la ganancia del amplificador, los valores de la salida se calculan en la tabla y se representan en la figura 5.

Tiempo	E	I	S
0	1	1	-1/2
T	1	1/2	-1/4
2T	1	3/4	-3/8
3T	1	5/8	-5/16
4T	1	11/16	-11/32

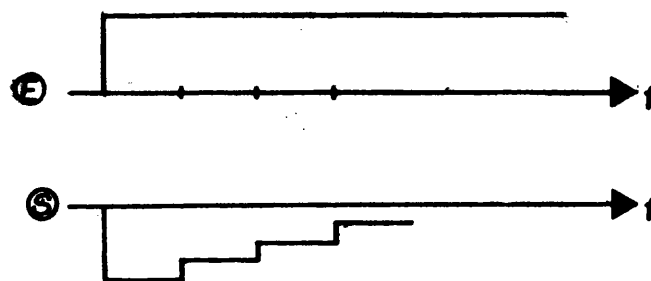


Fig. 5

La realimentación ha tenido por consecuencia *estabilizar el sistema*. El apartamiento del equilibrio, señal de salida nula, producido por la señal de entrada, es seguido por una sucesión de corrimientos que tienden a retornar la salida a su valor original. *Si la señal es de cualquier otro valor, ocurre exactamente lo mismo.*

Ganancia $A = -1$

Con esta ganancia, la secuencia de valores de la salida es la siguiente:

Tiempo	E	I	S
0	10	1	-1
T	1	0	0
2T	1	1	-1
3T	1	0	0
4T	1	1	-1

La Fig. 6 ilustra la evolución de la salida.

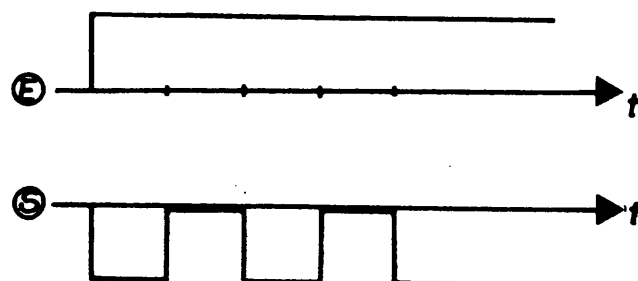


Fig. 6

Se ha logrado así un *oscilador*. La salida es *pulsante de amplitud constante*. En un caso real, esta situación no es fácil de conseguir. Un pequeño apartamiento de la ganancia del valor $A = -1$ traerá un cambio en la respuesta del sistema. Será del tipo *oscilante con amplitudes crecientes* (similares al caso $A = -2$) o *amortiguada* según que el valor de A sea menor o mayor que -1 .

Conclusiones

El análisis anterior muestra que *una misma configuración de realimentación de un sistema puede dar lugar a respuestas distintas.*

En el caso analizado, la respuesta depende del *valor y el signo* de la ganancia del amplificador.-

En general, en un sistema realimentado, se puede realizar un análisis similar. Supongamos que el sistema se puede representar según el diagrama de bloques de la Fig. 7.

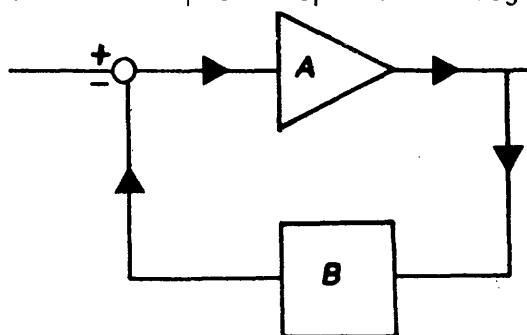


Fig. 7

El lazo de realimentación se abre en el punto P y se aplica una señal X (figura 8).

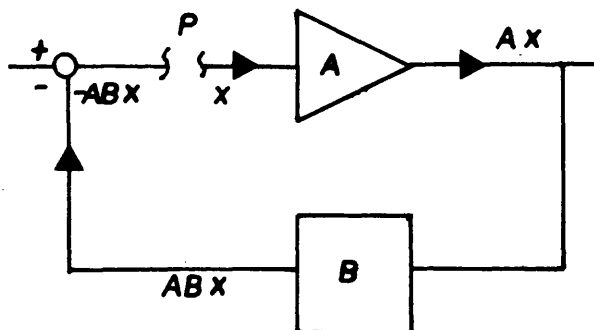


Fig.8

Recorriendo el lazo la señal X sufre diversos procesos: una amplificación de valor A, una transferencia B y un cambio de signo. Aparece nuevamente en P como $-ABX$. La relación entre los valores (señal obtenida a señal aplicada) se llama *ganancia del lazo*. En el caso de la Fig. 7 esa ganancia es AB.

En general, puede afirmarse que *la estabilidad de un sistema realimentado depende del valor de la ganancia del lazo y del signo que esta ganancia posee*. Según sea el caso, el sistema *oscilará, crecerá sin límites o estabilizará*.

Se habla de *sistemas de control* cuando interesa regular el valor de una cierta variable. Supongamos que se trata de mantener la temperatura de una habitación en 45°C . Se dispone de una estufa como fuente de calor y de un termómetro que mide la temperatura ambiente.

Una primera solución al problema consiste en emplear un dispositivo automático que conecte y desconecte la estufa a intervalos regulares de tiempo. Por ejemplo, puede conectarse la estufa por cinco minutos y desconectarse por diez. Se hace necesario en este caso un procedimiento de calibración, que asegure que el sistema lleve la temperatura de la habitación a 45°C .

Esta solución es mala. La variación de la temperatura externa a la pieza, o el cambio de rendimiento de la estufa harán perder validez a la calibración y la temperatura resultante se apartará del valor deseado.

En la figura 1 se muestra el diagrama de bloques de la solución analizada.

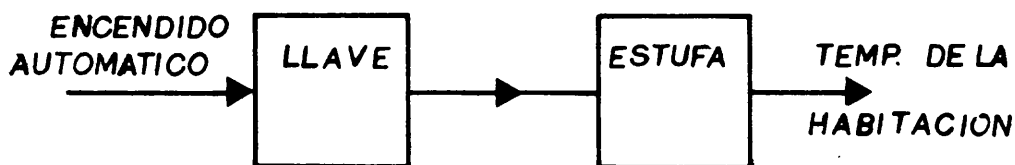


Fig. 1

En una segunda solución, un operador puede conectar o desconectar la estufa según que la temperatura ambiente esté por debajo o por encima de 45°C .

Esta solución presenta dos diferencias con la anterior:

- Exige un operador, *no es automática*.
- Es un sistema de control*: aunque varíe la temperatura externa o el rendimiento de la estufa, la temperatura de la habitación continuará en 45°C .

La segunda solución se ilustra en la figura 2.

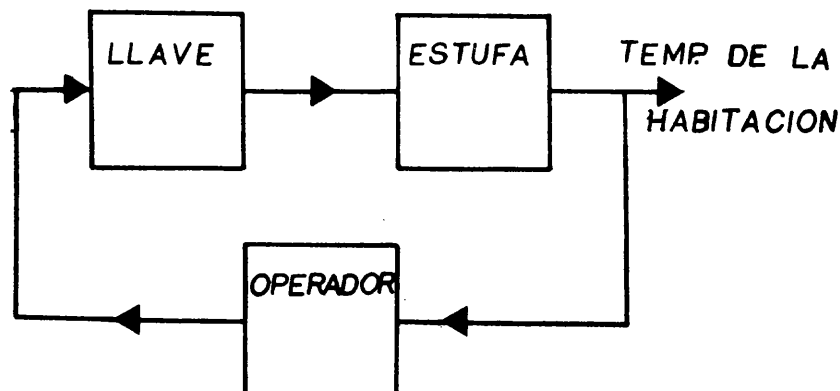


Fig. 2

El operador realiza una doble tarea: *compara la temperatura de la habitación con la temperatura deseada y actúa sobre la llave según sea el resultado de la comparación.*

En el diagrama de bloques se advierte la presencia de *un lazo o camino cerrado, característico de un sistema de control.*

En una tercera solución, la temperatura de la habitación *se detecta* mediante un transductor (por ejemplo un termistor) y la señal eléctrica obtenida *se procesa en un circuito de control* que regula la potencia entregada por la estufa.-

En este esquema, que es automático, la acción de control resulta de la diferencia entre *señal de salida* (la temperatura ambiente) y la *señal de referencia* (la temperatura de 45°C).

En la figura 3 se ilustra esta nueva solución.

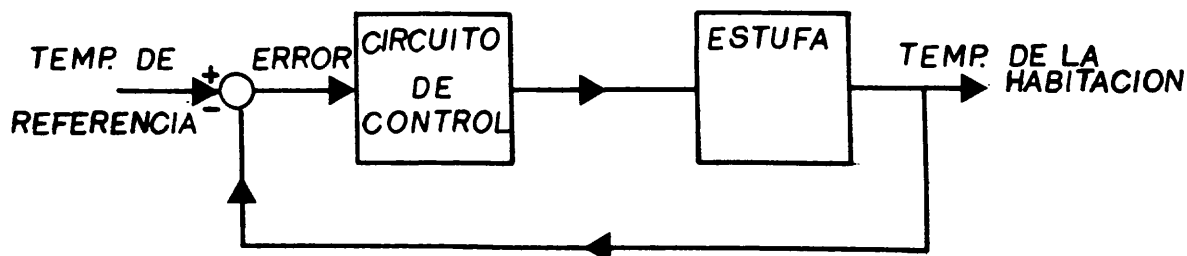


Fig. 3



En esta figura se representa por un pequeño círculo la operación de sustracción entre la temperatura de referencia y la temperatura ambiente.

A partir de esta diferencia, llamada error, se comanda el sistema de control. La señal de comando se obtiene de una comparación entre la entrada y la salida y no de una calibración como en la primera solución señalada.

Los ejemplos analizados muestran que los sistemas de control poseen, en su diagrama de bloques, un lazo cerrado (closed loop). En otros procesadores de señal, se tiene un sistema de lazo abierto (open loop).

La existencia del lazo cerrado crea una *realimentación* (feedback). *Parte de la señal de salida del procesador regresa a la entrada, se realimenta.*

Si se ha diseñado adecuadamente, *el sistema realimentado tiende a corregir todo apartamiento de la salida del valor deseado, independientemente de la calibración y de la variación de parámetros externos o internos. Esta propiedad resulta porque la variable de salida del sistema se compara con la entrada para generar la señal que se aplica al sistema de control. De esta manera, el control obliga al sistema a tener error cero, a igualar la salida con la entrada.*

Un sistema físico cualquiera posee situaciones que son denominadas de *equilibrio*. En estas posiciones el sistema -al menos en teoría- *puede permanecer indefinidamente en reposo, sin moverse ni cambiar.*

Consideremos como el ejemplo más sencillo, una esfera apoyada sobre una superficie. Un punto de equilibrio para la esfera, es un punto en el cual la superficie posee tangente horizontal. En la figura 1 se ilustran tres casos diferentes de equilibrio, todos en una superficie con tangente horizontal.

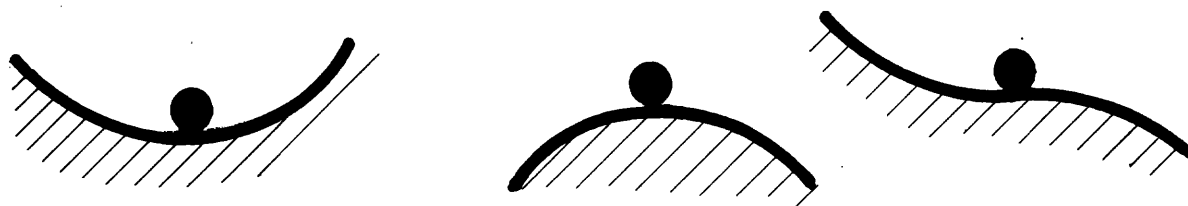


Fig. 1

La figura muestra tres situaciones diferentes de equilibrio. En la primera la esfera *se puede apartar de la situación de equilibrio sin que ocurra nada.* Luego de algunas oscilaciones, la esfera regresará a su posición.

En el segundo caso, el menor apartamiento que se produzca determinará que la esfera abandone la posición y *se aleje cada vez más de la situación de equilibrio.* En el tercer caso se tiene una situación intermedia.

Una posición de equilibrio se llama *estable* si es posible apartar el sistema algo de su estado de reposo y *el sistema regresa al equilibrio.* Esta es la situación del primer caso presentado.

Por el contrario, se denomina *equilibrio inestable o no estable, si existe algún tipo de apartamiento del estado del reposo que obliga al sistema a apartarse cada vez más de la posición de equilibrio.* Los dos últimos ejemplos de la figura 1 ilustran la situación de inestabilidad.

Sistemas multiestables

Un sistema puede tener muchos estados estables. En general, *entre dos estados estables existe un estado inestable*. La figura 2 ilustra este concepto en el caso de una esfera apoyada en una superficie: entre dos mínimos (estados de equilibrio estable), existe un máximo (estado de equilibrio inestable).

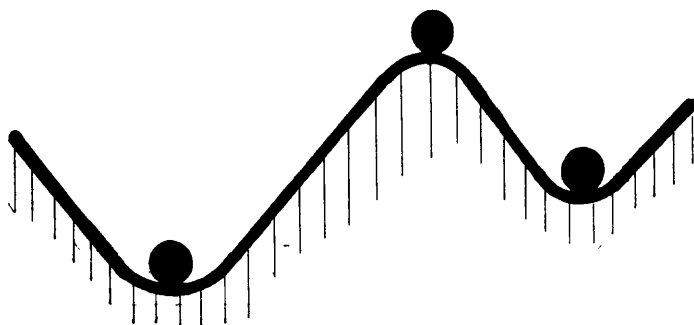


Fig. 2

Esta situación puede ilustrarse con ejemplos:

Ejemplo: Un interruptor es un sistema *biestable*: posee *dos estados estables* que corresponden a las dos posiciones de un interruptor. Este sistema mecánico posee una situación intermedia de equilibrio *inestable* a partir de la cual el interruptor salta a cualquiera de las situaciones estables.-

Ejemplo: Una llave de cambio posee varias situaciones estables. En particular, un selector de canales de televisión posee, generalmente, *doce posiciones estables*. - Entre dos posiciones estables existe una posición inestable, en la cual la llave puede dirigirse hacia una u otra de las situaciones próximas. En este caso, la llave posee además, *doce posiciones inestables*.

Movimiento alrededor del equilibrio estable.

Un sistema que posee un punto de equilibrio estable, regresa a este punto si es apartado de la posición de reposo. Básicamente existen dos conductas diferentes para el sistema: el regreso *oscilante* y el regreso *asintótico*.



En el regreso oscilante el sistema oscila alrededor del equilibrio, con amplitud decreciente. Una esfera en un mínimo de una superficie tiene regreso oscilante a la posición de equilibrio y su conducta semejante a un péndulo es bien conocida. Un sistema que posea algún tipo de fricción o de pérdida de movimiento, regresa al punto de equilibrio sin oscilar.

El caso típico de sistema asintótico lo constituye la suspensión de un automóvil. En este caso el amortiguador (cuando está en condiciones adecuadas) se encarga de evitar que el sistema oscile y permite que el automóvil regrese rápidamente a su situación de equilibrio.

Comportamiento de los sistemas inestables

Los sistemas inestables poseen dos conductas típicas: la conducta *oscilante* y la conducta *asintótica*. Alrededor de una posición inestable ocurren las dos situaciones que suceden en las posiciones estables. En el primer caso, el sistema oscila alrededor del punto de equilibrio inestable, *con amplitud creciente*. En el segundo caso, el sistema *se dirige permanentemente en una dirección*; en general, hacia otro punto de equilibrio estable.

La conducta asintótica es la más frecuente en los puntos inestables, especialmente cuando poseen en sus proximidades, puntos estables que pueden capturar el movimiento asintótico.



FUSIBLES

Los fusibles son *conductores de metal*, calibrados de manera de soportar la corriente nominal de trabajo pero de fundirse a una cierta corriente.

En un fusible de acción lenta se define la corriente *límite de fusión* como la que produce la fusión del fusible en un lapso comprendido entre *una y seis horas*, según la intensidad nominal del fusible.

En un fusible de *acción rápida*, se dispone de curvas que vinculan el tiempo de fusión con la corriente que se aplica.

En un alambre tendido en el aire, la corriente límite de fusión depende del diámetro D (en milímetros) y del tipo de material empleado.

Entre estos valores existe la relación:

$$D = 25.4 \left(\frac{I}{a} \right)^{2/3}$$

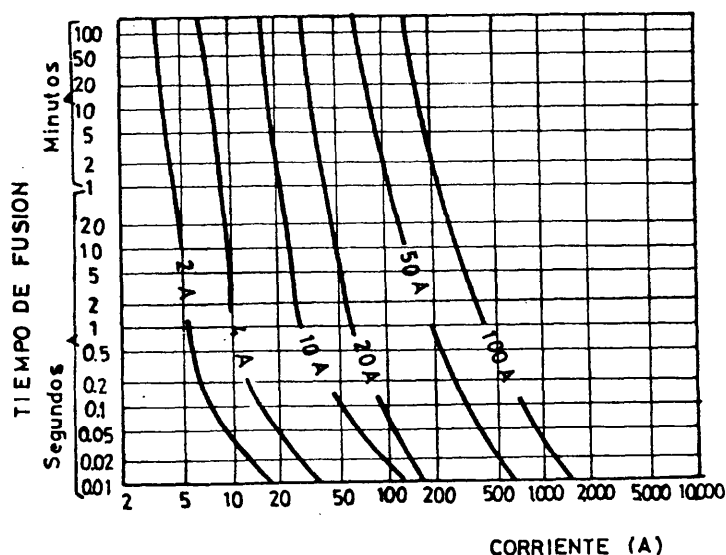
donde a es una constante que depende del material e I es la corriente límite de fusión en amperios. En la tabla adjunta se indican valores de a para diferentes materiales y el diámetro para cada corriente límite.

I (A)	D(mm)					
	Cobre a=10244	Aluminio a=7585	Plata a=5320	Estaño a=1642	Aleación estaño-plomo a=1318	Plomo a=1379
1	0,053	0,066	0,084	0,182	0,211	0,206
5	0,157	0,193	0,246	0,533	0,617	0,599
10	0,249	0,305	0,391	0,848	0,980	0,952
50	0,730	0,894	1,143	2,48	2,87	2,78
100	1,16	1,42	1,82	3,93	4,55	4,42

Ejemplo: Un fusible de plomo, con corriente límite de fusión de 10A, tiene un diámetro de 0,952 mm. El mismo fusible exige, en cobre, solamente 0,249 mm.

Las especificaciones de un fusible comprenden un juego de curvas que vinculan tiempo de fusión con corriente.-

En la figura 1, se dan las curvas de fusión de un tipo de fusibles.



Para cada calibre, se tiene el tiempo de fusión que corresponde a los distintos valores de la corriente. La fusión se produce tanto más rápidamente cuanto mayor es la corriente.

Cuando se interrumpe el circuito se produce un arco que debe ser extinguido.

El *poder de ruptura* de los fusibles es la máxima corriente que puede interrumpir con seguridad.

Cuanto mayor sea el poder de ruptura, más elaborada debe ser la construcción del cortacircuito a fusibles. Deben incorporarse elementos que ayuden a la extinción del arco y se subdividen los conductores fusibles separándolos lo más posible entre sí.



El calentamiento de un devanado, un semiconductor o, en general, una componente eléctrica cualquiera *fija los límites de trabajo y la vida útil de esta componente.*

En todos los casos se trata de un cuerpo que recibe una cierta *potencia de pérdidas* que eleva su temperatura.

El calentamiento de un cuerpo puede ser estudiado en forma muy simple, por analogía a los fenómenos de carga y descarga de capacitores. Para esto es necesario pasar revista a las leyes físicas que regulan el proceso de calentamiento y enfriamiento de un cuerpo.

Leyes del calentamiento de un cuerpo

El cambio de temperatura de un cuerpo se vincula a dos fenómenos básicos que ocurren: *la transmisión de calor al medio ambiente y la acumulación de energía al elevarse la temperatura del cuerpo.* Toda la energía comunicada al cuerpo homogéneo tiene dos destinos finales: *es transmitida al ambiente o eleva la temperatura del cuerpo.*

Las dos leyes básicas son *lineales*. El calor transmitido por el cuerpo al medio ambiente es *proporcional* (aproximadamente) *a la diferencia de temperaturas entre el cuerpo y el ambiente.* Si T es la temperatura del cuerpo y T_a es la temperatura ambiente (en grados centígrados), *la potencia transmitida al ambiente es:*

$$H (T - T_a)$$

donde H es el *coeficiente de transmisión al ambiente.* Este coeficiente depende de la forma del cuerpo, de su posición, de la existencia de circulación de aire o de otro fluido que altere la conducción del calor, etc.

La segunda ley básica vincula la elevación de temperatura de un cuerpo con la energía que se le ha comunicado. Si un cuerpo ha elevado su temperatura desde el ambiente hasta la temperatura T , se le ha comunicado *una energía.*

$$C (T - T_a)$$

donde C es la llamada *capacidad calorífica del cuerpo.* Este coeficiente depende de la masa del cuerpo y del material de que está formado.

Analogía del proceso de calentamiento

Para comprender el mecanismo de calentamiento de un cuerpo, es conveniente introducir una analogía con la carga de un capacitor. En esta analogía se tendrán como papeles relativos:

la energía es el análogo de la carga eléctrica

la temperatura es el análogo del potencial eléctrico

Con estas dos reglas de conversión, la potencia es el análogo de la corriente. La ecuación de transmisión de calor al ambiente vincula la "corriente" con la diferencia de "potencial". Esta ecuación lineal es el análogo de la ley de Ohm, donde H es la conductividad al ambiente. La ecuación de elevación de temperatura vincula "carga" con diferencia de "potencial", es el análogo de la ecuación fundamental del capacitor. La capacidad calorífica se convierte en capacidad eléctrica.

Con esta analogía, la figura 1 muestra el circuito equivalente de un proceso de calentamiento: una fuente de "corriente" W suministra la potencia al cuerpo y actúa sobre un circuito RC.

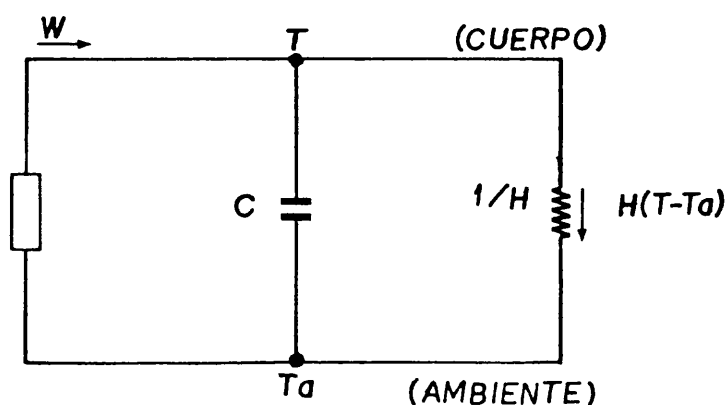


Fig. 1

Con este circuito, puede deducirse que la elevación de temperatura de un cuerpo sigue una ley exponencial, igual a la carga de un capacitor. Por esta razón puede asegurarse que el proceso de calentamiento sigue una exponencial.

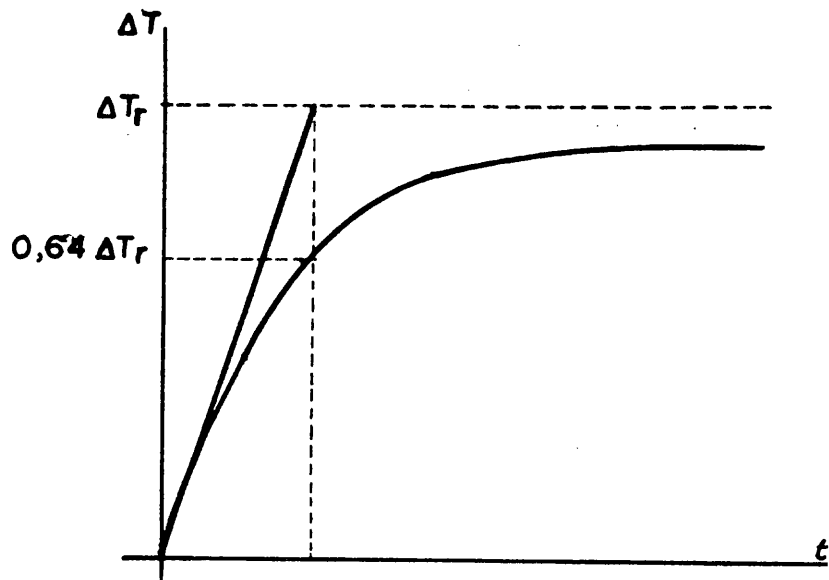


Fig. 2

En esta figura se llama:

$$\Delta T = T - T_a$$

La temperatura final, *de régimen*, está dada (ver fig. 1) por:

$$H(T_r - T_a) = W$$

$$\Delta T_r = \frac{W}{H}$$

La constante de tiempo de la exponencial es:

$$\frac{C}{H}$$

Curva de enfriamiento.

Si quita la potencia W , el cuerpo inicia un proceso de enfriamiento. En el circuito de la figura 1 es equivalente a eliminar la fuente W . Se tiene entonces un proceso de *descarga de un capacitor*, ver figura 3.

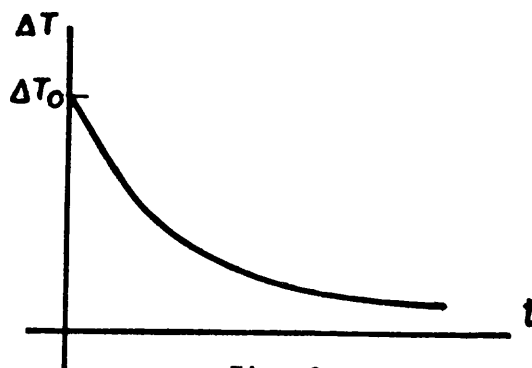


Fig. 3

Muchos circuitos requieren, para funcionar correctamente, una tensión de alimentación constante.

La tensión suministrada por una fuente de poder varía debido a distintas causas:

1) Al aumentar la *carga*, es decir la corriente entregada por la fuente, su voltaje disminuye.

Este efecto está representado por la existencia de una impedancia de salida R_s en el circuito equivalente Thévenin de la fuente (figura 1).

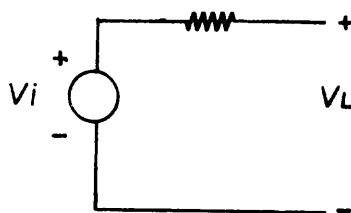


Fig. 1

2) Las variaciones del *voltaje de la línea* que alimenta a la fuente de poder se traducen en una variación de la tensión continua que ésta genera. En el circuito equivalente de la Fig. 1, este aspecto afecta el valor de la fuente V_i .

3) Las variaciones de *temperatura* afectan la conducta de los semiconductores, lo cual puede traducirse también en una variación del voltaje de la fuente.

Representando la tensión V_i por la fuente de poder en función de la corriente de carga I_L , se tendrá la curva de la figura 2.

Para un valor fijo de la tensión de la red (caso a) se tendrá una caída lineal del voltaje de la fuente.

En vacío ($I_L = 0$) se tendrá $V_L = V_i$, y en carga la tensión V_L disminuye linealmente. La pendiente de esa recta corresponde a la impedancia de salida de la fuente.

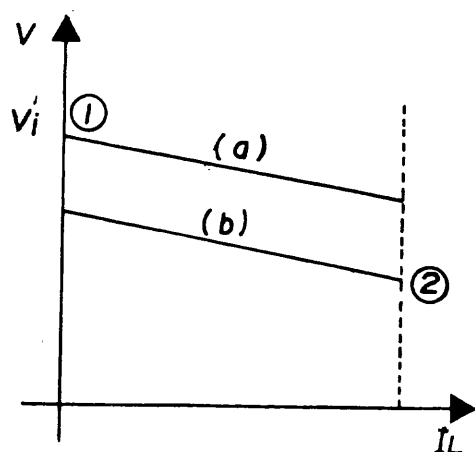


Fig. 2

Para un valor menor de la tensión de la red (caso b), se tiene un corrimiento hacia abajo de la característica anterior. Entre las condiciones extremas de funcionamiento, representadas por los puntos 1 (vacío y red máxima) y 2 (máxima carga y red mínima) puede tenerse una apreciable diferencia en el voltaje entregado por la fuente. Cuando esta diferencia no es admisible para el correcto funcionamiento de los circuitos, se recurre a un regulador de voltaje.

Reguladores de voltaje

El sistema básico de un regulador de voltaje serie se representa en la figura 3.

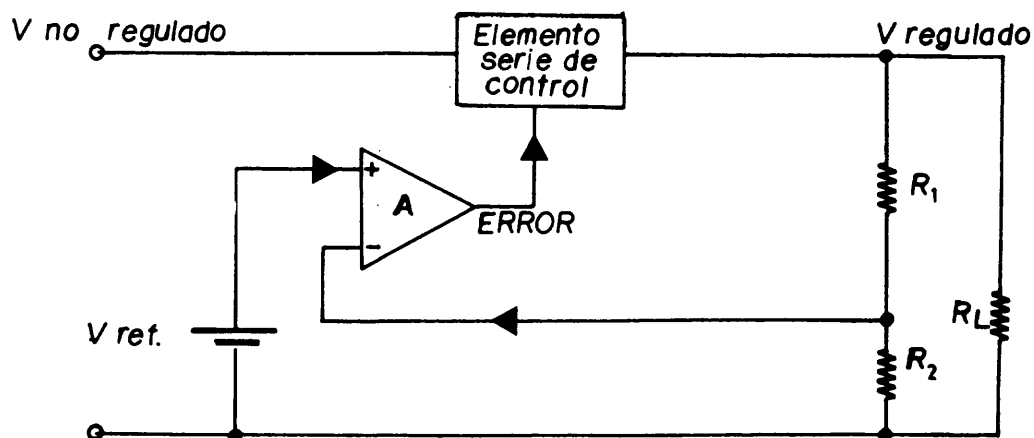


Fig. 3

A partir de un *voltaje regulado*, sustancialmente mayor que el deseado, se obtiene el *voltaje regulado* con un *elemento de control*. El elemento de control compara un voltaje fijo de referencia con el que interesa estabilizar. En la figura 3, el amplificador diferencial A, a través de la realimentación, intenta igualar V_{REF} con:

$$V \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Cualquier diferencia genera una *señal de error* que modifica la tensión que cae en el elemento regulador. De esta manera se tiene una salida:

$$V = V_{REF} \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

Hay diversos circuitos *reguladores de voltaje*, de distinto grado de complejidad. La calidad de los mismos se medirá por la regulación del voltaje frente a variaciones de la red, de la carga y de la temperatura.

Referencias y reguladores sencillos

En la Fig. 4 se representa un circuito muy sencillo, con un diodo Zener en paralelo con la carga.

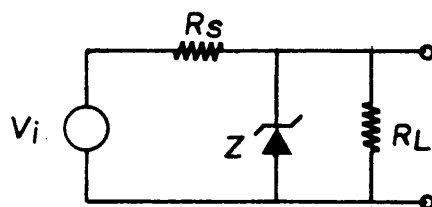


Fig. 4

Con un diodo Zener ideal, el voltaje de salida sería el impuesto por el Zener. La regulación sería perfecta y la salida, constante.

En un caso real no es así. El Zener posee una cierta resistencia propia R_z (figura 5). El voltaje en sus bornes depende de la corriente que lo recorre.

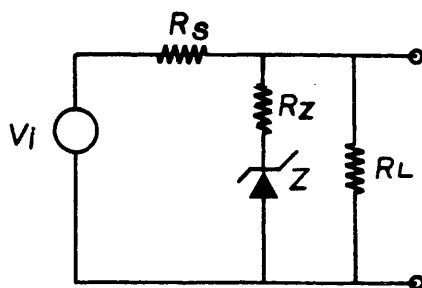


Fig. 5

La impedancia de salida de la fuente regulada es el paralelo de R_z y R_s . Cuanto menor sea este valor mejor será la regulación obtenida respecto de la carga.

La tensión en bornes del Zener varía no solamente con la corriente que lo recorre sino también con la temperatura. Existen maneras de compensar en temperatura los diodos Zener.

Estos circuitos con diodos Zener se emplean con *reguladores sencillos* o como fuentes de referencia para un *regulador realimentado*.

Reguladores realimentados

En la Fig. 6 se presenta el circuito de un regulador realimentado sencillo.

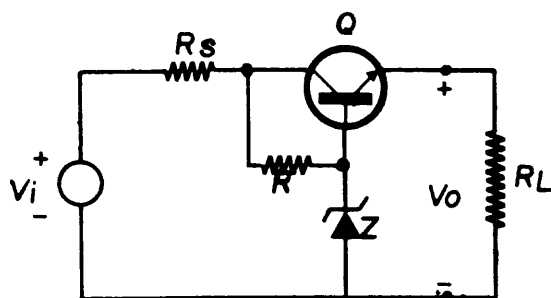


Fig. 6

La operación del regulador puede comprenderse de la descripción cualitativa. La base del transistor serie Q está a la tensión V_z de referencia.

Una elevación en el voltaje de línea produce un aumento en V_i que hace subir V_o . El transistor Q , que tiene su base fija, reduce su voltaje base-emisor,

conduce menos y aumenta la caída de voltaje entre colector y emisor. De esa manera V_o disminuye. Se compensa así la variación opuesta de V_o : crecimiento debido al aumento de V_i y disminución debida a la acción del regulador.

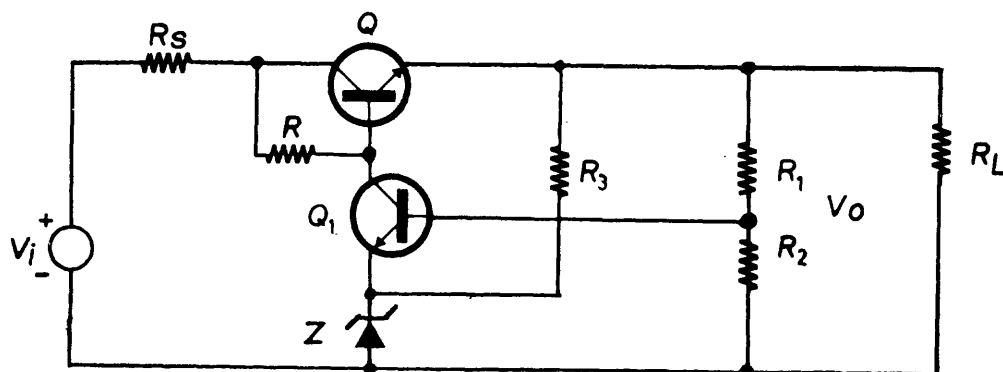
Análogamente el regulador estabiliza el voltaje respecto a variaciones de la carga. Un aumento de la corriente extraída a la fuente tiende a disminuir el voltaje V_o . Se modifica la polarización de Q y conduce más. La caída de voltaje colector-emisor disminuye y se compensa la caída de V_o .

En cualquier caso, las variaciones del voltaje regulado V_o son mucho menores que las de V_i .

Este regulador responde al esquema de la figura 3. Zener actúa como *referencia*. La señal de error se forma directamente como *diferencia de la tensión de base y emisor de Q* .

Si la variación del voltaje de salida se amplifica antes de aplicarse al transistor serie, se puede obtener una mejor estabilización.

La Fig. 7 muestra el esquema de una fuente regulada basada en esa realimentación.



En este circuito, Q_1 actúa como amplificador de error de la diferencia de la tensión del Zener y del divisor R_1 y R_2 . En lo demás, actúa como el regulador de la figura 6.

Reguladores integrados

El circuito de la figura 3 se presta muy bien a su implementación en un circuito integrado.

En estos casos se implementa *la referencia, el amplificador A y el transistor Q* (Fig. 6 y 7) *como regulador serie. Los resistores R_1 y R_2 forman parte del circuito exterior.*

Se tienen así reguladores integrados monolíticos, con las siguientes ventajas:

- el amplificador diferencial integrado posee excelentes condiciones de ganancia, balance de voltaje y equilibrio térmico;

- la referencia de voltaje puede compensarse en temperatura mucho mejor que en un circuito discreto;

- el pequeño tamaño y bajo costo del integrado permite en equipos grandes descentralizar la regulación de la fuente e incluir un regulador en cada placa. Se evitan así los problemas que tiene el empleo de una fuente regulada única que alimenta todos los circuitos. Se regulan además las caídas en los contactos, importantes cuando se trabaja con voltajes bajos y corrientes altas.

Las hojas de datos incluyen las configuraciones típicas para distintos casos de regulación y las componentes a conectar externamente: *resistores para fijar el valor de la tensión regulada y transistores serie externos*, en el caso en que sean necesarios para aumentar la corriente del regulador.

Además se deben conectar *capacitores de compensación* en los terminales indicados. El empleo de amplificadores realimentados implica el riesgo de oscilaciones que se evitan con un capacitor adecuado de compensación.

Algunos reguladores integrados permiten proteger al regulador en caso de cortocircuito a la salida por limitación de la corriente de salida a un valor que no exceda la disipación admisible.

Existen reguladores integrados que suministran un voltaje fijo.
Poseen tres terminales: *entrada no regulada, salida regulada y tierra.*
Poseen el formato de un transistor de potencia.

En la Fig. 1 se da el esquema sencillo de un regulador de este tipo:

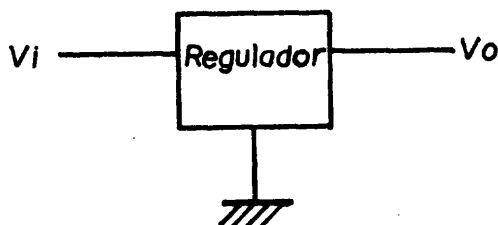


Fig. 1

Estos reguladores pueden emplearse en otros usos, con un adecuado circuito externo.

Regulador de corriente

En la Fig. 2 se da el circuito de una *fuentes de corriente* armada con un regulador de voltaje.

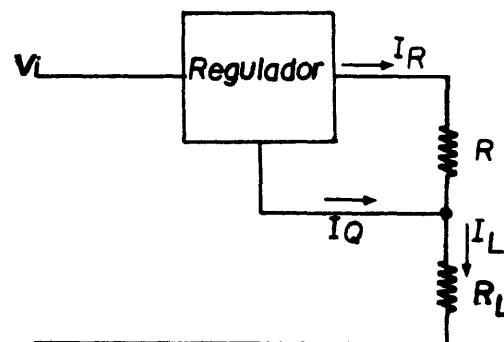


Fig. 2

Por la carga Z_L circula una corriente:

$$I_L = I_R + I_Q$$

La corriente I_R es fija, pues está determinada por el voltaje regulado:

$$I_R = \frac{V_o}{R}$$

La corriente I_Q es la parte de la corriente de entrada al regulador que no es entregada a su carga. Es, en general, muy pequeña y puede despreciarse. Se tiene entonces:

$$I_L \approx \frac{V_o}{R}$$

Regulador de tensión variable

En la Fig. 3 se representa un regulador de voltaje variable implementado a partir de uno fijo.

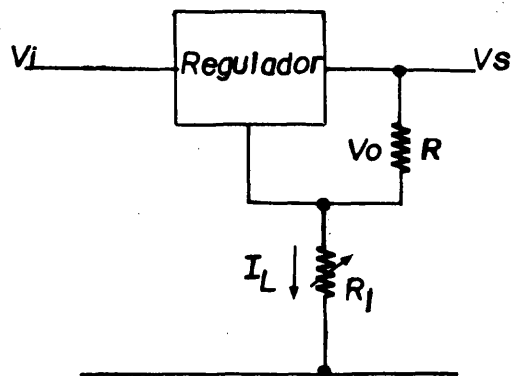


Fig. 3

Esta configuración coincide con la fuente de corriente de la figura 2. El voltaje de salida es la suma de V_o y la caída en R_1 :

$$V_s = V_o + R_1 \left(\frac{V_o}{R} + I_Q \right)$$

En la figura 1 se representa el diagrama de bloques del regulador integrado 723.

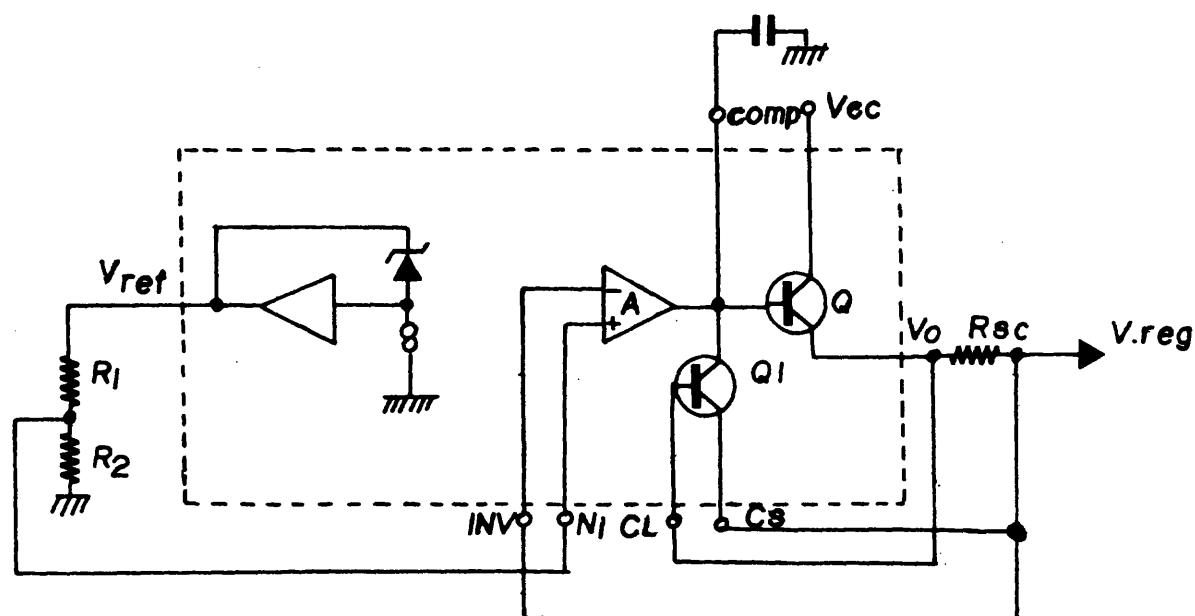


Fig. 1

La referencia de voltaje, V_{ref} , se establece a partir de un Zener, compensado en temperatura, alimentado por una fuente de corriente. Un amplificador separador entrega el voltaje V_{ref} , cuyo valor típico es 7,15 V.

Como consecuencia de la buena compensación térmica de la referencia (y de todo el integrado) el voltaje regulado tiene una variación con la temperatura menor de 0,015 %/°C.

El amplificador de error A, y el transistor Q amplifican la diferencia entre el voltaje de salida y una tensión de referencia V_o que determina el voltaje regulado:

$$V_o = V_{ref} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

Un capacitor en el terminal de compensación permite reducir la ganancia del amplificador en alta frecuencia y evitar el riesgo de oscilaciones.



El transistor Q_1 actúa como *limitador de corriente* del regulador.

Sobre el resistor R_{sc} , la corriente de salida desarrolla un voltaje tal que al exceder 0,6 V (aproximadamente) hace conducir al transistor Q_1 , normalmente polarizado al corte. De esa manera Q_1 *extrae corriente de base del transistor* Q y limita la corriente que puede entregar el regulador.

Para aumentar la corriente entregada por el regulador, se puede emplear un transistor externo en conexión Darlington con el transistor integrado Q .

En ese caso, el emisor de Q (terminal V_o del integrado) alimenta la base del transistor externo, el colector se conecta a voltaje no regulado y el emisor será el terminal de salida del regulador.