



22 29

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
GUAUTITLAN

“ PROYECTO Y CONSTRUCCION DE UN REACTOR
PATRON PARA PRUEBA DE SISTEMAS FLUORESCENTES
EN LABORATORIO ”

T E S I S

Que para obtener el Titulo de :
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P r e s e n t a

ALEX GUILLERMO RAMIREZ RIVERO



Director de Tesis :
M. en I. María de la Luz González Quijano

Cuatitlán Izcalli, Edo. de Méx.

Octubre 1990

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

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

I N D I C E.

CAPITULO I.

INTRODUCCION. Importancia de la Luz Artificial en Nuestros Días. Sistemas Modernos de Iluminación. Laboratorios de Alumbrado. Funciones de los Laboratorios de Alumbrado. Estructura y Organización de un Laboratorio. Equipo de los Laboratorios de Alumbrado.

EQUIPO DEL LABORATORIO DE ALUMBRADO PUBLICO DEL D.D.F. Equipo Fotométrico. Equipo Mecánico. Equipo Ambiental. Equipo Eléctrico. Necesidad de los Reactores Patrón.

NORMAS APLICABLES A LOS SISTEMAS DE ILUMINACION.

CAPITULO II.

SISTEMAS FLUORESCENTES DE ILUMINACION. Lámparas, Balastros y Luminarios.

LAMPARAS FLUORESCENTES.

Descarga Eléctrica en los Gases.

Funcionamiento de las Lámparas Fluorescentes.

Construcción de las Lámparas Fluorescentes. Electrodo, Bulbos, Gases, Fósforos, Bases.

Tipos de Lámparas Fluorescentes. De cátodo frío. De cátodo caliente.

Lámparas de Arranque Instantáneo (Slimline). De Arranque Rápido. De Alta Emisión Lumínica. De Muy Alta Emisión Lumínica. Circulares. En forma de "U". De Luz Negra y Azulada. Germicidas. Estimulantes del Crecimiento de las Plantas. Reflectoras (de flujo dirigido). Para Corriente Continua. Para Encendido a Bajas Temperaturas. Para Operar en Redes con Grandes Fluctuaciones de Tensión. De Sección no Circular (Power Groove). Compactas. Ahorradoras.

Características de Iluminación de las Lámparas Fluorescentes. Curva de Sensibilidad del Ojo Humano. Conversión de la Energía en Luz. Eficacia. Vida Util. Mantenimiento de Lámenes. Luminancia. Efecto Estroboscópico. Temperatura de Trabajo. Efecto de la Temperatura Ambiente. Efecto de la Humedad. Efecto de las Fluctuaciones de Tensión. Efecto de la frecuencia. Funcionamiento con c.c.. Interferencia de radio. Color. Nomenclatura. Tabla Comparativa de Características.

BALASTROS PARA LAMPARAS FLUORESCENTES.

Introducción. Impedancia Positiva y Negativa. Lámparas de Descarga Balastradas por Resistencia, por Lámpara Incandescente, por Capacitancia, por Bobina de Choque, por Capacitor y Bobina de Choque, Por Autotransformador y Bobina de Choque, por Autotransformador de Alta Reactancia de Dispersión.

Tipos de Balastros. Encendido por Pre calentamiento. Encendido Rápido. Encendido Instantáneo. Inductancia Serie o Bobina de Choque. Autotransformador de Alta Reactancia. Autotransformador Autorregulado.

Funciones que Cumplen los Balastos.

Componentes de los Balastos. Devanados. Núcleo. Sujeción de la Laminación. Capacitor. Resistencias. Protector Térmico. Filtro para Radio-Interferencia. Conductores para Conexión. Compuesto para Encapsulado. Recipiente Metálico. Placa de Datos.

Características de Funcionamiento de los Balastos. Efecto de la Tensión de Línea. Factor de Potencia. Protección Térmica y Ventilación. Balastos con Cápsula de Resinas Poliésteres. Ruido. Radio-Interferencia. Operación en Alta Frecuencia. Balastos Ahorradores. Factor de Eficacia de Balastro.

Normas Aplicables.

LUMINARIOS PARA LAMPARAS FLUORESCENTES.

Características Físicas. Mecánicas. Eléctricas. Fotométricas. Estéticas.

Componentes. Reflector. Difusor. Coraza. Pantalla. Refractor.

Clasificación. Comerciales. Para Uso Exterior. Para Decoración. Para Alumbrado Público. Industriales.

Características Generales de los Luminarios Fluorescentes.

Normas Aplicables.

CAPITULO III.

- III.1.- CURVA $\mu r - \beta$
- III.2.- ACOPLAMIENTO MAGNETICO DE BORINAS
- III.3.- CURVA DE MAGNETIZACION
- III.4.- CURVAS DE MAGNETIZACION DE MATERIALES MAGNETICOS COMERCIALES
- III.5.- FENOMENO DE HISTERESIS MAGNETICA
- III.6.- LAZO DE HISTERESIS Y RELACION DE FASE CON LA ONDA SENOIDAL
- III.7.- TRAZADOR DE LAZOS DE HISTERESIS
- III.8.- CIRCULACION DE CORRIENTES DE FOUCAULT
- III.9.- CORRIENTES PARASITAS INDUCIDAS EN UNA CHAPA DE NUCLEO FERROMAGNETICO
- III.10.- PERDIDAS MAGNETICAS POR UNIDAD DE PESO
- III.11.- DESPLAZAMIENTO DE LOS LIMITES DE UN DOMINIO PRODUCIDO POR UN CAMPO MAGNETICO
- III.12.- CAMBIOS EN LA CONFIGURACION DE LOS DOMINIOS DEBIDOS A UN CAMPO MAGNETICO
- III.13.- EFECTO BARKHAUSEN

CAPITULO IV.

- IV.1.- FLUJOGRAMA DE DISEÑO
- IV.2.- SECCION DE NUCLEO PARA REACTORES CON RELACION DE ENTREHIERRO DE 0.003.
- IV.3.- AMPERE-VUELTAS PARA REACTORES CON NUCLEO DE ACERO
- IV.4.- DIMENSIONES TIPICAS DE LOS NUCLEOS MAGNETICOS TIPO "E"
- IV.5.- DIMENSIONES REALES DEL NUCLEO USADO EN EL REACTOR
- IV.6.- CURVA DE MAGNETIZACION
- IV.7.- CURVA DE PERMEABILIDAD RELATIVA

CAPITULO IV.

FLUJOGRAMA DE DISEÑO. Tipos de Núcleo. Clases de Enfriamiento. Flujograma Típico. Estrategia de Diseño.

DEFINICIONES Y REQUISITOS DE NORMA. Reactor Patrón. Corriente Patrón. Reactor de Impedancia Variable. Recipiente. Blindaje. Estabilidad. Linealidad. Factor de Potencia. Temperatura de Operación.

ALTERNATIVAS DE DISEÑO. Núcleo de Aire con Capacitor Variable. Núcleo de Acero con Entrehierro y Capacitor Variable. Núcleo de Hierro-Aire tipo Imbolo con Resistencia Serie.

DIMENSIONADO DEL REACTOR. Producto de Energía. Dimensionado Preliminar. Prueba Electromagnética. Dimensionado Definitivo. Cálculo del Número de Vueltas. Cálculo del Calibre del Conductor. Cálculo de la Resistencia Efectiva del Conductor. Watts Totales por Disipar. Ajuste del Factor de Potencia.

VERIFICACION DEL AISLAMIENTO. Equipo de Prueba. Clases de Aislamiento. Aislamientos en Aire. Aislamientos en Aceite. Resistencia Mínima de Aislamiento. Corrección por Temperatura.

ESTUDIO TERMICO DEL REACTOR. Superficie de Enfriamiento del Bobinado. Superficie de Enfriamiento del Núcleo. Transmisión del Calor Producido. Transmisión por Convección y Radiación. Temperatura Nominal de Operación del Reactor.

CAPITULO III.

ANTECEDENTES TEORICOS.

FUNDAMENTOS DE ELECTROMAGNETISMO. Unidades, Conceptos y Leyes en Electromagnetismo. Imanes Naturales. Imanes Artificiales. Electroimanes. Ley de Inducción Electromagnética de Faraday. Campo Magnético Fijo y Conductor Móvil. Campos Magnético Variable y Conductor Fijo. Campo Magnético Variable y Conductor Móvil. Ley de Lenz. Densidad de Flujo. Efectos Motor y Generador. Fuerza Magnetomotriz. Intensidad de Campo. Permeabilidad. Reluctancia. Analogía Circuito Eléctrico-Circuito Magnético. Coeficiente de Autoinducción. Inducción Mutua. Coeficiente de Acoplamiento. Curva de Magnetización. Histéresis. Construcción del Lazo de Histéresis. Cálculo Práctico de Pérdidas por Histéresis. Corrientes de Foucault. Cálculo Práctico de Pérdidas por Corrientes Parásitas. Pérdidas Totales en el Núcleo.

MATERIALES MAGNETICOS. Materiales Ferromagnéticos Duros y Blandos. Teoría de los Materiales Magnéticos. Teoría Molecular de Ewing. Teoría de los Dominios. Efecto Barkhausen. Influencia de la Estructura Cristalina sobre las Propiedades Magnéticas. La Estructura Atómica y el Magnetismo. Estructura Cristalina. Deformación de la Red Cristalina. Efecto Magnetostrictivo. Efecto del Trabajo en Frio sobre las Propiedades Magnéticas. Deformación de la Red producida por el Temple. Influencia del Tamaño de los Cristales en las Propiedades Magnéticas. Materiales Magnéticos Blandos. Evolución de los Materiales Magnéticos Blandos. Resumen de Características de los Materiales Magnéticos Blandos.

CAPITULO V.

CONCLUSIONES.

INDICE DE FIGURAS.

CAPITULO I.

- 1.1.- RELACION ENTRE EL NIVEL DE ILUMINACION Y EL RENDIMIENTO EN EL TRABAJO.
- 1.2.- RELACION ENTRE EL NIVEL DE ILUMINACION Y LAS FALLAS HUMANAS.
- 1.3.- GRAFICA COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES SISTEMAS DE ILUMINACION.
- 1.4.- EQUIPO FOTOMETRICO.
- 1.5.- EQUIPO MECANICO Y AMBIENTAL.
- 1.6.- EQUIPO ELECTRICO Y RACK DE PRUEBA DE VIDA.

CAPITULO II.

- 11.1.- DESCARGA ELECTRICA EN LOS GASES
- 11.2.- PRODUCCION DE LUZ EN UNA LAMPARA FLUORESCENTE
- 11.3.- PARTES PRINCIPALES DE UNA LAMPARA FLUORESCENTE
- 11.4.- BASES PARA LAMPARAS FLUORESCENTES
- 11.5.- LAMPARAS DE ARRANQUE INSTANTANEO
- 11.6.- LAMPARAS DE ARRANQUE RAPIDO
- 11.7.- TIPOS DE LAMPARAS FLUORESCENTES
- 11.8.- LAMPARA DE ALTA EMISION LUMINICA (HO)
- 11.9.- LAMPARA DE MUY ALTA EMISION LUMINICA (YHO)
- 11.10.- CENTRO DE CONTROL DE PRESION EN UNA LAMPARA VHO
- 11.11.- LAMPARA FLUORESCENTE DE FLUJO DIRIGIDO (REFLECTORA)
- 11.12.- LAMPARA FLUORESCENTE DE SECCION NO CIRCULAR
- 11.13.- LAMPARA POWER GROOVE PERFECCIONADA
- 11.14.- LAMPARA FLUORESCENTE COMPACTA (TUBOS GEMELOS)

- 11.15.- CARACTERISTICAS DE OPERACION DE LA LAMPARA DE TUBOS GEMELOS
- 11.16.- LAMPARAS FLUORESCENTES AHORRADORAS DE ENERGIA
- 11.17.- CURVA DE SENSIBILIDAD DEL OJO HUMANO
- 11.18.- DISTRIBUCION DE LA ENERGIA TOTAL ABSORBIDA POR UNA LAMPARA FLUORESCENTE
- 11.19.- CURVA DE ESPERANZA DE DURACION DE LAMPARAS FLUORESCENTES.
- 11.20.- INFLUENCIA DE LOS CICLOS DE OPERACION EN LA VIDA DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES
- 11.21.- CURVA DE MANTENIMIENTO DE LUMENES EN VARIOS TIPOS DE LAMPARAS FLUORESCENTES BLANCO FRIO
- 11.22.- INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE LA PARED DEL BULBO DE UNA LAMPARA FLUORESCENTE
- 11.23.- EFECTO DE LA TEMPERATURA AMBIENTE SOBRE LA EMISION LUMINICA DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES DESNUDAS EN AIRE CALMADO
- 11.24.- RENDIMIENTO LUMINICO RELATIVO A DIFERENTES TEMPERATURAS AMBIENTE DE VARIOS TIPOS DE LAMPARAS FLUORESCENTES PARA INTemperie
- 11.25.- EFECTO DE LAS FLUCTUACIONES DE TENSION EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES
- 11.26.- CURVAS DE DISTRIBUCION DE ENERGIA ESPECTRAL EN LAMPARAS FLUORESCENTES
- 11.27.- CARACTERISTICAS DE IMPEDANCIAS
- 11.28.- LAMPARA BALASTRADA POR RESISTENCIA
- 11.29.- LAMPARA BALASTRADA POR LAMPARA INCANDESCENTE
- 11.30.- LAMPARA BALASTRADA POR CAPACITANCIA
- 11.31.- LAMPARA BALASTRADA POR BOBINA DE CHOQUE
- 11.32.- LAMPARA BALASTRADA POR LA COMBINACION DE CAPACITOR Y BOBINA DE CHOQUE
- 11.33.- BALASTRO FORMADO POR AUTOTRANSFORMADOR Y BOBINA DE CHOQUE ADICIONAL
- 11.34.- DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL AUTOTRANSFORMADOR DE ALTA

REACTANCIA DE DISPERSION

- 11.35.- DEVANADOS, NUCLEO Y TRAYECTORIAS MAGNETICAS EN UN AUTOTRANSFORMADOR DE ALTA REACTANCIA DE DISPERSION
- 11.36.- ENCENDIDO POR PRECALENTAMIENTO
- 11.37.- ENCENDIDO RAPIDO
- 11.38.- ENCENDIDO INSTANTANEO
- 11.39.- AUTOTRANSFORMADOR AUTORREGULADO
- 11.40.- PARAMETROS DE BALASTROS A 90% DE LA TENSION NOMINAL
- 11.41.- PARAMETROS DE BALASTROS A 100% DE LA TENSION NOMINAL
- 11.42.- PARAMETROS DE BALASTROS A 110% DE LA TENSION NOMINAL
- 11.43.- AHORRO DE ENERGIA EN SISTEMAS DE DOS LAMPARAS FLUORESCENTES DE ENCENDIDO RAPIDO 40-34 WATTS
- 11.44.- BALASTRO PARA LAMPARAS FLUORESCENTES A 127 VOLTS
- 11.45.- BALASTRO PARA LAMPARAS FLUORESCENTES HO Y VHO A 220 VOLTS
- 11.46.- DIFUSOR ACRILICO TRANSPARENTE
- 11.47.- PANTALLA ANTIDESLUMBRANTE
- 11.48.- LUMINARIO FLUORESCENTE INSTALACION INTERIOR COMERCIAL TIPO EMPOTRAR 2x75 WATTS
- 11.49.- LUMINARIO FLUORESCENTE INSTALACION INTERIOR TIPO SOBREPONER A PRUEBA DE VAPOR 2x39 WATTS
- 11.50.- LUMINARIO FLUORESCENTE INSTALACION INTERIOR TIPO COMERCIAL 2x40 WATTS
- 11.51.- LUMINARIO FLUORESCENTE INSTALACION INTERIOR COMERCIAL TIPO SOBREPONER DE 2x40 WATTS
- 11.52.- LUMINARIO FLUORESCENTE INSTALACION INTERIOR SOBREPONER TIPO EJECUTIVO 2x75 WATTS
- 11.53.- LUMINARIO FLUORESCENTE INSTALACION INTERIOR TIPO ESQUINERO CON DOS LAMPARAS DE 75 WATTS
- 11.54.- LUMINARIO FLUORESCENTE INSTALACION INTERIOR TIPO INDUSTRIAL CON UNA LAMPARA DE 75 WATTS
- 11.55.- LUMINARIO FLUORESCENTE INSTALACION INTERIOR TIPO INDUSTRIAL 2x75 WATTS

- IV.8. - RESISTENCIA MINIMA DE LOS AISLAMIENTOS EN AIRE
- IV.9. - CORRECCION POR TEMPERATURA PARA AISLAMIENTOS EN AIRE
- IV.10. - RESISTENCIA MINIMA DE LOS AISLAMIENTOS EN ACEITE
- IV.11. - CORRECCION POR TEMPERATURA PARA AISLAMIENTOS EN ACEITE
- IV.12. - RESISTENCIA DE AISLAMIENTO A TENSIONES NOMIALES EN BALASTROS.
- IV.13. - SUPERFICIE DE ENFRIAMIENTO DEL BOBINADO.
- IV.14. - SUPERFICIE DE ENFRIAMIENTO DEL NUCLEO MAGNETICO.
- IV.15. - TRANSMISION DEL CALOR POR CONVECCION EN SUPERFICIES VERTICALES.
- IV.16. - TRANSMISION DEL CALOR POR RADIACION.

RELACION DE TABLAS.

- I.A.- TABLA COMPARATIVA DE CARACTERISTICAS DE LAMPARAS.
- II.A.- PROMEDIOS DE DURACION DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES A DISTINTOS CICLOS DE ENCENDIDO.
- II.B.- COLOR DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES
- II.C.- CLASIFICACION DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES.
- II.D.- CLASIFICACION POR SONIDO Y APLICACIONES DE LOS BALASTROS PARA LAMPARAS FLUORESCENTES.
- II.E.- FACTORES DE EFICACIA DE BALASTROS.
- III.A.- PROPIEDADES DE MATERIALES MAGNETICOS.
- III.B.- RESISTIVIDAD, COEFICIENTE DE TEMPERATURA Y PUNTO DE INTERSECCION CON EL EJE DE LAS t .
- III.C.- VALORES DEL COEFICIENTE DE STEINMETZ
- III.D.- VALORES DE Γ PARA CHAPAS MAGNETICAS DE ACERO AL SILICIO Y DIFERENTES ESPESORES.
- III.E.- CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS MATERIALES MAGNETICOS BLANDOS.
- IV.A.- CARACTERISTICAS DEL REACTOR PATRON A 60 HZ
- IV.B.- PARAMETROS Y TOLERANCIAS DEL REACTOR PATRON
- IV.C.- SECCION Y AMPACIDAD DE ALAMBRES MAGNETO.
- IV.D.- REPORTE DE PRUEBA ELECTROMAGNETICA
- IV.E.- CONSTANTES PARA CORRECCION POR EFECTO PIEL
- IV.F.- CAPACITANCIA REQUERIDA PARA AJUSTE DE FACTOR DE POTENCIA.

CAPITULO I

INTRODUCCION

INTRODUCCION.

La luz artificial juega un papel de capital importancia en nuestros días debido a que sin ella no podríamos realizar actividades nocturnas ni tampoco muchas de las que realizamos durante el día.

La luz artificial no sólo debe asociarse con la comodidad que brinda, sino también con un gran número de ventajas adicionales como son:

- a) Incrementa la capacidad de percepción.
- b) Facilita una mayor precisión y por lo tanto mejor desempeño en actividades de toda índole.
- c) Proporciona mejor apreciación del espacio, con lo que se aprovecha la totalidad de las áreas de trabajo.
- d) Estimula el orden y la limpieza personal y general.
- e) Disminuye o evita el cansancio de los ojos, especialmente en las personas mayores, logrando así el máximo rendimiento con el mínimo esfuerzo.
- f) Proporciona seguridad, reduciendo los accidentes de trabajo y el vandalismo en la vía pública.
- g) Infiere psicológicamente en las personas, con lo que se pueden obtener mejores resultados en todas las áreas de aplicación en general.
- h) Proporciona seguridad vial en vías de comunicación como

puentes, carreteras, ejes viales y calles urbanas.

- 1) Permite el desarrollo de toda clase de actividades como: deportivas, industriales, sociales, culturales, recreativas, etc.*

En los últimos años diferentes instituciones y científicos reconocidos han estado trabajando con investigaciones metódicas, las relaciones entre un buen sistema de iluminación con el rendimiento de trabajo, las fallas humanas y los accidentes laborables. En principio se puede decir que el nivel de iluminación en cualquier sitio es un factor inestimable.

Para probar que el mejoramiento de la iluminación realmente tiene efecto, mencionaremos aquí algunos estudios prácticos realizados por el Gerente Técnico de Illuminating Engineering Society (IES), que muestran integramente las ventajas de una buena iluminación.

De acuerdo con el reporte se tuvieron -en una investigación de 445 empresas de los Estados Unidos y Europa- los siguientes resultados posteriores al mejoramiento del nivel de iluminación:

- * 79.4% de los encuestados obtuvieron un aumento en la producción entre 8 y 25% y en casos excepcionales hasta un 100%.*
- * 71.1% encontraron una reducción considerable de las fallas de producción.*
- * 95.5% registraron una fuerte disminución en los accidentes de trabajo.*

* 51% comprobaron mayor orden e higiene en la empresa.

* 75% de los encuestados reconocieron que habían aprendido la gran utilidad de una iluminación adecuada y argumentada.

En la figura 1.1 se muestra la relación entre el nivel de iluminación y el rendimiento en el trabajo en los Estados Unidos. En la 1.2 se aprecia la relación entre el nivel de iluminación y las fallas humanas.

SISTEMAS MODERNOS DE ILUMINACION.

Se llama fuente luminosa o manantial luminoso al dispositivo, aparato u órgano natural o artificial que emite radiaciones visibles para el ojo humano; por lo tanto, las fuentes luminosas pueden ser naturales y artificiales.

La fuente luminosa natural más importante es el sol; las fuentes artificiales se denominan en general lámparas. Actualmente disponemos de muchos tipos de lámparas para la producción de iluminación artificial, pero todos estos tipos están basados solamente en dos fenómenos físicos que son: calor y luminiscencia. Por lo tanto podemos distinguir entre las lámparas basadas en la elevación de la temperatura de un cuerpo, es decir, en elementos que emiten radiaciones caloríficas (como es el caso de las lámparas incandescentes) y lámparas basadas en otras propiedades cuya característica común es que apenas existe elevación de temperatura, o sea en elementos que permiten radiaciones luminiscentes (como lo son las lámparas de descarga en gas). Algunas lámparas emiten ambas clases de radiaciones.

Aunque la variedad de lámparas es muy grande, los tipos más utilizados actualmente son los siguientes:

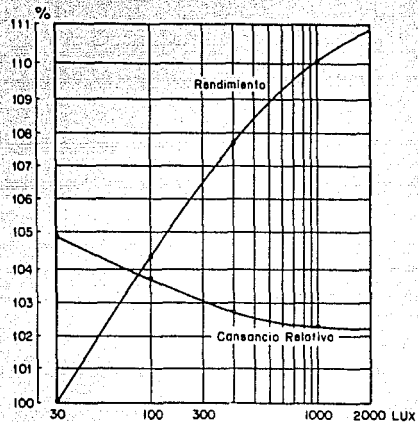


FIG 1.1.- RELACION ENTRE EL NIVEL DE ILUMINACION Y EL RENDIMIENTO EN EL TRABAJO.

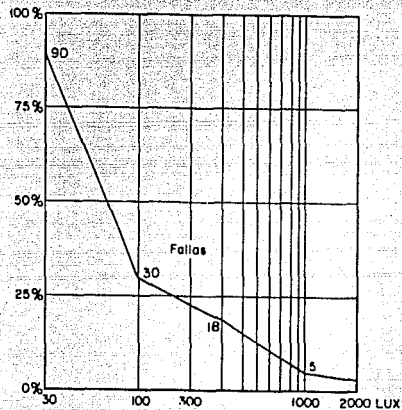


FIG 1.2.- RELACION ENTRE EL NIVEL DE ILUMINACION Y LAS FALLAS HUMANAS.

- a) Incandescentes.
- b) Fluorescentes.
- c) De Vapor de Mercurio.
- d) De Vapor de Sodio en Baja Presión.
- e) De Aditivos Metálicos.
- f) De Vapor de Sodio en Alta Presión.

En la Tabla I.A se pueden apreciar las características más importantes de estos tipos de lámparas.

Cabe mencionar que las características que aparecen en la Tabla se refieren exclusivamente a las lámparas; desde el punto de vista de la Ingeniería de Iluminación es más importante considerar todo el Sistema de Alumbrado en conjunto, ya que es así como se obtienen las características reales de operación.

Todo sistema de alumbrado está formado por las siguientes partes:

- a) Lámpara
- b) Balastro (excepto incandescentes).
- c) Luminario.

De acuerdo con el objetivo de este trabajo, el sistema que analizaremos en el capítulo siguiente es el fluorescente.

En la figura I.3 se puede comparar otra característica importante -como la eficacia- considerando los últimos adelantos con productos ahorradores de energía para cada sistema completo.

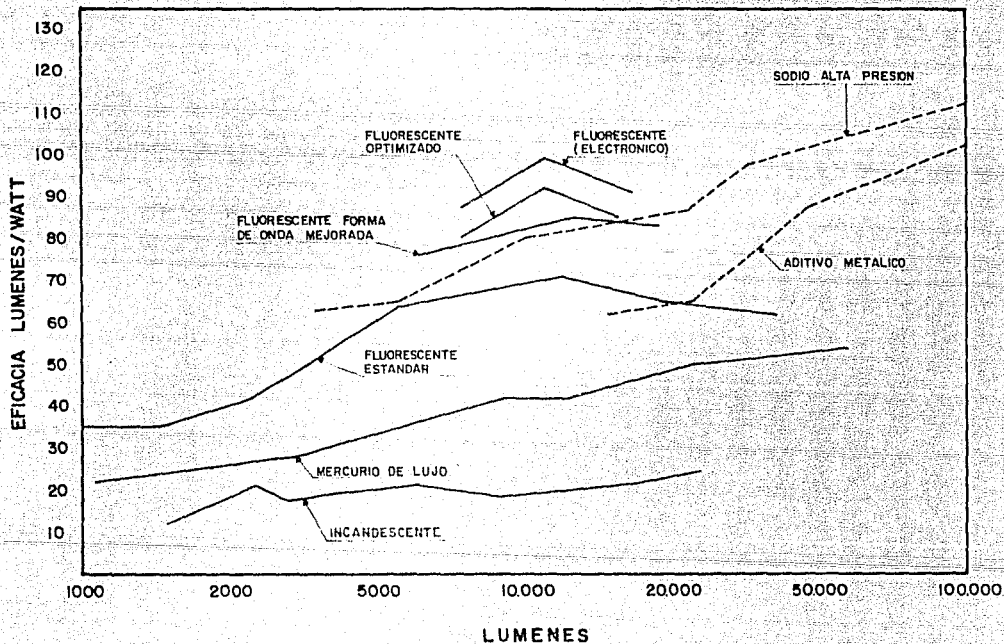
Analizando las características que aparecen en las figuras anteriores, se puede llegar a una conclusión muy importante: cada

TABLA COMPARATIVA DE CARACTERISTICAS DE LAMPARAS

TABLA I.A

	INCANDESCENTE	FLUORESCENTE	VAPOR DE MERCURIO	ADITIVOS METALICOS	VAPOR DE SODIO ALTA PRESION	VAPOR DE SODIO BAJA PRESION
VIDA (HORAS)	750 - 2000	6000 - 24000	MAS DE 24000	7500 - 20000	24 000	18 000
ENCENDIDO	INSTANTANEO	MUY RAPIDO	5 - 7 MINUTOS	5 - 7 MINUTOS	3 - 5 MINUTOS	15 MINUTOS
REENCENDIDO	INSTANTANEO	INSTANTANEO O MUY RAPIDO	15 MINUTOS	15 MINUTOS	1 MINUTO	70% INSTANTANEO
FALLA TIPICA	NO ENCIENDE	NO ENCIENDE (PUEDE PARPADEAR)	NO ENCIENDE O ENCIENDE MUY TENUE	NO ENCIENDE	ENCIENDE YAPAGA INTERMITENTE	NO ENCIENDE
RENDIMIENTO DE COLOR	REGULAR	DE REGULAR A EXCELENTE	DE POBRE (CLARA) A BUENO (FOSFORADO)	BLANCO AZULADO DE BUENO A EXCELENTE	AMARILLO CHAMERVA REGULAR	AMARILLO MONOCROMATICO POBRE
DEPRECIACION DE LUMENES DE LA LAMPARA	DE BUENO A EXCELENTE	DE REGULAR A BUENO	DE POBRE A REGULAR	DE POBRE A REGULAR (DEPENDIENDO DEL ANGULO DE INSTALACION)	BUENO	EXCELENTE
EFICACIA (LUMENES/ WATT)	9 - 24	37 - 93	39 - 53	65 - 115	65 - 127	100 - 183
COSTO INICIAL	BAJO	REGULAR	REGULAR	REGULAR	DE REGULAR A ALTO	ALTO
COSTO DE OPERACION	ALTO	REGULAR	REGULAR	DE BAJO A REGULAR	BAJO	BAJO

GRAFICA COMPARATIVA ENTRE DIFERENTES SISTEMAS
 FIGURA 1.3



sistema tiene sus particularidades; por lo tanto se puede afirmar que no hay sistemas malos de iluminación. Lo que pueden tenerse son malas aplicaciones. Para cada necesidad debe hacerse un detallado estudio técnico-económico con el cual se elegirá el sistema más conveniente.

LABORATORIOS DE ALUMBRADO.

En la producción y distribución de luz hay muchas variables que pueden afectar los resultados. Primero, deben definirse bien los objetivos. Por ejemplo en iluminación industrial los principales objetivos son: reducir los costos incrementando la productividad, reducir el desperdicio, los accidentes y el ausentismo e incrementar la comodidad de los empleados al desarrollar su trabajo.

En iluminación de calles, los objetivos deben ser: reducir los accidentes de tránsito, hacer más fluido el flujo de autos, reducir el cansancio de los choferes, proporcionar una sensación de seguridad, reducir el crimen, etc.

Para iluminación comercial, los objetivos deben ser: incrementar las ventas proporcionando un ambiente atractivo y cómodo y hacer resaltar los distintos puntos de interés.

En alumbrado deportivo, el objetivo es permitir a las personas que trabajan durante el día la oportunidad de participar y disfrutar de actividades deportivas durante la tarde y noche.

Para iluminación decorativa se debe resaltar la belleza de los lugares durante la noche y promover la conciencia ciudadana en la comunidad.

En iluminación de escuelas el objetivo es aumentar la facilidad y velocidad de aprendizaje reduciendo el cansancio y desgaste de los ojos de los jóvenes.

El ingeniero que diseña el sistema de iluminación debe considerar todos estos objetivos y otros factores adicionales. Por ejemplo, debe analizar aquellos lugares en que el brillo o los reflejos puedan ser objeccionables o ventajosos. Debe considerar los contrastes, colores y sombras y sus efectos tanto en visibilidad como en comodidad. Entonces puede hacer un balance entre los beneficios del sistema de iluminación y su costo.

Todos estos pasos requieren experiencia, habilidad y coordinación entre el diseñador y los fabricantes de los componentes del sistema de alumbrado. Los resultados finales de cada proyecto generalmente se miden en función de los objetivos fijados inicialmente.

De lo anterior se deduce que es necesario proporcionar los medios para determinar hasta qué punto los componentes seleccionados cumplen con las necesidades del sistema. Este es el propósito de los laboratorios de alumbrado.

Por ejemplo, en una fábrica que produce artículos de iluminación, un laboratorio fotométrico puede medir el funcionamiento de los luminarios manufacturados allí. Puede hacer las mediciones para proporcionar los datos y publicar la información técnica que servirá a los Ingenieros para hacer la selección del producto. También puede hacer cálculos a partir de sus propios datos para determinar la adaptabilidad de los productos para tal o cual aplicación. Puede monitorear la calidad en diferentes puntos del proceso de fabricación, para asegurar que el producto cumplirá con lo calculado en el diseño. Esto

permite reconocer oportunamente los efectos de los cambios en los materiales, en el proceso y en los métodos de fabricación. También permite la evaluación de las variables en el funcionamiento de los luminarios debido a variaciones en el sistema como son: la fuente de tensión, el comportamiento de la lámpara, el tipo de balastro, la depreciación por suciedad, el viento, la temperatura, etc.

En suma, es difícil imaginar cómo un fabricante de productos de iluminación puede subsistir sin un laboratorio de alumbrado.

FUNCION DE LOS LABORATORIOS DE ALUMBRADO.

En general, todos los laboratorios de alumbrado tienen las siguientes funciones:

- Promover el desarrollo de tecnologías para optimizar los sistemas de iluminación.
- Efectuar la estandarización de sistemas y procedimientos de instalación, mantenimiento, fabricación y adquisición de equipo.
- Promover la investigación, capacitación y difusión de resultados, así como establecer convenios con organismos afines.
- Participar en el mecanismo autónomo de emisión de dictámenes de las pruebas realizadas.

Las funciones anteriores se subdividen a su vez y son llevadas a cabo a través de departamentos específicos como son:

a) *Sección de Normatividad e Investigación.- Sus principales objetivos son los siguientes:*

- * Promover el desarrollo de tecnología propia.*
- * Investigar nuevas técnicas, equipo y materiales.*
- * Conformar la infraestructura normativa de medición y parámetros considerados en las pruebas.*

b) *Sección de Control de Calidad.- Sus funciones se pueden resumir en las siguientes:*

- * Supervisar las pruebas que se efectúen estableciendo sistemas y procedimientos compatibles con el equipo utilizado.*
- * Llevar a cabo un riguroso control estadístico sobre los exámenes realizados y las conclusiones que se obtengan.*
- * Establecer sistemas para la emisión computarizada de los dictámenes.*

c) *Sección de Difusión y Capacitación.- Tiene como funciones principales las siguientes:*

- * Instrumentar programas de cursos, conferencias e intercambio con organismos afines.*
- * Promover la difusión de resultados mediante publicaciones técnicas y didácticas.*
- * Proporcionar asesoría, capacitación y apoyo técnico a*

organismos privados y oficiales así como a instituciones educativas.

EQUIPO DE LOS LABORATORIOS DE ALUMBRADO.

La eficiencia con que un laboratorio pueda cumplir sus funciones depende de 2 puntos fundamentales: de la cantidad y calidad del equipo para probar y del grado de preparación del personal que labore en él.

En México no son muchos los laboratorios que puedan cumplir con estos requisitos. Dentro de los fabricantes podemos citar: General Electric (Monterrey), Focos S.A., Lumisistemas, Osram, Manufacturera de Reactores, Sola Basic, Holophane, Philips, y Lightolier, entre otros. Los laboratorios de estas empresas cubren específicamente las pruebas, equipo y personal necesarios para someter a prueba sus propios productos.

En el sector oficial el Instituto Mexicano del Seguro Social, Compañía de Luz y Fuerza del Centro y el Departamento del Distrito Federal tienen los laboratorios más completos, aunque hasta el momento ninguno ha sido homologado para obtener reconocimiento oficial ante el Sistema Nacional de Acreditamiento de Laboratorios de Prueba (S.I.H.A.L.P.).

De estos tres organismos, el D.D.F. es el que cuenta con el laboratorio más completo. El crecimiento de la zona metropolitana en los últimos años ha requerido incorporar nuevas técnicas de operación y mantenimiento del servicio de alumbrado público, acordes con la situación urbana y ecológica de la Ciudad de México. El Laboratorio De Alumbrado Público -terminado en noviembre de 1988- representa la solución a esas necesidades. Hoy se continúa con las tareas tendientes a optimizar el

funcionamiento de ese importante instrumento, a fin de contar con un organismo rector reconocido y calificado que oriente sus acciones, entre otros aspectos, a lograr un estricto control de calidad en la selección de equipos a utilizar, abatir los costos de energía, solucionar problemas de mantenimiento, promover la investigación nacional, intercambiar y capacitar al personal, además de emitir las normas necesarias para la instalación, conservación y mantenimiento del alumbrado público.

En los próximos años se requerirán sistemas de alumbrado que proporcionen una mayor capacidad y economía para vencer el reto de una metrópoli en constante evolución. El Laboratorio de Alumbrado Público constituye una respuesta enérgica y eficiente.

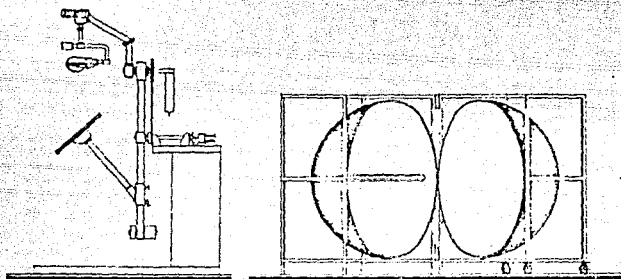
EQUIPO DEL LABORATORIO DE ALUMBRADO PÚBLICO.

El laboratorio cuenta con instalaciones que, por su estructura y conformación, son reconocidas como únicas en el país, puesto que su diseño se llevó a cabo atendiendo las normas internacionales que especifican los requisitos a cumplir en la realización de las pruebas fotométricas, eléctricas, mecánicas y ambientales que tradicionalmente realizan los organismos de este tipo.

El edificio principal consta de dos plantas que facilitan la coordinación, supervisión y realización de las actividades tanto operativas como administrativas. El equipamiento se llevó a cabo mediante un programa que incluyó una rigurosa investigación del conjunto de requerimientos necesarios para cumplir al 100% las pruebas previstas. En la actualidad se cuenta con los siguientes instrumentos y equipos para la realización de las pruebas:

1) EQUIPO FOTOMETRICO.

- a) Goniómetro (Fig 1.4)
- b) Esfera de Ulbrich (Fig 1.4)
- c) Luxómetro
- d) Fotómetro Digital
- e) Nitómetro



GONIOMETRO

ESFERA DE ULBRICH

FIG 1.4.- EQUIPO FOTOMETRICO.

2.- EQUIPO MECANICO.

- a) Balanza Analítica (Fig 1.5).
- b) Elcómetro (Fig 1.5).
- c) Micrómetro.
- d) Dinamómetro.
- e) Durómetro (Fig 1.5).

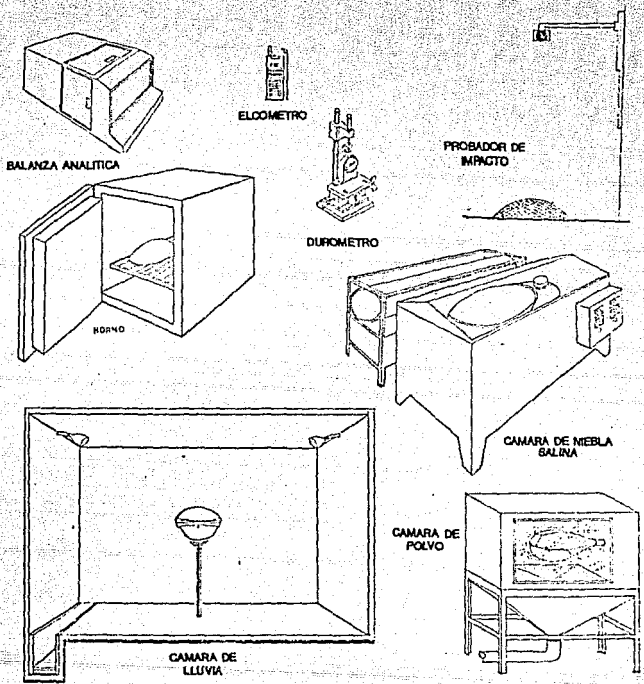


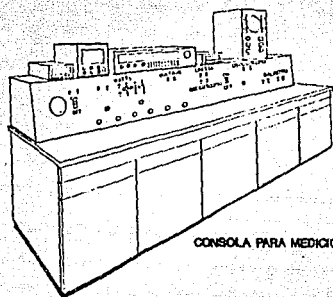
FIG 1.5- EQUIPO MECANICO Y AMBIENTAL.

3.- EQUIPO AMBIENTAL.

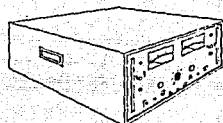
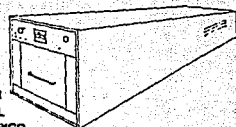
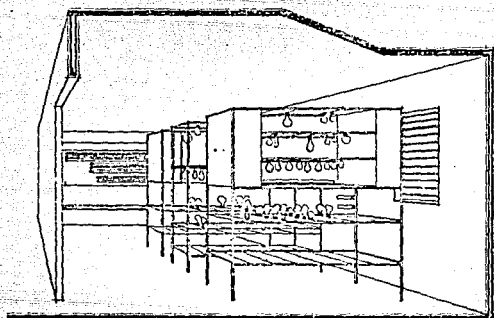
- a) Cámara de Niebla Salina (Fig 1.5).
- b) Cámara de Lluvia (Fig 1.5).
- c) Horno Lindberg (Fig 1.5).
- d) Cámara de Temperatura.
- e) Cámara de Polvo (Fig 1.5).
- f) Dispositivo de Vibración.
- g) Probador de Resistencia al Impacto (Fig 1.5).

4) EQUIPO ELECTRICO.

- a) Consolas para Pruebas de Lámparas de Alta Intensidad de Descarga (Fig 1.6)
- b) Consolas para Pruebas de Lámparas Fluorescentes (de encendido rápido e instantáneo).
- c) Reactores Patrón.
- d) Calibrador de Control Fotoeléctrico (Fig 1.6).
- e) Hi-Pot (Fig 1.6).
- f) Heggerts.
- g) Puentes.



CONSOLA PARA MEDICION

CALIBRADOR
DE CONTROL
FOTOLECTRICOMEDIDOR DE RIGIDEZ
DIELECTRICA

VIDA UTIL DE LAMPARAS

FIG 16.- EQUIPO ELECTRICO Y RACK DE PRUEBA DE VIDA.

h) Instrumentos de Medición Analógicos y Digitales (Ohmetros, voltímetros, amperímetros, wattímetros, multimetros, etc.)

i) Osciloscopios

j) Rack de Prueba de Vida (Fig 6).

Cada uno de los equipos anteriores tiene una función específica, siendo en ocasiones su funcionamiento y el método de prueba muy complejo. Por cuestiones de espacio y objetividad en este trabajo nos ocuparemos exclusivamente de los REACTORES PATRON. En la norma NOM-J-197-1977 se especifican los valores que se han encontrado necesarios para asegurar resultados exactos y reproducibles cuando se están probando ya sea balastos y lámparas. En los capítulos siguientes se trata lo relacionado a estos importantísimos equipos.

NORMAS APLICABLES.

Existen varias organizaciones involucradas en las normas para sistemas de iluminación y sus pruebas. Parte de este trabajo ha sido basado en la información proporcionada por las organizaciones más importantes que son:

NOM.- Norma Oficial Mexicana dependiente de la Dirección General de Normas (DGN).

La Dirección General de Normas (DGN) es una unidad administrativa de la Secretaría de Comercio y Fomento Industrial que tiene a su cargo la atención del despacho de los asuntos que señala el artículo 13 del Reglamento Interior de la propia

Secretaría, entre los que se encuentran:

a) Formular, aprobar, expedir, revisar, difundir y vigilar el cumplimiento de las normas y especificaciones oficiales mexicanas (NOM) que regulan el sistema general de medidas y las de los productos, así como las correspondientes a las clasificaciones.

b) Promover, difundir y vigilar el cumplimiento de la normalización de productos en el país y organizar y coordinar los comités consultivos correspondientes, conforme a lo establecido en la Ley General de Normas de Pesas y Medidas.

CCONNIE.- Comité Consultivo de Normalización de la Industria Eléctrica. Es una organización mexicana que promueve la creación de normas de interés nacional apoyada por dependencias gubernamentales y la iniciativa privada. Las normas creadas en el seno del CCONNIE son elaboradas por fabricantes y representantes del gobierno y propuestas posteriormente para su aceptación oficial a través de la Dirección General de Normas de la Secretaría de Comercio.

CBM.- Certified Ballast Manufacturers. Es la asociación de fabricantes de balastos en los Estados Unidos de Norteamérica que producen balastos de acuerdo con las normas ANSI C82.1, C82.2 y C82.3.

ANSI.- American National Standards Institute. Es una institución que origina normas a nivel nacional en E.E.U.U., compuesta por más de 120 asociaciones comerciales, sociedades técnicas, grupos de profesionistas y organizaciones de consumidores.

ETL.- Electrical Testing Laboratories, Inc. Es una organización

privada e independiente en E.E.U.U., de reconocida autoridad en mediciones y pruebas de lámparas y equipo de iluminación. "Certified Ballast Manufacturers" utiliza los servicios de ETL para probar los balastos producidos por sus miembros, con el fin de asegurar que cumplen con las normas ANSI y CBH.

CSA.- Canadian Standards Association. Es la autoridad que prueba los balastos en Canadá.

CEI.- Commission Electrotechnique Internationale. Es una organización internacional con sede en Ginebra, Suiza, cuyos Comités Técnicos están formados por representantes de Comités Nacionales de diversos países; expresan, tan fielmente como es posible, un consenso internacional de opinión en relación con la norma correspondiente.

CAPITULO II

SISTEMAS FLUORESCENTES DE ILUMINACION

LAMPARAS .

DESCARGA ELECTRICA EN LOS GASES.

Un gas libre de influencias exteriores no contiene cargas eléctricas, puesto que todos sus átomos están en estado neutro. Sin embargo, los gases pueden hacerse conductores mediante diferentes procedimientos y el más utilizado en las lámparas de descarga es el siguiente: se encierra el gas (nitrógeno, neón, etc.) en un tubo de vidrio completamente sellado en cuyo interior existe baja presión y dos electrodos fríos y planos, uno en cada extremo (Fig 11.1).

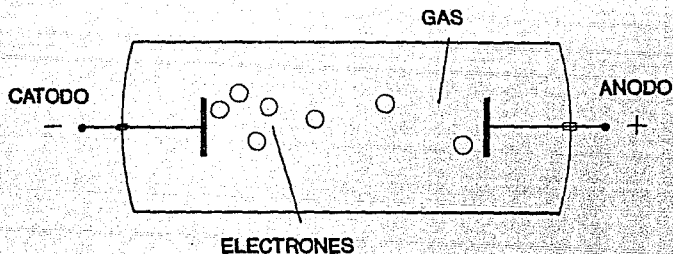


FIG 11.1.- DESCARGA ELECTRICA EN LOS GASES.

Si se conecta un generador de c.c. a los electrodos, los electrones libres presentes se desplazarán del electrodo negativo (cátodo) al positivo (ánodo) con lo cual se crea la posibilidad de choque con los átomos del gas. Si la tensión es suficientemente alta, un electrón puede adquirir tanta energía cinética que, en una colisión con un átomo, provoque la excitación de éste. Significa esto que un electrón de la capa exterior de un átomo es expulsado de su órbita a otra más alejada del átomo contiguo.

En consecuencia, el átomo pasa del estado mínimo de contenido de energía -que es su estado fundamental- a un estado con más contenido de energía o estado de excitación. El átomo siempre permanece en este estado durante un tiempo muy corto, porque vuelve después espontáneamente a su órbita original, con lo que emite energía en la forma de un cuanto.

Este cuanto corresponde a una línea del espectro emitido por un gas y es característico de los átomos del gas utilizado. Dicho de otra forma, la línea espectral de mayor energía dentro del espectro emitido por un gas es la línea producida por la transición del átomo desde el nivel más alto de excitación al nivel fundamental.

Si la tensión a través de los electrodos se eleva nuevamente, entonces la energía cinética de un electrón libre puede llegar a ser tan grande que ionice a un átomo, esto es, que el electrón ligado más débilmente se libere de su átomo original.

Se requiere mayor cantidad de energía para la ionización de un átomo que para su excitación. La ionización es importante para el mecanismo de la conducción eléctrica en las descargas eléctricas con gases y vapores, ya que como se explicó, un electrón por medio de una colisión deja libre a otro electrón; de igual forma estos dos electrones pueden producir dos colisiones más y de esta manera se obtienen cuatro electrones libres. Si el potencial entre electrodos es suficientemente intenso, a partir de un electrón se pueden obtener sucesivamente un número de electrones iguales a 1,2,4,8,16,32, etc. es decir, que el número de electrones libres aumenta espontáneamente en progresión geométrica y de manera definida, de la forma 2^n .

Bajo la influencia del campo eléctrico los electrones desprendidos de los átomos se dirigen hacia el ánodo y los iones positivos formados se van hacia el cátodo.

Para efectuar una descarga en un gas se necesita de una tensión mínima, llamada tensión de encendido. Después del encendido la corriente aumenta bruscamente por la formación sin obstáculos de un alud de electrones.

Esta corriente sería desastrosamente grande si el circuito tuviera conectada una resistencia externa insuficiente o si no dispusiera de alguna. Si la corriente es limitada por una resistencia externa de magnitud suficiente, entonces se crea una situación estacionaria, por medio de la cual la tensión a través del bulbo -tensión de encendido- es tal que obtenemos una descarga en gas que se mantiene a sí misma.

Se asegura así una corriente ininterrumpida de electrones a través del gas, a medida que van siendo liberados éstos por la descarga.

La posibilidad de un aumento ilimitado de la corriente en un tubo de descarga, conduce a la consecuencia práctica de proveer un medio para limitar la corriente y evitar que adquiera valores demasiado elevados. En corriente continua este dispositivo es una resistencia, pero en el caso de corriente alterna puede ser una reactancia de valor elevado, tal como un transformador del tipo alta impedancia o un conjunto inductancia-capacidad, dispositivo conocido como BALASTRO o simplemente REACTOR.

FUNCIONAMIENTO DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES.

A las radiaciones luminosas obtenidas mediante materia en la que no se produce o se produce en muy pequeño valor una elevación de temperatura, se le llama LUMINISCENCIA.

Cuando la producción de radiaciones luminosas se mantiene solamente mientras dura la causa que la produce, la luminiscencia producida se llama fluorescencia; las lámparas fluorescentes deben su nombre a este fenómeno del cual hacen uso.

Es una propiedad característica de las sustancias fluorescentes el emitir radiaciones de mayor longitud de onda que las radiaciones recibidas; en este caso, las radiaciones recibidas son ultravioletas, no visibles, que excitan a las sustancias fluorescentes y éstas emiten radiaciones visibles siempre de mayor longitud de onda que las ultravioletas.

Las lámparas fluorescentes son esencialmente lámparas de descarga eléctrica en atmósfera de vapor de mercurio a baja presión y un gas inerte. La descarga se produce en un recipiente tubular de gran longitud con relación a su diámetro; sobre la pared interior se ha depositado una fina capa de sustancias minerales fluorescentes. En las extremidades del tubo se sitúan los electrodos. El tubo está relleno de un gas noble -generalmente argón a algunos milímetros de presión- y de una pequeña cantidad de mercurio.

Con ayuda de la figura 11.2 se entiende como se produce la luz en una lámpara fluorescente. Al aplicar una tensión adecuada entre los electrodos o cátodos de la lámpara, se produce una descarga eléctrica entre ellos; los electrones procedentes de los cátodos invaden el espacio interelectrónico, chocando con los átomos de mercurio que existen en dicho espacio. A consecuencia

de estos choques una parte de los átomos se ioniza, aumentando así la corriente de descarga; la mayor parte de los átomos de mercurio ya están aquí excitados.

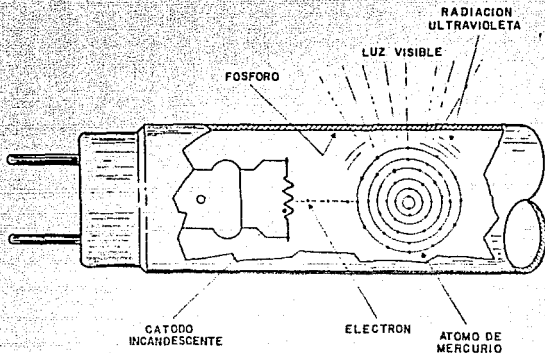


FIG 11.2.- PRODUCCION DE LUZ EN UNA LAMPARA FLUORESCENTE.

Ahora bien, la baja presión que existe en el interior del tubo es la causante de que en la excitación de los átomos de mercurio se emitan casi exclusivamente radiaciones ultravioletas cuya longitud de onda es de 253.7 nanómetros. Estas radiaciones excitan a su vez materias fluorescentes depositadas en las paredes del tubo que emitirán radiaciones de mayor longitud de onda que las radiaciones ultravioletas incidentes; dicho de otra forma, emitirán radiaciones visibles.

CONSTRUCCION DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES.

En la figura 11.3 se pueden apreciar las principales partes constitutivas de una lámpara fluorescente, así como su función principal. A continuación damos una explicación más

amplia de aquellas partes que por su importancia, así lo requieren.

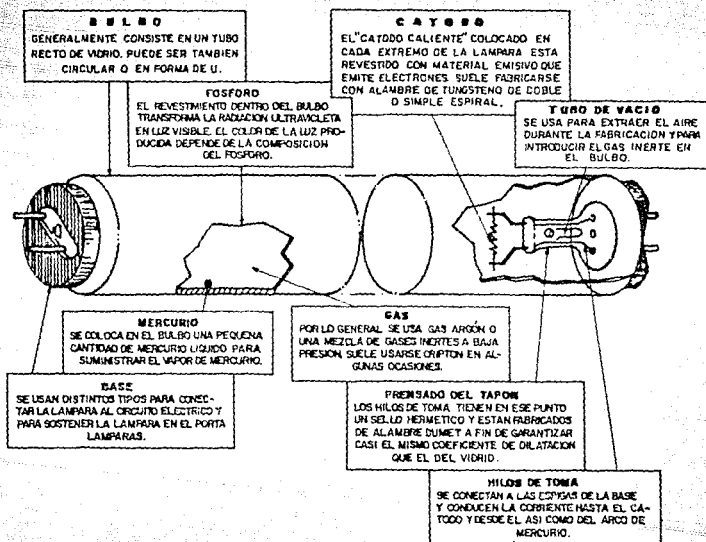


FIG 11.3.- PARTES PRINCIPALES DE UNA LAMPARA FLUORESCENTE.

Electrodos El electrodo que va en cada uno de los extremos de las lámparas fluorescentes consiste generalmente de un alambre

con revestimiento de tungsteno de doble o triple arrollamiento espiral. Dicho revestimiento por ser un material emisor (bario, estroncio y óxido de calcio) emite electrones cuando se calienta a una temperatura de operación de alrededor de 950°C. A esta temperatura los electrones se desprenden libremente con sólo una pequeña pérdida de potencia en cada uno de los cátodos.

Este proceso se llama "emisión termoiónica", ya que el calor es más responsable por la emisión de electrones que el voltaje. A un electrodo de este tipo se le llama "cátodo caliente" y es por mucho el tipo de electrodo más usado actualmente. Este tipo de cátodos reducen el voltaje de arranque necesario para establecer el arco. Existen también los electrodos del tipo "cátodo frío" que requieren de una mayor tensión de arranque, como se describirá más adelante.

Búlbos La forma y tamaño del bulbo de una lámpara fluorescente se expresa mediante una clave que consiste de una letra "T" (designando la forma del bulbo), la cual va seguida de un número que especifica el diámetro del bulbo en octavos de pulgada. El diámetro puede variar desde T-5 (5/8 de pulgada) hasta T-17 (2 1/8 de pulgada).

En cuanto a la longitud nominal, las lámparas fluorescentes fluctúan entre 6 y 96 pulgadas. Las lámparas circulares se fabrican en tres tamaños: con diámetro exterior de 3, 12 y 16 pulgadas. Existe también una lámpara de 40 watts que tiene un bulbo T-12 en forma de "U". Recientemente ha llegado al mercado nacional una nueva lámpara fluorescente de baja potencia sumamente compacta, de tubos gemelos y alta eficacia que puede reemplazar con grandes ventajas a la lámpara incandescente tradicional. Por lo novedoso de este diseño, comentaremos sobre él por separado más adelante.

Gases > Una pequeña cantidad de gotas de mercurio se coloca en el interior del tubo fluorescente. Durante la operación de la lámpara, el mercurio se vaporiza a una presión muy baja. A esta presión, la corriente fluyendo a través del vapor provoca que éste radie energía, principalmente a una sola longitud de onda en la región ultravioleta del espectro (253.7 nanómetros). La presión del mercurio es regulada durante la operación por la temperatura de la pared del bulbo. La lámpara contiene también una pequeña cantidad de un gas raro altamente purificado. Los más comunes son el argón y el argón-neón, pero algunas veces también se utiliza el kriptón. El gas se ioniza rápidamente cuando se aplica un voltaje suficiente a la lámpara. El gas ionizado decrece rápidamente su resistencia, permitiendo que la corriente fluya y el mercurio se vaporice.

Fósforos > La longitud de onda o el color de la luz producida por una lámpara fluorescente depende de la composición química del fósforo utilizado en el revestimiento interno del bulbo. Mediante la combinación en proporciones variantes de distintos fósforos, es posible producir una amplia variedad de colores. Los colores disponibles en la actualidad incluyen varias tonalidades de blanco, así como de azul, verde, dorado, rosa y rojo.

Otras lámparas fluorescentes están diseñadas con fósforos que generan los colores de luz que son más estimulantes al crecimiento de las plantas. Además, hay otras que contienen un fósforo que produce una radiación casi ultravioleta en la banda de luz negra para activar los materiales fluorescentes y fosforescentes. Las lámparas de tamaño similar de todos los colores son exactamente iguales, salvo por el revestimiento. Las lámparas de luz negra azul se fabrican con un vidrio especial que filtra la energía visible.

Bases En la figura 11.4 se muestran las bases tipo que se usan con las lámparas fluorescentes. Para las lámparas de precalentamiento y de arranque rápido se necesitan cuatro contactos eléctricos, dos en cada extremo de la lámpara. Esto se realiza usando una base con dos espigas en cada extremo. Existen tres tamaños: miniatura, mediana y mogul.

En las lámparas circulares los cátodos van conectados a una base con cuatro espigas ubicada entre la unión de los dos extremos de la lámpara. Las lámparas HO y VHO tienen bases embutidas de doble contacto. Las lámparas Slimline (arranque instantáneo) requieren solamente de dos contactos eléctricos, o sea uno en cada extremo de la lámpara y usan bases de una sola espiga.

TIPOS DE LAMPARAS FLUORESCENTES.

De acuerdo con su principio de funcionamiento, las lámparas fluorescentes pueden clasificarse en dos grandes tipos: las de cátodo frío y las de cátodo caliente.

LAMPARAS FLUORESCENTES DE CATODO FRIO.

Estas lámparas utilizan los efectos de la descarga luminiscente en el seno de un gas noble y proporcionan una luz coloreada muy intensa; el color de la luz depende del gas de relleno que puede ser: argón, neón, helio, kriptón y xenón. Mezclando dos o más gases se puede obtener una amplia gama de colores. Estas lámparas son conocidas también como fluorescentes de alta tensión y constructivamente difieren de las lámparas de cátodo caliente en que la presión del gas contenido en el tubo de descarga es siempre algo menor y en que los electrodos están constituidos por un cilindro hueco de hierro puro, recubierto de

LAMPARAS DE
DOS
ESPIGAS

35

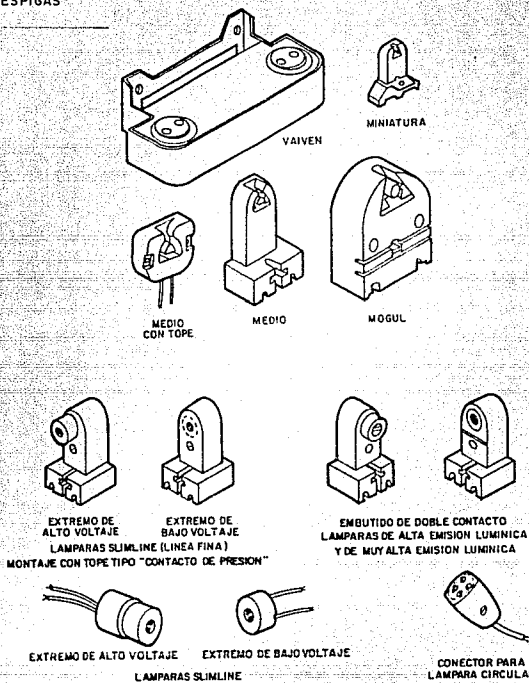


FIG 11.4.- BASES PARA LAMPARAS FLUORESCENTES.

una capa de óxidos metálicos emisores de electrones.

La emisión de radiaciones luminosas se realiza aprovechando los efectos de la descarga luminiscente, es decir solamente por efecto de la tensión existente entre los electrodos de la lámpara; esta tensión ha de ser elevada (superior a los 1000 volts) y suministrada a partir de la red de baja tensión por medio de un transformador elevador de características adecuadas.

Las lámparas fluorescentes de cátodo frío son de forma tubular, con un diámetro exterior que oscila entre 15 y 25 mm y la longitud puede estar comprendida entre algunos centímetros y más de tres metros. Son de arranque instantáneo y requieren, como ya se dijo, de un transformador elevador de tensión (un transformador de 12000 volts puede hacer funcionar aproximadamente 39 metros de tubo fluorescente de alta tensión); la reactancia necesaria para estabilizar la descarga puede obtenerse del mismo transformador porque la tensión de descarga de esta lámparas es del orden del 50% de la tensión de encendido.

Como se necesita una alta tensión para el encendido, generalmente no se presentan dificultades para arrancar estas lámparas en condiciones de mucha humedad o mucho frío. Tienen una duración que puede estimarse en 10,000 horas de vida, pero cuando una lámpara lleva funcionando más tiempo del estimado como tiempo normal de vida, la luz que emite se vuelve inestable y pálida; cuando esto sucede hay que reemplazar inevitablemente la lámpara.

Al contrario de lo que sucede con las lámparas fluorescentes normales -que solamente pueden funcionar entre límites muy estrechos de corriente- las lámparas fluorescentes de alta tensión pueden utilizarse para iluminación regulable, entre amplios límites de tensión entre electrodos.

Resulta muy fácil dar a los tubos fluorescentes de cátodo frío la forma que resulte más conveniente; pueden instalarse además en serie o paralelo formando una serie luminosa ininterrumpida. Por estas razones son usadas cuando se desea una adaptación exacta a las líneas arquitectónicas del espacio que han de iluminar. También se emplean en iluminación publicitaria, en tonos de color caprichosos.

LAMPARAS FLUORESCENTES DE CATODO CALIENTE.

Por su forma de encendido estas lámparas se pueden dividir en tres tipos fundamentales que son:

- i) Lámparas del tipo Pre calentamiento
- ii) Lámparas de Arranque Instantáneo (Slimline)
- iii) Lámparas de Arranque Rápido.

LAMPARAS DEL TIPO PRECALENTAMIENTO El circuito de pre calentamiento fue el primer tipo de lámpara en ser desarrollado, en 1941. Requiere un arrancador separado que precalienta los electrodos, provocando una emisión de electrones. Esto causa que la resistencia interna disminuya, lo que permite que el arco se establezca. El proceso de pre calentamiento requiere de algunos instantes, de aquí lo lento del encendido que es característico del circuito de pre calentamiento. El pre calentamiento puede efectuarse por medio de un botón manual de arranque o por un arrancador automático. El arrancador hace circular la corriente por los electrodos de la lámpara por un tiempo suficiente para calentarlos y entonces automáticamente -o manualmente- interrumpe la corriente en los electrodos, causando que el voltaje aplicado entre los electrodos establezca el arco.

LAMPARAS DE ARRANQUE INSTANTANEO (SLIMLINE).

En 1944 fue introducido el circuito de encendido instantáneo, también conocido como Slimline. Estas lámparas trabajan sin necesidad de arrancadores, ya que el balastro suministra un voltaje lo suficientemente alto como para producir el arco en forma instantánea, evitando así el arranque lento que se tiene con las lámparas de precalentamiento; además simplifica el sistema de alambrado y el sistema correctivo.

Dado que las lámparas Slimline no necesitan calentamiento previo, se requieren bases con una sola espiga a cada extremo de la lámpara. Las lámparas de arranque instantáneo de 40 watts usan una base media de dos espigas, la cual tiene una conexión entre las espigas de cada extremo, produciendo el mismo efecto que solamente una espiga para cada cátodo. Las lámparas de arranque instantáneo con doble espiga no trabajan en circuitos de precalentamiento o de arranque rápido, aún cuando inadvertidamente se instalaran en artefactos con este tipo de balastros (Fig 11.5).

LAMPARAS DE ARRANQUE RAPIDO.

En 1952 se desarrollaron el circuito y la lámpara de arranque rápido. Este tipo de lámparas arrancan con suavidad y rapidez sin necesidad de arrancadores. En realidad arrancan rápidamente pero no instantáneamente como lo hacen las del tipo Slimline, pero arrancan en un período de tiempo mucho más corto que las lámparas de precalentamiento, usando balastros más eficientes y más pequeños que los balastros de arranque instantáneo.

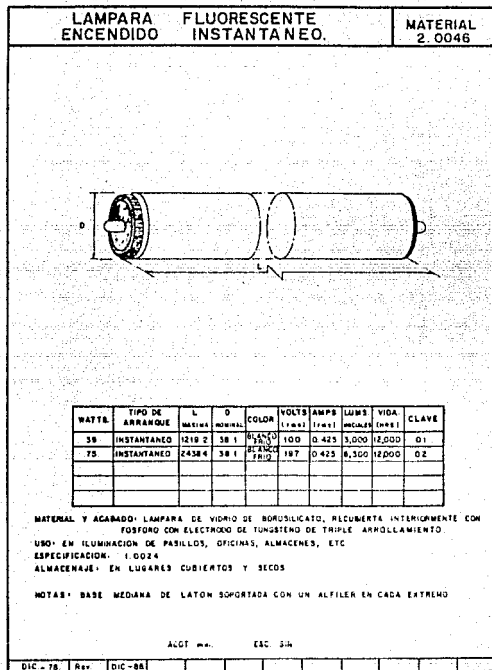


FIG 11.5.- LAMPARAS DE ARRANQUE INSTANTANEO.

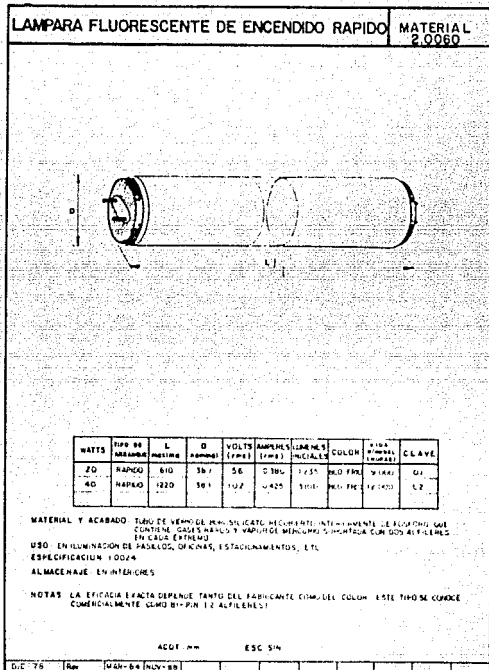


FIG 11.6.- LAMPARAS DE ARRANQUE RAPIDO.

Este tipo de lámparas dependen del calentamiento del cátodo, el cual es suministrado por unos devanados que tiene el balastro. De esta forma se reduce el voltaje de arranque, que es menor que el de las lámparas Slimline del mismo tamaño. La lámpara de encendido rápido es la lámpara fluorescente más común y es adecuada para la mayoría de las aplicaciones (Fig 11.6).

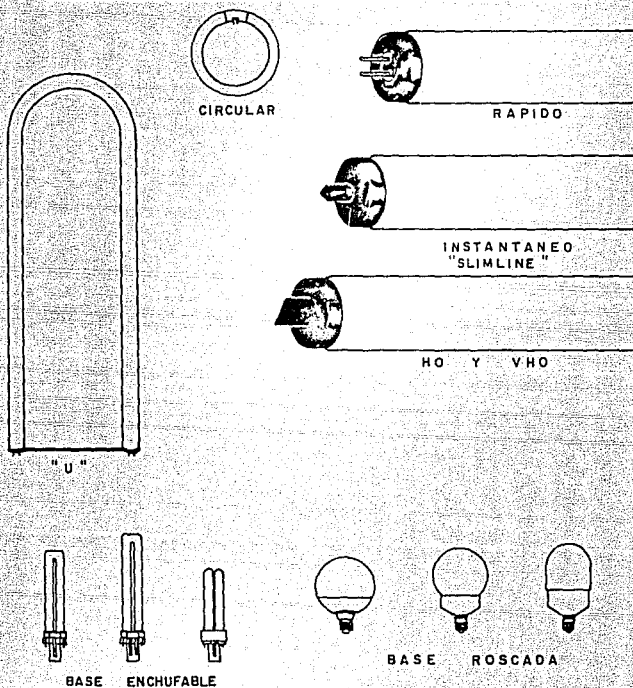
En la actualidad existe una gran variedad de tipos de lámparas fluorescentes, una para cada necesidad y condiciones especiales de funcionamiento. Entre los principales tipos de lámparas fluorescentes se tienen las siguientes (Fig 11.7):

a) DE ALTA EMISION LUMINICA (HO).- Las lámparas Slimline de precalentamiento y arranque rápido del tipo convencional trabajan aproximadamente a un máximo de 31 watts por metro con una corriente de 430 mA. El principio de arranque rápido posibilita el que se pueda exceder esa carga con buena eficiencia en el sistema de instalación.

Las lámparas HO para uso en intemperie generalmente funcionan a 800 mA con una carga aproximada de 43 watts por metro. A 800 mA las lámparas suministran aproximadamente 45% más de lúmenes que las del tipo Slimline de tamaño comparable. Para emplearlas a la intemperie, es decir, para alumbrado de calles o en reflectores, las lámparas de alta emisión casi siempre trabajan a 1000 mA para suministrar una alta emisión luminica a bajas temperaturas. Las lámparas HO reglamentarias fluctúan en potencias entre 32 y 105 watts y en longitud entre 24 y 96 pulgadas (Fig 11.8).

LAMPARAS FLUORESCENTES

39



EFICACIA: 37 A 93 LUMENES POR WATT

VIDA : 6,000 A 20,000 HORAS

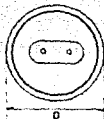
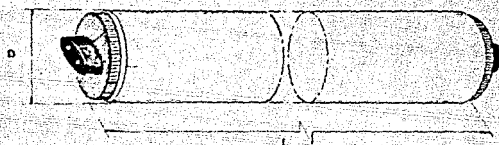
POTENCIAS: 4 A 215 WATTS

USOS : RESIDENCIAL, COMERCIAL, OFICINAS, INDUSTRIAL .

FIG 11.7.- TIPOS DE LAMPARAS FLUORESCENTES.

LAMPARA FLUORESCENTE AHORRADORA DE
ENERGIA ENCENDIDO RAPIDO H.O - V.H.O

MATERIAL
2.0649



WATTS	TIPO DE ARRANG	L MAX	D MAX	VOLTS (R.M.S)	AMPS (R.M.S)	LUMENES INICIALES	VIDA (HORAS)	COLOR	CLAVE
95	RAPIDO	2438.4	38.1	126	0.83	8 800	12 000	BLANCO LIGERO	O1
185/195	RAPIDO	2435.4	53.9	257	0.83	14 900	12 000	BLANCO LIGERO	O2

MATERIAL Y ACABADO TUBO DE VIDRO DE BORDOLICATO RECLUBIERTO INTERIORMENTE DE FOSFORO QUE
CONTIENE GASES RAROS Y VAPOR DE MERCURIO, SOPORTADA CON DOS -
ALFIRES EMBUTIDOS EN CADA EXTREMO

USO, PARA ILUMINACION DE PASILLOS, OFICINAS, AULAS, ETC

ESPECIFICACION: ANSI (78.3 A-1983), ANSI (81.2 0-1976) DIMENSIONES

ALMACENAJE: EN INTERIORES

NOTAS: EL WATTAJE EXACTO DEPENDE DE CADA FABRICANTE
LA LAMPARA DE 34/35 W SUSTITUYE A LA DE 40 W.
LA LAMPARA DE 95 W SUSTITUYE A LA DE 100/115 W.
LA LAMPARA DE 185/195 W SUSTITUYE A LA DE 215 W.
ESTA LAMPARA DEBERA OPERARSE SIEMPRE CON BALASTRO
AHORRADOR DE ENERGIA
HO SIGNIFICA ALTA EMISION
VHO SIGNIFICA MUY ALTA EMISION

ACOT: MM.

ESC: 5/1.

b) **DE MUY ALTA EMISION LUMINICA (VHO).**- Estas lámparas trabajan a 1500 mA y aproximadamente 78 watts por metro de longitud de tubo. Cuando la corriente de la lámpara excede de 1000 mA, los watts por metro de la lámpara se vuelven más elevados como para crear un problema de calentamiento que hace más complicado el diseño para su debido control. Si el calor resultante de 1500 mA se deja sin control, puede hacer que la temperatura del vapor de mercurio suba demasiado dando como resultado un aumento en la presión, lo cual reduciría la eficacia de la lámpara. Este control se obtiene empleando blindajes reflectores metálicos de forma circular que van montados entre los electrodos y los extremos de las lámparas, produciéndose un "centro de control de presión" (Figs 11.9 y 11.10).

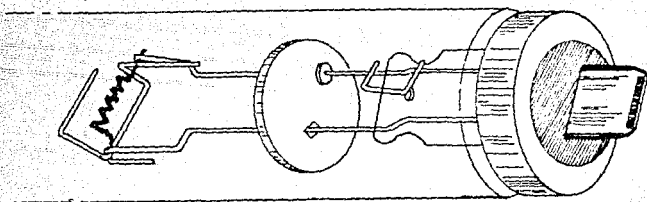


FIG 11.10.-CENTRO DE CONTROL DE PRESION EN UNA LAMPARA VHO.

c) **CIRCULARES.**- Estas lámparas están constituidas por un tubo fluorescente doblado en forma circular. Se emplean cuando se precisa simultáneamente una iluminación funcional combinada con un buen efecto estético. Aun cuando son lámparas del tipo de arranque rápido diseñadas para trabajar con balastros circulares

de arranque rápido, también pueden funcionar con reactores de precalentamiento. Los tamaños normales fluctúan entre 22 y 40 watts con diámetros de 8 a 16 pulgadas.

d) EN FORMA DE "U".- Son esencialmente lámparas de 40 watts en forma de "U" con una longitud nominal de 24 pulgadas. Su forma curvada permite el uso de dos lámparas (el equivalente a 2 de 48 pulgadas o de 4 de 24 pulgadas de tipo recto) en un luminario cuadrado de 24 pulgadas.

Funcionan con reactores de arranque rápido de 40 watts. Tienen la ventaja de permitir que el alambrado y los portalámparas se instalen en uno de los extremos del luminario. Ofrece una forma compacta que se puede usar en cielos rasos modulares.

e) DE LUZ NEGRA Y AZULADA.- Las lámparas de luz negra se diferencian de las lámparas fluorescentes comunes únicamente en la composición de los filtros utilizados, que son los que irradian la mayor parte de su energía en la región de ultravioleta (máximo a 356 nm), en vez de en la gama visible.

Dado que las lámparas de luz negra también emiten alguna radiación visible, a menudo se usan con filtro externo de color azul oscuro, para suprimir la irradiación visible. Las lámparas fluorescentes de luz negra azulada son como las de luz negra, salvo que van dotadas de un tubo especial azul oscuro que absorbe casi toda la luz visible mientras transmiten libremente radiación ultravioleta, dando como resultado la eliminación de un filtro separado.

Ambos tipos de lámparas trabajan en los mismos circuitos y equipos como lo hacen las otras lámparas fluorescentes comunes

del mismo wattaje. Existe un sinnúmero de aplicaciones para las lámparas de luz negra en la industria, así como también en el teatro y en los efectos de luz decorativa en general.

f) LAMPARAS GERMICIDAS.- Las lámparas germicidas pertenecen al grupo de lámparas fluorescentes aún cuando sus bombillas de vidrio claro no van revestidas con pigmento fluorescente. El vidrio normal que se utiliza en las lámparas fluorescentes suprime la radiación por debajo de 280 nanómetros aproximadamente.

El bombillo germicida consiste de un vidrio especial que transmite la energía ultravioleta de 253.7 nanómetros generada en el arco. La radiación de esta longitud de onda mata a una inmensa variedad de gérmenes y bacterias de moho. Es muy importante proteger la piel y los ojos contra la radiación ultravioleta producida por estas lámparas, pues provocan irritación si se tiene exposición prolongada. Nunca deben verse directamente las lámparas desnudas.

g) LAMPARAS ESTIMULANTES DEL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS.- Estas lámparas tienen por objeto producir energía radiante en las bandas de longitud de onda que estimulan el crecimiento de las plantas. Suministran altos niveles de radiación roja y azul que son sumamente beneficiosas para la proliferación de las plantas. Además, contribuyen a mejorar el crecimiento vegetal y reproductivo de muchas plantas para uso comercial y doméstico.

Hay dos tipos de estas lámparas en varios tamaños. La del tipo común y corriente no sólo estimula el crecimiento de las plantas sino que tiene una luz purpurina que realza la apariencia de las flores a la vez que imparte un aspecto atractivo a los peces tropicales en el acuario. Para los cultivadores comerciales es recomendable el uso de esta lámpara de amplio espectro

diseñada específicamente para ese fin. La emisión producida por este tipo de lámpara es bastante fuerte en las longitudes de onda de radiación que son las que promueven dos radiaciones fotoquímicas importantes: fotosíntesis y síntesis clorofílica.

h) **LAMPARAS REFLECTORAS (DE FLUJO DIRIGIDO).**— Esta lámpara es idéntica en funcionamiento a la lámpara fluorescente normal, pero dentro del tubo de descarga se aplica una capa de material especial, opaca hacia la parte superior y reflectora hacia la parte inferior del tubo. La consecuencia directa de esta nueva disposición es que el flujo luminoso de la lámpara queda dirigido hacia abajo. El efecto direccional conseguido es favorable no solamente porque la dirección predominante es hacia el plano de trabajo, sino también porque la acumulación de polvo en la parte superior de las lámparas corrientes produce con el tiempo una disminución apreciable del rendimiento luminoso (Fig 11.11).

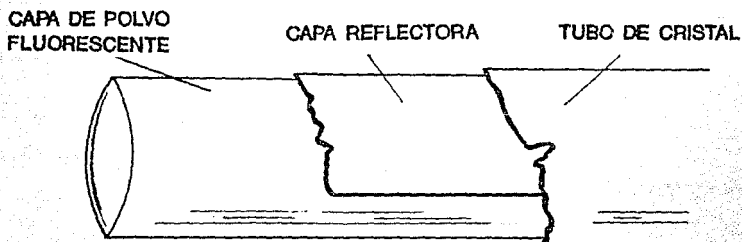


FIG 11.11.- LAMPARA FLUORESCENTE DE FLUJO DIRIGIDO.

i) **LAMPARAS FLUORESCENTES PARA CORRIENTE CONTINUA.**— La lámpara fluorescente está proyectada, esencialmente, para funcionar en c.a., pero en muchas ocasiones se presenta el caso de alimentación en c.c.; esto ocurre por ejemplo en el alumbrado de

ferrocarriles y tranvías. En estos casos también es posible -con algunas modificaciones- utilizar la lámpara fluorescente, como veremos enseguida.

La lámpara debe conectarse en serie con una inductancia parecida a la utilizada en c.a. y con una resistencia. Aquí la inductancia no tiene efecto limitador de la corriente, sino que se emplea solamente para provocar, en combinación con un interruptor, pulsador, etc., la sobretensión necesaria para el encendido de la lámpara. La resistencia en serie actúa como estabilizador de la corriente de descarga, impidiendo que su valor se eleve excesivamente.

En general estas lámparas tienen bajo rendimiento, debido al consumo de la resistencia adicional y se fabrican en potencias bajas (hasta 20 W) ya que las lámparas de mayor potencia requieren de mayores voltajes de encendido, lo que no es posible lograr por medio de autotransformadores porque la tensión de la red es en c.c..

j) LAMPARAS PARA ENCENDIDO A BAJAS TEMPERATURAS.- Para los casos en que el encendido haya de realizarse a bajas temperaturas, las lámparas fluorescentes normales no son apropiadas, ya que se ven afectadas muy desfavorablemente. Para estos casos se utilizan lámparas especiales, en las que durante el proceso de fabricación se modelan las condiciones de presión en el interior del tubo, de forma que sea posible el encendido con balastos normales.

Actualmente se fabrican lámparas que pueden encender a temperaturas ambientes de -20°C . También pueden utilizarse para alumbrado interior en locales sometidos a muy bajas temperaturas, por ejemplo cámaras frigoríficas. Estas lámparas tienen la misma

construcción que las lámparas normales, por lo que pueden sustituir a estas últimas sin tener que cambiar ningún accesorio.

K) LAMPARAS PARA OPERAR EN REDES CON GRANDES FLUCTUACIONES DE TENSION.- Como se verá en la sección siguiente, las fluctuaciones de tensión afectan muy desfavorablemente a las lámparas fluorescentes; tanto es así que si dichas fluctuaciones alcanzan un valor elevado, pueden llegar a destruir la lámpara. En redes con estas características era imposible o muy difícil el uso de lámparas fluorescentes, pero recientemente se ha desarrollado una lámpara especial que puede funcionar aún con grandes fluctuaciones de tensión. La eficacia de una lámpara de este tipo es inferior a la de una lámpara fluorescente normal, pero aún así resulta un 50% mayor al de una lámpara incandescente de igual potencia.

l) LAMPARAS FLUORESCENTES DE SECCION NO CIRCULAR (POWER GROOVE).- Estas lámparas han sido desarrolladas por la firma norteamericana General Electric con el nombre de lámparas Power Groove. En estas lámparas se parte de un tubo de 53 mm de diámetro, cuya sección transversal se ha deformado, tal como se presenta en la figura 11.12 la descarga se concentra en la parte sombreada de la figura y los puntos más bajos permanecen relativamente fríos. En esta lámpara se dejan tramos de sección circular para aumentar la resistencia mecánica.

Para una longitud de 1.2 metros esta lámpara tiene una tensión de funcionamiento de 84 volts y una corriente de descarga de 1.5 amperes, lo que representa una potencia absorbida de 110w y un flujo luminoso aproximado de 6200 lúmenes. Recientemente se ha perfeccionado la forma original de la lámpara construyendo tubos con aplastamientos en lados opuestos, tal como se ve en la figura 11.13, aumentándose así el rendimiento luminoso. En estas



FIG 11.12.- LAMPARA FLUORESCENTE DE SECCION NO CIRCULAR.



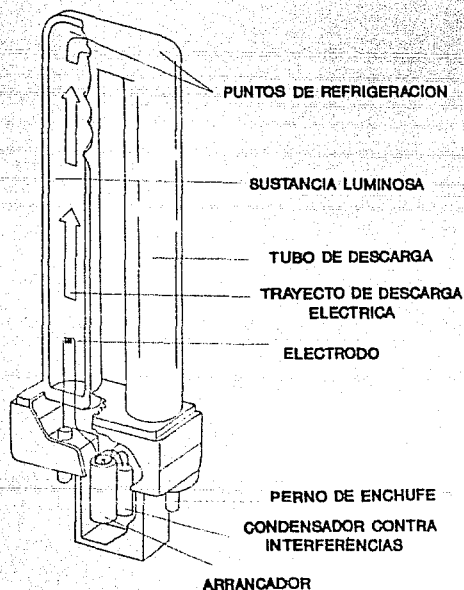
FIG 11.13.- LAMPARA POWER GROOVE PERFECCIONADA.

nuevas lámparas la corriente de descarga y la tensión de funcionamiento es como en los tipos más antiguos. Pero ahora, la lámpara con tubo de 1.2 metros tiene un flujo luminoso de 6900 lúmenes. En la lámpara con tubo de 2.4 metros, la tensión de funcionamiento se eleva hasta 175 volts, lo que representa una potencia de 215 watts y un flujo luminoso de 15000 lúmenes.

m) **LAMPARAS FLUORESCENTES COMPACTAS.**- A raíz de la crisis petrolera a principios de la década de los 70, la necesidad de un aprovechamiento más racional de la energía eléctrica dió inicio al desarrollo de una nueva lámpara fluorescente más versátil que las anteriores. A través de muchos años de investigación y estudio se logró desarrollar un nuevo tipo de lámpara de tubos

gemelos y sumamente compacta que entre las muchas cualidades que posee destacan el generar una luz agradable, una buena reproducción de colores, una gran duración, alta eficacia, buena distribución luminosa, fácil instalación y sobre todo un reducido consumo de energía (75% menos en comparación con las lámparas incandescentes).

En estas lámparas la producción de luz ocurre en la misma forma que en las lámparas fluorescentes convencionales. Las



**FIG II.14.- LAMPARA FLUORESCENTE COMPACTA.
(TUBOS GEMELOS).**

condiciones óptimas de funcionamiento se producen cuando se tiene una temperatura de 30 a 65°C. En este intervalo se obtiene un flujo luminoso superior al 80%. Para las lámparas de 13 watts se tiene actualmente una base del tipo enchufable (Fig 11.14) pero ya se contempla actualmente la posibilidad de producir un adaptador. El balastro necesario se encuentra también disponible en el mercado con una integración nacional total.

Si se tienen temperaturas superiores a 20°C es recomendable hacer funcionar las lámparas con el casquillo arriba o en forma horizontal, mientras que el funcionamiento con el casquillo abajo es más ventajoso cuando se tienen temperaturas menores a 20°C. De esta forma es posible aprovechar al máximo el flujo luminoso emitido. Sin embargo, en general estas lámparas son capaces de funcionar aceptablemente dentro de un intervalo de temperatura ambiente de -15 a 60°C (Fig 11.15).

A causa de su bajo consumo de energía estas lámparas emiten muy poco calor por lo que son muy recomendables para aquellas instalaciones en las que la aportación de calor debe ser mínima (como en exposiciones, museos, supermercados, etc.).

n) LAMPARAS FLUORESCENTES AHORRADORAS. En fechas recientes han sido introducidas en el mercado nacional lámparas fluorescentes con eficacias mayores que las típicas para lámparas convencionales. Esta mayor eficacia se traduce en un ahorro directo de energía eléctrica ya que se obtiene con estas lámparas una cantidad de lúmenes muy aproximada a la de las lámparas convencionales pero con una potencia de lámpara menor. Como la eficacia es también función del color -como se explicará posteriormente- estas lámparas presentan el inconveniente de tener como color único el Blanco Ligero por lo que en instalaciones ya existentes es necesario reemplazar por completo

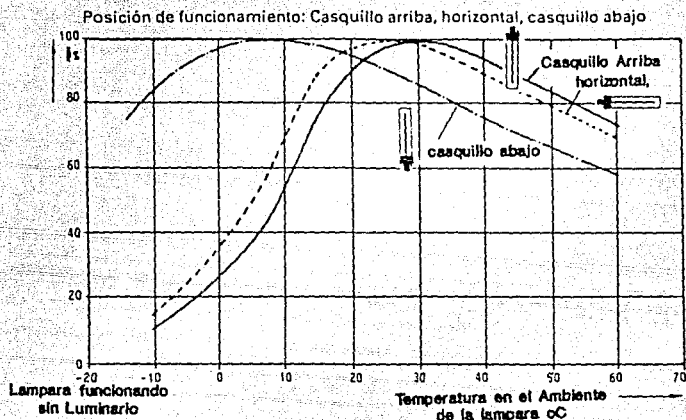


FIG 11.15.- CARACTERISTICAS DE OPERACION DE LA LAMPARA DE TUBOS GENELOS.

las lámparas convencionales, lo que representa un importante inconveniente. Otro problema que presentan es el tener que utilizar balastos compatibles, es decir, balastos del tipo ahorrador de energía, ya que de otra manera se tiene operación inadecuada de todo el sistema fluorescente, repercutiendo esto directamente en la vida del equipo. En la parte correspondiente a balastos se mencionan las diferentes alternativas para combinar los distintos tipos de lámparas con los diferentes productos ahorradores de energía disponibles en el mercado nacional. Las lámparas ahorradoras de 32, 34, 60, 95 watts HO y 195 watts VHO sustituyen a las lámparas convencionales de 39, 40, 75, 110 HO y 215 watts VHO respectivamente (Fig 11.16).

CARACTERISTICAS DE ILUMINACION DE LAS LANPARAS FLUORESCENTES.

Cada sistema de iluminación tiene características de funcionamiento particulares, que lo hacen apropiado para tal o cual aplicación. De aquí la importancia de conocer las características de iluminación de los diferentes sistemas, siendo para los sistemas fluorescentes las más importantes las que trataremos a continuación. Se incluye un breve repaso sobre las características de sensibilidad del ojo humano por ser un factor fundamental para la determinación de las características de las lámparas.

CURVA DE SENSIBILIDAD DEL OJO HUMANO.— *El conjunto de radiaciones de la luz de día tiene longitudes de onda que van desde 380nm para el color violeta, hasta 780nm para el color rojo; estos valores corresponden a los límites de sensibilidad del ojo humano a la luz. Fuera de los mismos el ojo es ciego, esto es, no percibe ninguna clase de radiación.*

Si cada una de las radiaciones que contiene la luz blanca se hace llegar al ojo en forma independiente, éste las captará en sus diversos colores con distinta intensidad, debido a que la sensibilidad de los conos de la retina es diferente para cada color.

Si se representa mediante una gráfica la sensibilidad de la retina del ojo humano para las diferentes longitudes de onda de la luz del mediodía soleado, se obtiene una curva acampanada que se denomina "Curva de Sensibilidad del Ojo Humano" (Fig. 11.17). Como se puede apreciar, el ojo tiene la mayor sensibilidad para una longitud de onda de 555nm que corresponde al color amarillo.

verdoso y la mínima a los colores rojo y violeta, como se observa en la gráfica.

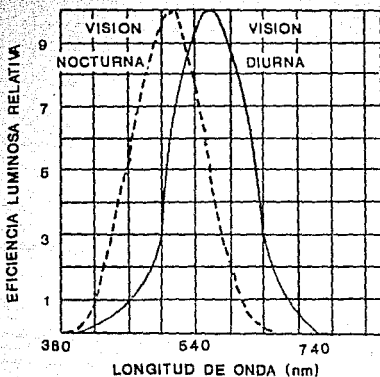


FIG 11.17.- CURVA DE SENSIBILIDAD DEL OJO HUMANO.

La curva de sensibilidad del ojo humano está basada en la visión por conos (fotópica), es decir, a niveles luminosos ordinarios durante el día. Cuando los niveles disminuyen sensiblemente durante la noche, la visión se efectúa principalmente por medio de los bastones (escotópica) y la curva de sensibilidad se verifica de acuerdo con una nueva curva que la fotópica, pero desplazada 48nm hacia el extremo azul del espectro. Esta traslación es conocida como Efecto Purkinje y desplaza a la sensibilidad máxima del ojo de los 555 a los 507nm, según puede apreciarse en la misma figura 11.17.

El resultado es que en la oscuridad y a pesar de que la

visión carece completamente de color, el ojo se hace relativamente muy sensible a la energía del extremo azul del espectro y casi ciego al rojo.

CONVERSION DE LA ENERGIA EN LUZ.— Cada fuente luminosa, de acuerdo con su construcción y su principio de funcionamiento, convierte la energía eléctrica en luz. Para explicar como se realiza esta conversión en una lámpara fluorescente nos referiremos a la figura 11.18 donde se ha representado gráficamente la distribución de la energía total absorbida por una lámpara típica de 40 watts.

De los 40 watts totales consumidos por la lámpara:

- 7 watts se consumen en los electrodos y se convierten en calor.
- 33 watts se consumen en la descarga y están repartidos de la siguiente manera:
 - * 1 watt bajo forma de energía luminosa constituida por las líneas amarilla, verde, azul y violeta del vapor de mercurio.
 - * 24 watts bajo forma de radiaciones ultravioletas, que por excitación de las materias fluorescentes del tubo darán:
 - 7 watts en forma de luz fluorescente.
 - 11 watts en forma de radiaciones infrarrojas, que acompañan a las radiaciones visibles, en forma de calor.
 - 6 watts en forma de pérdidas de calor por convección y radiación.
 - * 8 watts procedentes de la energía perdida en la descarga y por conducción, convertidos también en calor.

Por lo tanto, en la lámpara luz de día de 40 watts, la

DISTRIBUCION DE LA ENERGIA TOTAL ABSORBIDA POR UNA LAMPARA FLUORESCENTE

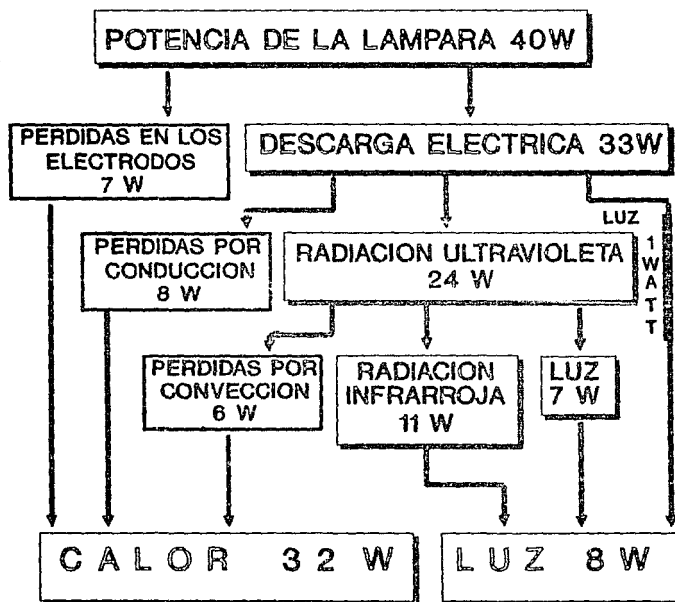


FIGURA II.18

transformación de la energía eléctrica en energía luminosa se realiza con el siguiente rendimiento:

$$\frac{1 + 7}{40} \times 100 = 20\%$$

transformándose los watts perdidos en calor y disipándose por conducción, convección y radiación. Naturalmente, sobre el límite teórico encontrado (20%) hay que tener en cuenta la sensibilidad relativa del ojo humano para los distintos colores constitutivos de la luz de la lámpara.

En el estado actual de la técnica prácticamente se consiguen eficacias o rendimientos luminosos del orden de los 100 lúmenes por watt del límite teórico que se puede esperar de la cadena de transformación:

DESCARGA ELÉCTRICA --> RADIACION ULTRAVIOLETA --> LUZ BLANCA

EFICACIA.— La eficacia o rendimiento luminoso de una fuente productora de luz indica el flujo emitido por dicha fuente en función de la unidad de potencia eléctrica consumida. La Eficacia se representa por la letra griega Eta (η) siendo su unidad el lumen por watt (lm/w).

Una de las ventajas más importantes de las lámparas fluorescentes es su alta eficacia. Suelen compararse con las lámparas incandescentes a ese respecto, pero los wattajes de las primeras deben incluir las pérdidas del reactor para que la comparación resulte exacta.

Las lámparas convencionales de dos espigas tienen eficacias

-sin incluir las pérdidas del reactor- que fluctúan entre 24 y 82 lúmenes por watt, según el tamaño y color. Las lámparas circulares fluctúan entre 48 y 85 lúmenes por watt; las HO producen entre 40 y 92 y las VHO producen entre 45 y 75 lúmenes por watt. Para las lámparas del mismo color y tipo, la clasificación de lúmenes por watt es mayor para una lámpara larga que para una corta. El hecho es que la energía consumida en los electrodos es igual para cualquier longitud de la lámpara.

En los últimos años se han desarrollado lámparas ahorradoras de energía que alcanzan eficacias mayores, como se explicó anteriormente.

VIDA UTIL DE LAS LAMPARAS.- En comparación con las lámparas incandescentes, las lámparas fluorescentes tienen un promedio de duración asignada mucho mayor, pero la forma de la curva de esperanza de duración es muy parecida, según se aprecia en la figura 11.19.

Debido a las ligeras variaciones en la construcción de las lámparas y de los materiales empleados sería imposible lograr que la lámpara funcionara por el tiempo exacto para el cual fue diseñada. En las lámparas incandescentes la duración está esencialmente ligada a la temperatura del filamento, por lo que se han podido establecer leyes que relacionan a la duración con la tensión de alimentación. Por el contrario, la duración de las lámparas fluorescentes dependen de una serie de factores considerables, por lo que no ha sido posible todavía establecer normas que relacionen la duración con dichos factores.

El desgaste del producto emisor -que es un factor determinante en la vida de la lámpara- depende entre otras cosas

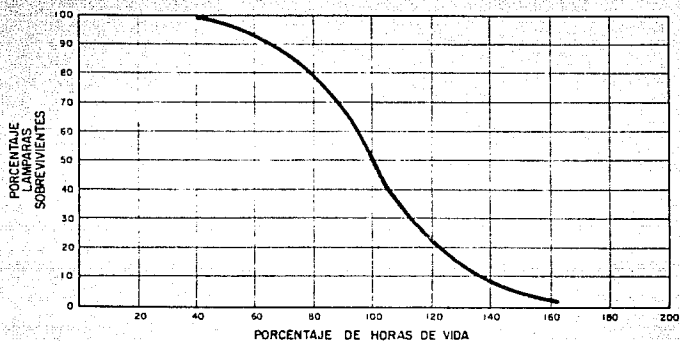


FIG II.19.- CURVA DE ESPERANZA DE DURACION DE LAMPARAS FLUORESCENTES.

de:

- la cantidad de material emisor utilizado en la fabricación
- la naturaleza y la presión del gas que rellena la lámpara
- el procedimiento de encendido de la lámpara
- los periodos de encendido
- el calentamiento, permanente o no, de los electrodos
- la temperatura ambiente en el momento de encendido
- la forma de onda de la corriente proporcionada por el balastro
- la tensión de alimentación

En vista de que los factores que afectan la vida son numerosos e impredecibles, la clasificación nominal de las lámparas se hace en base al promedio de duración de un grupo considerable de lámparas funcionando bajo condiciones controladas de laboratorio.

La duración promedio calculada es el punto en el cual el 50% de las lámparas en un grupo considerable se han fundido y el 50% restante continúan encendiendo, según se detalla en la curva de esperanza de duración. Durante el ciclo de arranque y el periodo de funcionamiento de una lámpara fluorescente, el material emisor es expulsado de los cátodos. El final normal de duración se alcanza cuando no queda material emisor suficiente en ninguno de los dos cátodos para formar el arco.

En virtud de que las cifras publicadas en los catálogos de los fabricantes sobre el promedio de duración nominal de las lámparas se basan por regla general en un ciclo de encendido de tres horas, los cálculos tienen que reflejar los efectos tanto de los periodos de arranque como de encendido. Por lo tanto, cualquier cambio en las horas de encendido por ciclo se reflejará en las horas de servicio.

Los ciclos de encendido más cortos -arranques más frecuentes- reducen la duración mientras que los ciclos de encendido más largos -arranques menos frecuentes- la aumentan. En la figura 11.20 se muestran las curvas típicas de mortalidad para las lámparas de arranque rápido de 40 watts con diferentes ciclos de encendido.

Asimismo, en la Tabla 11.A se indica la duración promedio de las lámparas a varios ciclos de encendido.

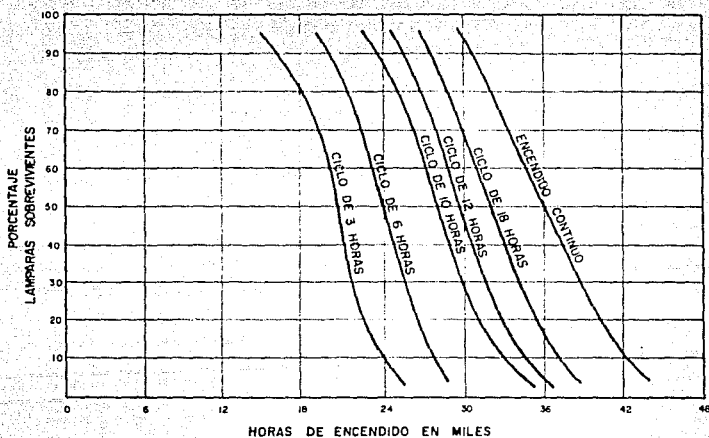


FIG 11.20.- INFLUENCIA DE LOS CICLOS DE OPERACION EN LA VIDA DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES.

PROMEDIOS DE DURACION EN HORAS DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES A DISTINTOS CICLOS DE ENCENDIDO.
(Miles de Horas)

TIPO DE LAMPARA	Horas por Arranque					
	3	6	10	12	18	Continua
De precalentam. 40w	12	14	17	18	20	22.5
De A. Rápido 40w	18	22	25	26	28.5	34.0
De Alta Em. Lumin.	12	14	17	18	20	22.5
De Muy Alta Em. Lum.	9	11.3	13.5	14.4	16.2	22.5
Slimline (96T12)	12	14	17	18	20	22.5

TABLA 11.A

MANTENIMIENTO DE LUMENES.— El flujo luminoso de una lámpara fluorescente decrece lentamente durante el curso de la vida de la lámpara. Este decrecimiento no es uniforme, como puede apreciarse en la figura 11.21, sino que es menor cuantas más horas de funcionamiento tenga la lámpara. Como el porcentaje de decrecimiento es relativamente más elevado al principio (del orden del 5% en las primeras cien horas), se considera como flujo luminoso inicial el flujo a las 100 horas de funcionamiento.

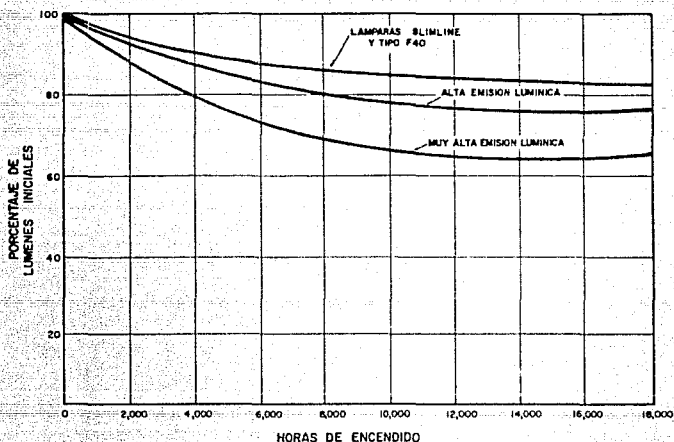


FIG 11.21.— CURVA DE MANTENIMIENTO DE LUMENES EN VARIOS TIPOS DE LAMPARAS FLUORESCENTES BLANCO FRIO.

Las dos causas principales que afectan la depreciación en cuestión la constituyen:

- i) La deterioración gradual del revestimiento fosfórico
- ii) El ennegrecimiento de la superficie interior del bombillo provocado por el material emisor en los cátodos, particularmente en los extremos de la lámpara.

Las lámparas de menor diámetro, con bulbos T5, T6 y T8 acusan un mayor ennegrecimiento de los extremos debido a que los cátodos están más cerca de las paredes del bulbo. El mantenimiento de lúmenes es mejor con las lámparas regulares Slimline y de arranque rápido T12 que con las HO y VHO. En la figura 11.21 se ilustra el mantenimiento de lúmenes en tres lámparas típicas.

LUMINANCIA DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES.- Para que se puedan aprovechar al máximo todas las posibilidades que la forma tubular de las lámparas fluorescentes puede ofrecer en el campo de la Luminotecnia es preciso que la luminancia de estas lámparas sea lo suficientemente bajo para evitar cualquier clase de deslumbramiento aunque estas lámparas se sitúen directamente en el campo visual.

Aunque el deslumbramiento provocado por los manantiales luminosos es una consecuencia directa de los fuertes contrastes de las luminancias respectivas con la luminancia del medio ambiente y aunque en principio resulte imposible sentar reglas en lo que se refiere a luminancia máxima compatible con la ausencia de deslumbramiento, se puede considerar como límite máximo 5,000 nits en la mayoría de los casos.

Ahora bien, dada la forma tubular de la lámpara fluorescente, tendremos:

$$\phi = L S \pi'$$

L = Luminancia en Nits

S = Superficie aparente en metros cuadrados, o sea el producto de la longitud de la lámpara por su diámetro.

de donde:

$$L = \frac{\phi}{S \pi'}$$

Por ejemplo, una lámpara de luz de día de 40 watts tiene las siguientes características:

$$\phi = 2,000 \text{ lúmenes}$$

$$l = 1.2 \text{ metros}$$

$$d = 0.038 \text{ metros}$$

$$S = l \times d = 1.2 \times 0.038 = 0.0456 \text{ m}^2$$

La luminancia de esta lámpara será:

$$L = \frac{2000}{3.14^2 \times 0.0456} = 4400 \text{ Nits}$$

valor inferior al valor encontrado anteriormente.

Se puede concluir que las dimensiones actuales de las lámparas fluorescentes no son caprichosas, sino que se han elegido teniendo en cuenta la intención de obtener mamantiales

luminosos cuya luminancia no provoque deslumbramiento por visión directa de la lámpara.

EFEECTO ESTROBOSCOPICO.— *Estroboscópico es una palabra griega que significa "ver movimiento". Se conoce como efecto estroboscópico a la variación de la emisión lumínica debido a la variación cíclica de la corriente alterna.*

El filamento de una lámpara incandescente retiene bastante calor, por lo que no se percibe la disminución de la energía luminosa al pasar por el punto cero la intensidad de la corriente, excepto cuando lámparas de poca potencia se hacen funcionar a frecuencias de 25 hertz o menores. El arco de mercurio de una lámpara fluorescente que trabaja con una corriente alterna de 60 hertz se enciende y se apaga 120 veces por segundo. La luz de la lámpara también se apagaría si no fuera por los fósforos que tienen "continuidad" o acción fosforescente. Es decir, continúan brillando por un corto periodo de tiempo después de cortar las radiaciones existentes. Sin embargo, todavía hay una variación rápida que en la emisión lumínica que pasa desapercibida al ojo humano, excepto tal vez como un centelleo en los extremos de la lámpara.

En algunas circunstancias esta variación en la emisión de luz puede producir efecto estroboscópico. Debido a dicho efecto, un objeto que se desplaza a una velocidad uniforme da la impresión de moverse en forma brusca. Bajo las más extremas condiciones estroboscópicas un objeto giratorio, tal como un volante daría la impresión de estar inmóvil o de moverse en dirección contraria.

El efecto estroboscópico queda atenuado hasta hacerse invisible, alimentando las diferentes lámparas de una instalación

entre las diferentes fases de la red de distribución o por medio de montajes especiales en grupos de lámparas. En la actualidad, el efecto estroboscópico rara vez ocasiona problemas en las lámparas fluorescentes pues los fósforos modernos tienen períodos de continuidad relativamente largos.

TEMPERATURA DE TRABAJO DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES.- Las condiciones óptimas para la transformación de la radiación ultravioleta de 253.7 nm en radiaciones visibles, se presenta cuando la presión del vapor de mercurio es muy débil; esta presión viene determinada por la temperatura de la pared más fría de la lámpara. En la figura 11.22 se indican los valores de flujo luminoso producido en función de la temperatura en la pared más fría de la lámpara suponiendo una corriente constante.

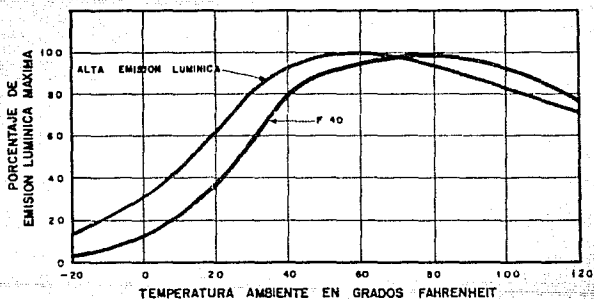


FIG 11.22.- INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA DE LA PARED DEL BULBO DE UNA LAMPARA FLUORESCENTE.

Nótese que el valor máximo del flujo luminoso emitido corresponde a una temperatura de 30 a 40°C; a menores temperaturas la presión del vapor de mercurio aumenta y parte de las radiaciones de 253.7 nm cambian a mayores longitudes de onda, reduciendo así la eficacia. Por tanto, se ha de procurar que la temperatura de la pared más fría esté comprendida entre 30 y 40°C, lo que supone una gran superficie de irradiación; esta es otra de las razones por las que la lámpara fluorescente ha de tener grandes dimensiones.

EFFECTO DE LA TEMPERATURA AMBIENTE.— Puesto que los cambios producidos en la temperatura ambiente van acompañados de cambios similares en la temperatura de la pared del bulbo, el rendimiento lumínico se ve afectado por las variaciones en la temperatura ambiente, según se muestra en la figura 11.23. Los valores nominales de eficacia se midieron a una temperatura ambiente industrial de 25°C.

Cuando las lámparas fluorescentes se usan en el interior a la temperatura normal del cuarto suministran el grado máximo de luz cuando se usan con los equipos de alumbrado adecuados para evitar el sobrecalentamiento. En la figura 11.23 se nota que la eficacia disminuye a medida que aumenta la temperatura ambiente por sobre 25°C. Las luminarias encastradas extractoras de calor y aire mejoran el rendimiento lumínico mediante el control de la temperatura de la pared del bombillo de la lámpara. Sin embargo, las lámparas desnudas, por estar expuestas al enfriamiento excesivo producido por climatizadores pueden causar un rendimiento lumínico reducido.

Cuando las lámparas fluorescentes se usan a la intemperie el arranque puede representar un problema a bajas temperaturas y en consecuencia se necesitará de un voltaje más alto. Con balastros

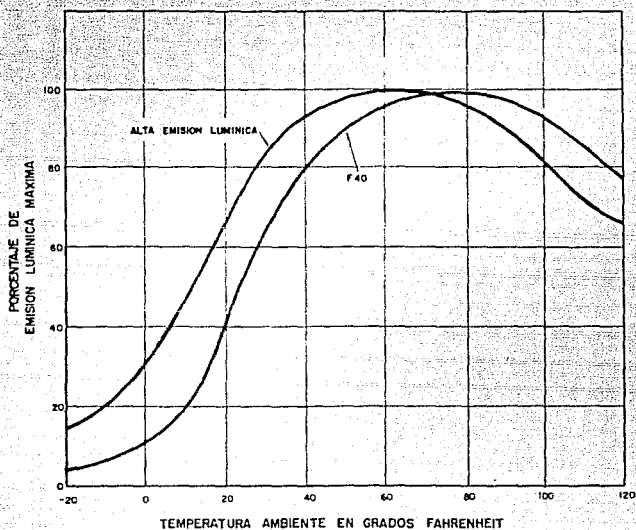
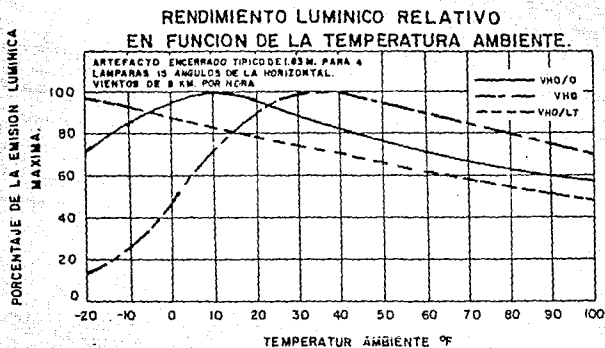


FIG 11.23.- EFECTO DE LA TEMPERATURA AMBIENTE SOBRE EL NIVEL LUMINICO DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES DESNUDAS EN AIRE CALMADO.

normales se pueden arrancar algunas lámparas en forma relativamente segura a 10°C. Sin embargo hay reactores para bajas temperaturas que operan cierto tipo de lámparas a temperaturas tan bajas como -25°C.

Una vez que ha arrancado la lámpara, la cantidad de luz depende de la temperatura a que ha llegado el bombillo. Puesto que esa temperatura varía con el tipo de lámpara que se use, la selección de la lámpara adecuada juega un papel muy importante.

El rendimiento luminoso relativo en función de las curvas de temperatura ambiente para los distintos tipos de lámparas fluorescentes que se usan comúnmente a la intemperie se muestran en la figura 11.24. La temperatura a que ocurre la emisión luminica máxima depende de la lámpara, del diseño del receptáculo de la misma y de la velocidad del viento.



**FIG 11.24.- RENDIMIENTO LUMINICO RELATIVO A DIFERENTES
TEMPERATURAS AMBIENTE DE VARIOS TIPOS DE LAMPARAS
FLUORESCENTES PARA INTENPERIE.**

EFFECTO DE LA HUMEDAD.- Cuando la humedad ambiente es elevada, se aprecia un notable aumento en la tensión de encendido; esto se debe a que la humedad enfría la superficie de la lámpara y por tanto equivale a un descenso de la temperatura ambiente que provoca un aumento en la tensión de encendido. En las lámparas que utilizan un arrancador para su encendido la acción de la humedad no tiene ningún efecto sobre la lámpara ya que la

sobretensión producida por el arrancador es bastante superior a la tensión de encendido.

Por el contrario, en las lámparas fluorescentes de encendido instantáneo este efecto puede significar que la lámpara no encienda, sobre todo si se toma en cuenta que, antes del encendido, no hay producción de calor en la lámpara que pueda ayudar a calentar sus paredes exteriores. Para evitar este inconveniente se emplean varios procedimientos, siendo los más importantes:

- i) Disponer de una estrecha banda conductora a lo largo del tubo y conectada a uno de los electrodos a través de una resistencia muy elevada situada en el casquillo de la lámpara.*
- ii) Depositar una finísima capa de silicón sobre la superficie exterior de la lámpara que evite la formación de una película continua de humedad.*

EFECTO DE LAS FLUCTUACIONES EN LA TENSION DE ALIMENTACION.-

Aunque las lámparas fluorescentes no son tan sensibles a los cambios de tensión como lo son las lámparas incandescentes, el voltaje en el balastro de las mismas deberá mantenerse dentro del régimen especificado en la etiqueta. Tanto el alto como el bajo voltaje tenderán a reducir la duración y la eficacia de la lámpara a diferencia de las lámparas incandescentes en las cuales se usa el voltaje reducido para prolongar la duración reduciendo la eficacia de las mismas.

Los bajos voltajes pueden causar problemas de arranque en las lámparas fluorescentes. El efecto producido por los volts de línea, los amperes, watts y lúmenes se pueden observar en la

figura 11.25.

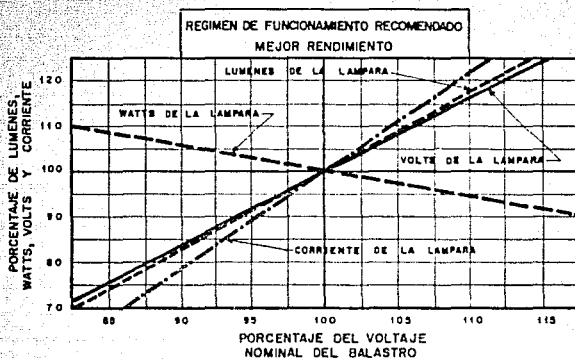


FIG 11.25.- EFECTO DE LAS FLUCTUACIONES DE TENSION EN EL COMPORTAMIENTO DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES.

El bajo voltaje de la línea puede reducir la corriente de precalentamiento en las lámparas de precalentamiento previo, dando como resultado el relampagueo frecuente de estas lámparas durante el arranque. Con esto se reduce la duración nominal de la lámpara debido al material emisoro que es expulsado de los cátodos. Si las lámparas de arranque rápido se hacen trabajar con un bajo voltaje, se verán afectadas por la reducción de la corriente calefactora de los cátodos, lo cual podría afectar en forma adversa el arranque, a la vez que aceleraría la decoloración en los extremos y acortaría la duración de las mismas.

Aún durante el periodo de encendido, las lámparas de

arranque rápido deberán tener un voltaje catódico adecuado. Si se sujetan a una disminución considerable en el voltaje de la línea, las lámparas fluorescentes se apagarán ya sea intermitentemente o por periodos más largos, según lo que dure la reducción. El porcentaje fluctúa con el tipo de la lámpara que se use y las características del reactor. A continuación se dan las caídas de tensión que harán que las lámparas de 40 watts se apaguen:

Tipo	Pre calentamiento	25%
•	Arranque Rápido con Secuencia Serie	20%
•	Arranque Instantáneo con Secuencia Serie	50%
•	•	de Adelanto y Retraso 40%

Los balastros normales están previstos para asegurar el encendido en condiciones normales del 7% pero algunos tipos especiales pueden asegurar una variación mayor.

EFFECTO DE LA FRECUENCIA.- Las características limitadoras de corriente de una reactancia dependen directamente de la frecuencia de la red y por esta razón los reactores deben usarse únicamente en redes de frecuencia para la que fueron proyectados. Con una frecuencia inferior, por ejemplo en el caso de un reactor para 60 hertz conectado a una red de 50 hertz, permitirá que circule una corriente mayor a través de la lámpara lo que provocará un acortamiento de la vida de la misma y un calentamiento del propio reactor.

Con una frecuencia mayor a la nominal, el reactor reducirá la corriente de la lámpara a un valor abajo del nominal con la consiguiente disminución de la emisión lumínica.

Por otro lado, el funcionamiento de las lámparas fluorescentes a altas frecuencias -como por ejemplo 400 hertz-

aumenta la eficacia de la lámpara y hace posible la reducción del tamaño, peso y pérdidas del reactor. La utilización práctica de las ventajas mencionadas depende del desarrollo de un equipo eficiente y económico para obtener tales frecuencias.

FUNCIONAMIENTO CON C.C.- Las lámparas fluorescentes pueden funcionar con c.c. siempre y cuando se use una resistencia conectada en serie con un reactor inductivo y se cuente con un voltaje lo suficientemente alto. En un circuito de este tipo todavía es necesario hacer un reactor inductivo para producir el impulso necesario para arrancar la lámpara cuando el interruptor se abre.

Dado que la bobina de inducción no tiene ningún efecto limitador sobre la corriente continua que fluye sobre el arco, se debe usar una resistencia conectada en serie con la lámpara y la propia bobina para limitar la corriente. La eficacia se reduce en comparación con el funcionamiento con corriente alterna, debido a que la resistencia consume aproximadamente tanta energía como la lámpara. La duración de esta última será también menor.

Otro problema en esta aplicación lo presenta el flujo constante de la corriente continua en una sola dirección, lo cual hace que el mercurio se desplace hacia el extremo negativo del tubo. Como resultado, el extremo positivo se atenúa después de varias horas de funcionamiento. El conmutador inversor de polaridad se recomienda para todas las lámparas de 20 watts o más para invertir la función de los electrodos a intervalos de unas cuantas horas y eliminar así la tendencia de que la lámpara encienda débilmente en uno de sus extremos.

Para las lámparas más cortas -que no sufren con la migración del mercurio- resulta útil usar un conmutador inversor

para equilibrar el desgaste de los cátodos invirtiendo la dirección de la corriente. El conmutador de control debe ser del tipo que invierte la corriente automáticamente cada vez que enciende la lámpara.

INTERFERENCIA DE RADIO.- Todas las lámparas de descarga pueden producir interferencias en los receptores de radio y televisión debidas a las oscilaciones de alta frecuencia que se producen en las lámparas; estas oscilaciones se manifiestan en forma de ruidos molestos o de perturbaciones en la imagen televisada. Las causas son muy complejas, pero pueden reducirse esencialmente a tres:

- a) Radiación directa de la propia lámpara a la antena del receptor o televisor.
- b) Radiación de los conductores de alimentación de la lámpara a la antena del receptor.
- c) Transmisión directa desde la lámpara fluorescente al receptor, a través de la línea de alimentación.

En los dos primeros casos la mayoría de las veces quedará por debajo de los límites molestos si estos elementos (lámpara y conductores) quedan a bastante distancia de la antena del receptor; puede considerarse suficiente una distancia entre 2.5 y 3 metros. Si no es posible establecer esta distancia y por lo tanto se siguen presentando estas molestas perturbaciones habrá que recurrir a otros métodos, que aunque sencillos, no se mencionarán por estar fuera del objetivo de este trabajo.

COLOR DE LAS LAMPARAS FLUORESCENTES.- Las lámparas fluorescentes son indudablemente las que son capaces de producir más variedad de colores, gracias a la calidad y tipo de los fósforos que revisten el tubo. Resulta muy difícil dar una definición exacta

de color, entre otras cosas porque este concepto se presta a una doble interpretación. Por una parte, el color es un fenómeno físico que, como todos los fenómenos físicos es mensurable, o sea que puede ser medido con relación a una unidad.

Por otra parte, el color es una sensación, es decir, la respuesta a un estímulo luminoso que se capta por medio de un órgano sensorial (el ojo humano), y que, seguidamente se percibe por el cerebro. El efecto de toda radiación luminosa varía con su longitud de onda. Dicho de otro modo a cada longitud de onda le corresponde siempre una sensación particular de color. Cada color está asociado por convención a la temperatura de un cuerpo patrón que al calentarse emite un color específico asociado a cada temperatura. La escala de temperatura es absoluta y se da en grados Kelvin.

Los colores más comunes en las lámparas fluorescentes son los siguientes:

COLOR	NOMENCLATURA	TEMP. DE COLOR(°K)
BLANCO CALIDO	WW	3000
BLANCO	W	3500
BLANCO FRIO	CW	4200
BLANCO LIGERO	LW	4200
BLANCO CALIDO DE LUJO	DWW	3000
BLANCO FRIO DE LUJO	DCW	4100
LUZ DE DIA	D	7500

Entre los colores anteriores, los más usados en México son aquellos cuya curva de distribución de energía espectral se muestra en la figura 11.26.

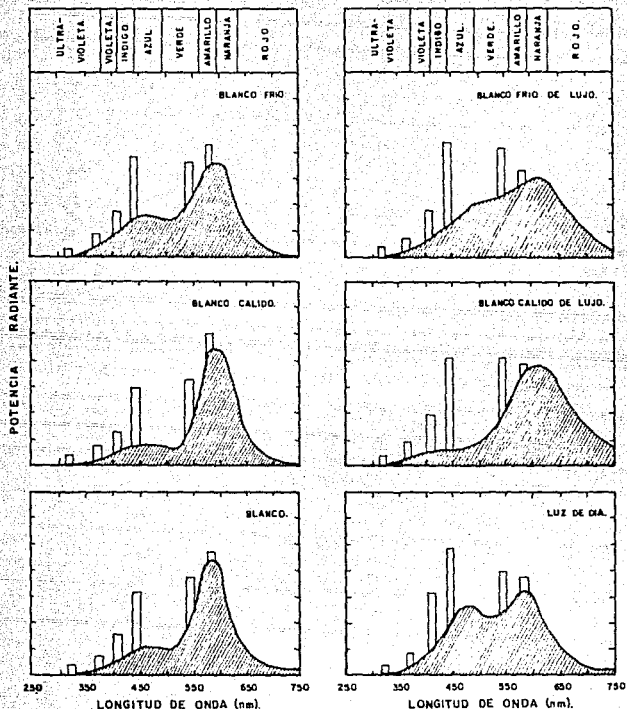


FIG. 11.25.- CURVAS DE DISTRIBUCION DE ENERGIA ESPECTRAL EN LAMPARAS FLUORESCENTES.

La lámpara Luz de Día se llama así debido a que el espectro luminoso se asemeja bastante a la de la luz natural. Se aplica en aquellos lugares en que se desea apreciar mejor los colores sin importar la hora ni las condiciones meteorológicas. Sus principales campos de aplicación son los siguientes:

Industrias Químicas, fábricas textiles, carpinterías y ebanisterías, talleres gráficos y laboratorios, pelaterías, estudios de fotografía, relojerías, joyerías, tiendas y supermercados, así como museos, galerías de arte, clínicas y consultorios.

La lámpara Blanco Frio es la lámpara fluorescente cuyo campo de aplicación es prácticamente ilimitado. Puede utilizarse por ejemplo para alumbrado industrial, de garages y hangares, oficinas y archivos, talleres, escuelas, etc. siendo estas lámparas las que alcanzan mayores eficacias. Tienen la ventaja práctica de poderse combinar indistintamente con la luz natural y con la luz de las lámparas de incandescencia, gracias a su temperatura de color.

La lámpara Blanco Cálido es adecuada en aquellos lugares en que sea esencial una perfecta reproducción de colores. Se utilizan ampliamente en despachos, oficinas, pasillos, industrias de productos alimenticios, aulas, auditorios, jardines infantiles, bibliotecas, salas de lectura, panaderías, jugueterías, papelerías, hoteles, bares, teatros, museos, clínicas, viviendas, etc.

NONENCLATURA DE LAS LANPARAS FLUORESCENTES.-

La nomenclatura de las lámparas fluorescentes es de acuerdo a su potencia, longitud, forma, diámetro en octavos de pulgada y color. Las lámparas de precalentamiento y encendido rápido utilizan la potencia nominal de la lámpara en su nomenclatura, mientras que las lámparas HO, VHO, encendido instantáneo y Power Groove utilizan la longitud nominal en su nomenclatura. A continuación se muestran algunos ejemplos:

■ **F20T12/CW** ■ Indica una lámpara Fluorescente, arranque por precalentamiento, de 20 watts, tubular, con 12/8 de pulgada de diámetro, color blanco frío.

■ **F30CW** ■ Corresponde a una lámpara fluorescente, encendido rápido, 30 watts, color blanco frío.

■ **F96T12/CW/HO** ■ Es una lámpara fluorescente de 96 pulgadas de longitud, color blanco frío, con 12/8 de pulgada de diámetro, Encendido Rápido de Alta Emisión Lumínica.

CLASIFICACION.

En la Tabla II.B aparece una clasificación de las lámparas fluorescentes donde se pueden apreciar sus características más sobresalientes.

CARACTERISTICAS DE LAMPARAS FLUORESCENTES										
WATTS	TIPO	ACABADO	LUMENES INICIALES	VIDA EN HORAS	EFICIENCIA (LM/W)	FACTOR DE DEPRECIACION	BASE	BULBO	LONGITUD (cm)	ENCENDIDO
7	TUBOS GEN.	BCO. CALIDO	400	10000	57.14	0.70	ENCHUFABLE	GENELOS	13.5	RAPIDO
9	TUBOS GEN.	BCO. CALIDO	600	1000	66.67	0.70	ENCHUFABLE	GENELOS	16.7	RAPIDO
13	TUBOS GEN.	BCO. CALIDO	900	10000	69.23	0.70	ENCHUFABLE	GENELOS	17.7	RAPIDO
22	CIRCULAR	BLANCO FRIO	1050	12000	48	0.72	4 ALFILERES	T-9	20.96	RAPIDO
22	CIRCULAR	LUZ DE DIA	850	12000	39	0.72	4 ALFILERES	T-9	20.96	RAPIDO
32	CIRCULAR	BLANCO FRIO	1900	12000	59	0.82	4 ALFILERES	T-9	30.48	RAPIDO
32	CIRCULAR	LUZ DE DIA	1500	12000	47	0.82	4 ALFILERES	T-9	30.48	RAPIDO
40	CIRCULAR	BLANCO FRIO	2500	12000	65	0.77	4 ALFILERES	T-9	40.64	RAPIDO
20	NORMAL	BLANCO FRIO	1300	9000	65	0.85	RED. 2 ALF.	T-12	60.96	CON ARRANC.

CARACTERÍSTICAS DE LAMPARAS FLUORESCENTES

77

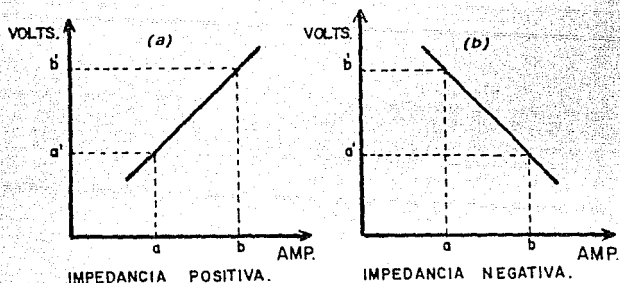
(Continuación)

WATTS	TIPO	ACABADO	LUMENES INICIALES	VIDA EN HORAS	EFICIENCIA (LM/W)	FACTOR DE DEPRECIACION	BASE	BALBO	LONGITUD (cm)	ENCENDIDO
20	NORMAL	LUZ DE DIA	1075	9000	54	0.85	MED. 2 ALF.	T-12	60.96	CON ARRANC.
21	NORMAL	LUZ DE DIA	1350	7500	49	0.81	1 ALFILER	T-12	60.96	INSTANTANEO
39	NORMAL	BLANCO FRIO	3000	9000	77	0.82	1 ALFILER	T-12	121.92	INSTANTANEO
39	NORMAL	LUZ DE DIA	2500	9000	64	0.82	1 ALFILER	T-12	121.92	INSTANTANEO
40	NORMAL	BLANCO FRIO	3150	12000	79	0.83	1 ALFILER	T-12	121.92	RAPIDO
40	NORMAL	LUZ DE DIA	2670	12000	65	0.83	MED. 2 ALF.	T-12	121.92	RAPIDO
40	TIPO "U"	BLANCO FRIO	2900	12000	73	0.84	MED. 2 ALF.	T-12	57.15	RAPIDO
75	NORMAL	BLANCO FRIO	6300	12000	84	0.87	1 ALFILER	T-12	243.84	INSTANTANEO
75	NORMAL	LUZ DE DIA	5450	12000	73	0.89	1 ALFILER	T-12	243.84	INSTANTANEO
80	H.O.	BLANCO FRIO	4300	12000	72	0.82	2 CONT. ENBUT.	T-12	121.92	RAPIDO
85	H.O.	BLANCO FRIO	6850	12000	78	0.72	2 CONT. ENBUT.	T-12	182.88	RAPIDO
110	H.O.	BLANCO FRIO	9200	12000	84	0.82	2 CONT. ENBUT.	T-12	243.84	RAPIDO
110	H.O.	LUZ DE DIA	7800	12000	71	0.82	2 CONT. ENBUT.	T-12	243.84	RAPIDO
110	V.H.O.	BLANCO FRIO	6250	10000	57	0.69	2 CONT. ENBUT.	T-12	121.92	RAPIDO
165	V.H.O.	BLANCO FRIO	9900	10000	60	0.72	2 CONT. ENBUT.	T-12	182.88	RAPIDO
215	V.H.O.	BLANCO FRIO	14520	10000	67	0.72	2 CONT. ENBUT.	T-12	243.84	RAPIDO
110	SP. GEORGE	BLANCO FRIO	7450	12000	68	0.69	2 CONT. ENBUT.	PG-17	121.92	RAPIDO
165	SP. GEORGE	BLANCO FRIO	11500	12000	70	0.67	2 CONT. ENBUT.	PG-17	182.88	RAPIDO
215	SP. GEORGE	BLANCO FRIO	16000	12000	74	0.69	2 CONT. ENBUT.	PG-17	243.84	RAPIDO
32	AMORRADORNA	BOC. LIGERO	2700	12000	85	0.75	1 ALFILER	T-12	121.92	INSTANTANEO
34	AMORRADORNA	BOC. LIGERO	2925	20000	86	0.75	MED. 2 ALF.	T-12	121.92	RAPIDO
60	AMORRADORNA	BOC. LIGERO	6000	12000	100	0.75	1 ALFILER	T-12	243.8	INSTANTANEO
95	AMORRADORNA	BOC. LIGERO	9100	12000	96	0.75	2 CONT. ENBUT.	T-12	243.8	RAPIDO
195	AMORRADORNA	BOC. LIGERO	14900	10000	77	0.75	2 CONT. ENBUT.	T-12	243.8	RAPIDO

BALASTROS

INTRODUCCION.

Antes de analizar el funcionamiento y los tipos de balastos para lámparas fluorescentes, sería conveniente contestar a esta pregunta. ¿Son en realidad necesarios? La respuesta es afirmativa sin duda. En la figura 11.27a se observa una gráfica de la característica de operación de una resistencia, que bien podría ser un foco incandescente. Uno de los ejes, el vertical, está graduado en amperes; el otro, el horizontal, está en volts. Puede observarse que la característica de esta curva indica que para que la corriente aumente del valor "a" al valor "b" es necesario aumentar la tensión del valor "a'" al "b'", es decir, debemos incrementar la tensión para que aumente la corriente.



Figs 11.27.- CARACTERISTICAS DE IMPEDANCIA.

Cuando este tipo de carga (resistencia o foco incandescente) se conecta a través de una fuente de alimentación resulta ser una carga autorregulada es decir, existe un punto de operación estable en el que circulará determinada corriente para una tensión aplicada.

Veamos ahora otro tipo de situación ilustrada en la figura 11.27b. Puede apreciarse que la recta es opuesta a la anterior; ahora, cuando la corriente aumenta la tensión disminuye. Del punto a al punto b la corriente ha aumentado mientras que la tensión ha disminuido del punto b' al punto a'. A este fenómeno se le conoce como "Característica de Impedancia Negativa". Como es de suponer, al de la figura anterior se la conoce como "Característica de Impedancia Positiva".

Si una carga con impedancia negativa se conectara a una fuente de tensión, la corriente tendería a adquirir inmediatamente un valor infinitamente grande que destruiría a la carga a menos que existiera en el circuito alguna protección que lo abra antes de que la enorme corriente destruya al dispositivo.

Las lámparas de descarga eléctrica en gases (por ejemplo las fluorescentes y las HID) tienen una característica real similar a la mostrada a la figura 11.27b y por lo tanto no pueden conectarse a la línea de alimentación como se hace con las lámparas incandescentes. Se requiere de un dispositivo que regule la corriente que circula a través de la lámpara y este dispositivo regulador de corriente se conoce como BALASTRO.

De acuerdo con la norma NOM-J-156-1977 se tiene la siguiente definición: "Un balastro es un dispositivo que, por medio de inductancias, capacitancias o resistencias, solas o en combinación limita la corriente de las lámparas fluorescentes al valor requerido para su operación correcta y también cuando es necesario suministra la tensión y corriente de arranque y para el caso de balastros para lámparas de arranque rápido, suministra la tensión para calentamiento de los cátodos". En la norma no se consideran los balastros que consisten de resistencia únicamente.

En muchos casos pueden formar parte del balastro: capacitores para la corrección del factor de potencia, resistencias para descarga de capacitores y capacitores para suspensión de radio-interferencia.

Estrictamente, un balastro no necesariamente es un dispositivo complicado. Pueden utilizarse como balastros resistencias, capacitores o inductores (reactores o bobinas de choque). El más sencillo de los balastros sería una resistencia que podría colocarse en serie con la lámpara, como se muestra en la figura 11.28. Como una lámpara incandescente es prácticamente una resistencia, una lámpara de descarga eléctrica en gases puede usar como balastro a una lámpara incandescente, como se aprecia en la figura 11.29.

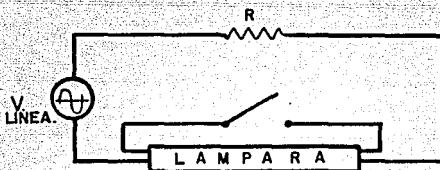


FIG 11.28.-LAMPARA BALASTRADA POR RESISTENCIA.

Sin embargo, no se utilizan resistencias a modo de balastros debido a que se tienen pérdidas de energía muy considerables que disminuyen la eficiencia total del sistema, haciendo que la lámpara de descarga en gases deje de ser una fuente luminosa eficiente y económica.

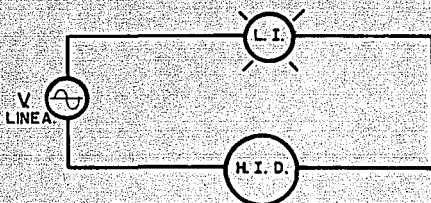


FIG. 11.29.- LAMPARA BALASTRADA POR LAMPARA INCANDESCENTE.

Las lámparas de "luz mixta" son autobalastadas y consisten básicamente de una combinación de un tubo en el que se produce un arco a través de gases y un filamento incandescente, ambos contenidos en un tubo de vidrio. Estas lámparas son poco eficientes, por lo que su uso es limitado.

Un capacitor también puede utilizarse como balastro para una lámpara de descarga eléctrica en gases, como se ilustra en la figura 11.30. El capacitor como balastro no se utiliza a frecuencias de operación tales como 50 ó 60 hertz porque produce una onda de corriente con un muy alto factor de cresta a través de la lámpara lo que tiende a destruirla rápidamente y es, además, ineficiente, aunque el capacitor en sí casi no produce pérdidas de energía. Sin embargo el capacitor resulta ser un buen balastro desde 400 hertz en adelante.

El tipo restante de balastro es una reactancia inductiva también conocida como inductancia, inductor o bobina de choque. La figura 11.31 muestra una bobina de choque como balastro. De los métodos mencionados hasta ahora, éste es sin duda el más satisfactorio para operar a una lámpara de descarga.

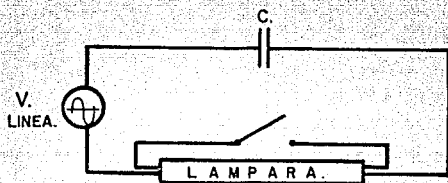


FIG 11.30.- LAMPARA BALASTRADA POR CAPACITANCIA.

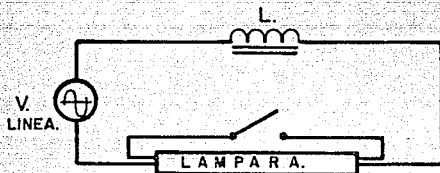


FIG 11.31.- LAMPARA BALASTRADA POR BOBINA DE CHOQUE.

La combinación en serie de un inductor y un capacitor produce características de operación sumamente valiosas. Cuando se utiliza este circuito (figura 11.32) es importante hacer notar que la reactancia capacitiva es siempre mayor que la reactancia inductiva, por lo que la impedancia neta que controla la corriente de la lámpara es de naturaleza capacitiva.

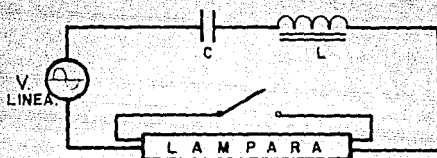


FIG 11.32.- LAMPARA BALASTRADA POR LA COMBINACION DE CAPACITOR Y BOBINA DE CHOQUE.

EL AUTOTRANSFORMADOR DE ALTA REACTANCIA DE DISPERSION.

Los circuitos mostrados anteriormente pueden funcionar en redes de alimentación cuyo voltaje es mayor que el voltaje mínimo de encendido de la lámpara; sin embargo, cuando este último es superior al de la línea, se necesitaría, además de la inductancia serie, un transformador o autotransformador que elevara la tensión hasta un valor suficiente para encender la lámpara, tal como se muestra en la figura 11.33.

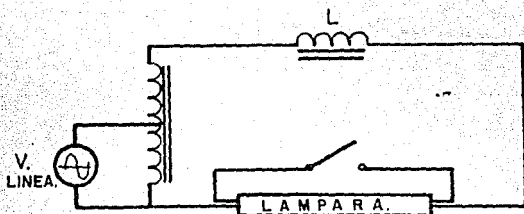


FIG 11.33.- BALASTRO FORMADO POR AUTOTRANSFORMADOR Y BOBINA DE CHOQUE ADICIONAL.

Esta combinación es completamente satisfactoria eléctricamente, pero excesivamente costosa. Probablemente el avance técnico de mayor significación en el campo de la fabricación de balastos para lámparas fluorescentes y en general para lámparas de descarga en gases, fue el desarrollo de los balastos "autotransformadores de alta reactancia de dispersión" que son los que se utilizan actualmente. Dicho de forma elemental, este balastro combina un autotransformador y una bobina de choque en un sólo núcleo, lo que disminuye el tamaño y el costo aumentando la eficiencia del circuito. Este balastro se muestra esquemáticamente en la figura 11.34.

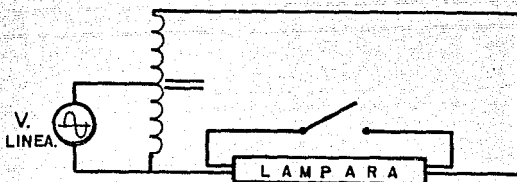


FIG 11.34.- DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL AUTOTRANSFORMADOR DE ALTA REACTANCIA DE DISPERSION.

En la figura 11.35 se muestra la estructura del núcleo de acero y de los devanados, así como las trayectorias de las líneas magnéticas. Nótese en la figura que el autotransformador de alta reactancia tiene dos devanados, uno primario y otro secundario, separados mediante entrehierros magnéticos.

En un transformador ordinario tendríamos a los devanados uno encima del otro, ya que en este caso resulta importante que todo el flujo magnético que produce el devanado primario pase a través del devanado secundario (alto factor de acoplamiento K). Al

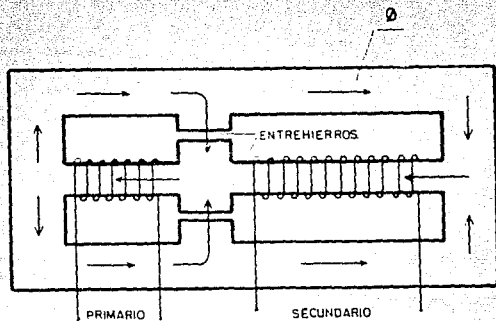


FIG II.35.- DEVANADOS, NUCLEO Y TRAYECTORIAS MAGNETICAS EN UN AUTOTRANSFORMADOR DE ALTA REACTANCIA DE DISPERSION.

embobinar ambos devanados uno encima del otro esto se logra fácilmente. Sin embargo en un transformador de alta reactancia, al tener separados mediante entrehierros los devanados primario y secundario, intencionalmente obligamos a que parte del flujo magnético creado por el devanado primario pase a través de los entrehierros y no pase a través del devanado secundario.

Esta alta dispersión del flujo magnético creada intencionalmente, manifiesta su efecto en forma de una reactancia inductiva parásita en serie con el circuito secundario y es precisamente esta reactancia inductiva la que controla la corriente eléctrica a través de la lámpara.

TIPOS DE BALASTROS.

En resumen, para poder iniciar la descarga eléctrica en un tubo fluorescente, se necesitan dos condiciones:

- 1) Que exista entre sus extremos un voltaje igual o mayor que el mínimo necesario especificado por el fabricante de las lámparas.
- 2) Que sus cátodos tengan al momento del arranque electrones libres disponibles.

Estas condiciones se pueden lograr de tres formas diferentes y da lugar a la división de las lámparas y de los balastos en tres tipos de encendido:

- a) Encendido por Pre calentamiento
- b) Encendido Rápido
- c) Encendido Instantáneo

a) ENCENDIDO POR PRECALENTAMIENTO.

El diseño de este tipo de lámparas requiere que sus electrodos sean calentados antes del arranque. En serie con los filamentos de la lámpara debe colocarse un dispositivo (cebador) manual o automático. Al energizar el circuito la corriente pasa a través del balastro, de los electrodos y del arrancador. Al calentarse los electrodos, emiten electrones que ionizan el gas que rodea a los electrodos hasta que enciende.

Durante su ciclo de arranque, el balastro limita el flujo de corriente a un valor adecuado para precalentar los electrodos, los cuales, tras unos segundos, alcanzan su temperatura apropiada y en este momento, el interruptor de arranque se abre ocasionando la desconexión de la trayectoria de corriente calefactora quedando el gas de la lámpara como único medio conductor, el cual, ayudado por la potencia que le suministra el balastro, logra el arco a través del tubo (Fig 11.36).

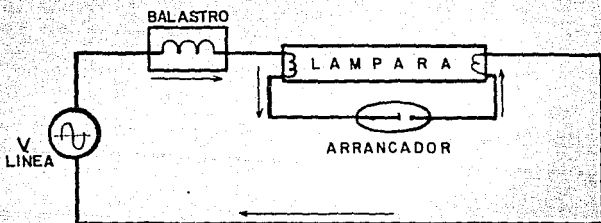


FIG 11.36.- ENCENDIDO POR PRECALENTAMIENTO.

b) ENCENDIDO RAPIDO.

Las lámparas de arranque rápido usan cátodos menores, de baja tensión, que son precalentados por el balastro con lo que se elimina la necesidad de un arrancador; dichos cátodos son precalentados por medio de devanados interconstruidos en el balastro que continúan proviendo corriente a la lámpara después de su encendido (Fig 11.37).

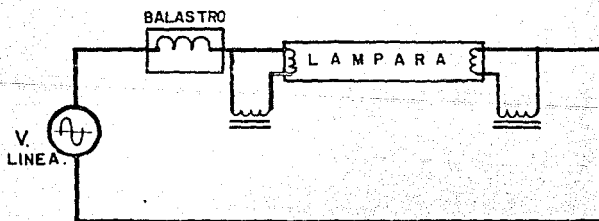


FIG 11.37.- ENCENDIDO RAPIDO.

El continuo calentamiento de los electrodos permite el arranque de estas lámparas a menor tensión que la requerida para encender las de arranque instantáneo. Las lámparas de arranque rápido alcanzan en dos segundos su máxima brillantez.

c) ENCENDIDO INSTANTANEO.

En el encendido instantáneo se tienen electrones disponibles en los cátodos por efecto de campo, sin recurrirse a un arrancador. El campo se logra aplicando un voltaje lo suficientemente alto en los extremos de la lámpara para que los electrones del material emisor de los cátodos sean literalmente arrancados y empiecen a viajar hacia el cátodo contrario iniciándose así la descarga eléctrica a través del gas.

En el circuito "secuencia serie", las lámparas arrancan siguiendo un orden prefijado. Este arreglo difiere de los demás en que cada una de las componentes realiza un trabajo diferente, ya que la sección de encendido provee de suficiente tensión y corriente para arrancar la primera lámpara, y una vez que esto se logra, arranca la segunda en serie, con la misma tensión y corriente; por este motivo no se requieren corrientes de lámpara completamente individuales (Fig 11.38).

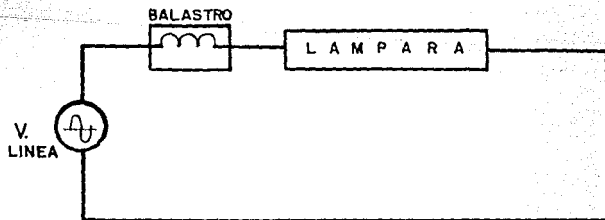


FIG 11.38.- ENCENDIDO INSTANTANEO.

Cada tipo de encendido presenta ventajas y desventajas sobre los otros, sin embargo todos tienen campo de aplicación y por lo tanto mercado.

Por el tipo de circuito que utilizan, los balastos tienen otra división, a saber, de acuerdo con sus circuitos:

a) INDUCTANCIA SERIE O BOBINA DE CHOQUE.- Es el circuito más simple (Fig 11.31). Se usa en líneas de alimentación cuyo voltaje exceda el voltaje mínimo de encendido de la lámpara. Para el caso de alto factor se agrega un capacitor en paralelo con la línea. Normalmente se usa en encendido precalentado exclusivamente, aunque se puede usar también en encendido instantáneo.

b) CIRCUITO AUTOTRANSFORMADOR DE ALTA REACTANCIA.- Se usa en los casos en donde el voltaje mínimo de encendido es mayor que el voltaje de la línea; usualmente son de bajo factor por lo que para alto factor se conecta un capacitor en serie con la inductancia (Fig 11.34). Se usa en encendido precalentado, encendido rápido e instantáneo bajo factor de potencia. En este tipo de circuito la regulación de corriente de la lámpara se logra mediante la reactancia de dispersión exclusivamente.

c) CIRCUITO AUTOTRANSFORMADOR AUTORREGULADO.- Es de alto factor de potencia y siempre tiene el capacitor en serie con la lámpara. Se usa en todos los balastos de encendido rápido alto factor y en los de encendido rápido alto factor para una sola lámpara. En este circuito (Fig 11.39) la combinación de la capacitancia en serie con la reactancia inductiva de dispersión proporciona una mejor regulación en la corriente del secundario que el circuito anterior.

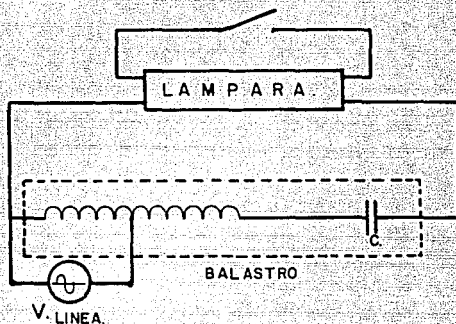


FIG 11.39.- AUTOTRANSFORMADOR AUTORREGULADO.

FUNCIONES QUE CUMPLEN LOS BALASTROS.

Las lámparas fluorescentes se fabrican en gran variedad de formas, tamaños y colores, como se describió ya en la primera parte. De acuerdo a su tipo requieren diversas tensiones y corrientes de encendido, dependiendo de la longitud, el diámetro, los gases con que son llenadas y su construcción. Por lo tanto se requieren dispositivos que suministren una cantidad controlada de energía eléctrica que satisfaga las corrientes de arranque, y posteriormente, las de operación normal. Durante el ciclo de arranque, el balastro:

- i) Provee una cantidad controlada de energía eléctrica para precalentar los electrodos de la lámpara.
- ii) Suministra una tensión y corriente suficientes para iniciar el arco entre los electrodos de la lámpara y en el circuito de operación.

- iii) Controla y limita la energía eléctrica a los valores adecuados para que la lámpara funcione con máxima eficiencia.

Además, los balastos deberán corregir el factor de potencia cuando ello resulte deseable para que la instalación del equipo de alumbrado fluorescente sea más económica, deben reducir la radio-interferencia que producen las lámparas y que se transmite a través de la línea de alimentación y funcionar bajo las máximas condiciones de seguridad.

COMPONENTES DE LOS BALASTROS.

Para cumplir con los estrictos requisitos de la norma, los balastos comerciales se componen de las siguientes partes:

1)DEVANADOS.-Para los devanados se utilizan alambres de cobre y/o aluminio que deben cumplir con sus normas correspondientes. Están protegidos con materiales aislantes (papeles, cintas, barnices, etc.). Para el proceso de devanado se usan máquinas de precisión que aseguran uniformidad en el paquete. El conjunto se impregna al vacío (3 mm de mercurio) en un compuesto altamente resistente a la humedad, flexible para amortiguar el ruido que inevitablemente produce al transformador, además de ser un excelente transmisor de calor.

2)NUCLEO.- Está formado por laminación de acero al silicio troquelado con precisión. Posteriormente la laminación es sometida a tratamiento térmico para proporcionar las características magnéticas y reducir las pérdidas en el núcleo de acero. El proceso se lleva a cabo de acuerdo con el método de Epstein, de las normas ASTM en vigor.

3)SUJECION DE LA LAMINACION.-La laminación se sujeta con sellos metálicos flexibles que permiten tener un núcleo comprimido. Este sistema, aunado a la precisión de los troqueles para laminar, el control exacto de los entrehierros y el encapsulado con compuesto flexible permite que los balastros sean silenciosos.

4)CAPACITOR.-Los capacitores utilizados para corregir el factor de potencia deben satisfacer las condiciones necesarias de encendido por lo que deben estar construidos con materiales de la más alta calidad, de acuerdo con la norma CCONNIE o NOM correspondiente.

5)RESISTENCIAS.-Las resistencias funcionan como limitadoras de corriente o como medio de descarga de capacitores por lo que deben ser de calidad para asegurar un valor óhmico que cumpla con las tolerancias calculadas en el diseño del balastro.

6)PROTECTOR TERMICO.-Es un dispositivo que se acopla al circuito del balastro para evitar su funcionamiento a temperaturas excesivas que pueden ser producidas por diferentes causas. Este dispositivo es opcional por lo que en la placa de datos debe aclararse por medio de una "P" si el balastro cuenta con esta protección.

7)FILTRO PARA RADIO-INTERFERENCIA.-Esta formado por un capacitor que ayuda a suprimir la interferencia en los aparatos de radio y TV causada por la retroalimentación de la lámpara fluorescente a la línea de alimentación y por la radiación directa de la línea de suministro al circuito de la antena.

8)CONDUCTORES PARA CONEXION.-Son de alambre de cobre, estañado y forrado con cloruro de polivinilo clase 105°C. Estos conductores van soldados a las terminales de conexión para garantizar

contacto permanente y efectivo. En los orificios de salida de la caja metálica se colocan unos protectores para evitar que se dañe el aislante con el filo de la lámina. La longitud de estos alambres es tal que permite la instalación del balastro sin necesidad de añadir más conductores.

9) COMPUESTO PARA ENCAPSULADO.- Es un producto a base de asfalto sopiado y sílice cuyo objeto es asegurar las componentes del balastro dentro de la caja metálica, ayudar a la disipación del calor, amortiguar el ruido que inevitablemente produce el transformador y proteger al conjunto contra la humedad. Ya en el balastro se califica su habilidad para amortiguar el ruido y capacidad para transmitir el calor y proteger los componentes que encapsula.

10) RECIPIENTE METÁLICO.- Está fabricado de lámina de acero rolada en frío y sometido a limpieza, fosfatizado, sellado, pintado por inmersión y horneado posteriormente. Se utiliza pintura negra mate, resistente al calor y a la corrosión.

11) PLACA DE DATOS.- Por norma todos los balastros llevan impreso en la etiqueta el circuito de conexión que permite la fácil identificación con respecto a las características de la red de alimentación, así como las características más sobresalientes.

CARACTERÍSTICAS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS BALASTROS.

Las características de funcionamiento que se mencionan a continuación son las más importantes para el buen funcionamiento y selección de los balastros.

a) EFECTO DE LA TENSION DE LA LINEA.- Si la tensión de la línea es mayor o menor que aquella para la que el balastro ha sido diseñado, esta condición puede afectar la vida de la lámpara, la

vida del balastro y la cantidad de luz producida.

Generalmente los balastros no se ven afectados seriamente cuando la tensión en la instalación es menor que la mínima recomendada para su operación óptima. Sin embargo, se tendrá una vida más corta en las lámparas y menor producción de luz. Además el encendido de las lámparas se dificultará.

Tensiones superiores a las del diseño del balastro disminuirán su vida útil, aunque se aumente la cantidad de luz producida. Generalmente también se reducirá la vida de la lámpara. En las lámparas en que se precalientan los electrodos antes de producirse el arco (precalentamiento y arranque rápido), puede producirse un arranque instantáneo que perjudicará a los cátodos. Otro efecto que se produce al tenerse una tensión de alimentación superior a la nominal es una elevación de la temperatura de operación del balastro, lo cual disminuye su vida.

En general, los balastros para lámparas fluorescentes deben operarse dentro de un rango de $\pm 7\%$ de la tensión nominal. En las figuras 11.40 a la 11.42 se muestra la variación de los principales parámetros cuando se tiene una variación en la tensión de línea de $\pm 10\%$.

b) **FACTOR DE POTENCIA.**-Específicamente, los balastros de alto factor de potencia son aquellos que tienen una relación entre los watts entregados al conjunto balastro-lámpara y los volt-amperes suministrados por la línea de alimentación de más de 0.9 ó 90%. Cuando un balastro no indica que es de alto factor de potencia, se considera que opera normalmente debajo de aquél límite. Un factor de potencia menor que la unidad produce conocidos efectos indeseables.

COMPANIA DE LUZ Y FUERZA S.A.
SUGERENCIA ELECTRICA DE CONSTRUCCION
AREA DE PRUEBAS DE ILUMINACION.

RESULTADO DE PRUEBAS ELECTRICAS A GALASTROS
ENCENDIDO INSTANTANEO EX39W

PARAMETRO	MUEST 1	MUEST 2	MUEST 3	PROM	VALOR NORMA *NOM J-156*
V LIN (V)	127	127	127	127	127
I LIN (MA)	804	805	808	805.6	
IO (MA)	645	653	663	660.3	
WO (W)	9.5	9.6	10	9.7	
D.C.V.L1 (90% V LIN)	467	464	462	464.3	385 MIN
D.C.V.L2 (90% V LIN)	420	419	420	419.6	365 MIN
I LAMP 1 (MA)	430	426	420	425.3	
I LAMP 2 (MA)	447	437	439	441	
W LAMP 1 (W)	38.7	38.6	39.7	39	35.6 MIN
W LAMP 2 (W)	39.3	39.5	40.2	39.6	35.8 MIN
W LIN (W)	99.8	99.8	100	99.86	
PERDIDAS (W)	21.84	21.7	22.1	21.80	
PERDIDAS (%)	21.86	21.74	22.1	21.91	
F.P. (%)	97.7	97.61	99	98.1	90 MIN
I PRIM. ANORM. (MA)	1.36	1.36	1.37	1.36	
I TICK. ANORM. (MA)	190	190	191	190	
F.C. L1 (ADIM)	1.81	1.79	1.74	1.78	1.85 MAX
F.C. L2 (ADIM)	1.74	1.79	1.77	1.76	1.85 MAX
1A. COND. ARR. (MA)	97	96	98	97	90 MIN
2A. COND. ARR. (MA)	106	105	107	106	100 MIN

MARCA: ADVANCE NO. CAT: SM-EE-40-S POTENCIA: EX39W
V LIN: 127V LAMPS: PHILIPS 330W/33 TEMP: AMB: 2500
FECHA: 18 SEP-90 REALIZO: AGRR/GAV/AMC APROBO: J.JOR/J65
OBSERVACIONES: PRUEBAS EFECTUADAS A MUESTRAS PROPORCIONALES POR
PHILIPS (AT'N ING. JESUS GLORIA).

FIG 11.40.

COMPANIA DE LUZ Y FUERZA S.A.
 SUBGERENCIA ELECTRICA DE CONSTRUCCION
 AREA DE PRUEBAS DE ILUMINACION.

RESULTADO DE PRUEBAS DE TEMPERATURA A BALASTROS
 ENCENDIDO INSTANTANEO 2x39W

PARAMETRO	MUEST 1	MUEST 2	MUEST 3	PROM	VALGR NORMA
TEMP. MAX. CAJA NORMAL	80			80	90 MAX
TEMP. BOB. PRIM.	95			95	105 MAX
TEMP. BOB. SEC.	95.9			95.9	105 MAX
TEMP. TICKLER	91.4			91.4	105 MAX
TEMP. CAP.	38.9			38.9	70 MAX
TEMP. HORNO	40-42			40-42	40 +/-5
TEMP. MAX. CAJA ANORM.	110			110	
TEMP. BOB. PRIM. ANORM.	135			135	135 MAX
TEMP. BOB. SEC. ANORM.	124.4			124.4	135 MAX
TEMP. BOB. TICK. ANORM.	139.8			139.8	135 MAX
TEMP. CAP. ANORM.	75.9			75.9	80 MAX
TEMP. HORNO	40-42			40-42	40 +/-5

MARCA: ADVANCE NO. CAT.: SM-2E40-S
 V LIN: 127V LAMPS: PHILIPS S39W/33 TEMP. AMB: 25°C
 FECHA: 18-SEP-90 REALIZO: AGRR/GAV/AM5 APROBO: JJDR/JGS
 OBSERVACIONES: PRUEBAS EFECTUADAS A MUESTRAS PROPORCIONADAS POR
 PHILIPS (AT'N ING. JESUS GLORIA).

FIG 11.41.

COMPANIA DE LUZ Y FUERZA S.A.
SUBGERENCIA ELECTRICA DE CONSTRUCCION
AREA DE PRUEBAS DE ILUMINACION.

RESULTADO DE PRUEBAS ELECTRICAS A BALASTOS
EN ENDEDIDO INSTANTANEO 2x75W

PARAMETRO	MUEST 1	MUEST 2	MUEST 3	PROM	VALOR NORMA NOM J-156
V LIN (V)	127	127	127	127	127
I LIN (A)	1.33	1.33	1.36	1.33	
I O (mA)	762	760	741	754.3	
W O (W)	14	14	13.5	13.83	
O.C.V. L1 (90% V LIN)	711	712	713	712	565 MIN
O.C.V. L2 (90% V LIN)	680	670	675	675	565 MIN
I LAMP 1 (mA)	409	409	407	408.3	
I LAMP 2 (mA)	406	399	398	399	
W LAMP 1 (W)	66.7	66.9	69	67.53	68.0 MIN
W LAMP 2 (W)	67.5	66.1	69.6	68.4	68.4 MIN
W LIN (W)	162.9	163.9	167.3	164.7	
PERDIDAS (W)	28.7	26.9	28.7	28.7	
PERDIDAS (%)	17.6	17.6	17.15	17.46	
F.P. (%)	96.4	97.03	96.8	96.74	90 MIN
I PRIM. ANORM. (A)	1.9	1.9	1.92	1.91	
I TICK. ANORM. (mA)	200	200	201	200.3	
F.C. L1 (ADIM)	1.78	1.76	1.67	1.74	1.85 MAX
F.C. L2 (ADIM)	1.7	1.7	1.71	1.7	1.85 MAX
1A. COND. ARR. (mA)	96	97	98	97	90 MIN
2A. COND. ARR. (mA)	110	111	111	111	100 MIN

MARCA: ADVANCE NO. CAT: SM-2E75-S-4 POTENCIAL: 2x75W
V LIN: 127V LAMP: PHILIPS 275W/33 TEMP. AMBI: 23.0C
FECHA: 18-SEP-90 REALIZO: ADRR/GAV/AMG/VGM APROBO: JJGR/JGS
OBSERVACIONES: PRUEBAS EFECTUADAS A MUESTRAS PROPORCIONADAS POR
PHILIPS (AT'N ING. JESUS GLORIA).

FIG 11.42.

Los balastos requieren una cantidad específica de potencia. Esta cantidad puede suministrarse a un nivel menor de corriente de línea si se utiliza equipo de alto factor de potencia. Por el contrario, el equipo de factor de potencia normalmente bajo requiere mayor cantidad de corriente eléctrica, lo que causa la sobrecarga de los circuitos de alimentación. Los balastos A.F.P. proporcionan las siguientes ventajas:

- 1) Evitan posibles recargos en los recibos por concepto de energía eléctrica.
- 2) Los costos de alambrado son menores ya que los balastos B.F.P. requieren alrededor del doble de corriente de línea que los balastos A.F.P. y, por tanto, exigen conductores de mayor calibre para conducir la energía eléctrica.
- 3) Al utilizar balastos A.F.P. se pueden instalar más luminarios por circuito simplificándose el equipo de protección.

c) PROTECCION TERMICA Y VENTILACION.—Los balastos protegidos térmicamente contra sobrecalentamientos por medio de un protector sensible a la temperatura de los devanados y a la magnitud de la corriente eléctrica, deben prevenir que la temperatura de su caja metálica exceda 105°C. El protector térmico es un dispositivo bimetalico que abre y cierra el circuito de operación del balastro. Se coloca cerca de las bobinas y en serie con el balastro para que maneje la misma corriente de línea que él. Es sensible a la corriente y a la temperatura. Reacciona a cada una por separado o a ambas a la vez. Si se presenta una falla que incremente el valor de la corriente o el montaje del balastro hace que éste eleve indebidamente su temperatura, el protector térmico actuará desconectando al balastro del circuito.

Cuando la temperatura del encapsulado llega a los 105°C

(aproximadamente 120°C de Hot Spot) el protector térmico se abre; cuando la temperatura desciende a 83°C se cierra. El ciclo se repite indefinidamente hasta que el problema causante de la sobrelevación de temperatura se corrija.

De acuerdo con las normas CCUNNIE, NOM, ANSI y UL los balastros para lámparas fluorescentes con aislamiento clase 105°C no deberán exceder el límite anterior en los devanados y una temperatura máxima en la caja del balastro de 90°C cuando operen normalmente en un medio ambiente de 40°C.

La experiencia ha demostrado que por cada 10°C de aumento sobre el límite de temperatura para los cuales están diseñados los aislamientos Clase 105°C, la vida de los mismos se reduce a la mitad. El calor generado en el balastro se transmite al envase metálico fundamentalmente a través del compuesto asfáltico. De la caja metálica se disipa por radiación a través del aire y por conducción al soporte en que se haya montado el balastro. Es por esto que los balastros deben instalarse en lugares bien ventilados.

d) BALASTROS ENCAPSULADOS EN RESINAS POLIESTERES.--Estos balastros han sido fabricados en México desde hace más de 20 años. Están encapsulados dentro de su caja metálica con un compuesto de poliésteres. Se añade además sílice para facilitar la transmisión del calor desde los devanados hasta la caja metálica.

Estos balastros, sin embargo, no muestran ninguna ventaja con relación a los balastros encapsulados en compuesto asfáltico y son, además, más susceptibles de verse afectados por la humedad; son más ruidosos debido a su rigidez, su sistema de aislamiento es para la misma temperatura que el de los devanados

encapsulados en compuesto asfáltico y, por lo tanto, no pueden trabajar a temperaturas más altas que éstos. A pesar de lo anterior, se siguen produciendo bajo pedido especial.

e) RUIDO.- Se puede clasificar el ruido de los balastros en dos grupos:

- i) El que se presenta con una frecuencia entre 100 y 500 Hz
- ii) El que se manifiesta a 1000 Hz o más.

El primero es causado por la vibración del núcleo de acero y la caja del balastro bajo la influencia de las fuerzas ejercidas sobre ellos por el campo magnético. El segundo es producido por las armónicas elevadas de la corriente de la lámpara.

Hay tres formas posibles en que este ruido puede ser amplificado en la instalación del equipo de alumbrado:

1.- Método inadecuado de montaje del balastro en el luminario. Se recomienda que todos los agujeros de la base del balastro se utilicen para fijar firmemente el balastro al luminario.

2.- Luminario mal Diseñado. Si el luminario no está bien diseñado, puede tener partes sueltas o su construcción y montaje no son rígidos, lo que provocará una amplificación del ruido.

3.- Características resonantes del techo, piso, paredes y muebles.

El nivel de ruido ambiente en el interior también es muy importante y debe ser cuidadosamente considerado. Resulta obvio que el ruido producido por el balastro es más importante en una

radiodifusora que en una tienda. La elección del balastro para lámparas fluorescentes debe hacerse en base al nivel sonoro del lugar en que ha de instalarse. Los balastros están clasificados según grupos dependientes del nivel de intensidad sonora ambiente. A continuación se muestra esa clasificación:

CLASIFICACION POR SONIDO Y APLICACIONES.

**EJEMPLOS DE APLICACION PROMEDIO DE RUIDO CLASIFICACION
EN DECIBELIOS EN EL MEDIO POR SONIDO
AMBIENTE**

RESIDENCIAS (1)		
BIBLIOTECAS (1)	20 A 24	A
ESTACIONES RADIO Y TV		
IGLESIAS		
BIBLIOTECAS (2)		
RESIDENCIAS (2)	25 A 30	B
ESCUELAS		
SALAS DE LECTURA		
EDIFICIOS		
OFICINAS (1)	31 A 36	C
ALHACENES (1)		
TIENDAS (1)		
OFICINAS (2)	37 A 42	D
SALONES DE CLASE		
TIENDAS (2)		
ALHACENES (2)	43 A 49	E

INDUSTRIA LIGERA
ALUMBRADO EXTERIOR

INDUSTRIA PESADA
ALUMBRADO PUBLICO
PARQUES DE DIVERSIONES

49 EN ADELANTE

F

f) RADIO-INTERFERENCIA.-La interferencia es causada por la acción del arco en los electrodos de la lámpara, que genera una serie de ondas de radiofrecuencia. Esta energía puede interferir en la recepción del aparato de radio o cualquier aparato electrónico por las siguientes causas:

- a) Radiación directa de la lámpara fluorescente hasta el circuito de la antena o circuito interior del aparato.
- b) Por retroalimentación a través del circuito de energía desde la lámpara hasta el aparato receptor.
- c) Por radiación directa desde la línea de energía hasta el circuito de la antena o circuito interior del aparato.

Para corregir la primera causa, se recomienda que el radio-receptor y el circuito de la antena o aparato electrónico se separen por lo menos 4 metros de la lámpara fluorescente y que el radio-receptor o aparato electrónico tenga una conexión efectiva a tierra.

La segunda y tercera causas se corrigen con ayuda de un capacitor, que generalmente se incluye para ese propósito excepto en los circuitos de precalentamiento. En casos especialmente críticos se recomienda un filtro adicional por separado. Es recomendable también que el circuito de alimentación del radio o

aparato electrónico sea independiente del de la lámpara fluorescente.

g) **BALASTROS PARA ALTAS FRECUENCIAS.**-En México se fabrican balastros para alimentación de 250 Volts c.a. y 250 Hertz que se utilizan en el Sistema de Transporte Colectivo del Departamento del Distrito Federal. Estos balastros usan aceros de grados especiales, aislamientos, alambres de cobre y compuestos de encapsulado que dan como resultado una operación más fría, una vida más larga y más emisión de luz en las lámparas.

Estos balastros, trabajando a temperatura ambiente alta (55°C) llegan a una temperatura ambiente máxima en la caja de 90°C. La frecuencia de 250 hertz facilita además que el tamaño sea más reducido y por lo tanto más económico que los balastros convencionales.

h) **BALASTROS AHORRADORES.**-Como respuesta a la necesidad cada vez más marcada de hacer un uso racional de la energía se encuentran en el mercado nacional balastros ahorradores de energía, presentando ventajas importantes en comparación con los balastros convencionales. Entre esas ventajas podemos señalar las siguientes:

a) **Menores Pérdidas.**- Los watts de entrada a potencia nominal de lámpara se reducen sustancialmente en comparación con los balastros normales para la misma aplicación. Como referencia, podemos considerar los siguientes valores de ahorro:

- * 10 watts menos promedio en encendido rápido
- * 9 watts menos para 39 o 40 watts nominales de la lámpara de encendido instantáneo y 19 watts menos para 75 watts

nominales de lámpara.

- 7 watts menos en promedio para todos los circuitos de precalentamiento.

b) Menor Temperatura de Operación.- Por sus excelentes características térmicas -35% menor temperatura de operación que el balastro convencional- el balastro se mantiene prácticamente frío en una atmósfera normal de operación. Debido a esto se puede afirmar que la vida del balastro se prolonga, ya que es sabido que por cada 10°C de disminución en la temperatura de operación promedio la vida de los aislamientos se duplica. En instalaciones donde se utilizan equipos de aire acondicionado, la carga térmica a considerar por efecto de temperatura del balastro es considerablemente menor a la de un conjunto de balastros convencionales, con lo que se obtiene un ahorro extra en los costos de operación. Estos balastros también pueden ser de la clase "P", como los balastros convencionales.

Dentro de sus limitaciones más importantes podemos citar las siguientes:

- Se requiere usar siempre el balastro ahorrador con lámpara también del tipo ahorradora. En pruebas de laboratorio se ha comprobado que la vida del equipo se reduce cuando los componentes del sistema no son 100% compatibles. En ocasiones la reducción de la vida puede ser muy drástica.
- La temperatura ambiente mínima para garantizar el encendido de las lámparas ahorradoras que se empleen con el balastro ahorrador es de 15°C para una operación segura. Asimismo, las lámparas no deben estar expuestas a corrientes

bruscas de aire que incidan directamente sobre ellas. Pueden ocurrir problemas de encendido o de parpadeo si se presenta cualquiera de los casos anteriores.

Los productos ahorradores de energía con que se cuenta actualmente son muy variados. Las alternativas que se pueden presentar son por lo tanto muy numerosas. En la figura 11.43 se pueden apreciar los ahorros de energía con cada combinación, así como la disminución de emisión luminosa para cada alternativa.

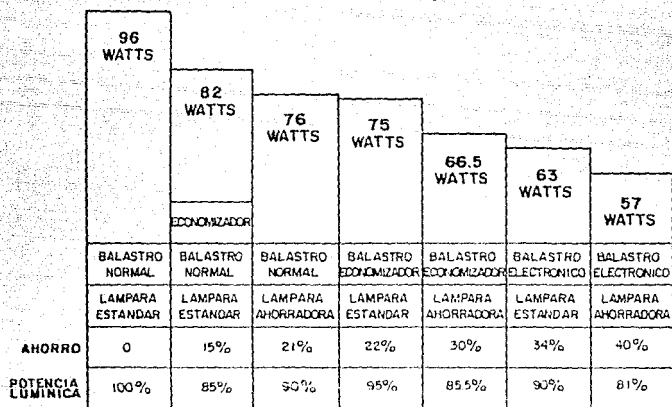


FIG 11.43.- AHORRO DE ENERGIA EN SISTEMAS DE DOS LAMPARAS FLUORESCENTES DE ENCENDIDO RAPIDO 40-34 WATTS.

Cabe señalar que de acuerdo con pruebas normalizadas y bajo condiciones controladas de laboratorio en LyF se ha llegado a la conclusión de que los productos ahorradores de energía con que

se cuenta en México no son del todo satisfactorios. Habrá que esperar el tiempo necesario para que los prototipos se perfeccionen y se elabore una Norma Nacional que establezca los requisitos mínimos de calidad que deberán cubrir los balastros nacionales.

En junio 28 de 1988, el entonces Presidente de E.E.U.U. Ronald Reagan firmó un importante documento, "El Instructivo Nacional de Modificaciones sobre Conservación de Energía" en el que se implantó un nuevo concepto, el BEF o "Factor de Eficacia de Balastro" para tres tipos de lámparas: 40 watts arranque rápido, 75 watts arranque instantáneo y 112 watts arranque rápido de alta emisión lumínica.

CBM y NEHA trabajaron conjuntamente con representantes de los más distinguidos grupos de especialistas en el país en el renglón de conservación de energía y preservación del medio ambiente para definir los términos de la modificación. Esta acción se produjo como respuesta a la proliferación de leyes estatales que establecían criterios diferentes en cuanto a la eficacia de balastros y luminarios, y también por la opinión general de que sólo a través de una legislación federal podría dar frutos la nueva tecnología tendiente a lograr ahorros importantes de energía en el renglón balastros.

Esta nueva disposición legalizó dos restricciones inmediatas: la primera señaló que sólo serían oficialmente aceptados diseños de balastros altamente eficientes para los tres tipos de lámparas fluorescentes más populares en aplicaciones comerciales e industriales. La segunda restricción fijó el 19 de enero de 1990 como la fecha límite para que los fabricantes pudieran producir balastros para el mercado americano con

eficiencias menores a las señaladas por el BIF. Y aún más, a partir del 1º de abril de 1990 ningún fabricante podrá ofrecer en el mercado americano ningún balastro de diseño no ahorrador aún cuando hubiera sido fabricado antes del 1º de enero del mismo año.

Esto significa que los fabricantes deberán vender todo su stock de balastros antes del 1º de abril o tendrán que venderlos fuera de los Estados Unidos. Y en caso de venderlos al exterior deberán ser marcados como de Exportación. Esta restricción es aplicable además a todos los fabricantes, sean americanos o extranjeros que vendan sus productos en los Estados Unidos.

El Factor de Eficacia de Balastro es la emisión lumínica relativa dividida entre la potencia eléctrica de entrada de un balastro fluorescente. La emisión lumínica relativa, expresada en porcentaje, es la relación entre la emisión producida por la(s) lámpara(s) operadas por el balastro bajo prueba dividida entre la emisión de las mismas lámparas pero operadas por un balastro patrón funcionando bajo condiciones específicas de acuerdo con la norma ANSI C82.2. El certificado de CBH garantiza que el balastro en cuestión tiene una emisión luminosa relativa mínima del 92.5% para las lámparas Slimline de 40 watts y 95% mínimo para las lámparas HO. Sin embargo, es posible que los balastros cumplan las condiciones del BEF sin cumplir con las del certificado de CBH.

Las leyes americanas establecen que los balastros para lámparas fluorescentes diseñados para operar con voltaje nominal de 120 o 277 volts, 60 hz y para conectarse a lámparas F40T12 (arranque rápido), F96T12 Slimline (arranque instantáneo) y F96T12HO (alta emisión) deberán tener un factor de potencia igual o mayor a 0.9 y su BEF no será menor de:

LAMPARA OPERADA	TENSION NOMINAL (ENTRADA)	WATTS TOTALES DE LAMPARA (NOMINALES)	FACTOR DE EFICACIA DE BALASTRO.
1 F40T12	120	40	1.805
	277	40	1.805
2 F40T12	120	80	1.060
	277	80	1.050
2 F96T12	120	150	0.570
	277	150	0.570
2 F96T12HO	120	220	0.390
	277	220	0.390

Los valores que aparecen en la tabla son producto de un consenso a nivel nacional y establecidos a través de la estadística y experiencia de muchos años en E.E.U.U.; esta experiencia puede ser tomada como apoyo y referencia para las normas mexicanas cuya revisión y actualización tienen una urgencia evidente, para evitar que el mercado nacional se vea invadido por productos americanos ineficientes.

En las figuras 11.44 y 11.45 se pueden encontrar las características generales que deben cumplir los balastos para conectarse a tensiones de línea de 127 y 220 volts para lámparas de arranque rápido e instantáneo de acuerdo con las normas de la Subgerencia Eléctrica de Construcción de CLYFC.

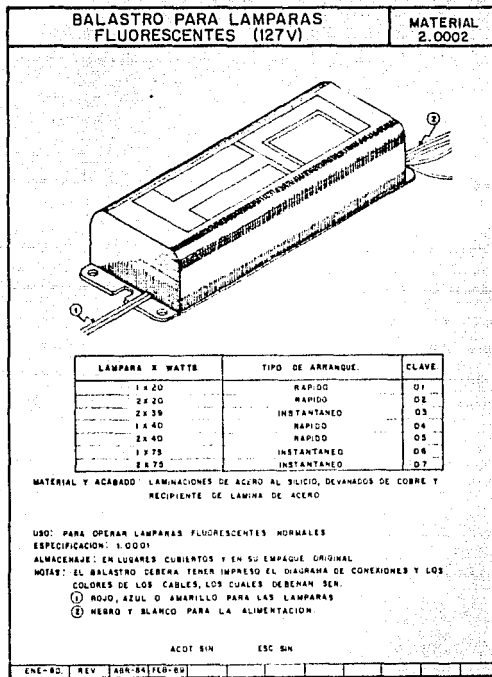


FIGURA 11.44

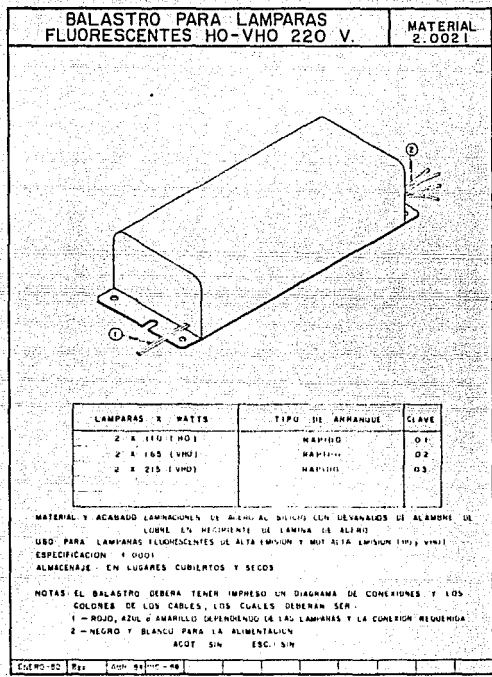


FIGURA 11.45

La norma NOM-J-156-1977 es la norma oficial que en México determina los requisitos que deben cumplir los balastos. De acuerdo con ella, las características a cubrir son:

- a) Placa de Datos
- b) Factor de Potencia
- c) Tensión de Circuito Abierto
- d) Marcas Suplementarias
- e) Código de Colores para las puntas de alimentación
- f) Condiciones de Arranque
- g) Conexión a tierra de los circuitos y luminarios
- h) Corriente de Arranque
- i) Potencia y corriente de salida
- j) Corriente de precalentamiento de Cátodo
- k) Regulación
- l) Forma de Onda de la corriente de operación.
- m) Supresión de Radio Interferencia
- n) Ruido
- o) Características Térmicas
- p) Pruebas Dieléctricas.

La norma que establece los métodos de prueba para comprobar las características anteriores es la NOM-J-198-1977 y en ella se establecen los siguientes puntos:

- a) Tensión, frecuencia y forma de onda de la tensión de línea.
- b) Regularización de Tensión
- c) Impedancia de la Fuente
- d) Temperatura ambiente
- e) Corrientes de aire

- f) Posición, selección y estabilización de la lámpara**
- g) Características del REACTOR PATRON.**
- h) Precisión, impedancia y compensación de los instrumentos de medición.**
- i) Alambrado de Circuitos**
- j) Procedimientos**
- k) Cálculo de elevación de temperatura**
- l) Determinación de la resistencia de aislamiento**
- m) Determinación del valor de los capacitores y resistencias**
- n) Determinación de la resistencia de aterrizamiento**
- o) Apéndice sobre instrumentos de medición.**

LUMINARIOS

LUMINARIOS.

Un luminario es un aparato de iluminación que está compuesto de un gabinete o armadura para que en su interior aloje un reflector lámparas y accesorios necesarios para fijar, proteger y conectar las lámparas al circuito de alimentación, así como un difusor, para que en conjunto pueda proporcionar la mejor distribución y filtración de una fuente de luz artificial.

CARACTERÍSTICAS DE LOS LUMINARIOS.

Un luminario debe poseer una serie de cualidades que lo haga idóneo para la misión que tiene que cumplir; podemos dividir estas cualidades en cuatro clases:

- a) Mecánicas
- b) Eléctricas
- c) Fotométricas
- d) Estéticas

a) MECANICAS.

Dentro de las características mecánicas más sobresalientes podemos distinguir las siguientes:

- 1.- Espesor de la Lámina o Metal que forma la Armadura
- 2.- Facilidad de Montaje y Desmontaje
- 3.- Pintura (Adherencia, Dureza y Espesor)
- 4.- Empaques (Volatilidad, Dureza y Envejecimiento)
- 5.- Vidrios (Choque Térmico, Resistencia al Impacto, Tamaño de la Partícula)
- 6.- Hermeticidad (Lluvia, Polvo y Gases).

- 7.- Temperatura (Balastro, Capacitor, Cables y Lámpara)
- 8.- Cadminizado de HERRAJES
- 9.- Boquillas y Marcado Terminado
- 10.- Etiquetado
- 11.- Carcaza Integral
- 12.- Robustez del Conjunto
- 13.- Ejecución en un Material Adecuado a las Condiciones de Trabajo

b) ELECTRICAS.

Estas características se evalúan en el luminario considerando en su conjunto, es decir, incluyendo el módulo de potencia y la lámpara. Las más significativas son las siguientes:

- 1.- Tolerancia a la Variación de Tensión
- 2.- Pulso del ignitor (si procede)
- 3.- Corriente de Arranque
- 4.- Corriente de Línea
- 5.- Potencia (a 90%, 100% y 110% de la tensión nominal)
- 6.- Tensión de Lámpara
- 7.- Factor de Cresta de la Corriente
- 8.- Pérdidas
- 9.- Tensión a Circuito Abierto
- 10.- Rigidez Dieléctrica
- 11.- Factor de Potencia
- 12.- Corriente de Lámpara

c) FOTOMETRICAS.

Son características evaluadas con personal y equipo muy especializado en laboratorio, siendo las más importantes las que

se mencionan a continuación:

- 1.- Independencia entre el Conjunto Optico y el Módulo de Potencia
- 2.- Recubrimiento del Reflector
- 3.- Curva de Distribución Fotométrica
- 4.- Humos en Conjunto Optico
- 5.- Filtrado de Gases
- 6.- Eficiencia Lumínica
- 7.- Dispositivo de Enfoque

d) ESTÉTICAS.

Son las características más subjetivas y por lo tanto difíciles de evaluar, pero en general se puede decir que se resumen en lo siguiente:

- 1.- Color y Acabado de la Superficie Exterior
- 2.- Tamaño y Forma del Conjunto
- 3.- Nivel de Iluminación y Color de la Luz Emitida

Los luminarios apagados durante el día o encendidos durante la noche, no deben desentonar con el medio ambiente que los rodea.

COMPONENTES DE LOS LUMINARIOS.

Para conseguir que un luminario proporcione una distribución luminosa que satisfaga determinadas necesidades, se recurre a las diversas propiedades de la luz, como reflexión, difusión, refracción, etc. En general en un aparato de alumbrado se aprovechan simultáneamente varias de estas propiedades; por esta razón repasaremos brevemente los componentes de los luminarios

que hacen uso de estos fenómenos.

REFLECTORES.- Los reflectores son dispositivos provistos de una superficie brillante de forma adecuada para que refleje la luz que incide sobre ella. La comparación entre las curvas de distribución luminosa correspondiente a una lámpara desnuda y a la misma lámpara provista de un reflector permite darse cuenta de la gran utilidad de este último.

DIFUSORES.- Los difusores actúan relativamente poco sobre la distribución luminosa de la lámpara; su misión es, sobre todo, difundir la luz para reducir los efectos de deslumbramiento. El fenómeno de deslumbramiento aumenta con la superficie del manantial luminoso. El difusor sustituye al manantial luminoso primario, constituido por la lámpara que tiene generalmente poca superficie radiante y por lo tanto elevada luminancia, por un manantial luminoso secundario, constituido por el mismo difusor, de gran superficie radiante y por consiguiente de mucha menor luminancia que la lámpara. Por lo tanto, con el difusor se reducen considerablemente los efectos nocivos del deslumbramiento estando esta reducción en función de la magnitud de la superficie del difusor; entre más grande sea el difusor, mayor será la reducción de deslumbramiento (11.47).

Además, para que un difusor sea lo más eficiente posible, es necesario que su superficie sea uniforme en todos sus puntos.

PANTALLAS.- Las pantallas son una parte del luminario diseñadas para impedir que las lámparas sean directamente visibles en determinada gama de ángulos con el objeto de evitar el deslumbramiento; también sirven para dirigir el haz luminoso sólo hacia donde se quiera.

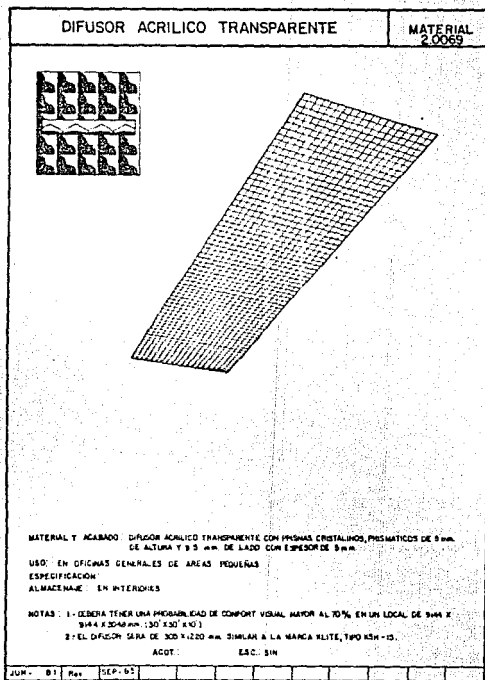


FIG 11.47.- DIFUSOR ACRILICO TRANSPARENTE.

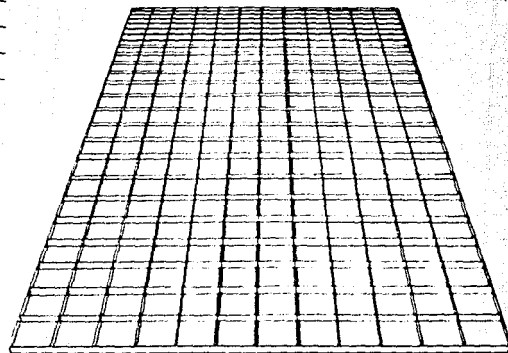


FIG 11.48.- PANTALLA ANTIDESLUMBRANTE.

Para evitar la luminancia en los aparatos de alumbrado, se requiere ocultar las lámparas a la visión directa del observador. Generalmente basta con un ángulo visual de 20°, aunque a veces este ángulo deberá acercarse a los 45° (como por ejemplo en la iluminación de aulas y salas de lectura); en la figura 11.48 se puede apreciar un tipo de pantalla extensamente utilizado en la Compañía de Luz.

El empleo de pantallas difusoras en los aparatos de alumbrado disminuye su rendimiento luminoso, por lo que hay que tomar esto en cuenta en los proyectos de alumbrado. Las eficiencias ordinarias de estos componentes fluctúan alrededor del 50%. Si se emplean pantallas difusoras es necesario, para obtener el mismo nivel luminoso, aumentar el número de los puntos de luz; este inconveniente queda sobradamente compensado por la mejor calidad de luz obtenida, de lo que resulta un aumento del confort visual.

REFRACTORES.- El refractor es un dispositivo en el cual se usa el fenómeno de refracción para cambiar la distribución del flujo luminoso de una fuente de luz y está constituido esencialmente por una pieza de vidrio o plástico acrílico.

En el control de los rayos de luz por medio de refractores se usan los fenómenos de reflexión y refracción, ya que por medio de éstos se puede cambiar la dirección del haz luminoso, con un mínimo de pérdida de luz. Estos dos efectos han sido incorporados en las pantallas de los luminarios con la impresión de prismas en la superficie de sustancias transparentes, como vidrio o acrílico.

El diseño científico de estos prismas permite obtener

distintas formas de distribución de la luz, adecuadas para diversas aplicaciones con resultados óptimos de eficiencia y reducción de deslumbramiento; de esta forma se obtiene una buena visión en forma económica con el mínimo consumo de energía.

CLASIFICACION.

Los luminarios se pueden clasificar por su uso de la siguiente manera:

1.- **LUMINARIOS COMERCIALES.**- Debido a que normalmente los luminarios del tipo comercial se instalan en interiores como: aulas, oficinas, tiendas, salas de exposición, etc., estos luminarios deben cumplir con las siguientes características:

- a) Buena Difusión
- b) Baja Brillantez
- c) Alta Eficiencia
- d) Ocultamiento de Lámparas
- e) Apariencia Distinguida y Moderna
- f) Facilidad de Montaje y Mantenimiento.

2.- **LUMINARIOS INDUSTRIALES.**- Este tipo de luminarios trabaja normalmente en naves industriales con alturas de montaje altas o medias, por lo que se requiere que sean capaces de alojar lámparas de mucha potencia con reflectores especiales.

Algunos luminarios del tipo industrial trabajan en lugares donde se tienen atmósferas explosivas, vapores o líquidos volátiles, por lo que su construcción debe ser hermética para protección de los elementos externos perjudiciales. En términos generales estos luminarios deben reunir las siguientes cualidades:

- a) Buena Difusión
- b) Curva de Distribución adecuada a la altura de montaje
- c) Alta Eficiencia
- d) Excelente Resistencia Mecánica
- e) Construcción con un material adecuado a su función y al lugar de operación
- f) Facilidad de Mantenimiento

3.- LUMINARIOS PARA EXTERIORES.- Existe un gran número de luminarios dentro de esta clasificación y algunos son: reflectores, tipo arbotante, tipo jardín, de luz de obstrucción, etc. Se utilizan para iluminar fachadas, campos deportivos, terrazas, estacionamientos, para señalización, para decoración, etc. Las lámparas utilizadas en estos luminarios pueden ser del tipo incandescente o de descarga eléctrica en gas, como las fluorescentes.

Este tipo de luminarios deben cumplir con las siguientes características:

- a) Iluminación Uniforme
- b) Alta Eficiencia
- c) Facilidad de Montaje y Mantenimiento.
- d) Diseño para Intemperie

4.- LUMINARIOS PARA DECORACION.- Estos luminarios deben ayudar a crear ambiente agradable al integrarse al conjunto arquitectónico del interior a iluminar; encendidos o apagados deben presentar buena apariencia.

Deben reunir las siguientes características:

- a) Iluminación Uniforme
- b) Apariencia agradable y moderna
- c) Construcción de acuerdo con el lugar de instalación
- d) Facilidad de Limpieza

5.- LUMINARIOS PARA ALUMBRADO PUBLICO.- Están diseñados para difundir el flujo luminoso de la lámpara en una dirección específica; se usan para iluminar avenidas, autopistas y en áreas para peatones como estacionamientos, jardines, parques de diversión y zonas residenciales. En México se utilizaron en pasos a desnivel y puentes peatonales con lámparas fluorescentes pero fueron reemplazados con ventajas por lámparas de alta intensidad de descarga, primero de Mercurio y posteriormente de Vapor de Sodio en Alta Presión.

CARACTERISTICAS GENERALES DE LOS LUMINARIOS FLUORESCENTES.

Frecuentemente los luminarios fluorescentes se vuelven inoperantes y la causa no siempre es atribuible al balastro o a la lámpara. Resulta importante examinar las partes componentes del luminario antes de remover el balastro o reemplazarlo.

Con fines prácticos es conveniente considerar a los sistemas fluorescentes de una manera integral como sistema, es decir, como un todo y no en función de sus componentes por separado. Todo el sistema fluorescente (luminario-balastro-lámpara) se prueba a una temperatura base de 25°C, que se supone reproduce las condiciones normales en la práctica. Sin embargo, en algunas construcciones en las que no se cuenta con aire acondicionado ni con una ventilación adecuada es frecuente encontrar temperaturas ambiente de 40° a 50°C en la zona en que se encuentra el equipo de iluminación.

Esta elevada temperatura ambiente afecta también al balastro, que es la parte más sensible a las altas temperaturas. Las pruebas a combinaciones balastro-luminario han demostrado que cada 10°C de aumento en la temperatura ambiente causa un incremento de 0.90°C en la temperatura de la caja del balastro. Las normas UL especifican la madera como el material que debe utilizarse para instalar luminarios del tipo sobreponer, excepto en los casos en que el material es de baja densidad. La mayoría de los techos utilizados actualmente son de placas de materiales acústicos, pero todos muestran diferente capacidad para absorber el calor.

Pruebas minuciosas han demostrado que puede existir una variación de 100°C entre el techo de madera de pino (prueba norma UL) y varios techos de materiales acústicos comúnmente utilizados. UL también ha creado una prueba destinada a luminarios para empotrar, que se realiza en un recinto de madera que reproduce las condiciones de operación dentro de la cavidad de la pared o el techo en los cuales el luminario opera. Normalmente esto no presenta ningún problema. Sin embargo, se han presentado numerosas ocasiones en que se coloca un material aislante como fibra de vidrio dentro de la cavidad alrededor del luminario, lo cual ocasiona problemas de temperatura.

Las pruebas realizadas indican que existe un aumento mínimo de 100°C entre el recinto de prueba de UL y la cavidad rellena con fibra de vidrio.

Hoy en día, los luminarios se diseñan de manera que permitan que las lámparas queden al descubierto (sin pantalla refractora) o totalmente encerradas. Los métodos para cubrir las lámparas son muy diversos para evaluarlos en detalle. Las pruebas en condiciones extremas indican que llegan a tenerse hasta 14.50°C de

diferencia en la temperatura del balastro entre un luminario con las lámparas al descubierto y otro con las lámparas totalmente encerradas.

En los plafones luminosos, la temperatura en la caja del balastro se mantiene entre estos dos extremos, dependiendo del diseño del plafón.

Otro factor muy importante es la forma en que se coloca el luminario con relación al techo. Muchos luminarios se diseñan para montarse en el techo o para suspenderse del mismo. La distancia a la que el luminario se suspende del techo afecta grandemente a la temperatura de operación del balastro. Las pruebas indican una variación hasta de 22.50C en la temperatura del balastro entre un luminario colocado en el techo y el mismo luminario suspendido a 15 cm del mismo.

Cuando el luminario se suspende a más de 15 cm del techo, ya no se tienen cambios apreciables en la temperatura de la caja del balastro. Sin embargo, si el luminario se suspende de 4 a 5 cm del techo, la temperatura en la caja del balastro será de 10 a 140C menor que en el caso del luminario colocado sobre el techo.

NORMAS APLICABLES.

En México la norma NOH-J-307-1977 establece los requisitos mínimos de seguridad que deben satisfacer los luminarios para uso interior. En todos los casos no contemplados en la norma se debe recurrir a las normas ANSI, UL y ASTM.

En las figuras 11.46 a la 55 se muestran los ocho tipos de luminarios más utilizados en Compañía de LUZ, cuyas características se encuentran detalladas en la especificación correspondiente para cada caso.

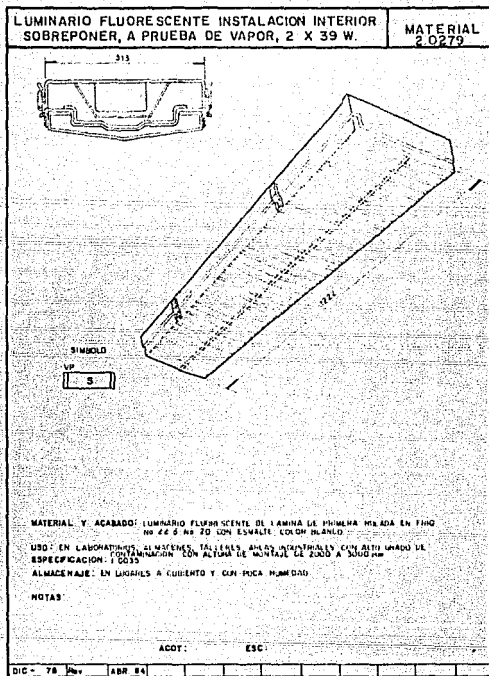
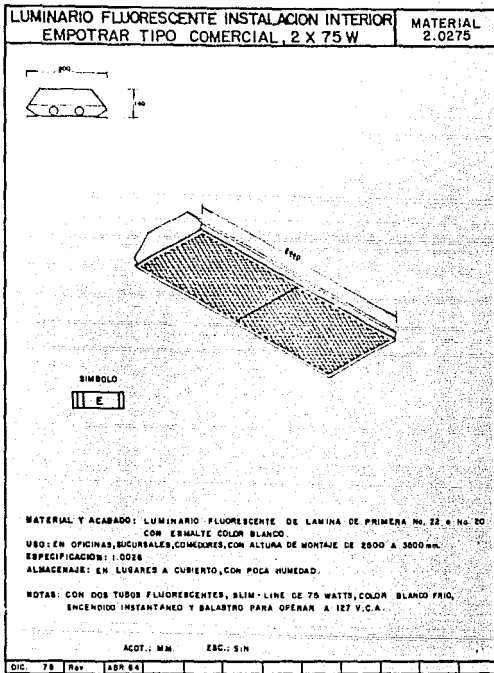


FIGURA 11.48

FIGURA 11.49

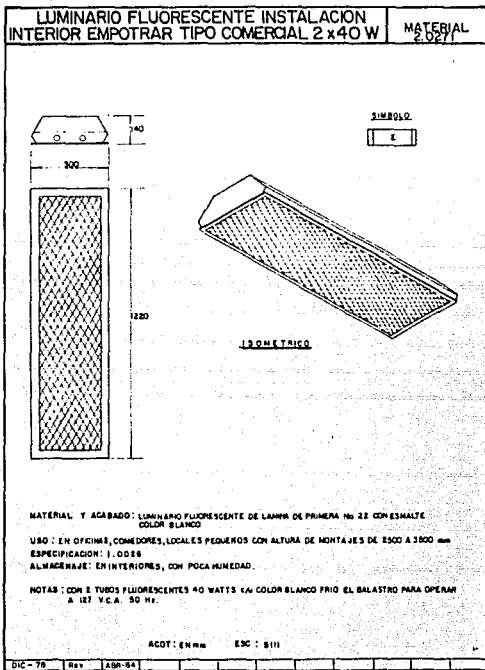


FIGURA 11.50

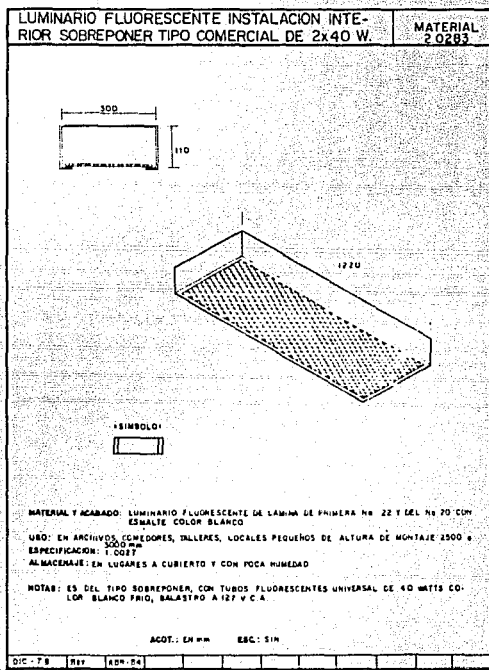
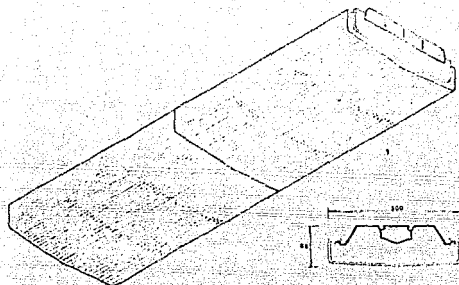


FIGURA 11.51

LUMINARIO FLUORESCENTE INSTALACION INTERIOR MATERIAL
 SOBREPONER TIPO EJECUTIVO 2 X 75 W 2.0294



SIMBOLO



MATERIAL Y ACABADO: LUMINARIO FLUORESCENTE DE LAMINA ROLADA EN FRIO No 22
 EN ESMALTE COLOR BLANCO

USO: EN OFICINAS, SUCURSALES, ALTURA DE MONTAJE: 2500 A 3500 mm.

ESPECIFICACION:

ALMACENAJE: INTERIORES.

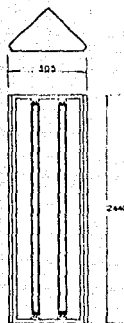
NOTAS: CON DOS TUBOS FLUORESCENTES, SLIM LINE, ENCENDIDO INSTANTANEO DE
 75 WATTS C/0, COLOR BLANCO FRIO, BALASTRO PARA OPERAR A 127 V.C.A. X 60 Hz

ACOT.: ESC.:

FIG. 1978 Rev. A331 04

FIGURA 11.52

LUMINARIO FLUORESCENTE INSTALACION INTERIOR MATERIAL
 TIPO ESQUINERO CON DOS LAMPARAS DE 75 W. 2.0303



ESQUEMATIC

SIMBOLO



MATERIAL Y ACABADO: LUMINARIO FLUORESCENTE DE LAMINA ROLADA EN FRIO No 22 EN
 ESMALTE COLOR BLANCO

USO: EN INSTALACIONES INDUSTRIALES, TALLERES, BARRAS Y ALMACENES, ALTURA DE MONTAJE
 2500 A 3500 mm.

ESPECIFICACION:

ALMACENAJE: INTERIORES.

NOTAS: SIMILAR A LA MARCA ELECTROLIGHTING MEXICANA SERIE 4000, CON UN TUBO FLUORESCENTE
 ENCENDIDO INSTANTANEO DE 75 WATTS, COLOR BLANCO FRIO, CON BALASTRO PARA
 OPERAR A 127 V.C.A., 60 Hz

ACOT.: EN MM ESC.: SIN.

FIG. 28 Rev. A331 04

FIGURA 11.53

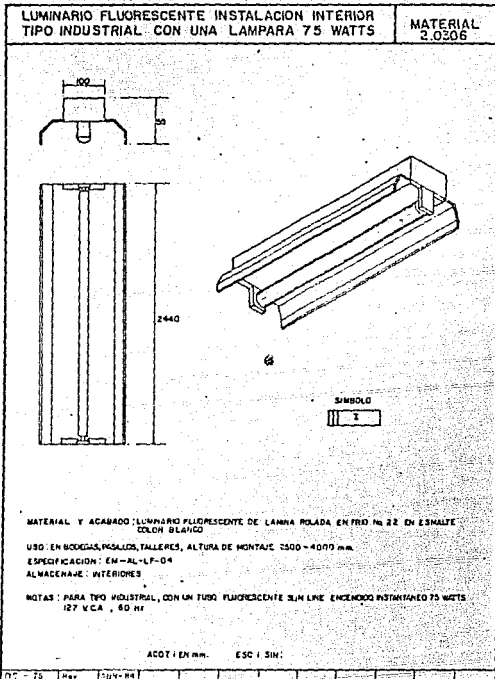


FIGURA 11.54

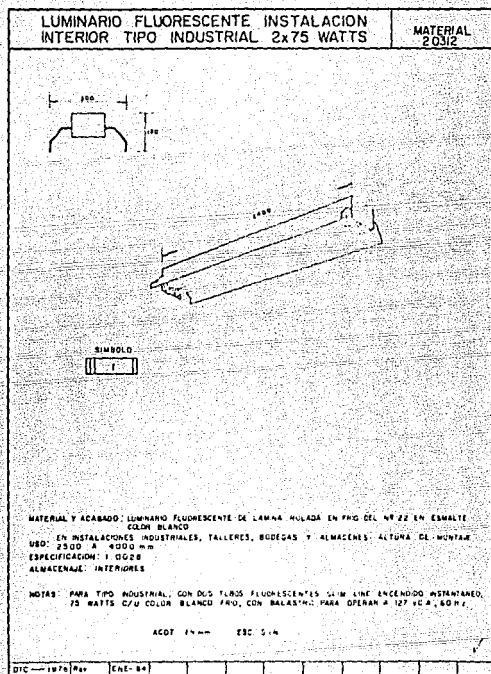


FIGURA 11.55

CAPITULO III

ANTECEDENTES TEORICOS

**FUNDAMENTOS
DE ELECTRO-
MAGNETISMO**

UNIDADES, CONCEPTOS Y LEYES EN ELECTROMAGNETISMO.

En 1820 Hans Christian Oersted descubrió que cuando un alambre conectado a las terminales de una batería se colocaba sobre una brújula, la aguja de ésta se deflexionaba. Este fue el primer indicio para relacionar al Magnetismo con la Electricidad.

En base al experimento de Oersted se enunció la muy útil "Regla de la Mano Derecha" o "Regla del Sacacorchos" que dice: "Si un conductor sólido que conduce corriente se sujeta con la mano derecha y el pulgar se alinea en la dirección de la corriente, los dedos restantes que rodean al conductor señalarán las líneas magnéticas de fuerza".

Por convención, las líneas de flujo magnético salen del extremo del Polo Norte (N) y entran por el extremo del Polo Sur (S). Esta dirección es arbitraria pero se adoptó cuando se hicieron los experimentos originales.

Michael Faraday fue el primero en hacer investigaciones y experimentos magnéticos y llamó con razón "líneas de fuerza magnética" a las líneas de flujo y demostró que los polos magnéticos se atraen cuando son opuestos y se rechazan cuando son iguales.

Al conjunto de líneas magnéticas de fuerza se le conoce como Campo Magnético y se denota por la letra griega \mathbf{H} . Para el Sistema Internacional de Unidades (SI) la unidad es el Weber (Wb) y equivale a 100 millones de líneas; para el CGS la unidad es el Maxwell (Max) y es igual a una sola línea; en el Sistema Inglés la unidad es la Línea (lin) o más usada la Kilolínea (Klin).

A partir de aquí encontramos las siguientes relaciones:

$$W_b = 10 \exp 8 \text{ max} = 10 \exp 5 \text{ KIlm}$$

En general, los campos magnéticos pueden ser producidos de tres formas:

- a) Por Imanes Naturales Permanentes
- b) Por Imanes Artificiales Temporales
- c) Por Electroimanes

a) **IMANES NATURALES.**- Hace más de 2000 años los griegos descubrieron el magnetismo cuando observaron que el hierro atraía a cierto tipo de piedras encontradas en la ciudad de Magnesia, en Asia Menor, de donde se le dió a esta piedra el nombre de Magnetita. La magnetita es un imán natural que atrae materiales como el hierro, el níquel y el cobalto que son naturalmente magnéticos.

Generalmente, los átomos al combinarse se disponen de una manera en que puedan tener en total ocho electrones de valencia de tal modo que sus campos magnéticos se anulan. Sin embargo, los átomos de algunos materiales se combinan de forma que se convierten en iones y comparten sus electrones de valencia de tal suerte que sus órbitas no se anulan, sino que se suman. Ordinariamente los imanes naturales son permanentes aunque sólo sean capaces de producir campos magnéticos débiles.

b) **IMANES ARTIFICIALES.**- En la actualidad existen complejos procesos de fabricación para obtener compuestos con excelentes propiedades magnéticas. Si se aplica energía para forzar a todas

Las moléculas a orientarse en una misma dirección se producirá un campo magnético intenso. Esta energía se aplica principalmente en dos formas: por frotamiento magnético o por medio de una corriente eléctrica.

En el primer caso se pasa un imán potente por la superficie de la pieza de material no magnetizado para que el campo del imán force a las moléculas a alinearse en una sola dirección. Estos imanes producen casi siempre campos constantes y de una magnitud relativamente pequeña y temporal. En el segundo caso la magnetización se logra por medio del paso de una corriente eléctrica muy alta no a través del material magnético, sino por una bobina de alambre cuya trayectoria magnética atraviesa el material del nuevo pequeño magneto. En este caso la magnetización puede ser temporal o permanente y de una magnitud considerable.

c) **ELECTROIMANES.**— Los electroimanes son imanes no permanentes y fabricados con materiales de muy buenas propiedades magnéticas. Constan de piezas polares llamadas Polos fabricadas a base de laminaciones de metal magnético, generalmente producidas a partir de material ferroso. Alrededor estas piezas van arrolladas bobinas llamadas bobinas de campo de tal manera que al circular por ellas una corriente eléctrica se forman polos de polaridad opuesta (Polos N y S).

Las líneas magnéticas tienen propiedades importantes que deben conocerse por su gran utilidad en la solución de circuitos magnéticos:

- a) Siempre tienden a acortarse actuando como bandas de hule en tensión.
- b) Nunca se cruzan una con otra.
- c) Siempre están dispuestas a pasar a través del hierro u otro material magnético en lugar del aire, pues escogen

- el medio más propicio para poder viajar aún cuando sus trayectorias se hagan más largas.
- d) Siempre arreglan sus posiciones de modo que el máximo número de ellas pueda pasar por determinada región.
 - e) Son trayectorias concéntricas con el eje del alambre y los planos de dichas trayectorias son siempre perpendiculares a su eje.
 - f) Son rectas sólo cuando dos polos opuestos están desplazados 180° geométricos entre sí.

LEY DE INDUCCION ELECTROMAGNETICA DE FARADAY.

En base a sus experimentos Faraday enunció la Ley de Inducción Electromagnética que lleva su nombre, Ley que constituye el punto de partida de todas las cuestiones -conceptos, fenómenos y ecuaciones- relacionadas con el electromagnetismo.

En efecto, la ecuación que cuantifica su enunciado ha evolucionado para dar origen a otras dos fórmulas fundamentales: La Ecuación Básica para Generador y la Ecuación Básica para Motor, ecuaciones que a su vez han ayudado a plantear sistemas de funciones más complejos que predicen y/o describen el comportamiento de todas las máquinas y dispositivos electromagnéticos.

La Ley de Faraday dice: "El valor de la tensión inducida en una sola espira de hilo es proporcional a la velocidad de variación de las líneas magnéticas que atraviesan dicha espira". La parte "velocidad de variación de las líneas magnéticas" implica un cierto número de líneas que son "cortadas" por una espira o conductor en determinado tiempo. Para que la Ley se

cumpla se requiere entonces de la presencia simultánea de un campo magnético y de un medio conductor, además de una interacción entre ambos factores. Dicho de otro modo, la velocidad relativa entre el campo y el conductor debe ser diferente de cero si se quiere que exista inducción.

Para que esto suceda existen tres posibilidades:

a) **Campo Magnético Fijo y Conductor Móvil.**-Este es un caso muy común en donde el campo fijo (en magnitud y en sentido) es producido por un imán permanente o por un electroimán alimentado por una fuente de corriente continua.

En ambos casos, si un conductor se desplaza a cierta velocidad a través del campo fijo "cortará" un determinado número de líneas por unidad de tiempo, lo que producirá una tensión inducida en el conductor. Los factores que determinan la magnitud de la tensión inducida se discutirán en breve.

Campo Magnético Variable y Conductor Fijo.-En este caso el campo variable puede ser producido por un electroimán conectado a una fuente de corriente alterna o a una fuente variable controlada de corriente continua con conmutador.

Si se introduce un conductor fijo en el campo variable de los circuitos anteriores, se inducirá una tensión en dicho conductor cuya magnitud será proporcional a la magnitud y a la velocidad de variación del campo. En el primer caso la velocidad será proporcional a la frecuencia de la fuente y en el segundo caso será proporcional al número de conmutaciones que se hagan por unidad de tiempo.

Esta situación también se presenta en los generadores de

inductor móvil e inducido fijo o armadura estacionaria.

Campo Magnético Variable y Conductor Móvil.- En este caso el campo puede ser variable como el producido en el inciso anterior o bien un campo giratorio como el usado en los motores de corriente alterna. Si el conductor se desplaza en el mismo sentido que el campo, la velocidad relativa será la diferencia entre ambas velocidades pero deberá ser diferente de cero para que exista inducción; si el campo y el conductor se desplazan en sentido opuesto la velocidad relativa será siempre diferente de cero e igual a la suma de ambas velocidades.

Este es el caso que se presenta en la Máquina de Inducción de Rotor Devanado usada como cambiador de frecuencia.

Neuman planteó así la primera ecuación que cuantificaba el enunciado de Faraday:

$$\epsilon = \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{Ec III.1}) \quad \text{o simplemente} \quad \epsilon = \frac{\phi}{t}$$

donde: ϵ es el valor de la tensión inducida en volts
 ϕ es el número de líneas "cortadas" en Wb o max
 t es el tiempo en segundos

Neuman comprobó que era necesaria una variación de 10EXP8 maxwell cada segundo para inducir una tensión de 1 volt. Como en el SI la unidad de flujo es el weber, si la fuerza electromotriz inducida (fem ó tensión inducida) es de 1 volt, se entiende que el flujo está cambiando a razón de 1 wb/seg. En el CGS se utiliza el maxwell (Wb = 10EXP8 max) motivo por lo cual se incluye al usar este sistema, una constante de proporcionalidad

igual a $10 \text{EXP}-8$.

LEY DE LENZ.

La Ley de Lenz está íntimamente relacionada con la Ley de Faraday, ya que también se refiere a la inducción electromagnética. Es una Ley aplicable a una gran cantidad de máquinas y dispositivos electromagnéticos y mediante ella se pueden explicar muchos de los fenómenos ocurridos en transformadores, motores, generadores, reactores, relevadores, etc.

Su enunciado más simple dice así: "En todos los casos de inducción electromagnética, la tensión inducida hará circular una corriente tal que su efecto se opondrá a la variación magnética que la ha engendrado". Dicho de otro modo, si las líneas de flujo producidas por un polo magnético "cortan" a un medio conductor, por inducción se originará en éste un polo opuesto al polo original.

Como un campo magnético de polaridad específica produce una tensión inducida de polaridad equivalente, es factible hablar de tensiones en lugar de hablar de polos o de polaridad; la fem inducida será, por tanto, opuesta a la tensión aplicada originalmente. En el dominio del tiempo equivale a tener dos ondas del mismo tipo (frecuencia, amplitud y naturaleza) pero desplazadas un tiempo tal que en un instante determinado mientras una alcanza su valor máximo positivo la otra alcanza su valor máximo negativo; en el dominio de la frecuencia equivale a un defasamiento de 180° exactos, como en los diagramas fasoriales.

En general representamos por V a una tensión constante que

proviene de una fuente de c.c., por $v(t)$ a una tensión variable con respecto al tiempo, producida por una fuente de c.a. y por ϵ a una fuerza electromotriz inducida (fem). En todos los casos las unidades son volts.

No es extraño encontrar en algunos textos la ecuación de la Ley de Faraday como:

$$\epsilon = - \frac{d \phi}{d t} \quad (Ec \text{ III.2})$$

donde el signo menos se debe precisamente a la Ley de Lenz.

Cuando se trata de N conductores o bien de un solo conductor arrollado helicoidalmente con N vueltas, se forma una bobina o solenoide con lo cual la ecuación queda:

$$\epsilon = - N \frac{d \phi}{d t} \quad (Ec \text{ III.3})$$

DENSIDAD DE FLUJO.

Las líneas magnéticas son producidas por polos magnéticos los cuales tienen caras polares con determinada superficie. A la cantidad de líneas magnéticas que atraviesan la unidad de área se llama Densidad de Flujo y se denota por la letra β , o sea $\beta = \phi/A$.

La unidad de densidad de flujo en el SI es la Tesla (τ) y equivale a 1 wb/m^2 ; en el CGS la unidad es el Gauss y es igual a

1 max/cm²; en el Inglés la unidad es klin/pul². De aquí encontramos las siguientes equivalencias:

$$\text{TESLA} = \frac{wb \cdot 10 \exp 8 \text{ max}}{m^2} = 10 \exp 4 \frac{\text{max}}{cm^2} = 10 \exp 4 \text{ Gauss}$$

$$\text{TESLA} = \frac{wb \cdot 10 \exp 5 \text{ Klin}}{m^2} = 64.52 \frac{\text{Klin}}{pul^2} = 1550 \frac{\text{pul}^2}{pul^2}$$

$$\frac{\text{Klin}}{pul^2} \cdot 10 \exp 4 = \text{Gauss} = 155 \text{ Gauss}$$

$$\frac{\text{pul}^2}{64.52} = 155 \text{ Gauss}$$

En el punto anterior hemos asumido que las líneas de flujo atraviesan a la superficie perpendicularmente. En caso de no ser así, la densidad es igual a $\phi/A \cos \theta$, donde θ es el ángulo entre la superficie y el eje de las líneas incidentes.

$$\text{como } \beta = \frac{\phi}{A} \cos \theta = \beta A \quad (\text{Ec III.4})$$

sustituyendo este valor en la ecuación III.3 queda:

$$\epsilon = \frac{N \beta A}{t} = \frac{N \beta l}{t} = N B l v = N \beta l v \quad (\text{Ec III.5})$$

que es la ecuación Básica para Efecto Generador, donde:

ϵ es la tensión inducida en volts

l es la longitud activa de la bobina en metros

v es la velocidad con que la espira corta las líneas de flujo magnético en metros/segundo

N es el número de vueltas de la bobina.

En la ecuación anterior se asume que β , l y v son todas perpendiculares entre sí. En caso contrario deberán incluirse las funciones seno θ y seno δ donde θ es el ángulo formado por β y v y δ es el ángulo entre β y l . Corresponde la función seno y no otra función trigonométrica porque cuando las líneas de flujo y el conductor se desplazan paralelamente, el ángulo entre ellas es 0° no habiendo corte de líneas, lo que provoca que la tensión inducida sea cero ($\text{sen } 0^\circ = 0$). Con el mismo razonamiento, cuando el flujo y el conductor se desplazan perpendicularmente, el conductor corta el máximo número de líneas posible por lo que la inducción es máxima ($\text{sen } 90^\circ = 1$).

Cabe aclarar que l es la longitud activa de la espira, es decir es exclusivamente aquella parte del conductor que interactúa con el campo magnético. Un aumento en la longitud total del conductor que no aumente la longitud activa significará un aumento en la resistencia total de la espira lo que provocará un aumento en las pérdidas con la consiguiente disminución de la eficiencia.

Ahora, suponiendo que por la espira de longitud l circula una corriente y multiplicando por I a ambos lados de la ecuación:

$$\epsilon I = N \beta I l v \quad (\text{Ec. III.6})$$

ϵI es una potencia eléctrica que puede convertirse

fácilmente a potencia mecánica por medio de una constante de proporcionalidad, o sea:

$$\text{Pot. Mec.} = k \text{ Pot. Eléc.}$$

pero

$$\text{Pot. Mec.} = \frac{\text{Energía Mecánica}}{\text{Tiempo}} = \frac{\text{Trabajo}}{\text{Tiempo}} = \frac{F \cdot d}{t} = F \cdot v \quad (\text{III.7})$$

Igualando las ecuaciones III.6 y III.7 :

$$F \cdot v = k \epsilon I = k N \beta I l v$$

$$\text{por lo tanto} \quad F = k N \beta I l \quad (\text{Ec III.8})$$

que es la Ecuación Básica para Efecto Motor.

donde: F es la fuerza en el elemento móvil
 β es la densidad de flujo
 l es la longitud activa de la espira
 I es la corriente que circula por la bobina
 k es la constante de proporcionalidad (*)

(*) La constante k es un factor para conversión de unidades electromagnéticas a unidades mecánicas y su valor depende del sistema utilizado. Para el CGS se puede encontrar como sigue:

$$F = k N \beta I l = \frac{\text{max}}{\text{cm}^2} \text{ amp cm} \frac{\text{wb}}{10 \exp 8 \text{ max}} \frac{10 \exp 2 \text{ cm}}{\text{m}} =$$

$$\begin{aligned}
 & \frac{\text{wb amp seg/seg}}{m} = \frac{10 \exp -6}{m} = \frac{\text{v amp seg}}{m} = \frac{10 \exp -6}{m} = \frac{\text{watt seg}}{m} = \frac{10 \exp -6}{m} \\
 & \frac{\text{Joule}}{m} = \frac{10 \exp -6}{m} = \text{Newton} \quad \frac{10 \exp 5 \text{ dina}}{\text{Newton}} = \frac{10 \exp -1 \text{ dina}}{\text{Newton}} = \\
 & = 1/10 \text{ dina, por lo tanto } k = \frac{1}{10} \text{ si } N = 1
 \end{aligned}$$

De manera análoga se puede comprobar que $k = 1$ en el sistema SI cuando β está en Teslas (wb/m^2), la corriente en amperes y la longitud en metros. El producto $\beta I l$ produce con estas unidades una fuerza exacta de un Newton.

FUERZA MAGNETOMOTRIZ (F_{mm})-

Cuando una carga eléctrica puntual (como un electrón) se desplaza en el espacio, produce un campo magnético alrededor de ella cuyo sentido depende del sentido del propio desplazamiento. Si la corriente eléctrica es un flujo de electrones es evidente que una corriente grande es un número grande de electrones en movimiento. Cada electrón produce su propio campo y como todos se desplazan en la misma dirección, el sentido de todos los campos individuales es el mismo lo que permite que se sumen para formar un campo resultante intenso que puede sobresalir fácilmente del conductor.

En un electroimán la corriente circula en el mismo sentido por todas las vueltas de la bobina, provocando que el campo de cada vuelta se sume con el siguiente formándose así un campo

total considerable. De aquí resulta evidente que el campo magnético es directamente proporcional al número de vueltas de la bobina y a la corriente que circula por ella, es decir, al producto NI en ampere-vuelta lo que se conoce precisamente como Fuerza Magnetomotriz (F_{mm}).

En el SI e Inglés la unidad es el ampere-vuelta y en el CGS es el Gilbert. Su relación es:

$$1 \text{ amp-vuelta} = 4\pi/10 \text{ Gilbert} = 1.257 \text{ Gilbert}$$

$$\text{o } 1 \text{ Gilbert} = 0.796 \text{ amp-vuelta}$$

INTENSIDAD DE CAMPO MAGNETICO (H).

Sabemos que los ampere-vuelta producen campo magnético. Si la trayectoria magnética es grande el campo se vuelve débil; si la trayectoria se reduce el campo se hace más fuerte. A la fuerza de un campo magnético se le denomina Intensidad de Campo Magnético (H) y es equivalente a la fuerza magnetomotriz por unidad de longitud, o sea:

$$H = \frac{F_{mm}}{l} \quad (\text{Ec III.9})$$

donde l es la longitud media de la trayectoria magnética en la cual es efectiva o actuante la F_{mm} .

En el SI la unidad es el ampere-vuelta sobre metro, en el CGS es el Oersted, que equivale a un Gilbert sobre centímetro y en el Inglés las unidades son ampere-vuelta sobre pulgada.

Encontramos las siguientes relaciones:

$$\frac{\text{amp vuelta}}{\text{amp vuelta}} = \frac{\text{amp vuelta } 4/r \text{ Gilbert}}{\text{Gilbert}}$$

$$\frac{m}{m} = \frac{10 \exp^2 \text{ cm}}{cm} = 1.256 \cdot 10 \exp^{-2}$$

$$\text{por lo tanto } \frac{\text{amp vuelta}}{m} = 1.256 \cdot 10 \exp^{-2} \text{ Oersted}$$

$$o \quad i \text{ Oersted} = 79.61 \frac{\text{amp vuelta}}{m}$$

$$\frac{\text{amp vuelta}}{m} = \frac{\text{amp vuelta}}{m} \cdot i = \frac{\text{amp vuelta}}{\text{pul}} = 25.4 \cdot 10 \exp^{-3}$$

$$\frac{m}{m} = \frac{39.37 \text{ pul}}{\text{pul}}$$

$$o \quad i \frac{\text{amp vuelta}}{\text{pul}} = 39.37 \frac{\text{amp vuelta}}{m}$$

PERMEABILIDAD (μ).

Es evidente que el campo magnético es proporcional a la F_{mm} e inversamente proporcional a la longitud magnética. Sin embargo,

hay otro importantísimo factor a considerar que es el medio por el que pasarán las líneas magnéticas. A la facilidad con que los distintos materiales o medios permiten el paso de las líneas de flujo se le conoce como Permeabilidad y se le denota por la letra μ .

Algebraicamente es la relación entre la Densidad de Flujo β y la Intensidad de Campo H , o sea:

$$\mu = \frac{\beta}{H} \quad (\text{Ec III. 10})$$

Sus unidades pueden deducirse con un sencillo análisis dimensional:

Para el SI:

$$\mu = \frac{\beta}{H} = \frac{\text{wb/m}^2}{\text{a.v/m}} = \frac{\text{wb seg/seg}}{\text{a.v m}} = \frac{\text{v seg}}{\text{a.v m}} = \frac{\text{Henry}}{\text{m}}$$

volt seg

* Por definición: Henry = $\frac{\text{volt seg}}{\text{amp}}$

de donde encontramos que también:

$$\mu = \frac{L}{l} \quad (\text{Ec III. 11})$$

donde L es el coeficiente de Autoinducción en Henrys.
 y l es la longitud magnética media en metros.

Para el CGS:

$$\mu = \frac{\beta}{H} = \frac{\text{Gauss}}{\text{Oersted}}$$

Las unidades en este sistema no son arbitrarias, ya que se eligieron de modo que la permeabilidad del vacío (μ_0) fuera exactamente de 1 Gauss/Oersted. Podemos deducir el valor de μ_0 para el SI a partir de esta relación:

$$\mu_0 = \frac{\text{Gauss}}{\text{Oersted}} = \frac{\frac{\text{max}}{\text{cm}}}{\frac{\text{Gilbert}}{\text{cm}}} = \frac{\frac{\text{wb}}{\text{max}}}{\frac{0.796 \text{ a. v. cm}}{10^8 \text{ cm}}} = \frac{\frac{\text{wb } 10^8 \text{ exp-6 seg/seg}}{0.796 \text{ a-v m}}}{\frac{\text{Hy}}{\text{m}}} = 1.25 \cdot 10^8 \text{ exp-6}$$

o sea:

$$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^8 \text{ exp-7 Hy/m}$$

Como es obvio, la permeabilidad es mayor para materiales magnéticos que para los no magnéticos porque es una medida de la facilidad con que los materiales se magnetizan. El aire es el medio más común en todos los dispositivos electromagnéticos, ya que salvo en raras ocasiones el entrehierro es siempre aire. Para

aplicaciones en Ingeniería se considera que la permeabilidad del aire es igual a μ_0 porque su diferencia es apenas detectable aún con sofisticados equipos de laboratorio.

Al igual que la densidad del agua que se ha tomado como base para determinar las densidades de las diferentes sustancias, en las pruebas para obtener las permeabilidades de los materiales se ha utilizado como base la permeabilidad del vacío por lo que en las tablas o gráficas siempre se expresa la μ de cada material adimensionalmente como función de μ_0 y se le llama permeabilidad relativa (μ_r) o sea:

$$\mu_r = \frac{\mu_m}{\mu_0} \quad (\text{Ec III.12})$$

donde:

μ_r es la permeabilidad relativa (adimensional)
 μ_m es la permeabilidad absoluta o real del material
 μ_0 es la permeabilidad del vacío

Para expresar en términos reales la permeabilidad de los materiales sólo es necesario hacer el producto $\mu_r \mu_0$ o sea:

$$\mu_m = \mu_r \mu_0$$

Los materiales con buenas propiedades magnéticas tienen μ_r muy grandes y los no magnéticos las tienen menores o iguales que la unidad, es decir, propiedades magnéticas más pobres que el aire.

De acuerdo con sus propiedades magnéticas podemos distinguir tres clases de materiales:

a) **Materiales Diamagnéticos.** - Son aquellos cuya μ es apenas mayor que μ_0 - la disminución rara vez es mayor de 0.01% - como la madera o la parafina:

μ Madera = 0.99999950

μ Parafina = 0.99999942

b) **Materiales Paramagnéticos.** - Son los que tienen μ ligeramente mayor que la del espacio libre, como el aluminio:

μ Aluminio = 1.00000065

c) **Materiales Ferromagnéticos.** - Son aquellos que tienen μ cientos o miles de veces mayores que μ_0 como el hierro, cobalto, níquel y aleaciones de éstos y otros materiales. En la Tabla III.A se muestran las μ de algunos materiales magnéticos fabricados y ampliamente utilizados en Europa.

En esta Tabla se puede hacer una observación sumamente interesante: la μ de todos los materiales es variable y función de la densidad de flujo. Puede notarse que μ alcanza su valor máximo a una densidad entre 0.4 y 0.6 Teslas, pero esta es una característica de cada material en particular. Con los datos de la tabla podemos dibujar la curva μ -B (Fig III.1), curva que nos permite seleccionar fácilmente los límites prácticos para lograr altas eficiencias en los diseños en que se utilicen estos materiales.

RELUCTANCIA (R).

Es bien sabido que la resistencia de un conductor es dependiente de la longitud, área y resistividad del material con que se fabricó dicho conductor, o sea:

TABLA III.A

PROPIEDADES MAGNETICAS

DENSIDAD DE FLUJO		HIERRO FUNDIDO		ACERO FUNDIDO TIPO DYNAMO		ACERO ALEADO		ACERO RECOGIDO		ACERO VACIADO	
B		H	μ_r	H	μ_r	H	μ_r	H	μ_r	H	μ_r
TESLA	GAUSS	A. v/m	$\mu\text{m}/\mu_0$	A. v/m	$\mu\text{m}/\mu_0$	A. v/m	$\mu\text{m}/\mu_0$	A. v/m	$\mu\text{m}/\mu_0$	A. v/m	$\mu\text{m}/\mu_0$
0.1	1,000	440	181	30	2650	8.5	9390	40	2000	180	444
0.2	2,000	740	215	60	2650	25	6350	60	2640	320	500
0.3	3,000	980	243	80	2980	40	2980	70	3424	420	571
0.4	4,000	1250	254	100	4180	65	4900	80	4000	460	695
0.5	5,000	1650	241	120	3310	90	4420	85	4544	520	768
0.6	6,000	2100	227	140	3410	125	3810	95	5048	580	824
0.7	7,000	3600	154	170	3280	170	3280	109	5136	620	904
0.8	8,000	5300	120	190	3350	220	2900	129	4960	700	912
0.9	9,000	7400	97	230	3110	280	2550	155	4640	820	872
1.0	10,000	10300	77	295	2690	355	2240	200	4000	990	808
1.1	11,000	14000	63	370	2360	460	1900	260	3384	1150	764
1.2	12,000	19500	49	520	1830	660	1445	360	2664	1400	685
1.3	13,000	29000	36	750	1380	820	1260	800	1300	1900	502
1.4	14,000	42000	26	1250	890	2250	495	1580	708	2700	414
1.5	15,000	65000	18	2000	600	4500	265	2700	444	4000	300
1.6	16,000			3500	363	8500	150	5800	220	6000	212
1.7	17,000			7900	171	13100	103			9000	151
1.8	18,000			12000	119	21500	67				
1.9	19,000			19100	79	39000	39				
2.0	20,000			30500	52	115000	14				
2.1	21,000			50700	33						
2.2	22,000			130000	13						
2.3	23,000			218000	4						

----- Límites prácticos

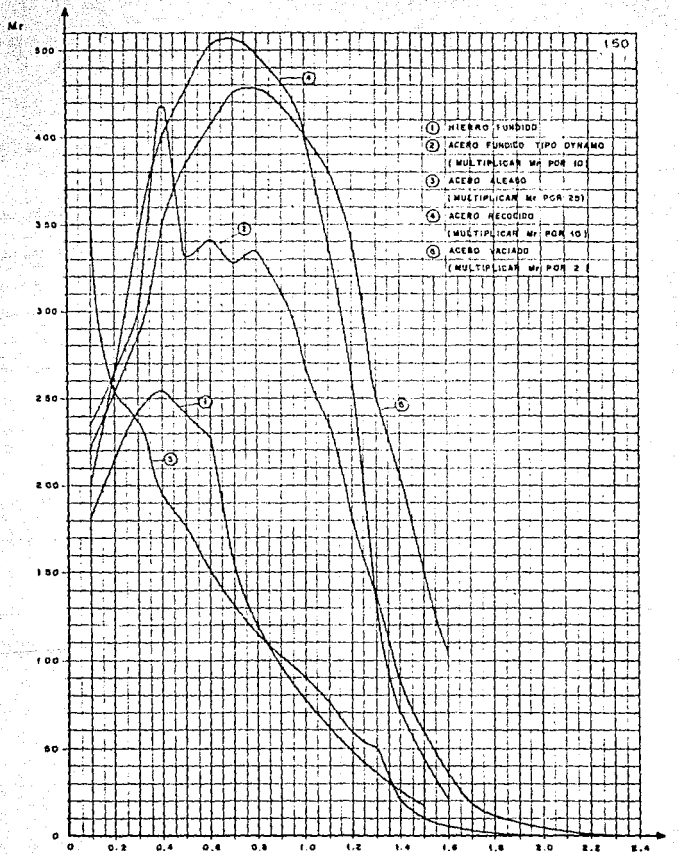


FIGURA 111.1.- CURVAS $\mu r-B$

$$R = \sigma \frac{l}{A} \quad (\text{Ec III. 13})$$

donde σ es la resistividad del metal y se puede encontrar en diferentes unidades de manera que sean compatibles con las unidades de la longitud y el área. La Tabla III.B muestra varias de esas posibilidades.

Existe una analogía directa entre resistencia total de un conductor eléctrico y reluctancia total de un material magnético. Por reluctancia R se entiende la oposición que presentan los diferentes materiales o medios al paso de las líneas de flujo magnético. Por tanto, podemos decir que:

$$R \propto \frac{l}{A} \frac{1}{\mu}$$

o sea:

$$R = \frac{l}{\mu} \frac{1}{A} \quad (\text{Ec III. 14})$$

donde:

μ es la permeabilidad absoluta del material
 l es la longitud media de la trayectoria magnética
 A es el área de la sección transversal por donde pasan las líneas.

Se ve una clara correspondencia entre:

TABLA III.B

RESISTIVIDAD (ρ), COEFICIENTE DE TEMPERATURA (α), Y PUNTO DE INTERSECCION (T)
CON EL EJE DE LAS I.

MATERIAL	RESISTIVIDAD ρ A 20 °C				COEFICIENTE DE TEMPERATURA α A 20 °C	(INTERSECCION CON EL EJE DE LAS I. °C BAJO CERO	
	MICROHM POR CENTIMETRO l [cm], A [cm ²]	OHM-MIL CIRCULARES l [mil], A [CM]	OHM POR METRO l [m], A [m ²]	OHM-mm ² POR METRO l [m], A [mm ²]			
ACERO DURO	47.2	289.2	47.2 x 10 ⁻⁸	0.472	1.8 x 10 ⁻⁵	800.0	
4% SILICIO	82.0	372.0	82.0 x 10 ⁻⁸	0.520	8.0 x 10 ⁻⁶	1.33	
BLANCO	17.4	104.4	17.4 x 10 ⁻⁸	0.174	4.2 x 10 ⁻⁵	218.0	
DE RIELES	13.8 + 21.6	108.8	17.7 x 10 ⁻⁸	0.177	—	—	
ALUMEL	34.0	204.0	3.4 x 10 ⁻⁷	0.340	1.2 x 10 ⁻⁵	839.0	
ALUMINIO	8.88	18.96	8.88 x 10 ⁻⁸	0.088	3.8 x 10 ⁻⁵	238.0	
ANTIMONIO	41.7	250.8	41.7 x 10 ⁻⁸	0.417	3.8 x 10 ⁻⁵	288.0	
BISMUTO	119.0	714.0	1.19 x 10 ⁻⁶	1.190	6.0 x 10 ⁻⁵	250.0	
BRONCE	7.0	42.0	7.0 x 10 ⁻⁸	0.070	2.0 x 10 ⁻⁵	460.0	
CALORITE	119.0	714.0	1.19 x 10 ⁻⁶	1.190	—	—	
CHROMELE	90.0	640.0	9.0 x 10 ⁻⁷	0.900	8.0 x 10 ⁻⁵	12.80	
COBRE	NORMAL RECOCIDO	1.724	10.34	1.72 x 10 ⁻⁸	0.017	5.8 x 10 ⁻⁵	284.8
	ESTIRADO EN FRIO	1.770	10.82	1.77 x 10 ⁻⁸	0.017	5.82 x 10 ⁻⁵	242.0
DURO, RECOCIDO	1.692	10.18	1.69 x 10 ⁻⁸	0.016	4.10 x 10 ⁻⁵	264.0	
CONSTANTAN (40% Ni, 60% Cu)	49.0	294.0	4.9 x 10 ⁻⁷	0.490	6.0 x 10 ⁻⁵	185.0	
DURALUMINIO	3.4	20.4	3.4 x 10 ⁻⁸	0.034	—	—	
ESTAO	11.3	69.0	1.13 x 10 ⁻⁷	0.113	4.2 x 10 ⁻⁵	220.0	
HIERRO COMERCIAL	—	73.5	1.28 x 10 ⁻⁷	0.122	5.6 x 10 ⁻⁵	184.0	
	FUNDIDO DURO	68.0	588.0	7.8 x 10 ⁻⁷	0.880	—	—
LATON	7.0	42.0	7.0 x 10 ⁻⁸	0.070	—	—	
MANGANIN (84% Cu, 12% Mn, 4% Ni)	42 + 74	348.0	5.8 x 10 ⁻⁷	0.580	3.0 x 10 ⁻⁵	33.0	
MERCURIO	96.0	976.0	9.6 x 10 ⁻⁷	0.960	8.0 x 10 ⁻⁵	1.10	
METAL ADVANCE	48.8	293.8	4.88 x 10 ⁻⁷	0.488	1.8 x 10 ⁻⁵	88.0	
METAL MONEL	42.0	252.0	4.2 x 10 ⁻⁷	0.420	2.0 x 10 ⁻⁵	480.0	
MOLIBDENO	5.7	34.2	5.7 x 10 ⁻⁸	0.057	5.3 x 10 ⁻⁵	280.0	
NICROMO	39.8	237.8	3.98 x 10 ⁻⁷	0.398	4.4 x 10 ⁻⁵	2.28	
NICROMO JJ	110.0	680.0	1.10 x 10 ⁻⁶	1.100	1.8 x 10 ⁻⁴	6.28	
NIGUEL	7.8	46.8	7.8 x 10 ⁻⁸	0.078	8.0 x 10 ⁻⁵	147.0	
ORO	2.44	14.64	2.44 x 10 ⁻⁸	0.024	3.4 x 10 ⁻⁵	274.0	
PLATINO	10.0	60.0	1.0 x 10 ⁻⁷	0.100	5.0 x 10 ⁻⁵	810.0	
PLATA	1.84	9.84	1.84 x 10 ⁻⁸	0.018	5.8 x 10 ⁻⁵	248.0	
PLATA ALEMANA (18% Ni)	33.0	198.0	3.3 x 10 ⁻⁷	0.033	4.0 x 10 ⁻⁴	8.80	
PLATINO (IRRADIADO)	24.8	147.8	2.48 x 10 ⁻⁷	0.248	1.8 x 10 ⁻⁵	814.0	
PLOMO	22.0	132.0	2.20 x 10 ⁻⁷	0.220	3.8 x 10 ⁻⁵	236.0	
SUPERIOR	86.4	518.4	8.64 x 10 ⁻⁷	0.864	8.0 x 10 ⁻⁵	-1.21	
TANTALIO	18.8	93.0	1.88 x 10 ⁻⁷	0.188	3.1 x 10 ⁻⁵	302.0	
TUNGSTENO	5.61	30.36	5.61 x 10 ⁻⁸	0.056	8.1 x 10 ⁻⁵	179.0	
ZINC	6.8	37.8	6.8 x 10 ⁻⁸	0.068	4.0 x 10 ⁻⁵	230.0	

Resistencia ----- Reluctancia
 Longitud ----- Longitud
 Area ----- Area
 Resistividad ----- 1/Permeabilidad

La resistividad es equivalente al inverso de la permeabilidad porque mientras la primera es oposición la segunda es facilidad.

Obtenemos las unidades de R para el SI:

$$R = \frac{l}{\mu A} = \frac{l}{\text{Hy m}^2} = \frac{l}{\text{Hy}}$$

de donde deducimos también que:

$$R = \frac{1}{L} \quad (\text{Ec. III.15})$$

donde L es el coeficiente de autoinducción en Henrys.

Ahora, descomponiendo el valor de Henry:

$$R = \frac{l}{\text{amp}^2 \text{ seg}^2} = \frac{\text{amp} \text{ seg}}{\text{wb}} = \frac{\text{amp-vuelta}}{\text{weber}}$$

* El número de vueltas es adimensional y constante para un circuito determinado.

Encontramos la siguiente relación con el CGS:

$$\frac{\text{amp-vuelta}}{\text{wb}} = \frac{0.796 \text{ gilbert}}{10^8 \text{ max}} = 7.96 \cdot 10^{-9} \frac{\text{gilbert}}{\text{max}}$$

ANALOGIA CIRCUITO ELECTRICO-CIRCUITO MAGNETICO.

De la ecuación elemental de Ohm se tiene:

$$V = R I \quad (\text{Ec III. 16})$$

Con los conceptos estudiados podemos hacer una analogía y plantear la ecuación de Hopkinson o Ley de Ohm para circuito magnético:

$$F_{mm} = R \phi \quad (\text{Ec III. 17})$$

donde F_{mm} , R y ϕ corresponden a los conceptos estudiados que hacen evidente la analogía directa entre cada variable.

Despejando R tenemos:

$$R = \frac{F_{mm} \text{ amp-vuelta}}{\phi \text{ weber}}$$

que coincide con las unidades para R obtenidas anteriormente.

COEFICIENTE DE AUTOINDUCCION L.

En circuitos, el efecto de una bobina se llama Inductancia y se denota por L o Coeficiente de Autoinducción. La magnitud de L depende de las características físicas de la bobina como: tipo de núcleo, geometría, diámetro o Área de la sección transversal, número de vueltas, longitud de la trayectoria magnética, etc., cuestiones que vale la pena discutir con más detalle.

Cuando una corriente variable con respecto al tiempo fluye por una bobina se origina un campo magnético igualmente variable que "corta" al conductor. Físicamente se puede considerar a la autoinducción como un intercambio de energía entre la bobina y la fuente, cuando la corriente cambia.

En la primera mitad del semiciclo positivo de una onda de corriente alterna, la corriente aumenta hasta alcanzar su valor máximo almacenándose en la bobina energía en forma de campo magnético (salida de energía de la fuente); en la segunda mitad del semiciclo la corriente disminuye hasta un valor cero provocando que el campo disminuya al convertirse nuevamente en energía eléctrica (regreso de energía a la fuente). En el semiciclo negativo el proceso se repite, aunque la corriente circula en sentido contrario creando un campo magnético opuesto al anterior.

La autoinducción L se manifiesta como una oposición a los cambios de magnitud de la corriente. Por tanto, mientras más grande sea L menor será la velocidad de variación de la corriente con respecto al tiempo. Lo anterior puede expresarse de la siguiente forma:

$$V = L \frac{di}{dt} \quad (\text{Ec III. 18})$$

donde V es la tensión inducida en la bobina
 L es el coeficiente de autoinducción
 di/dt es la velocidad de variación de la corriente con respecto al tiempo.

Por definición, una bobina tiene una inductancia igual a 1 Hy cuando al circular por ella una corriente que varía a razón de un ampere por segundo se induce en sus bornes una tensión de 1 v.

Lo anterior puede comprobarse con las ecuaciones III.3 y III.18 donde tanto ϵ como V son tensiones inducidas por lo que:

$$L \frac{di}{dt} = N \frac{d\phi}{dt}$$

por lo tanto:

$$L = N \frac{d\phi/dt}{di/dt} = N \frac{d\phi}{di}$$

y para un instante determinado:

$$L = \frac{N \phi}{i} = \frac{NB \text{ vuelta}}{\text{amp}} \quad (\text{Ec III. 19})$$

multiplicando el numerador por seg/seg y de la Ley de Faraday

tenemos que:

$$L = \frac{N \phi \text{ seg/seg}}{I} = \frac{N \text{ volt seg}}{\text{amp}} = \frac{N \text{ volt}}{\text{amp/seg}}$$

y para $N = 1$

$$L \text{ (Henrys)} = \frac{\text{volt}}{\text{amp/seg}} = \frac{\text{volt seg}}{\text{amp}}$$

Determinemos ahora los parámetros físicos de los que depende la magnitud de la inductancia:

$$\phi = \frac{F_{\text{m}}}{R} = \frac{N I}{\frac{l}{\mu}} = \frac{N I \mu A}{l}$$

sustituyendo en la ecuación para L:

$$L = \frac{N \phi}{I} = \frac{N (N I \mu A)}{I} = \frac{N^2 \mu A}{l} \quad (\text{Ec III. 20})$$

donde:

N es el número de vueltas de la bobina

μ es la permeabilidad del núcleo

A es el área de la sección transversal del núcleo

l es la longitud media magnética

Comprobamos las unidades para el SI:

$$L = \frac{N \mu A}{l} = \frac{\frac{Hy}{m} m^2}{m} = \text{Henrys}$$

INDUCCION MUTUA.

La inducción mutua se produce entre dos bobinas cuando las líneas de flujo producidas por cada una de ellas "corta" las espiras de la otra. Equivale a la inductancia real o inductancia útil de dos bobinas acopladas magnéticamente y se determina mediante el grado de encadenamientos de flujo. Este grado de encadenamientos se expresa por medio de un factor llamado Coeficiente de Acoplamiento (k).

Cuando el total de las líneas de flujo de cada bobina se concatenan o eslabonan con las espiras de la otra, k vale 1 o sea el valor máximo. Cuando no hay concatenamiento entre espiras y líneas k vale cero (como en circuitos magnéticos independientes).

El valor de k depende principalmente de 4 factores:

1. - La magnitud de la corriente en la bobina excitada. A mayor corriente mayor flujo y mayor encadenamiento.
2. - La distancia física entre bobinas. A mayor distancia menor encadenamiento.
3. - Las características magnéticas del medio. A mayor reluctancia menor encadenamiento.
4. - El ángulo relativo formado por los ejes de dichas bobinas. A 90° el acoplamiento es nulo y a 0° es máximo (relación

cosenoidal).

Por su utilidad, usaremos notación con subíndices para identificar a los flujos que se presentan en dos bobinas acopladas mutuamente (FIG III. 2)

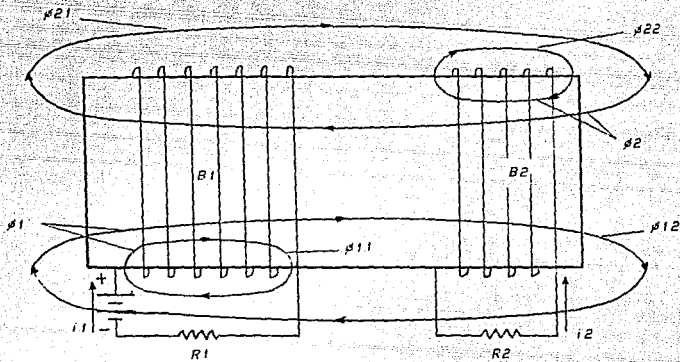


FIG III. 2.- ACOPLAMIENTO MAGNETICO ENTRE DOS BOBINAS

De la figura se tiene que:

- ϕ_{11} es el flujo propio o exclusivo de la bobina 1 (B1)
- ϕ_{12} es el flujo de B1 que concatan a las espiras de B2.
- ϕ_1 es el flujo total producido por B1 ($\phi_1 = \phi_{11} + \phi_{12}$)
- ϕ_{22} es el flujo propio o exclusivo de la bobina 2 (B2)
- ϕ_{21} es el flujo de B2 que concatan las espiras de B1
- ϕ_2 es el flujo total producido por B2 ($\phi_2 = \phi_{21} + \phi_{22}$)

Si la autoinductancia o inductancia propia de cada bobina es:

$$L_1 = \frac{N_1 \phi_1}{i_1} \quad \text{y} \quad L_2 = \frac{N_2 \phi_2}{i_2}$$

Entonces la inductancia mutua M de B_1 a B_2 es la relación de encadenamientos de flujo en B_1 por unidad de corriente en B_2 es decir:

$$M_{12} = \frac{N_2 \phi_{12}}{i_1} \quad \text{y análogamente} \quad M_{21} = \frac{N_1 \phi_{21}}{i_2}$$

Considerando primero el caso ideal en que todas las líneas de flujo de cada bobina corten todas las espiras de la otra bobina, tendríamos:

$$\phi_{11} = 0 \quad \therefore \phi_{12} = \phi_1 \quad ; \quad \phi_{22} = 0 \quad \therefore \phi_{21} = \phi_2$$

entonces

$$M_{12} M_{21} = \frac{N_2 \phi_{12}}{i_1} \frac{N_1 \phi_{21}}{i_2} = \frac{N_1 \phi_1}{i_1} \frac{N_2 \phi_2}{i_2} = L_1 L_2 = M^2$$

por lo tanto:

$$M = L_1 L_2 \quad (\text{Ec III. 21})$$

donde M es la máxima inductancia mutua teórica posible.

Sin embargo, en los casos reales existe siempre algún flujo que no encadena las vueltas de la otra bobina, como las líneas de

flujo de cada devanado (#11 y #22).

Entonces podemos redefinir al coeficiente de acoplamiento k como la razón de la inductancia mutua real a la máxima inductancia mutua teórica posible:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

de donde:

$$M = k \sqrt{L_1 L_2} \quad (\text{EcIII.22})$$

k también se puede definir en términos de los flujos mutuos y propios:

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{\Phi_{12}}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{\Phi_{12} \Phi_{21}}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{\begin{array}{|c|c|} \hline \Phi_{12} & \Phi_{21} \\ \hline \end{array}}{\begin{array}{|c|c|} \hline \Phi_{11} & \Phi_{22} \\ \hline \end{array}} = \frac{\begin{array}{|c|c|} \hline \Phi_{12} & \Phi_{21} \\ \hline \end{array}}{\begin{array}{|c|c|} \hline \Phi_{11} & \Phi_{22} \\ \hline \end{array}}$$

Φ_{12} Φ_{21}
 $0 \text{ } \frac{\text{---}}{\Phi_{11}}$ $\frac{\text{---}}{\Phi_{22}}$ 0 por lo que $0 \text{ } \frac{\text{---}}{\Phi_{11}}$ $\frac{\text{---}}{\Phi_{22}}$ 0

CURVA DE MAGNETIZACION.

Al aumentar la corriente en una bobina H se incrementa directamente ya que $H=NI/l$, pero el incremento resultante en B no siempre es proporcional a H . Esto significa que la permeabilidad de los materiales no es constante, sino que varía con las diferentes densidades de flujo. La figura III.1 mostró la relación entre μ y B para algunos materiales.

Si H se hace variar en pasos discretos desde cero hasta algunos cientos o miles y se encuentra el valor correspondiente de B para cada H se pueden llevar estos datos a unos ejes donde B corresponda a las ordenadas y H a las abscisas. La gráfica que muestra este comportamiento de los materiales es la llamada Curva de Magnetización. Esta curva es indudablemente la curva más importante para resolver problemas con circuitos magnéticos que incluyen materiales con μ variable. Para cada diseño deberán considerarse siempre las curvas características de los materiales comercialmente disponibles.

La forma de esta curva es similar en todos los materiales ferromagnéticos y es como la de la figura III.3 donde apreciamos tres secciones fundamentales.

Si se trata de un material nuevo, es decir sin antecedentes magnéticos, cuando H vale cero B también es cero. Al aumentar lentamente H se observa una respuesta no lineal de B (sección 1), debido a que la fuerza magnetizante es tan baja que no es suficiente para poner orden y alinear a un número constante de moléculas. La sección 2 se produce cuando incrementos pequeños en H producen incrementos iguales en B , o sea que la relación $B-H$ (permeabilidad) sí es constante. La pendiente de una curva en un

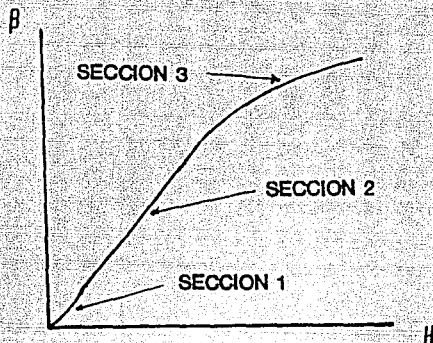


FIG III.3.- CURVA DE MAGNETIZACION

punto sobre ella es la pendiente de la recta tangente a la curva en ese punto. Como la tangente es una línea recta la pendiente se expresa por el valor dB/dH sobre la línea.

Evidentemente la mayor pendiente y la mayor permeabilidad se obtienen cuando la tangente es más grande. Invariablemente el aumento de B provocado por el incremento de H es proporcional sólo en cierto rango. Cuando la excitación se eleva demasiado el circuito magnético llega a su límite por lo que no puede ya producir más flujo magnético.

Se dice que se llega a la saturación cuando un aumento pequeño en H ya no produce un incremento proporcional en B . Este comportamiento se observa en la sección 3 de la gráfica.

En la figura III.4 aparecen las curvas reales de magnetización de los materiales cuyas características aparecieron en la Tabla III.A.

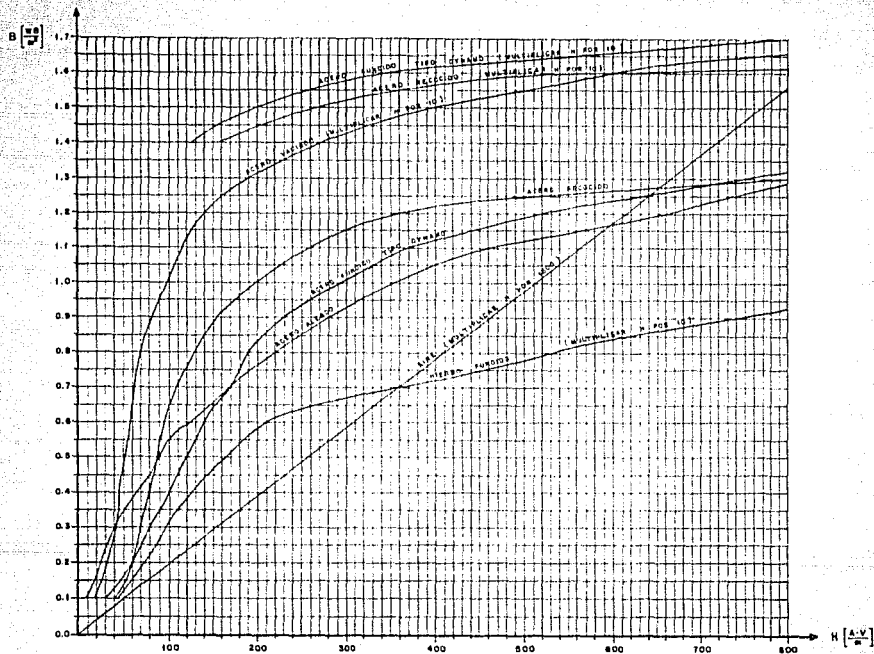


FIG III.4.- CURVAS DE MAGNETIZACION DE MATERIALES COMERCIALES

Los fabricantes de materiales ferromagnéticos proporcionan las curvas de magnetización ya que son indispensables en el diseño y operación de dispositivos y máquinas electromagnéticas. Las pérdidas por saturación pueden evitarse operando a los materiales hasta antes de la "rodilla de saturación"; de este modo se asegura un máximo aprovechamiento de la corriente de excitación con un consiguiente aumento en la eficiencia total de todo el sistema.

Vale la pena mencionar que si bien en algunos diseños la saturación es un fenómeno inconveniente, en otros diseños -como en reguladores de tensión y algunos transformadores de instrumento- es en cambio sumamente útil.

HISTERESIS.

Cuando una barra de hierro se coloca en un campo magnético, las moléculas del hierro se disponen de una forma ordenada y la barra se convierte instantáneamente en un imán. Si se hace que esta barra gire en el campo (por ejemplo en el sentido de las manecillas del reloj), cada molécula de la barra permanecerá en su posición original, alineada con el campo (Fig III.5).

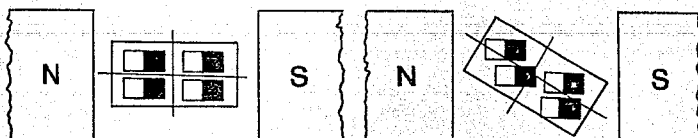


FIG III.5.- HISTERESIS EN UNA BARRA DE HIERRO

Este cambio en la posición relativa de las moléculas con respecto a la posición de la barra consume potencia y al fenómeno se le llama histéresis. Las pérdidas por histéresis pueden presentarse también en el caso de que el campo sea producido por un electroimán que esté conectado a una fuente de corriente alterna. En este caso, con cada cambio de sentido de la corriente habrá un cambio en la polaridad del imán y esto provocará también un cambio en la posición relativa entre las moléculas y la barra. Las pérdidas causadas por este fenómeno pueden determinarse de varias formas y una de ellas es con ayuda del Lazo de Histéresis.

CONSTRUCCION DEL LAZO DE HISTERESIS.

Para producir un campo magnético uniforme en un cuerpo determinado como por ejemplo un anillo o una barra de hierro, las vueltas de alambre de la bobina deben estar distribuidas de manera uniforme a lo largo del cuerpo. Si no existe flujo en la barra desde el principio, o sea si las condiciones iniciales son cero (como en el caso de una bobina o solenoide nuevo) un aumento en la corriente de la bobina desde cero hasta un valor máximo I_m causará un incremento en la densidad de flujo desde $\beta=0$ hasta un valor máximo β_m y la curva $\beta-H$ será la curva de magnetización característica del material con el cual está hecha la barra (Fig III.5 trayectoria 0-A).

Sin embargo, si el valor de la corriente decrece causando que disminuya la intensidad de campo magnético ($H = NI/l$) los valores correspondientes de densidad de flujo serán mayores que los que corresponden a la curva de magnetización porque existe una densidad de flujo llamada magnetismo residual o remanente que funciona como una "memoria magnética" que es retenida por el hierro aún cuando se haya eliminado por completo la excitación

(trayectoria A-B). En general a esta característica se le llama Remanencia pero cuando esta remanencia es producida después de haber alcanzado la saturación se le llama Retentividad. Se puede decir entonces que la retentividad es el valor máximo posible de remanencia y es característica de cada material.

Para reducir a cero la remanencia es necesario invertir la corriente en la bobina (trayectoria B-C). Si se aumenta progresivamente esta nueva corriente se obtendrá una curva de magnetización invertida, o sea con valores de β y H invertidos o negativos (trayectoria C-D). Si una vez que se logró la "saturación negativa" se hace llegar la corriente a cero (trayectoria D-E) para después alcanzar nuevamente su valor +Im (trayectoria E-F-A) se tiene finalmente un recorrido cerrado cuya superficie puede determinarse por cualquier método. En la misma figura III.6 se pueden apreciar los puntos equivalentes de la trayectoria del lazo de histéresis producidos por una onda senoidal.

Debido a la naturaleza de los materiales ferromagnéticos, los lazos resultantes de un segundo o aún un tercer cambio en la polaridad no estarían colocados exactamente sobre el primero. Sin embargo, con la corriente alterna los cambios son muy rápidos (dependen de la frecuencia) por lo que los lazos sucesivos si siguen una trayectoria fija.

Es evidente que al usar energía para romper el alineamiento residual de las moléculas y para alinearlas otra vez, existe una pérdida de energía durante cada ciclo. Puede determinarse entonces la pérdida por ciclo:

$$W \text{ (ciclo)} = V_h \Delta h = \text{Joules/ciclo} \quad (\text{Ec III.23})$$

donde:

W es la potencia perdida por ciclo dada en watts

V_h es el volumen del material magnético

Alh es el área del lazo de histéresis

Y haciendo el análisis dimensional:

$$\begin{aligned} V_h Alh &= (\text{mexp}^3) (\text{amp/cm}) (\text{wb/m}) = \text{amp wb seg/seg} = \\ &= (\text{wb/seg}) \text{ amp seg} = \text{volt amp seg} = \text{watt seg} = \\ &= \text{joule /ciclo} \end{aligned}$$

Si se quisieran determinar las pérdidas por segundo, sólo es necesario multiplicar la ecuación III.23 por f en ciclos/seg:

$$W (\text{watts}) = V_h Alh f \quad (\text{Ec III.24})$$

con lo que $W = (\text{joule/ciclo}) (\text{ciclo/seg}) = \text{joule/seg} = \text{Watt}$

De lo expuesto se desprende que es relativamente sencillo calcular las pérdidas por histéresis cuando se cuenta con el lazo convenientemente trazado. Sin embargo, la gran desventaja de este método es precisamente trazar dicho lazo. Sólo con equipo muy complejo de laboratorios especializados que operan bajo estrictas condiciones de prueba (Fig III.7) se puede obtener el lazo exacto; en vista de lo anterior se han desarrollado métodos analíticos sencillos ampliamente usados actualmente que permiten calcular las pérdidas causadas por este fenómeno con mayor facilidad.

CALCULO PRACTICO DE PERDIDAS POR HISTERESIS.

La potencia que absorben los núcleos magnéticos es

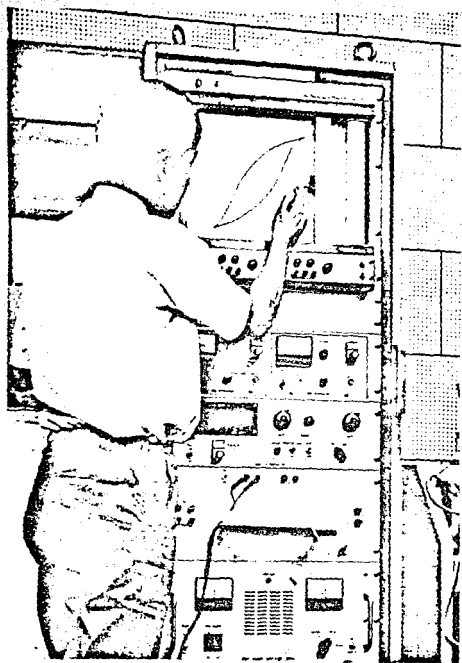


FIG 111.7.- TRAZADOR DE LAZOS DE HISTERESIS

transferida a ellos por vía electromagnética, es decir que la potencia eléctrica que cubrirá se transforma en energía magnética que a su vez se pierde al disiparse al medio en forma de calor. Su magnitud depende en grado sumo del tipo del material del núcleo, de sus dimensiones, de la inducción magnética a que se

le someta y del número de ciclos por unidad de tiempo.

Charles Steinmetz, científico alemán llegado a los Estados Unidos y reconocido como un auténtico genio de la electricidad, entre los muchos trabajos que llevó a cabo realizó estudios con diversos materiales magnéticos, casi todos ellos compuestos por hierro puro con agregados de silicio, manganeso, etc. El estudio se extendió al acero y al hierro fundido. Posteriormente se ensayaron láminas de acero especialmente preparadas para núcleos de máquinas rotatorias y transformadores. De todos estos ensayos surgió una fórmula empírica para calcular las pérdidas por histéresis:

$$W = \int B \exp 1.6 f 10 \exp -\beta \quad (\text{Ec 111.25})$$

W es la potencia perdida en un Kg de núcleo dada en watts. Para calcular la pérdida en todo el núcleo hay que multiplicar el resultado de la fórmula por el peso total en Kg. O, si se conoce el volumen en decímetros cúbicos se multiplica éste por el peso específico, que es aproximadamente constante para todos los tipos de aceros. En la expresión anterior β es la densidad de flujo máxima que atraviesa el núcleo, en Gauss y f es la frecuencia en hertz. El coeficiente η es el llamado Coeficiente de Steinmetz y depende del material del núcleo. En la tabla adjunta se dan sus valores para los materiales más usuales.

Se observa en la Tabla la influencia que tiene el tipo de material elegido en la cifra de pérdidas, pero como en los núcleos no sólo aparecen las pérdidas por histéresis, no se puede elegir el material por este sólo detalle, sino que hay que contemplar el efecto de las corrientes parásitas, que como se

verá a continuación, requieren condiciones distintas.

TABLA III. C

VALORES DEL COEFICIENTE DE STEINMETZ.

MATERIAL	COEF.	MATERIAL	COEF.
Hierro Dulce	2.5	Acero 2.5% Silicio	1.375
Fundición	17.0	Acero 3% Silicio	1.250
Acero Fundido	15.0	Acero 3.5% Silicio	1.125
Acero Ducte para Máq. ...	10.0	Acero 4% Silicio	1.000
Acero Dulce Recocido ..	5.8	Laminación Dulce	3.100
Acero Dulce	2.7	Laminación Delgada	3.800
Acero Dulce 2% Silicio. .	1.5	Laminación Ordinaria ...	4.200

CORRIENTES DE FOUCAULT (REHOLINO).

Cuando fluye corriente en una bobina devanada sobre un núcleo magnético (por ejemplo una barra) el flujo de la bobina "corta" el material induciendo voltajes y por lo tanto corrientes en él. Como toda corriente que circula por un conductor de resistencia R produce una pérdida de potencia $P = R I^2$, resulta obvio que al aumentar la corriente la potencia perdida aumenta en forma cuadrática mientras que al aumentar R la pérdida de potencia aumenta en forma directamente proporcional a R . Entonces es más importante limitar a la corriente que a la resistencia. Para lograr esto se utilizan núcleos laminados, es decir, hechos a base de placas o laminaciones aisladas eléctricamente entre sí

que no permiten que las corrientes se sumen; si las láminas no estuvieran aisladas, el voltaje en cada una de ellas haría circular una corriente individual y la corriente total sería igual a la suma de todas las corrientes parciales. Cada laminilla actuaría como una fuente independiente de corriente conectada en paralelo con otras fuentes similares; el equivalente sería una fuente de corriente muy grande.

El primero en reconocer la existencia de estas corrientes fue J. Foucault por lo que actualmente se les conoce con este nombre. Por la forma en que circulan (Fig III.8) se les conoce también como corrientes de Eddy (o remolino, en español) y por el hecho de no producir ningún trabajo útil también se les llama corrientes parásitas. Cualquiera de estos nombres puede usarse indistintamente.

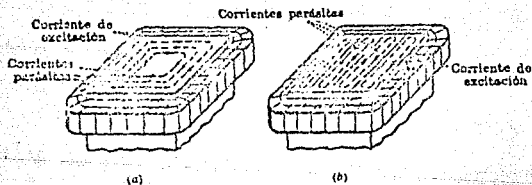


FIG III.8.- CIRCULACION DE CORRIENTES DE FOUCAULT EN NUCLEOS FERROMAGNETICOS

Como la magnitud de la tensión y de la corriente dependen del volumen del material, mientras más delgada sea la lámina menor será la corriente y también menor la pérdida de potencia. Como la resistencia del conductor varía en forma inversa al área de su sección transversal, la resistencia de cada laminilla aumenta al adelgazar su espesor, lo que limita aún más a la corriente.

Para deducir una expresión que nos permita hacer un cálculo rápido de estas pérdidas nos referiremos a la figura III.9 que muestra una chapa de acero como las que se usan comúnmente. Se supone que el espesor de la chapa, indicado como en la figura está exagerado notablemente, ya que en realidad mide apenas unas fracciones de milímetro de espesor.

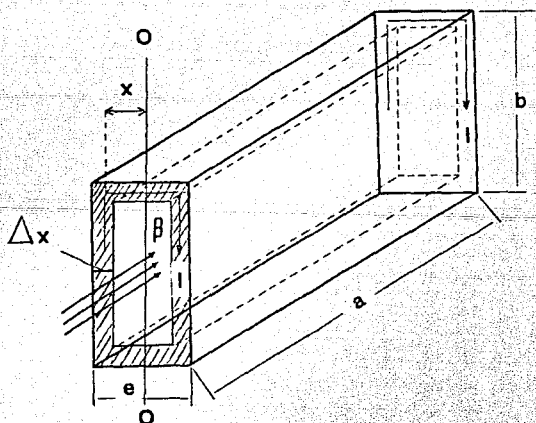


FIG III.9.- CORRIENTES PARASITAS INDUCIDAS EN UNA CHAPA DE NUCLEO FERROMAGNETICO

El campo magnético atraviesa la chapa en el sentido indicado en la figura, es decir, recorre la longitud a , con lo que atraviesa una sección neta dada por el producto del espesor e y por el alto b . Todas las dimensiones se toman en centímetros para uniformar. Debido a la variación de este campo, cuya inducción es B , se inducirá una corriente que circulará envolviendo el campo, en la forma que se indica con I en la figura. Se supone a la chapa formada por capas sucesivas que envuelven al campo magnético. La capa rayada en el dibujo tiene espesor ∂x y dista x del eje OO .

El valor de la f.e.m. inducida por la densidad B al variar con frecuencia f ciclos por segundo y atravesar la sección ya expresada, será, de acuerdo con la teoría básica igual a:

$$E = 4.44 f B A 10 \exp^{-8} \quad (\text{Ec } 111.26)$$

en cuya expresión la sección A debe ser considerada como la que queda dentro de la capa envolvente, es decir, vale:

$$A = 2 x b$$

La resistencia eléctrica de la capa mencionada -sombreada en la figura- tiene un valor dado por el producto de la resistividad del acero, por la longitud recorrida por la corriente y dividido por la sección que atraviesa la corriente. La longitud puede suponerse igual a $2b$, dada por el pequeño espesor de la chapa, y la sección atravesada por la corriente vale $(a \partial x)$. Luego, la resistencia eléctrica vale que encuentra la corriente en su camino vale:

$$r = \frac{2 \sigma b}{a \partial x} \quad (\text{Ec } 111.27)$$

Ahora las pérdidas ocasionadas por la circulación de esta corriente se pueden calcular por cociente entre el cuadrado de la tensión y la resistencia, es decir:

$$dW = \frac{E^2 (4.44 f B 10 \exp - 8) 4 x^2 b^2}{R 2 \sigma b/a dx}$$

Donde hemos indicado a las pérdidas con dW , debido a que se refieren a una capa con finísimo espesor que envuelve a la chapa. Dentro de esta capa hay otra, y otras más adentro, hasta llegar al eje, en que la distancia desde él hasta la capa, es decir x , vale cero. Luego hay que calcular las pérdidas para cada capa, dando a x valores comprendidos entre cero y su valor máximo, que es la mitad del espesor e de la chapa. Esta integración se resuelve así:

$$dW = \frac{(4.44 f B 10 \exp - 8)^2 4 x^2 b^2 a dx}{2 \sigma b}$$

$$W = \int_0^{x=e} dW = \frac{(4.44 f B 10 \exp - 8)^2 2 b a}{\sigma} \int_0^{x=e} x^2 dx$$

y la integral que figura al final da:

$$\int_0^e x^3 dx = \frac{(x^4)^e}{4} = \frac{e^4}{4}$$

con lo que se llega a:

$$W = \frac{(4.44 \times 10^{-8})^2 b a e^3}{12 \sigma}$$

Calculamos ahora el peso de la chapa para poder determinar las pérdidas por unidad de peso. El peso será igual al volumen por el peso específico:

$$P_t = P_e \cdot a \cdot e \cdot b$$

De manera que dividiendo las pérdidas totales por este peso, se tienen las pérdidas por unidad de peso:

$$W = \frac{(4.44 \times 10^{-8})^2 b a e^3}{12 \sigma P_e a b} \quad (\text{Watt/unidad de peso})$$

Y aquí es conveniente hacer algunas aclaraciones. El peso específico de los hierros es aproximadamente constante e igual a 7.8 kg/dm cúbico, de manera que para usarlo en la fórmula hay que convertir las dimensiones, que están en cm a dm. Si la

resistividad del hierro se toma como $9.65 \times 10 \exp -6$ Ohm-cm y el espesor de la chapa se pasa a mm para tener congruencia en las unidades (dividiendo por 100 porque está al cuadrado, como se verá enseguida), se obtiene finalmente:

$$W = 2.2 f^2 B^2 e^2 10 \exp -11 \text{ (Watts/Kg)} \quad (\text{Ec III.28})$$

donde f es la frecuencia en hertz, B es la densidad máxima en Gauss y e es el espesor de la chapa en mm.

Las expresiones anteriores nos permiten hacer algunas observaciones interesantes. Se ve que las pérdidas dependen del cuadrado del espesor de las chapas, por lo cual se debe tener especial interés en que éste sea lo menor posible. Además, aparecen también al cuadrado la densidad de flujo y la frecuencia, por cuya razón esta pérdidas fijan valores límites para la densidad máxima. También, como la resistividad del hierro aparece en el denominador convendrá elegir hierros que sean malos conductores eléctricos pero buenos conductores magnéticos; con esto, la elección puede presentar interesantes alternativas. En la práctica el factor que es más flexible es el espesor de las chapas, llegándose a utilizar chapas de fracciones de milímetro cuyos límites son impuestos por razones económicas principalmente.

CALCULO RAPIDO DE PERDIDAS POR CORRIENTES PARASITAS.

En la ecuación III.28 se ha llegado a una expresión que involucra una constante ($2.2 10 \exp -11$) resultado de considerar las características físicas (peso específico) y eléctricas (resistividad) del hierro. Sin embargo en la práctica son mucho más utilizados los núcleos fabricados con aceros y otros elementos, como el silicio. La inclusión de silicio permite

aumentar enormemente la resistividad del material aunque las características mecánicas se empobrecen, volviéndose más frágil. Las características exactas del material dependen del % de contenido de silicio. Para hacer cálculos rápidos de pérdidas los fabricantes proporcionan valores de las constantes de cada material que se pueden sustituir directamente en la siguiente ecuación:

$$W \text{ (watts)} = \Gamma \left[\frac{f}{100} \times \frac{\beta}{10000} \right]^2 Pt \text{ (Ec III.29)}$$

siendo W la pérdida en watts por corrientes parásitas, f la frecuencia en hertz, β la densidad máxima en Gauss, Pt el peso total del núcleo en kg y Γ el coeficiente que depende de la resistividad del material y del espesor de las chapas. En la Tabla III.D se muestran los valores de Γ para diferentes materiales disponibles comercialmente.

PERDIDAS TOTALES EN EL NUCLEO.

Las expresiones vistas anteriormente permiten calcular las pérdidas en los núcleos magnéticos debidas a dos causas: histéresis y corrientes parásitas. En la práctica interesa casi siempre conocer la cifra total para el cálculo de reactores, motores y transformadores y separarlas únicamente cuando se estudia el material del núcleo.

Las pérdidas totales en los núcleos magnéticos pueden calcularse con los métodos descritos, pero resulta más práctico disponer de curvas obtenidas en laboratorios especializados que

TABLA III.D

VALORES DE Γ PARA CHAPAS MAGNETICAS DE ACERO AL SILICIO
Y DIFERENTES ESPESORES.

$\% Si$	Espesor de Chapas en mm		
	0.35	0.55	0.63
0.5	1.68	4.00	5.25
1.0	1.17	2.75	3.75
2.5	0.65	1.55	2.00
3.5	0.46	1.20	1.60
4.5	0.40	1.00	1.30

suministren directamente las pérdidas para cada material, a distintas frecuencias y por unidad de peso (Fig III.10).

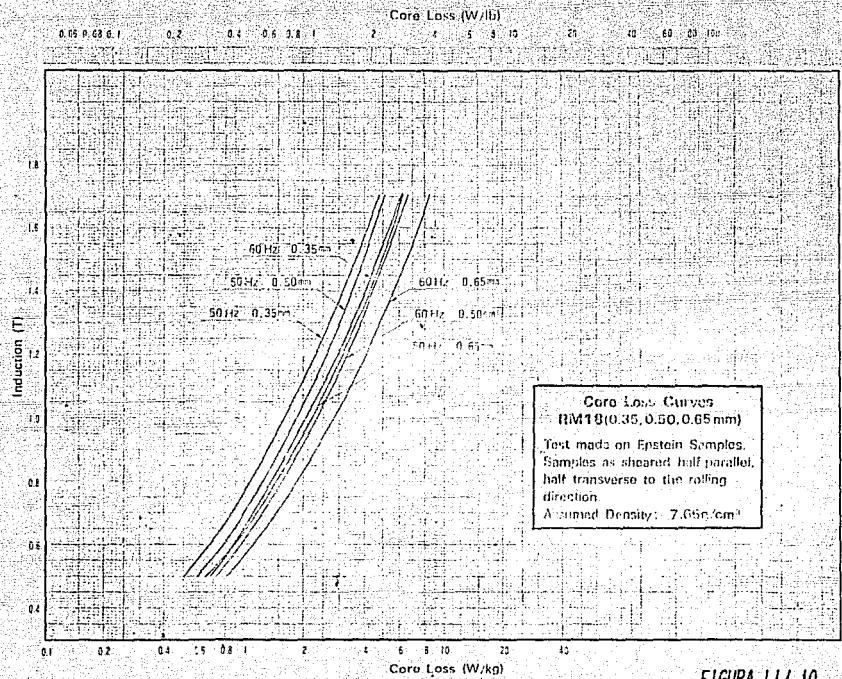


FIGURA 117.10

MATERIALES MAGNETICOS

MATERIALES FERROMAGNETICOS <<DUROS>> Y <<BLANDOS>>.

Los materiales ferromagnéticos se pueden dividir en dos grupos: los que retienen una cantidad considerable de energía magnética después de haber eliminado la fuerza magnetizante y los que pierden la mayor parte de su magnetismo en cuanto se suprime la fuerza aplicada.

Estos dos grupos se conocen como magnéticamente <<duros>> y <<blandos>>, quizá porque la mayoría de los materiales de ambas clases con los que se realizaron los primeros experimentos eran mecánicamente duros y blandos, respectivamente. La fuerza coercitiva de los materiales magnéticos duros es elevada (es decir, imanes permanentes) y la de los materiales blandos (aceros para transformadores, por ejemplo) es baja.

Ya en la primera mitad del siglo XIX desde los trabajos de Faraday y Oersted sobre la inducción electromagnética se apreció la importancia de ambas clases de materiales. El propio Faraday realizó un gran trabajo de exploración en este campo.

TEORIA DE LOS MATERIALES MAGNETICOS.

Aunque los materiales magnéticos se conocen desde hace muchos siglos, hasta los últimos años no se ha llegado a comprender totalmente el mecanismo de la imantación. Los conceptos de Ewing y Weber sobre los imanes elementales han tenido un desarrollo más completo en la teoría de los dominios que, a su vez, ha sido ligada al concepto del spin como origen de las fuerzas magnéticas. Al mismo tiempo se han estudiado las variaciones de las propiedades magnéticas que acompañan a los cambios estructurales del material, con el resultado de que se ha creado

una teoría digna de crédito que relaciona la estructura cristalina y la tensión interna con el comportamiento magnético.

A continuación esbozaremos a grandes rasgos las diversas facetas de la teoría relacionada con los materiales magnéticos empleados en Ingeniería Eléctrica.

TEORÍA MOLECULAR DE EWING.

Experimentalmente se observó que la relación existente entre la Densidad de Flujo B y la Intensidad de Campo H seguía cierta pauta como se mostró en las figuras III. y III. , que representan respectivamente, la curva de magnetización y el ciclo de histéresis. Además de lo anterior se vió que si se rompía un imán permanente en pequeñas partes, éstas conservaban el magnetismo en el mismo sentido que la muestra original.

Estas consideraciones llevaron a la teoría molecular del magnetismo, que se debe a Ewing y a Weber. Según esta teoría cada molécula o grupo de átomos de un cuerpo magnético consiste en un imán elemental que goza de libertad para girar alrededor de su centro. Si se coloca un número de pequeños imanes-barra que puedan girar libremente, yuxtapuestos, y se someten luego a un campo magnético cuya intensidad va en aumento, nos encontraremos con que, al principio, el conjunto de imanes gira lenta y continuamente; luego se produce un cambio brusco de sentido y, finalmente, otro giro continuo hasta que todos los imanes se ponen paralelos al campo.

Si se llevan a unos ejes de coordenadas la suma vectorial de las intensidades de los imanes elementales y la intensidad de campo, se obtiene una curva de forma similar a la de la curva de magnetización. Esto se calculó primero y luego se demostró

experimentalmente con un conjunto de 130 imanes colocados en las esquinas de unos cuadrados como en un tablero de ajedrez. La disminución de permeabilidad que se produce cuando la temperatura se eleva al punto de cambio de ferromagnético a paramagnético, que se conoce por punto Curie, se atribuyó a que las fuerzas de agitación térmica a esta temperatura vencían a las fuerzas de atracción magnética.

Esta idea revolucionaria de Ewing no es el todo exacta, pero valió para establecer los criterios necesarios que sirvieron de base a las teorías más avanzadas que se plantearon posteriormente. El cumplimiento de una de sus predicciones -la desaparición de la histéresis en un campo giratorio- mostró su gran valor.

TEORIA DE LOS DOMINIOS.

En 1907 Weiss introdujo la teoría de magnetización de los Dominios. Suponía que un cuerpo ferromagnético está compuesto por muchos "dominios" pequeños, cada uno de ellos imantado hasta la saturación, pero cuyo sentido de imantación se produce al azar. Así pues, cuando el cuerpo no está imantado, los "dominios" se anulan entre sí. Esto sucedió muchos años antes de que se demostrara de manera práctica y directa la existencia de tales "dominios" pero los experimentos de Barkhausen -que se describirán más adelante- dieron la sorprendente confirmación.

El momento magnético de un dominio está determinado por su volumen y por la magnitud y el sentido de la imantación. Por tanto, se puede producir una alteración en el momento al cambiar el volumen o el sentido. El cambio de volumen puede producirse, pues se supone que los límites o paredes del dominio se pueden desplazar lateralmente. Se supone que estos cambios pueden ser

reversibles o irreversibles. En la figura III.11 se ilustran estos posibles cambios.



FIG III.11.- DESPLAZAMIENTO DE LOS LÍMITES DE UN DOMINIO PRODUCIDO POR UN CAMPO MAGNETICO

Durante la imantación se producen estos cambios en grados diferentes en las tres etapas principales del proceso:

- 1.- Porción inicial - desplazamiento de límites reversible
- 2.- Porción Media - desplazamiento de límites irreversible (Sacudidas Barkhausen).
- 3.- Porción superior - rotación irreversible

Estos cambios se ilustran en la figura III.12

Aunque los dominios pueden representarse adecuadamente en forma cúbica a fines de simple interpretación de la teoría, en la práctica parecen presentar más bien forma de agujas.

El sentido de imantación de un dominio está gobernado por la estructura cristalina y por el estado de tensión del material, así como por el sentido del campo que se aplica. Un dominio en el hierro ocupa un volumen de unos 10×10^{-9} cm cúbicos. Weiss suponía que estaban presentes fuerzas interatómicas de gran magnitud, que

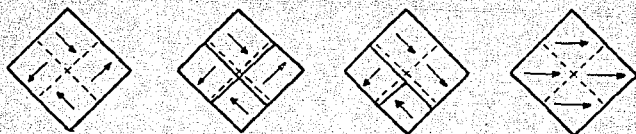


FIG 111.12.- CAMBIOS EN LA CONFIGURACION DE LOS DOMINIOS DEBIDOS A UN CAMPO MAGNETICO

contribuyen al efecto alineador del campo aplicado. La existencia de tales fuerzas no era conocida cuando Weiss postuló esa teoría pero en 1928 Heisenberg dió una explicación en la teoría cuántica aplicada a las fuerzas de intercambio entre electrones de átomos adyacentes.

EFFECTO BARKHAUSEN.

Se puede demostrar que la teoría de los dominios según la desarrolló Weiss puede explicar los fenómenos magnéticos asociados con la imanación y el punto Curie. Fue algunos años antes de que hubiera pruebas prácticas de la existencia de los dominios.

Barkhausen descubrió en 1919 que la imanación de un trozo de hierro no tiene lugar de un modo continuo, sino que se produce a sacudidas, lo que se conoce actualmente como efecto Barkhausen. Se puede demostrar este efecto arrollando una bobina captadora y conectándola a un amplificador y a un auricular de teléfono. Cuando se está imanando la muestra se oye en el auricular una

sucesión de chasquidos, que corresponden a la parte de elevación rápida (segunda) de la curva de magnetización, para la que la teoría de los dominios postula desplazamientos irreversibles de los límites (Fig 111.13).

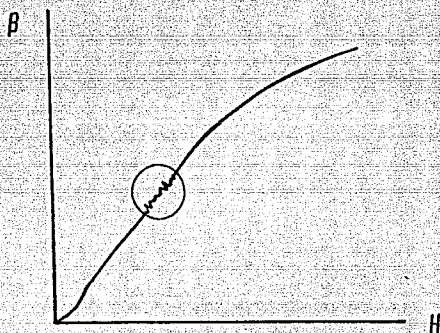


FIG 111.13.- EFECTO BARKHAUSEN

INFLUENCIA DE LA ESTRUCTURA CRISTALINA SOBRE LAS PROPIEDADES MAGNÉTICAS.

La influencia de la estructura cristalina sobre las propiedades magnéticas es de gran importancia y se le debe considerar desde varios puntos de vista como son:

a) La separación de los átomos

- b) La dirección de los ejes de los cristales
- c) La deformación de la red
- d) El tamaño de los cristales

Para comprender esta materia es esencial tener algunos conocimientos generales sobre la estructura del átomo y de los tipos de formaciones cristalinas.

LA ESTRUCTURA ATOMICA Y EL MAGNETISMO.

Es bien sabido que se puede considerar al átomo como un núcleo central con carga positiva y rodeado de electrones que no sólo se mueven alrededor del núcleo describiendo órbitas definidas, sino que también giran en torno a sus propios ejes. Se ha averiguado que el magnetismo está asociado casi enteramente con el movimiento de rotación (spin) de los electrones y apenas con su movimiento orbital.

Unos electrones giran en un sentido y otros en el opuesto; en los átomos de la mayor parte de los elementos, estas rotaciones están equilibradas dentro de cada órbita, de modo que las imantaciones debidas a las rotaciones se anulan y el material es no magnético. Sin embargo, sucede que en el hierro, en el níquel y en el cobalto, las rotaciones de sus electrones en una de sus órbitas no están equilibradas y, por consiguiente, estos elementos muestran características magnéticas.

En un átomo de hierro hay cuatro capas principales (conocidas por K, L, M N, o numeradas 1, 2, 3, 4 que corresponden al número cuántico de Bohr) y siete subcapas. La más exterior de las subcapas contiene dos electrones que se convierten en los electrones "libres" responsables de la conducción cuando los

átomos se unen para formar un metal. La siguiente órbita yendo hacia el interior contiene seis electrones, cinco de los cuales giran en un sentido y uno en el contrario. En todas las demás órbitas las rotaciones están equilibradas. Por lo tanto, la segunda órbita contando de fuera hacia dentro es la responsable de las propiedades magnéticas del hierro. Algo semejante sucede con el níquel y el cobalto.

ESTRUCTURA CRISTALINA.

La separación de los átomos de un cuerpo magnético está gobernada en gran parte por su estructura cristalina y el comportamiento magnético de una masa de material magnético es la suma total de los efectos de los cristales simples. Por tanto, la estructura cristalina tiene una importancia primordial, teniendo particular interés en nuestro caso.

Estos tres elementos cristalizan de tres modos distintos, cada uno de los cuales es una forma simple y conocida. La simplicidad de su estructura permite hacer ciertas previsiones de sus propiedades magnéticas; los hallazgos teóricos han demostrado estar muy de acuerdo con los resultados experimentales.

DEFORMACION DE LA RED CRISTALINA.

La red cristalina se puede deformar de uno o de varios modos; por esfuerzos internos, por ejemplo, como los que están asociados con el efecto magnetoestrictivo, o por esfuerzos aplicados al trabajar el material, por la presencia de impurezas. Hay dos clases de impurezas: las producidas por átomos de carbono o de oxígeno que pueden penetrar en la red cristalina del hierro o de otro material magnético y las producidas por átomos "extraños" que reemplazan a algunos átomos de hierro y, al ser

su tamaño diferente, sólo pueden hacerlo forzando la red. Por lo que se ha dicho sobre la separación óptima de los átomos magnéticos y sobre las direcciones de fácil imantación dentro de una red cristalina, se apreciará que la deformación de un cristal puede influir fuertemente sobre las propiedades magnéticas.

EFFECTO MAGNETOESTRICTIVO.

La imantación de un material ferromagnético cambia a menudo las dimensiones lineales en el sentido en que se aplica el campo (efecto Joule). También la compresión o el alargamiento longitudinal producen cambios en la permeabilidad (efecto Villari). En ambos casos el cambio de volumen es muy pequeño. El material que se alarga cuando es imantado (magnetoestricción positiva) aumentará su permeabilidad al ser alargado, mientras que el que se contrae cuando es imantado (magnetoestricción negativa) mostrará un descenso en su permeabilidad al ser alargado.

El coeficiente magnetoestrictivo se define como la dilatación lineal por unidad de longitud que se produce al aplicar un campo magnético.

EFFECTO DEL TRABAJO EN FRIO SOBRE LAS PROPIEDADES MAGNETICAS.

La fabricación de materiales magnéticos blandos puede implicar una apreciable cantidad de "trabajo en frío", como laminación, estirado, etc., operaciones en las que por lo general se somete al material a esfuerzos que sobrepasan su límite elástico. Se produce la deformación de la red cristalina cuyo resultado es, ordinariamente, la disminución de las propiedades magnéticas, es decir, reducción de la permeabilidad y aumento de la pérdida por histéresis. La orientación del grano

producido por la laminación en frío constituye una excepción. La deformación "plástica" a que da lugar el mecanizado se puede eliminar con un tratamiento térmico a temperatura conveniente, con lo que se mejora el comportamiento magnético.

DEFORMACIÓN DE LA RED PRODUCIDA POR EL TEMPLE.

La presencia de tensiones internas en los materiales magnéticos va en perjuicio de su utilización en los casos en que se requiere que la permeabilidad sea alta y que la pérdida por histéresis sea baja. Para los imanes permanentes el caso es especial, porque deben tener un gran ciclo de histéresis para que la remanencia y la fuerza coercitiva sean elevadas.

Todos los aceros templados y enfriados por inmersión pertenecen al grupo que se conoce por ferrítico. Otro grupo de materiales usados en imanes permanentes son las aleaciones templadas por dispersión. Comprende los conocidos imanes Alnico y Alcomax. Como su nombre lo indica, el primero contiene aluminio, níquel y cobalto, además de hierro. Controlando la velocidad de enfriamiento se detiene la precipitación, en cuyo caso la red cristalina está sometida a un gran esfuerzo, lo que da lugar a una remanencia y a una coercitividad muy altas.

Cuando se enfrían materiales de este tipo pasando por la temperatura Curie en un campo magnético, la remanencia y el producto de energía β -H aumentan mucho en el sentido en que se aplica el campo. En esto se basa la fabricación de imanes permanentes "direccionales", cuyo producto de energía en la dirección preferente es muy elevado.

INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE LOS CRISTALES EN LAS PROPIEDADES MAGNÉTICAS.

En un compuesto químicamente puro, el tamaño de los cristales que lo componen depende del procedimiento empleado para formar el material, y muy en particular, de las condiciones en que se ha efectuado el tratamiento térmico. Es importante notar que si el material magnético se encuentra en forma de polvo fino, no se deduce necesariamente que cada partícula está constituida por un solo cristal. Con un tratamiento adecuado se forman cristales de metal muy grandes que permiten cortar muestras en las que los ejes son paralelos a los ejes principales del cristal, con lo que se facilita la determinación de las propiedades magnéticas en esas direcciones.

Se entiende de aquí que es conveniente producir estructuras cristalinas tan grandes como sea posible, puesto que en ciertos materiales -como chapas de acero al silicio- se ha observado que los cristales de gran tamaño están con frecuencia relacionados con una permeabilidad alta y unas pérdidas por histéresis bajas.

MATERIALES MAGNÉTICOS BLANDOS.

La función de los materiales magnéticos blandos está relacionada invariablemente con el deseo de aumentar la inductancia de una bobina o de proporcionar la concatenación lo más exacta posible entre la acción de dos o más bobinas.

En los relevadores y en las bobinas de choque se emplea una sola bobina, mientras que el transformador es un ejemplo clásico de la aplicación de más de un devanado a un sólo núcleo. Es

evidente que uno de los requisitos que ha de cumplir un material magnético para estos fines es que tanto el magnetismo residual como la coercitividad sean lo más bajos posible. En función del ciclo de histéresis esto significa que el ciclo de histéresis será la mínima posible. La permeabilidad debe ser alta, o sea que los lados del ciclo deben tener mucha pendiente y la densidad de flujo de saturación debe ser elevada; en otras palabras, el ciclo debe ser alto y estrecho.

Lo que se requiere de un material magnético "blando" es la antítesis de lo que se requiere a un imán permanente o "duro". Al principio se halló que los materiales que tenían las propiedades requeridas eran maleables y dúctiles, es decir, mecánicamente blandos, y que si el material había sido endurecido por deformación durante su elaboración era necesario eliminar la tensión mediante un recocido antes de poder obtener las propiedades más útiles. No es cierto que los materiales cuya pérdida por histéresis es mínima son invariablemente los más dúctiles; la aleación hierro-silicio, por ejemplo, es mecánicamente más dura que el hierro comercialmente puro, pero su pérdida por histéresis es menor. Sin embargo, aún se acostumbra a llamar a los materiales de pocas pérdidas "blandos" en función de sus características magnéticas.

EVOLUCION DE LOS MATERIALES MAGNETICOS BLANDOS.

Las valiosas propiedades del hierro como material magnético blando son conocidas desde hace muchos años; también se sabía que mejoraban, por lo general, purificando el metal.

El creciente desarrollo de los equipos de corriente alterna puso de manifiesto la necesidad de conseguir algunas mejoras en lo que respecta a las pérdidas por corrientes parásitas. La

resistividad del hierro es baja (unos 10 microhms-cm). La adición de otros elementos aumenta su resistividad y favorece la reducción de la pérdida por corrientes parásitas. Las investigaciones a principio de siglo llevaron a la utilización a gran escala de acero al silicio, aleación que sigue teniendo gran demanda actualmente. La ventaja que esta aleación tiene sobre el hierro comercialmente puro estriba en que se reduce la pérdida por corrientes parásitas y la pérdida por histéresis. Presenta la desventaja de que se reduce la β de saturación al aumentar el contenido de silicio.

Como consecuencia de las extensas investigaciones llevadas a cabo en Los Estados Unidos, se dió otro paso importante en la producción de los materiales magnéticos con las aleaciones Hierro-níquel, que se conocen universalmente como Permalloy. Estas aleaciones, en especial las que contienen alrededor de 80% de níquel, presentan una permeabilidad muy alta y una pérdida por histéresis muy baja, que se combina con una pérdida por corrientes parásitas satisfactoriamente baja (y que aún pueden reducirse añadiendo un tercer elemento, molibdeno por ejemplo). La β de saturación es baja (aproximadamente la mitad que la del hierro) pero pueden prestar un gran servicio en numerosas aplicaciones, especialmente en equipos de telecomunicación.

CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS MATERIALES MAGNETICOS BLANDOS.

A continuación se resumen las características más importantes de los materiales magnéticos blandos, características que deben ser cuidadosamente estudiadas para hacer una correcta selección de acuerdo con la aplicación deseada. Se incluye también el nombre comercial por tratarse de materiales comercialmente disponibles y como complemento y guía las aplicaciones usuales.

HIERRO MAGNETICO.- μ de saturación alta. Permeabilidad razonablemente buena y pérdida por histéresis baja (mejora al purificar el material). Baja resistividad eléctrica (en consecuencia, mucha pérdida por corrientes parásitas). Bajo costo. Se le conoce como Hierro Sueco o Armco, dependiendo del fabricante. Se aplica en piezas polares y culatas de los equipos para probar imanes. También se usan en electroimanes.

HIERRO FUNDIDO.- B de saturación bastante alto. Permeabilidad baja y pérdidas por histéresis más bien alta. Mayor resistividad que el hierro magnético. Bajo costo. Se usa en toda clase de máquinas y en frenos de vehículos.

HIERRO-SILICIO.- B de saturación ligeramente inferior a la del hierro magnético. Permeabilidad alta con altas intensidades de campo. Pérdida por Histéresis baja. Pérdidas por corrientes parásitas alrededor de $1/5$ la del hierro. Costo razonablemente bajo. Laminando el material en frío se mejoran considerablemente la permeabilidad y la pérdida por histéresis en la dirección de laminación. En bajo contenido de silicio se le conoce como RTB No.1 y se usa en motores, generadores y balastos para iluminación con tubos fluorescentes. En contenido medio de silicio (2%) se llama R.T.B. No. 2 y se usa en alternadores. En contenido alto de silicio se aplica en transformadores de potencia, motores, generadores y balastos para alumbrado (4%Si), conocido como R.T.B. No. 4. En muy altos porcentajes de silicio (9%) se usa en transformadores especiales en que se requieren pocas pérdidas (pequeños transformadores). Para transformadores de muy pocas pérdidas y reactancias con campos imantadores de poca intensidad se usan materiales más costosos como el Crystalloy y el Alphasil.

75-80% HIERRO-NIQUEL.- β de saturación baja. Permeabilidad muy alta, pérdida por histéresis baja. Pérdida por corrientes parásitas baja. Caro. Se le conoce comercialmente como Mumetal o Permalloy C. Se aplica en Transformadores de Corriente y de Potencial, voltímetros y ampérmetros de hierro móvil; Pantallas para protección magnética. Transformadores de audio-frecuencia. Relevadores sensibles. Carga continua en líneas telefónicas. Culatas para los aparatos probadores de imanes.

NIQUEL-HIERRO al 50%.- β de saturación intermedia entre el Si-Fe y el de 80% Ni-Fe. La permeabilidad y la pérdida por histéresis son peores que las del 80% Ni con bajas intensidades de campo. Más apropiadas para intensidades medias. La permeabilidad del material con grano orientado es mucho más elevada en la dirección preferente. Baja pérdida por corrientes parásitas. Algo más barato que el 80% Ni-Fe. Se le llama Radiometal o Permalloy B. Se aplica en pequeños transformadores que operan simultáneamente con corrientes alterna y continua. Transformadores y reactancias de audio. Relevadores de acción rápida. En grano orientado se usa en aplicaciones especiales como amplificadores magnéticos y transformadores de radar.

36% NIQUEL-HIERRO.- β de saturación baja. La permeabilidad y la pérdida por histéresis son inferiores a las del 50% Ni-Fe. Elevada resistividad eléctrica; pérdida por corrientes parásitas inferior a las de otros materiales metálicos. Más barato que el 50% Ni-Fe. Llamado Rhometal o Permalloy D. Muy apropiado para frecuencias de 3 a 200 Khz. Transformadores de H.F. y de impulsos. Chapas laminadas para estatores de generadores de H.F. Bobinas deflectoras de tubos de rayos catódicos.

50% COBALTO-HIERRO.- Máxima β de saturación. Permeabilidad

razonablemente alta pero inferior a la del Ni-Fe, sobre todo con intensidades de campo bajas. Pérdida por histéresis más bien alta. Pérdida por corrientes parásitas superior que para el Si-Fe y Ni-Fe. Caro. Nombrado Permendur. Se usa esencialmente en diafragmas de auriculares telefónicos.

FERRITAS SINTERIZADAS.- B de saturación muy baja. Permeabilidad baja en comparación con los metales. Pérdida por histéresis razonablemente baja. Resistividad muy alta en comparación con los metales. Densidad baja. Algo caras. No se pueden conseguir en chapas. También conocidas como Ferroxcube. Se aplican sobre todo en bobinas de telecomunicación.

CAPITULO IV

DISEÑO DEL REACTOR

FLUJOGRAMA DE DISEÑO.

En el estudio y recopilación de información acerca de reactores es difícil lograr una clasificación estructurada de tal manera que concuerden perfectamente las aplicaciones con el tipo de reactor a utilizar, porque en muchas ocasiones se utilizan dos tipos de reactores para una misma aplicación. Además, cada autor o fabricante trata de defender el tipo de reactor que ha estudiado o desarrollado presentándolo como la mejor opción para varias aplicaciones.

Para dar forma a esta parte, hemos clasificado a los reactores por el tipo de núcleo, resaltando las características más sobresalientes:

	Núcleo de Aire	Reactancia Baja No Saturables Inductancia Constante Rango de Operación Grande
TIPO DE NUCLEO	Núcleo con Entrehierros	Reactancia Media Inductancia constante en un radio o rango pequeño de corriente.
	Núcleo Cerrado de Hierro	Reactancia Alta Saturables Inductancia variable con la corriente.

El primer tipo de reactores (Núcleo de Aire) tienen un

número de aplicaciones bastante grande y han sido los más estudiados. Los del segundo grupo (con entrehierros) tienen mucha aplicación debido a que sus características son intermedias entre los otros dos tipos. Este tipo de reactores ha sido fabricado en México obteniéndose resultados satisfactorios cercanos a los del diseño. Por último, los reactores con núcleo cerrado de hierro tienen una aplicación bastante limitada ya que los otros tipos son superiores.

Los tipos anteriores de reactores pueden clasificarse en dos clases, según su sistema de enfriamiento: enfriados en aire y enfriados en aceite. A continuación se mencionan brevemente las principales características de cada clase.

ENFRIAMIENTO DE REACTORES.

La selección del enfriamiento no depende sólo de la carga térmica, sino que también es importante considerar las condiciones del medio, si es interior o exterior, si existen polvos o sustancias químicas que perjudiquen a los materiales de construcción, el nivel de voltaje que requieren los aislamientos, y las limitaciones de espacio.

En el diseño de reactores sumergidos en aceite, la influencia de materiales magnéticos alrededor de la bobina debe ser evitado por medio de blindajes, ya que el tanque contenedor del aceite es una trayectoria adicional que tomará el flujo magnético. Esto tiene efectos en la reactancia y en las pérdidas del reactor porque es muy probable que el tanque se sature. En los reactores secos se usan blindajes con el fin de ahorrar espacio. En los reactores sumergidos en aceite esto se hace necesario para obtener una operación adecuada y lograr un diseño eficiente.

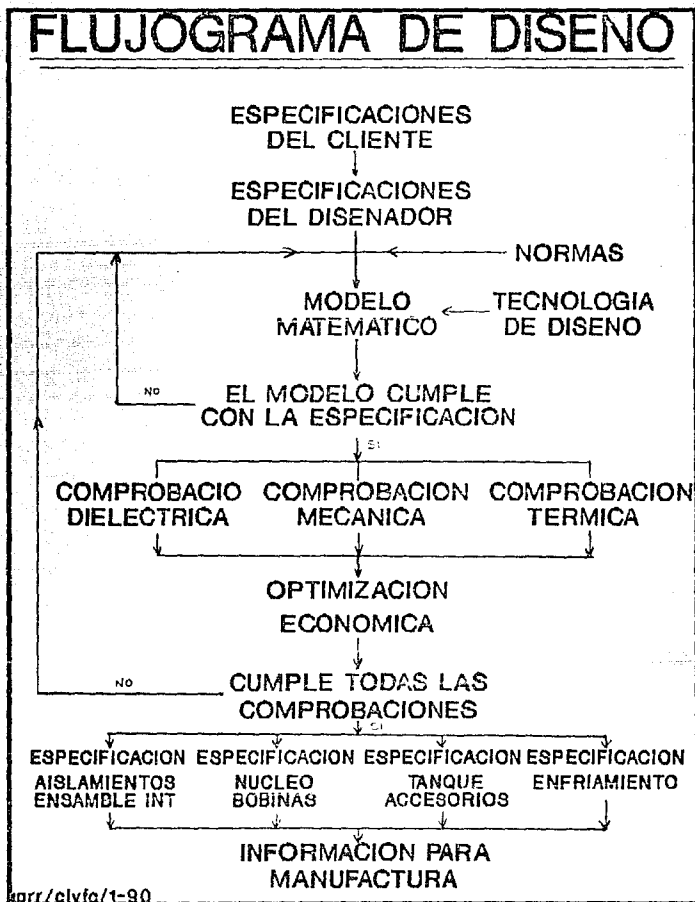
En general, los reactores enfriados en aceite son más ventajosos que los enfriados en agua y la siguiente es una relación de las características generales.

- a) Niveles de voltaje más altos, aprovechando las propiedades aislantes del aceite.
- b) Reducción de espacio utilizado. No hay que guardar distancias mínimas a partes magnéticas ni existen problemas con lazos cerrados de materiales conductores.
- c) Aplicaciones en medios adversos como ambientes con sustancias químicas o polvos.
- d) Mayor resistencia en exteriores. Estas dos últimas son debidas a la protección que proporciona el tanque.
- e) Alta capacidad térmica, debida principalmente a las características refrigerantes del aceite.
- f) Los enfriados en aceite son de mayor costo.

Aunque cada tipo de reactor, de acuerdo con su construcción, su principio de funcionamiento y sus características generales debe ser construido con diferente técnica, todos los diseños siguen cierto procedimiento general, como puede verse en la figura IV.

En nuestro caso particular seguiremos el siguiente procedimiento:

FIGURA IV.1



- 1.- Establecer las definiciones de norma, ya que es indispensable manejar el mismo lenguaje técnico.
- 2.- Establecer los requisitos a cumplir de acuerdo con la misma norma nacional.
- 3.- Tabular los parámetros normalizados para cada lámpara.
- 4.- Tabular los valores normalizados y derivados incluyendo tolerancias para cada lámpara.
- 5.- Seleccionar la mejor alternativa, como puede ser: Núcleo de aire con ajuste por capacitor-resistor, núcleo de hierro con entrehierros fijos con ajuste por capacitor-resistor, núcleo de hierro con entrehierro variable tipo émbolo, etc.
- 6.- Selección de tipo de núcleo (Columna o Acorazado)
- 7.- Selección preliminar de dimensiones del núcleo de hierro
- 8.- Selección definitiva de acuerdo con los materiales comerciales disponibles y fabricados en México.
- 9.- Obtención de Curvas ν -B y B-H mediante permeámetro implementado (prueba electromagnética).
- 10.- Cálculo del número de vueltas para máxima impedancia de norma.
- 11.- Cálculo del número de vueltas para máxima impedancia.

- 12.- *Cálculo del calibre y aislamiento del conductor para máxima corriente y tensión.*
 - 13.- *Cálculo del número de vueltas por capa y número total de capas.*
 - 14.- *Cálculo del capacitor y resistor requerido para ajuste de factor de potencia para cada lámpara.*
 - 15.- *Cálculo de pérdidas eléctricas y magnéticas (máximas).*
 - 16.- *Cálculo de potencia por unidad de área por disipar.*
 - 17.- *Cálculo de elevación de temperatura en aceite y/o en aire.*
 - 18.- *Cálculo del gabinete (o tanque en caso de ser en aceite).*
 - 19.- *Cálculo de la resistencia mínima de aislamiento (en aceite y en aire).*
 - 20.- *Cálculo del Blindaje (Opcional).*
-

DEFINICIONES Y REQUISITOS DE NORMA.

La norma NOH-J-197-1977 es la norma nacional que establece los requisitos que deben cumplir los reactores patrón para lámparas fluorescentes. Las siguientes son las principales definiciones que deben conocerse para entender los requisitos establecidos por esta norma.

REACTOR PATRON.

Un reactor patrón es un inductor, con o sin un resistor adicional en serie, fabricado y mantenido con el propósito de suministrar valores normalizados de comparación para la prueba de balastos y lámparas, y se caracteriza por tener impedancia constante dentro de un amplio margen de corriente de operación y también por tener características constantes que no son influenciadas por el tiempo, temperatura, magnetismo circunstancial, etc.

CORRIENTE PATRON.

La corriente patrón es el valor de corriente especificado para una lámpara determinada, en la norma correspondiente. Es normalmente el mismo valor de corriente que el correspondiente para el cual la lámpara ha sido especificada.

Como el Reactor Patrón es representativo de la impedancia de las fuentes de potencia de lámpara instalada, no es necesario cambiar los valores de corriente a menos que cambios mayores en la Norma requieran de modificaciones en la impedancia del Reactor Patrón. Por esta razón, las características del Reactor Patrón se

especifican en términos de y con referencia a la corriente patrón.

REACTOR PATRON DE IMPEDANCIA VARIABLE.

Este tipo de Reactor Patrón es un inductor ajustable y un resistor variable adecuado en serie. Estas dos componentes se diseñan usualmente de tal manera que la combinación resultante tiene una capacidad de corriente y un rango de impedancia suficiente para usarse con un número de diferentes tamaños de lámparas. La impedancia y el factor de potencia de la combinación reactor-resistor se ajusta o se confronta cada vez que la unidad se use.

RECIPIENTE.

El Reactor Patrón debe estar contenido dentro de una caja metálica para su protección mecánica. En el caso del tipo impedancia variable, el resistor serie no necesita estar dentro del mismo recipiente que el reactor.

BLINDAJE MAGNETICO.

Un Reactor Patrón blindado magnéticamente, debe estar diseñado y construido de tal manera que su impedancia a la corriente patrón no cambie más de un 0.2% cuando una placa de 12.5 mm de espesor de acero magnético se coloque de 22 a 25 mm de cualquiera de las caras del recipiente del Reactor.

ESTABILIDAD DE LA IMPEDANCIA.

Los reactores de impedancia variable se ajustan para cualquier valor de impedancia y deben ser capaces de mantener

esta calibración durante periodos normales de uso. Por esta razón el núcleo móvil (o cualquier otro medio de ajuste) debe incluir algún sistema para mantenerlo fijo mecánicamente en la posición deseada.

PARAMETROS ELECTRICOS.

La tensión nominal de alimentación, la corriente patrón y la impedancia deben estar de acuerdo con los valores especificados en la Tabla IV.1 . La impedancia puede estar dentro de más o menos el .4%.

LINEALIDAD.

Para cualquier valor de corriente del 50 al 115% de la corriente patrón, la impedancia del Reactor Patrón debe estar dentro de 3% del valor especificado en la Tabla IV.1 .

FACTOR DE POTENCIA.

Es la relación de pérdida en watts entre volt-amperes del reactor a la corriente patrón y a la frecuencia de operación y debe estar también de acuerdo con la Tabla mencionada.

TEMPERATURA.

Cuando se opera la porción inductiva del reactor Patrón al aire libre a una temperatura ambiente de $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ a la corriente patrón y frecuencia nominal, el incremento de temperatura del devanado cuando se ha estabilizado, medido por el método de resistencia no debe ser mayor de 25°C .

TABLA IV.1

CARACTERÍSTICAS DEL REACTOR PATRON A			50 HERTZ			TIP0 DE LAMPARA			TENSION CORRIENTE IMPEDANCIA FACTOR			NOMINAL PATRON 60 HZ 500V DE			VOLTS AMPERES ONMS POTENCIA		
40	WATTS	1-12	118	0.155	810	118	0.155	810	118	0.155	810	118	0.155	810	118	0.155	810
6	WATTS	1-5	118	0.145	675	118	0.145	675	118	0.145	675	118	0.145	675	118	0.145	675
8	WATTS	1-5	118	0.150	550	118	0.150	550	118	0.150	550	118	0.150	550	118	0.150	550
14	WATTS	1-12	118	0.190	275	118	0.190	275	118	0.190	275	118	0.190	275	118	0.190	275
15	WATTS	1-2	118	0.100	305	118	0.100	305	118	0.100	305	118	0.100	305	118	0.100	305
15	WATTS	1-2	118	0.100	305	118	0.100	305	118	0.100	305	118	0.100	305	118	0.100	305
20	WATTS	1-12	118	0.180	240	118	0.180	240	118	0.180	240	118	0.180	240	118	0.180	240
25	WATTS	1-12	118	0.185	210	118	0.185	210	118	0.185	210	118	0.185	210	118	0.185	210
30	WATTS	1-8	238	0.155	548	238	0.155	548	238	0.155	548	238	0.155	548	238	0.155	548
40	WATTS	1-12	238	0.110	438	238	0.110	438	238	0.110	438	238	0.110	438	238	0.110	438
ARRANQUE CON DISPOSITIVO ARRANCADOR																	
4	WATTS	1-5	118	0.155	810	118	0.155	810	118	0.155	810	118	0.155	810	118	0.155	810
6	WATTS	1-5	118	0.145	675	118	0.145	675	118	0.145	675	118	0.145	675	118	0.145	675
8	WATTS	1-5	118	0.150	550	118	0.150	550	118	0.150	550	118	0.150	550	118	0.150	550
14	WATTS	1-12	118	0.190	275	118	0.190	275	118	0.190	275	118	0.190	275	118	0.190	275
15	WATTS	1-2	118	0.100	305	118	0.100	305	118	0.100	305	118	0.100	305	118	0.100	305
15	WATTS	1-2	118	0.100	305	118	0.100	305	118	0.100	305	118	0.100	305	118	0.100	305
20	WATTS	1-12	118	0.180	240	118	0.180	240	118	0.180	240	118	0.180	240	118	0.180	240
25	WATTS	1-12	118	0.185	210	118	0.185	210	118	0.185	210	118	0.185	210	118	0.185	210
30	WATTS	1-8	238	0.155	548	238	0.155	548	238	0.155	548	238	0.155	548	238	0.155	548
40	WATTS	1-12	238	0.110	438	238	0.110	438	238	0.110	438	238	0.110	438	238	0.110	438
ARRANQUE INSTANTANEO DOS PERROS																	
40	WATTS	1-12	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920
ARRANQUE INSTANTANEO UN PERRO																	
4	WATTS	1-12	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920
6	WATTS	1-12	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920
8	WATTS	1-12	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920
ARRANQUE RAPIDO																	
40	WATTS	1-12	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920
4	WATTS	1-12	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920
6	WATTS	1-12	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920
8	WATTS	1-12	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920
14	WATTS	1-12	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920
15	WATTS	1-2	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920
15	WATTS	1-2	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920
20	WATTS	1-12	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920
25	WATTS	1-12	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920
30	WATTS	1-8	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920
40	WATTS	1-12	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920	430	0.125	920
Los valores dados de impedancia para lámparas de arranque rápido están indicados para uso en circuitos donde el calentamiento separado de cátodos está alineado a 3.5 voltios con conexión susstractiva de los transformadores de cátodo.																	

PARAMETROS ESTABLECIDOS POR LA NORMA.

Los valores especificados por esta norma son aquellos que se han encontrado necesarios para asegurar resultados exactos y reproducibles cuando se están probando ya sea balastros o lámparas.

Como el reactor patrón es representativo de la impedancia de las fuentes de potencia de lámpara instalada, no es necesario cambiar los valores de corriente a menos que cambios mayores en la norma de la lámpara requiera de modificaciones en la impedancia del reactor patrón. Por esta razón, las características del reactor patrón se especifican en términos de y con referencia a la corriente patrón y se encuentran resumidos en la Tabla IV.1 .

Asimismo, en la Tabla IV.2 se concentran los valores establecidos anteriormente para cada lámpara, incluyendo ya las tolerancias y los parámetros eléctricos derivados de los datos primarios.

ALTERNATIVAS DE DISEÑO.

En los diseños con materiales ferromagnéticos hay dos alternativas a seguir: una de ellas es hacer el cálculo teórico de dimensiones, espesor de laminación y propiedades magnéticas para después buscar el material comercial que cumpla mejor con estos requisitos. En el extranjero es tal la gama de materiales magnéticos que es factible conseguir el material idóneo para cada aplicación. Se dispone siempre de información técnica muy completa que proporciona todas las características necesarias para una rápida selección. Las diferencias entre las propiedades reales del material disponible y las propiedades proyectadas en

TABLA IV.2

f/Lamp.	Volts	I nom		Z		XL		L		R				
		(A)	max	nom	min	max	min	max	min	max	min			
1	110	136	1813.24	810	1808.76	1810.94	1807.71	1804.48	12.1510	12.1474	12.1339	120.993	120.75	120.44
2	110	145	1677.7	675	1672.3	1675.79	1673.07	1670.40	11.6575	11.6534	11.6422	120.027	120.675	120.4
3	110	160	1522.2	520	1517.8	1520.64	1518.45	1516.25	11.4600	11.4567	11.4479	141.415	141.25	141.01
4	110	180	1216.1	270	1213.9	1215.32	1214.22	1213.12	10.7307	10.7273	10.7244	120.607	120.623	120.54
5	110	300	1306.22	306	1303.71	1305.33	1304.14	1302.92	10.0099	10.0057	10.0035	123.925	123.975	123.7
6	110	300	1290.95	290	1289.01	1290.79	1289.37	1288.35	10.0373	10.0324	10.0302	112.072	112.117	112.0
7	236	36	1520.19	540	1518.00	1520.64	1518.45	1516.27	11.4875	11.4844	11.4748	141.761	141.740	141.5
8	236	40	1440.75	439	1437.24	1439.51	1437.76	1436.01	11.1633	11.1611	11.1523	133.025	133.015	132.75
9	430	425	1923.60	920	1916.32	1921.07	1917.43	1913.73	12.4431	12.4404	12.4327	169.735	169.740	169.4
10	430	425	1923.60	920	1916.32	1921.07	1917.43	1913.73	12.4431	12.4404	12.4327	169.735	169.740	169.4
11	525	425	1104.4	1100	1095.6	1101.2	1096.9	1092.5	12.9211	12.9206	12.9179	120.63	120.61	120.5
12	625	425	1125.1	1210	1124.8	1121.5	1123.5	1121.2	13.3722	13.3716	13.3671	125.394	125.39	125.1
13	236	40	1440.75	439	1437.24	1439.51	1437.76	1436.01	11.1633	11.1611	11.1523	133.025	133.015	132.75
14	230	100	1749.97	244	1745.02	1744.79	1743.51	1742.33	10.6479	10.6463	10.6423	110.371	110.3	110.17
15	300	150	1472.71	179	1471.23	1470.20	1470.49	1471.73	10.4757	10.4743	10.4715	113.470	113.425	113.3
16	300	150	1316.75	315	1313.74	1315.36	1314.11	1312.86	10.0355	10.0330	10.0281	123.719	123.63	123.5
17	360	150	1197.70	197	1196.21	1197.23	1196.44	1195.25	10.5774	10.5760	10.5717	114.734	114.73	114.7
18	400	150	1416.65	145	1413.54	1415.49	1413.13	1412.17	10.1075	10.1052	10.1022	116.129	116.123	116.1
19	400	150	1215.06	215	1214.14	1215.25	1214.39	1213.53	10.5549	10.5531	10.5522	116.102	116.105	116.0
20	117	300	1225.9	225	1224.1	1225.25	1224.35	1223.45	10.0975	10.0951	10.0927	116.929	116.935	116.0
21	117	425	1235.94	225	1234.02	1235.27	1234.32	1233.40	10.0740	10.0719	10.0691	117.625	117.629	117.5
22	236	40	1440.75	439	1437.24	1439.51	1437.76	1436.01	11.1633	11.1611	11.1523	133.025	133.015	132.75

el diseño generalmente son muy pequeñas, por lo que se pueden hacer con facilidad los ajustes necesarios.

El segundo camino a seguir es hacer un cálculo aproximado de características generales del material idóneo para hacer una primera discriminación general. A partir de aquí se escoge el material que cumpla con las dimensiones recomendadas por la práctica para hacer ya la selección tentativa. En este caso (como en México) no se dispone de información completa ya que las hojas técnicas proporcionadas por los fabricantes nacionales son muy incompletas. En este caso se requiere entonces de obtener mediante ensayos en laboratorio las características más necesarias (como permeabilidad, por ejemplo). Estas pruebas se realizan sobre núcleos específicos, es decir de dimensiones preseleccionadas. Primero se hace el dimensionado del núcleo y después las pruebas electromagnéticas para comprobar que cubre los requisitos de diseño.

DIMENSIONADO DEL NUCLEO.

En un reactor serie no puede partirse de la potencia absorbida por una carga inexistente, pero hay una energía absorbida por el núcleo que puede obtenerse como sigue:

Cuando una corriente instantánea de I amperes circula por una bobina de L Henrys y no es apreciable la resistencia, la potencia instantánea es ϵI watts, cuando las unidades de ϵ e I son volts y amperes. Durante un intervalo de tiempo dt , la energía almacenada en el campo es:

$$dW = \epsilon i dt \quad (\text{Ecu. IV.}).$$

Ahora, de la ecuación III.18:

$$v = L \frac{di}{dt}$$

de donde se tiene que:

$$dW = \left[L \frac{di}{dt} \right] i dt = L i di \quad (\text{Joules})$$

$$W = \int_0^I L i di = \frac{L}{2} i^2 \int_0^I =$$

$$W = \frac{1}{2} L I^2 \quad (\text{Joules}) \quad (\text{Ec IV.2})$$

donde L es la inductancia en Henrios e I es la corriente en amperes. De relaciones prácticas se ha obtenido la curva de la figura IV.2. en la que, entrando con el producto $L I^2$ se encuentra la sección mínima del núcleo para la relación ordinaria de entrehierro a longitud magnética media de 0.003 o sea:

$$\frac{l_e}{l_m} = 0.003$$

Una vez conocida el área del núcleo A_n se entra con este dato en la gráfica IV.3 para obtener en la ordenada la cantidad de amperes-vuelta necesarios.

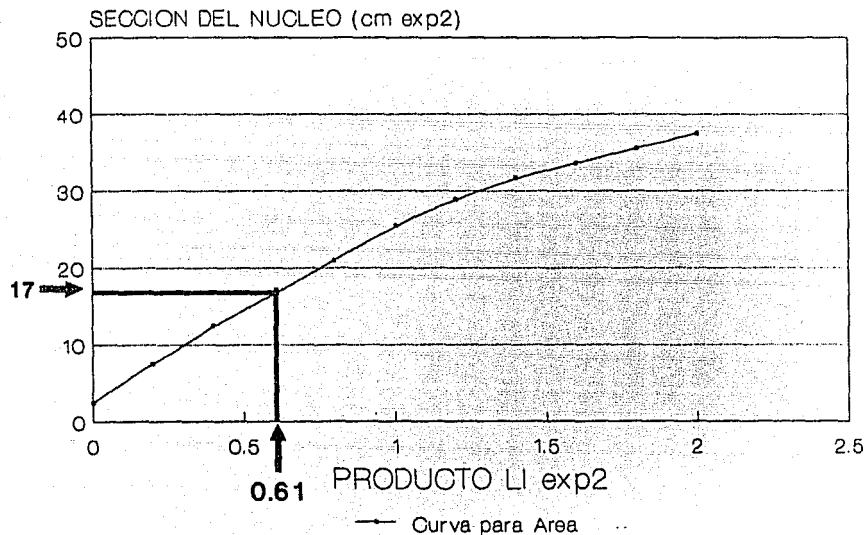
Para nuestro caso el punto crítico de acuerdo con la norma es donde el producto $L I^2$ es mayor; esto sucede con la lámpara T-12 arranque instantáneo de 2.44 m cuya corriente es de 0.425 amperes con impedancia de 1280 ohms y f.p. de 0.075. Con estos datos se tiene lo siguiente:

$$R = f.p. \cdot Z = (0.075) (1280) = 96 \Omega$$

$$XL = \text{sen} (\text{arc cos } 0.075) Z = 1276.39 \Omega$$

$$\text{o } XL = (Z^2 - R^2)^{1/2} = 1276.39 \Omega$$

SECCION DE NUCLEO PARA REACTORES CON RELACION DE ENTREHIERRO 0.003



agrr/clyfc/10-89

FIGURA IV.2

512

$$\text{entonces } L = \frac{XL}{W} = \frac{1276.39}{377} = 3.386 \text{ Hy}$$

$$L I^2 = (3.386) (0.425^2) = 0.6115$$

Entrando con este dato en la figura IV.2 se obtiene una sección mínima de 17 cm². Ahora con este nuevo valor se obtiene la Fmm total usando la gráfica IV.3 de donde resultan 640 ampere-vueltas.

$$\text{Haciendo } N = \frac{N I}{I} = \frac{640}{0.425} = 1505 \text{ vueltas}$$

Para la sección del conductor a emplear en el bobinado podemos hacer el cálculo de su sección, pues conocemos la corriente máxima que circulará por él, asumiendo una densidad de corriente J de 2 amp/mm², valor recomendado en la práctica. Para evitar hacer operaciones o referirnos a las fuentes citadas en la bibliografía, adjuntamos la Tabla IV.3 que resuelve el problema directamente.

De la norma se encuentra la corriente máxima que deberá manejar nuestro reactor (1.5 Amperes) de lo que resulta, consultando la Tabla anterior, un conductor de 0.785 mm² con diámetro de 1 mm.

Con la ecuación empírica

$$S_v = N D_c^2 \quad (\text{Ec IV.3})$$

DETERMINACION DE AMPERE-VUELTAS PARA REACTORES CON NUCLEO DE ACERO

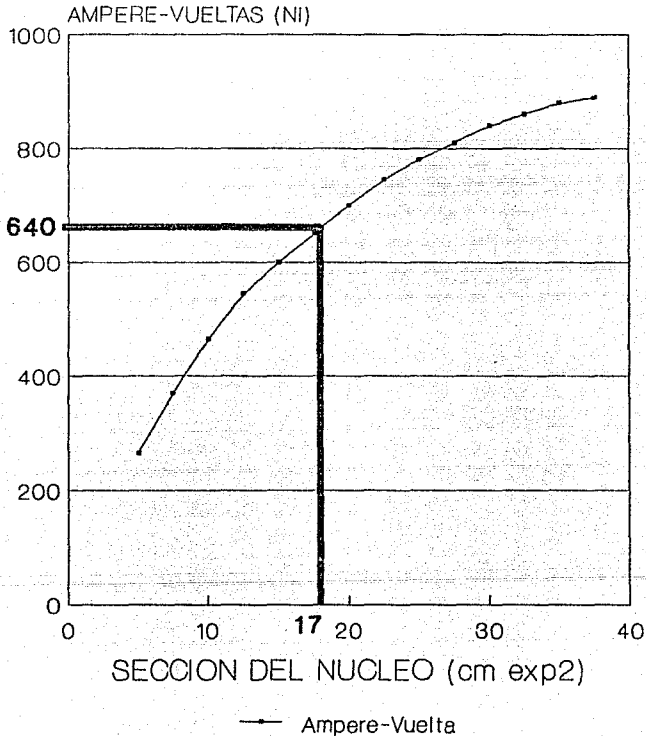


TABLA IV.3

CORRIENTE (Amperes)	DIAMETRO (mm)	SECCION (mm ²)
0.015	0.10	0.0078
0.020	0.11	0.0095
0.025	0.12	0.0113
0.035	0.15	0.0176
0.050	0.18	0.0254
0.065	0.20	0.0314
0.075	0.22	0.0380
0.100	0.25	0.0500
0.130	0.28	0.0620
0.150	0.30	0.0700
0.190	0.35	0.0960
0.250	0.40	0.1260
0.320	0.45	0.1600
0.400	0.50	0.1960
0.450	0.55	0.2380
0.550	0.60	0.2830
0.650	0.65	0.3320
0.750	0.70	0.3850
0.850	0.75	0.4420
1.000	0.80	0.5030
1.130	0.85	0.5670
1.270	0.90	0.6360
1.600	1.00	0.7850
2.250	1.20	1.1300
3.600	1.50	1.7700
5.000	1.80	2.5400
6.500	2.00	3.1400
10.000	2.50	4.9100

dónde S_v es el área de la ventana en cm^2
 N es el número de vueltas totales
 D_c es el diámetro del conductor en cm

se encuentra el área mínima de la ventana del núcleo:

$$S_v = 1505 (0.01 \text{ cm}^2) = 15.05 \text{ cm}^2$$

Los núcleos magnéticos para inductores se fabrican con dimensiones que guardan ciertas relaciones entre sí. En la figura IV.4 se muestran los valores típicos:

$$S_v = b e \qquad d = 1.5 c \qquad e = 1.5 \sqrt{An}$$

$$f = 1.5 a \qquad l_m = 6.5 \sqrt{An} \qquad a = 2 c$$

$$An = a f$$

Sustituyendo valores:

$$e = 1.5 \sqrt{An} = 1.5 \sqrt{17} = 6.18 \text{ cm}$$

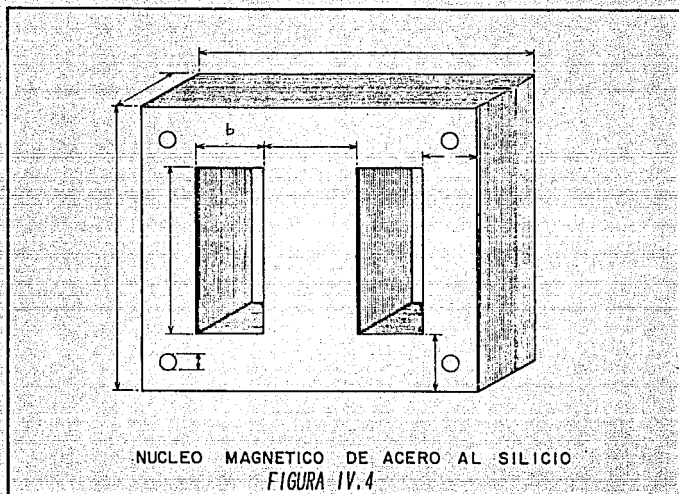
$$b = \frac{S_v}{e} = \frac{15.05 \text{ cm}^2}{6.18 \text{ cm}} = 2.43 \text{ cm}$$

$$l_m = 6.5 \sqrt{An} = 6.5 \sqrt{17} = 26.8 \text{ cm}$$

$$An = a f \quad \text{pero} \quad f = 1.5 a$$

por lo que

$$a f = An = 17 \text{ cm}^2 = 1.5 a^2$$



entonces $f = 1.5 (3.36) = 5.06 \text{ cm}$

$$y \quad c = \frac{a}{2} = \frac{3.32}{2} = 1.66 \text{ cm}$$

con lo cual queda totalmente dimensionado el núcleo. Por supuesto que los valores anteriores son sólo valores mínimos recomendados (no normalizados) pero que se han obtenido empíricamente dando

buenos resultados en la práctica. Estos valores son los mínimos, estando los valores máximos limitados por cuestiones económicas o de volumen y peso.

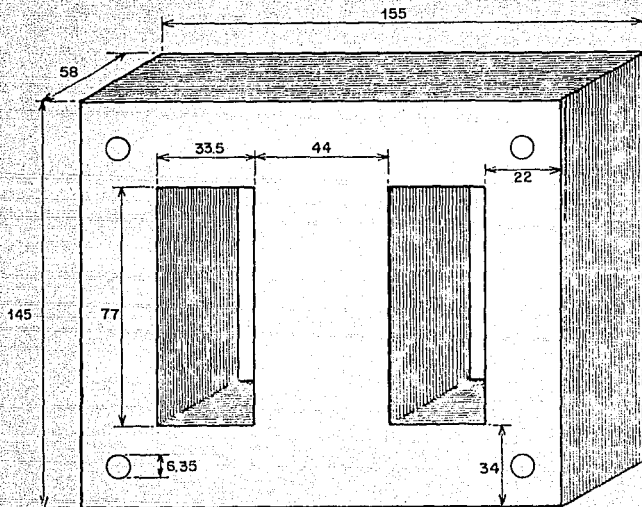
Tras hacer una investigación de los productos disponibles comercialmente en el mercado hemos seleccionado un núcleo tipo acorazado cuyas dimensiones se muestran en la figura IV.5 , teniendo además las siguientes características: espesor de laminación de 0.355 mm y 3.5% de Silicio. Para obtener las propiedades restantes se requiere generalmente de sofisticados equipos (como permeámetros) de los que no disponemos en CLYFC ni en el Laboratorio de la Facultad. Por tanto, proponemos y empleamos el siguiente método de prueba el cual es inédito pero está totalmente fundamentado en los conceptos teórico-prácticos expuestos en el Capítulo III.

PRUEBA ELECTROMAGNETICA.

OBJETIVOS.- Obtener mediante pruebas electromagnéticas las curvas $\mu-B$ y $B-H$ del núcleo magnético seleccionado para usarse en el Reactor Patrón.

MATERIAL Y EQUIPO.

- > 1 Fuente de c.a. ajustable de 0 - 250 volts y 10 amperes mínimo cuyo r.c.m. de las componentes armónicas no exceda el 3% de la componente fundamental.
- > 1 Voltmetro de rango múltiple de 250 volts Vc.a. analógico escala lineal o digital r.m.c. verdadero y alta resolución.
- > 1 Ampérmetro de rango múltiple de 10 amperes analógico escala lineal o digital r.m.c. verdadero.



ESCALA: SIN ACOTACIONES: mm

ESPEJOR DE LAMINACION: 0.355 mm

NUCLEO MAGNETICO DE ACERO AL SILICIO

FIGURA IV.5

> 1 Puente de Wheatstone de $1m\Omega$ a $1M\Omega$.

PROCEDIMIENTO.

1.- Se arrolla sobre el núcleo una bobina hecha con alambre magneto de sección suficiente para manejar una corriente que multiplicada por el número de vueltas asegure alcanzar la saturación del material. El bobinado sobre el núcleo tiende a tomar forma cilíndrica porque al doblar los conductores para envolverlos alrededor del paquete de chapas, éstos toman forma circular.

Es evidente que habrá una diferencia entre la superficie del bobinado y el área del núcleo, lo que se llama Coeficiente de Plenitud del Núcleo. Este coeficiente está dado por el cociente entre la sección neta del hierro y el área del círculo en que dicha sección está inscrita. Para que este coeficiente sea ideal (igual a 1) se requiere que el núcleo tenga una fina sección cruciforme o que la bobina sea rectangular o cuadrada y no cilíndrica. El primer caso no es factible en nuestro diseño pero el segundo sí lo es siempre que el conductor no sea de mucho calibre y se devane con cuidado. Para tal efecto usaremos alambre 16 AWG y 100 vueltas.

2.- Una vez formada la bobina se conectan a ella los aparatos de medición y la fuente. Se eleva después la corriente en pasos discretos (para lograr continuidad) desde cero hasta un valor máximo (para alcanzar la saturación) pero menor o igual al nominal del conductor, que en este caso es de 3 amperes.

3.- Se seleccionan valores de interés de la corriente tomándose simultáneamente lecturas de la tensión aplicada. Para este punto

tomaremos variaciones iniciales de 0.02 amperes rmc entre lecturas sucesivas, incrementando después estas variaciones en un rango conveniente para lograr una curva continua.

4.- A partir de la relación V_{ca}/I_{ca} se obtiene el módulo de la impedancia para cada lectura. A modo de ejemplo haremos el cálculo numérico para el primer punto de interés. Los demás cálculos se realizan de manera idéntica.

$$Z = \frac{V_{ca}}{I_{ca}} = \frac{3.0}{0.02} = 150 \Omega$$

5.- Con el Puente de Wheatstone o de Tablas y con la longitud y calibre de la bobina se calcula la resistencia total de la misma. Para este primer caso la resistencia resultó ser de 0.321 Ω a temperatura ambiente de 20°C.

6.- A partir de Z y R se obtiene el valor de XL.

$$X = Z^2 - R^2 = 150^2 - 0.341^2 = 149.9 \Omega$$

L

7.- A partir de XL se obtiene el coeficiente de autoinducción L.

$$L = \frac{X_L}{2 \pi f} = \frac{149.9}{377} = 0.3978 \text{ Henry}$$

8.- Se calcula l_m y A_n a partir de mediciones directas en el núcleo y según se aprecia en la figura IV.5 :

$$l_m = (155/2 - 22/2) \cdot 2 + (145 - 34/2 - 34/2) \cdot 2$$

$$= 355 \text{ mm} = 0.355 \text{ m}$$

$$A_n = (44) \cdot (58) = 2552 \text{ mm}^2 = 25.52 \cdot 10 \exp^{-4} \text{ m}^2$$

9.- De acuerdo con la ecuación (11.20 se obtiene que:

$$\mu_m = \frac{L \cdot l_m}{N \cdot A_n} = \frac{(0.3978 \text{ Hy}) (0.355 \text{ m})}{(100) (25.52 \cdot 10 \exp^{-4} \text{ m}^2)} = 5.53 \frac{\text{mHy}}{\text{m}}$$

10.- Se divide a μ_m entre μ_0 para conocer μ_r (adimensional).

$$\mu_r = \frac{\mu_m}{\mu_0} = \frac{5.53 \cdot 10 \exp^{-3} \text{ Hy/m}}{1.25 \cdot 10 \exp^{-6} \text{ Hy/m}} = 4426.9$$

11.- Con los valores de número de vueltas y corriente para cada lectura se encuentra la intensidad de campo H .

$$H = \frac{F_{mm}}{l_m} = \frac{N \cdot I}{l_m} = \frac{(100) (0.02)}{0.355} = 5.6338 \text{ A-v/m}$$

12.- A partir de la ecuación III.10 se determina el valor correspondiente de β :

$$\beta = \mu_m H = (5.53 \cdot 10 \exp^{-3}) (5.6338) = 0.3115 \text{ Teslas}$$

13.- Como dato adicional para prueba optativa se calcula el tiempo teórico de duración del transitorio (5τ):

$$5\tau = \frac{5L}{R} = \frac{5(0.3978)}{0.321} = 6.196 \text{ Seg}$$

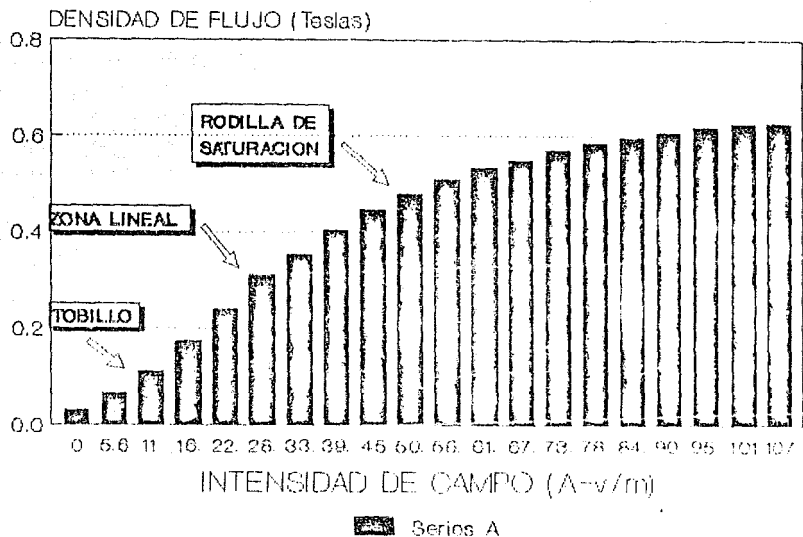
14.- Con los valores encontrados se integra la Tabla IV.4 y a partir de ella se procede a graficar las curvas β -H y μ - β con los valores correspondientes para cada lectura. Las gráficas se muestran en las figuras IV.6 y IV.7 .

TABLA IV.4

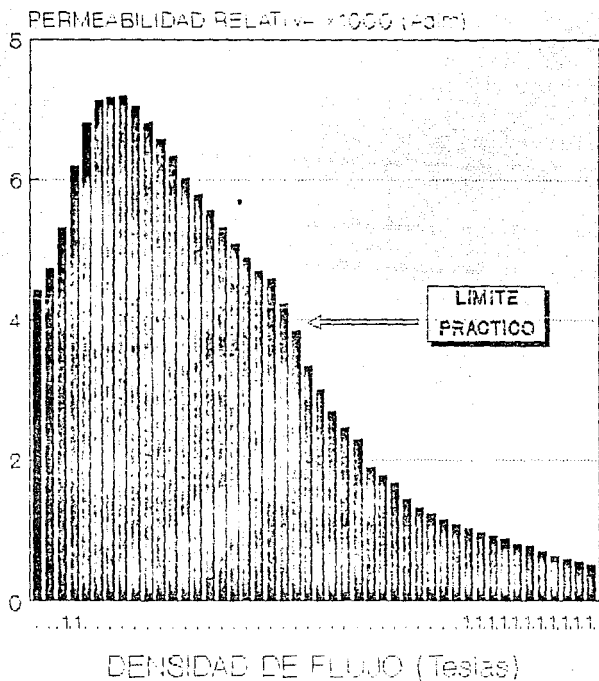
REPORTE DE PRUEBAS ELECTROMAGNETICAS
 NUCLEO MAGNETICO TIPO 'E' 0.355mm 3.5SI

f	Yca	Ica	Z	R	XL	L	!Hu	mat!	Hu	rel	H	B	!S	Taor
!(rms)	!(res)	!(Ohms)	!(Ohms)	!(Ohms)	!(Henrys)	!(mH/g)	!(Adm)	!(A-v/m)	!Tesla	!(Seg)				
3.00	0.02	150.0	10.321	1149.9	10.3978	5.530	14426.9	15.6330	10.0311	16.19				
6.40	0.04	160.0	10.321	1159.9	10.4244	5.900	14122.9	111.250	10.0661	16.61				
10.8	0.06	180.0	10.321	1179.9	10.4774	6.640	15312.4	116.900	10.1122	17.43				
16.8	0.08	210.0	10.321	1209.9	10.5567	7.740	16195.1	122.530	10.1743	18.57				
23.1	0.10	231.0	10.321	1230.9	10.6124	8.520	16415.1	128.100	10.2400	19.53				
29.0	0.12	241.6	10.321	1241.5	10.6407	8.910	17130.0	131.600	10.3120	19.93				
34.0	0.14	242.8	10.321	1242.7	10.6439	8.950	17165.6	131.430	10.3528	19.93				
38.9	0.16	243.1	10.321	1243.0	10.6447	8.970	17174.5	131.000	10.4036	19.93				
42.9	0.18	278.7	10.322	1238.2	10.6319	8.190	17032.0	150.700	10.4456	19.91				
46.1	0.20	230.5	10.322	1230.4	10.6113	8.510	16802.8	1560330	10.4785	19.49				
49.1	0.22	223.2	10.322	1223.1	10.5919	8.270	16586.9	161.970	10.5100	19.19				
51.5	0.24	214.6	10.322	1214.5	10.5691	7.910	16333.2	167.600	10.5347	18.59				
53.0	0.26	203.8	10.322	1203.7	10.5404	7.520	16013.8	171.220	10.5504	18.26				
55.0	0.28	196.4	10.322	1196.3	10.5208	7.240	15795.7	176.910	10.5712	18.06				
56.5	0.30	188.5	10.324	1188.2	10.4993	6.940	15556.4	184.520	10.5864	17.70				
57.5	0.32	179.7	10.324	1179.6	10.4765	6.632	15302.7	190.110	10.5964	17.35				
58.5	0.34	170.0	10.325	1171.9	10.4560	6.344	15074.6	195.823	10.6073	17.01				
59.5	0.36	165.3	10.325	1165.0	10.4384	6.101	14878.4	199.42	10.6185	16.72				
60.3	0.38	158.7	10.326	1158.6	10.4210	5.851	14625.1	197.10	10.6259	16.45				
62.0	0.40	155.1	10.327	1154.9	10.4112	5.722	14516.0	192.61	10.6440	16.22				
63.0	0.44	143.2	10.328	1143.1	10.3799	5.221	14221.7	192.90	10.6542	15.77				
65.0	0.50	130.0	10.329	1129.9	10.3448	4.792	13811.1	194.82	10.6744	15.17				
68.0	0.60	113.3	10.330	1113.2	10.3005	4.180	13334.1	199.10	10.7064	14.51				
71.0	0.70	101.4	10.331	1101.3	10.2590	3.742	12921.5	197.22	10.7377	13.93				
73.0	0.80	91.2	10.332	111.9	10.2419	3.360	12592.0	1225.30	10.7570	13.57				
75.1	0.90	83.4	10.333	83.3	10.2212	3.011	12461.5	1253.50	10.7782	13.27				
77.6	1.00	77.6	10.335	77.5	10.2058	2.860	12290.2	1261.70	10.8056	12.99				
82.0	1.20	64.7	10.338	64.6	10.1716	2.387	11909.6	1338.00	10.8689	12.49				
84.0	1.40	60.0	10.341	59.9	10.1591	2.212	11710.5	1394.30	10.8714	12.31				
86.0	1.60	53.7	10.344	55.6	10.1504	2.090	11633.1	1450.70	10.9019	12.13				
88.0	1.80	48.9	10.347	48.7	10.1297	1.801	11443.3	1507.00	10.9123	11.84				
90.0	2.00	45.0	10.348	44.9	10.1192	1.660	11327.6	1563.40	10.9351	11.69				
92.0	2.20	41.8	10.352	41.7	10.1109	1.544	11232.0	1619.70	10.9544	11.57				
94.0	2.40	39.2	10.356	39.1	10.1029	1.441	11150.2	1676.10	10.9734	11.44				
95.8	2.60	36.3	10.360	36.7	10.0976	1.351	11085.1	1732.40	10.9887	11.35				
97.0	2.80	34.6	10.364	34.5	10.0917	1.270	11020.5	1788.70	11.0016	11.27				
98.0	3.00	32.6	10.368	32.5	10.0854	1.200	10961.5	1845.00	11.0140	11.17				
99.8	3.20	31.2	10.372	31.1	10.0827	1.155	10920.1	1901.40	11.0366	11.12				
102.0	3.40	30.0	10.376	29.9	10.0795	1.110	10847.1	1957.71	11.0534	11.06				
104.0	3.80	27.4	10.380	27.3	10.0726	1.010	10673.1	2070.10	11.0811	10.97				
105.0	4.00	26.2	10.384	26.1	10.0694	0.965	10612.3	2126.7	11.0866	10.92				
107.0	4.50	23.8	10.388	23.7	10.0631	0.877	1022.2	2126.7	11.1111	10.82				
108.5	5.00	21.7	10.392	21.6	10.0515	0.799	639.9	2108.4	11.1253	10.75				
110.0	5.50	20.0	10.396	19.9	10.0510	0.737	598.8	2154.9	11.1418	10.68				
112.21	6.00	18.7	10.400	18.6	10.0495	0.688	550.8	2169.0	11.1629	10.62				
130.0	8.44	15.4	10.404	15.3	10.0406	0.564	498.5	2237.4	11.2255	10.55				

CURVA DE MAGNETIZACION RELACION B-H



CURVA DE PERMEABILIDAD RELACION MU-BETA



CALCULO DEL NUMERO DE VUELTAS.

Se calcula el número de vueltas de acuerdo con el valor máximo de impedancia requerido por norma, que es de 1280 ohms nominales, aunque puede variar entre 1274.8 y 1285.1 para una corriente de 425 mA.

Calculamos el número de vueltas por aproximaciones sucesivas, para el caso más crítico que es el de máxima impedancia debido a la no linealidad magnética del material usado. Partiendo del supuesto de que el número de vueltas N sea de 800 tenemos:

$$H = \frac{800 \cdot I}{0.355} = 2253.5 \text{ A/m}$$

para $I = 425 \text{ mA}$ $H = 957.74 \text{ A-v/m}$

de la Curva de Magnetización se tiene que $\beta = 1.0534$

$$\text{y como } \mu = \frac{\beta}{H} = \frac{1.0534}{957.74} = 1.1 \cdot 10 \exp^{-3} \text{ Hy/m}$$

por tanto se obtiene que L es igual a:

$$L = \frac{N^2 \cdot \mu \cdot A}{l_m} = \frac{800^2 \times 1.1 \cdot 10 \exp^{-3} \times 25.52 \cdot 10 \exp^{-4}}{0.355}$$

de donde $L = 5.06 \text{ Henry}$

Se tiene entonces que $XL = 377 \times 5.06 = 1907.62$

Como este valor es muy superior al requerido hacemos una aproximación con N igual a 600 vueltas, de donde se obtienen con el mismo procedimiento los siguientes parámetros:

$$\begin{aligned} H &= 1690 \text{ l} \\ \beta &= 0.90 \text{ Teslas} \\ \mu &= 1.360 \cdot 10 \exp^{-3} \text{ Hy/m} \\ L &= 3.53 \text{ Hy} \\ XL &= 1331 \text{ Ohms} \end{aligned}$$

En vista de que el exceso de inductancia puede compensarse fácilmente por medio de capacitancia, es preferible tener un margen de seguridad que garantice alcanzar el valor máximo de inductancia requerida por norma, aunque esto naturalmente repercutirá en el costo, peso, volumen y pérdidas por efecto Joule en el reactor. Aplicando un margen de seguridad, calculamos los parámetros para N igual a 700, de donde se obtiene:

$$\begin{aligned} H &= 830 \text{ Lenz} \\ \beta &= 1.01 \text{ Teslas} \\ \mu &= 1.205 \cdot 10 \exp^{-3} \\ L &= 4.24 \text{ Hy} \\ XL &= 1598.40 \text{ ohms} \end{aligned}$$

Se observa que con 700 vueltas se tiene un margen de seguridad aproximado de 25% suficiente para compensar los flujos de dispersión y el factor de plenitud del hierro.

Determinemos ahora el calibre del conductor. No existe tabla alguna o información técnica que indique la ampacidad del alambre magneto. La ampacidad de cualquier alambre depende de la

aplicación que se le le dará al equipo o aparato del cual forma parte, de la temperatura permisible de la bobina formada por dicho alambre y de otros factores.

La fórmula para obtener la ampacidad del alambre magneto que presentamos a continuación nos dará resultados aceptables y está basada en la unidad de medición de área conocida como Circular Mil (CM).

Así tenemos:

$$\text{AMPACIDAD} = \frac{\text{AREA DEL ALAMBRE EN CIRCULAR MILS}}{1000}$$

tenemos por lo tanto, un conductor:

$$\text{Area Cond} = 1000 (1.5 \text{ amp}) = 1500 \text{ Circular Mils}$$

$$\text{o también: Area Cond} = 1500 \text{ CM}/1974 \text{ CM/mm}^2 = 0.76 \text{ mm}^2$$

$$\text{de donde } D^2 = 4A/\pi = 4(0.76)/3.1416 = 0.9576 \text{ mm}^2$$

$$\text{por lo tanto } D = 0.9837 \text{ mm}$$

Consultando ahora con las tablas para alambre magneto tenemos un conductor 18 AWG cuya resistencia en corriente continua y 68oF es de 3.97 mohms/metro. Si escogemos un aislamiento como el Sodereze de Conelec se tienen las siguientes ventajas: Soldable, buena flexibilidad, resistente a la abrasión,

buena adherencia al cobre, resistente a la humedad, resistente a tratamientos parafínicos, alta rigidez dieléctrica, clase 1050C, gran resistencia al envejecimiento por calor, con diámetro nominal de 1.023 mm y peso de 1.38 mg/m.

En un devanado ligeramente sellado con baja disipación térmica tenemos 1000 Circular Mils por ampere dándonos un alto factor de seguridad para que el devanado eleve su temperatura y, por otra parte, si tenemos el mismo devanado ventilado apropiadamente y no nos interesa mayormente que se caliente bajando su eficiencia, podríamos descender hasta 750 circular mils por ampere.

Podemos ahora proceder a hacer el cálculo de vueltas por capa:

Si la altura de la ventana es de 77 mm podemos considerar una longitud útil de 70 mm, para dejar un espacio de 3.5 mm entre el conductor y el hierro, suficiente para alojar al aislamiento y a las cuñas de sujeción.

En la primera capa cabrán por tanto considerando de Tablas que el diámetro total para calibre 18 AWG incluyendo aislamiento es de 1.023 mm:

$$70/1.023 = 68.23 \text{ vueltas}$$

y redondeando en 70 vueltas por capa se tendrán diez capas.

CALCULO DE LA RESISTENCIA EFECTIVA DEL CONDUCTOR.

Para calcular la resistencia efectiva del conductor procedemos a calcular primero la longitud total de la bobina. Si

asumimos que la bobina es perfectamente rectangular podemos decir que:

$$\text{Long. capa 1} = 2 (4.4 \times 5.8) = 20.4 \text{ cm/vuelta}$$

$$\text{Long. capa 2} = 20.4 + 4 (0.1023) = 20.8 \text{ cm/vuelta}$$

$$\text{Long. capa 3} = 20.8 + 4 (0.1023) = 21.22 \text{ cm/vuelta}$$

$$\text{Long. capa 4} = 21.22 + 4 (0.1023) = 21.63 \text{ cm/vuelta}$$

$$\text{Long. capa 5} = 21.63 + 4 (0.1023) = 22.03 \text{ cm/vuelta}$$

$$\text{Long. capa 6} = 22.03 + 4 (0.1023) = 22.44 \text{ cm/vuelta}$$

$$\text{Long. capa 7} = 22.44 + 4 (0.1023) = 22.85 \text{ cm/vuelta}$$

$$\text{Long. capa 8} = 22.85 + 4 (0.1023) = 23.26 \text{ cm/vuelta}$$

$$\text{Long. capa 9} = 23.26 + 4 (0.1023) = 23.67 \text{ cm/vuelta}$$

$$\text{Long. capa 10} = 23.67 + 4 (0.1023) = 24.08 \text{ cm/vuelta}$$

$$\text{Long. Total} = 223.38 \text{ cm/vuelta} \times 70 \text{ vueltas} = 155.56 \text{ m}$$

Si de tablas $R = 3.97 \text{ ohms/km}$ para 18 AWG:

$$R_{\text{bob}} = 3.97 \text{ ohms/km} \times 0.1556 \text{ Km}$$

por tanto: $R_{\text{bob}} = 0.618 \text{ ohms en c.c. y a } 20^{\circ}\text{C}$

La resistencia anterior es la resistencia en c.c. y a temperatura base de 20°C . Sin embargo la resistencia real o efectiva es la resistencia en c.a. y a temperatura máxima de operación que en este caso es de 50°C . Procedemos por tanto a obtener la resistencia efectiva.

La resistencia en c.a. es mayor que la resistencia en c.c. debido al efecto superficial o efecto Skin. La constante que las relaciona depende de la permeabilidad del conductor, de su diámetro o sección transversal y de la frecuencia de la red de corriente alterna. Podemos encontrar esta constante de acuerdo

con la siguiente expresión:

$$x^2 = \frac{0.0025 \mu r f}{R_c}$$

donde μr es la permeabilidad relativa del conductor

f es la frecuencia de operación

R_c es la resistencia del conductor en ohms por km en corriente continua, cualquiera que sea su calibre.

Sustituyendo valores y asumiendo que el cobre tiene una permeabilidad relativa aproximada de 50 tenemos:

$$x^2 = \frac{0.0025 \times 50 \times 60}{3.97} = 1.889$$

de donde se tiene que $x = 1.374$

Con el valor de x entramos en la Tabla siguiente, donde se encuentra directamente el valor del Factor de Corrección por Efecto Piel.

Interpolando se obtiene un factor de 1.06. La resistencia en corriente alterna y a 20°C es entonces:

$$R_{c.a.} = 0.618 \times 1.06 = 0.655 \text{ ohms.}$$

Procedemos ahora a corregir por temperatura. Como los

TABLA IV. 5:

X	K	X	K
0.0	1.00000	2.1	1.09375
0.1	1.00000	2.2	1.11126
0.2	1.00001	2.3	1.13069
0.3	1.00004	2.4	1.15207
0.4	1.00013	2.5	1.17538
0.5	1.00032	2.6	1.20056
0.6	1.00067	2.7	1.22753
0.7	1.00124	2.8	1.25620
0.8	1.00212	2.9	1.28644
0.9	1.00340	3.0	1.31809
1.0	1.00519	3.1	1.35102
1.1	1.00758	3.2	1.38504
1.2	1.01071	3.3	1.41999
1.3	1.01470	3.4	1.45570
1.4	1.01969	3.5	1.49202
1.5	1.02582	3.6	1.52879
1.6	1.03323	3.7	1.56587
1.7	1.04205	3.8	1.60314
1.8	1.05240	3.9	1.64051
1.9	1.06440	4.0	1.67724
2.0	1.07816		

metales en general responden de una manera lineal con los cambios en la temperatura, es posible hacer la corrección en la resistencia cuando la temperatura cambia, por medio de la siguiente expresión general:

$$\frac{R_{t.op.}}{R_{t.amb.}} = \frac{T + t_{op.}}{T + t_{amb.}}$$

siendo T una constante para cada material y es equivalente a la temperatura bajo cero en la que teóricamente cada material se comporta como conductor ideal. Con ayuda de la Tabla III.B encontramos el valor de T para el cobre, considerando además que la temperatura de operación es máximo de 50°C, de acuerdo con la norma.

$$R_{t.op.} = R_{t.amb.} \frac{T + t_{op.}}{T + t_{amb.}} = R_{t.amb.} \frac{234.5 + 50}{234.5 + 20}$$

$$R_{t.op.} = 0.655 \times 1.1178 = 0.7322 \text{ ohms}$$

siendo esta resistencia la resistencia efectiva que produce pérdidas por efecto Joule, mismas que deberán ser disipadas por la bobina del reactor.

CALCULO DE LOS WATTS TOTALES POR DISIPAR.

El calor total disipado es función directa de dos fuentes principales productoras de calor: el núcleo y la bobina. Las pérdidas eléctricas en watts pueden calcularse fácilmente a partir la resistencia efectiva y la corriente máxima que pasa por la bobina.

$$P_{\text{eléc.}} = \text{Ref } I' = 0.7322 \times 1.5' = 1.6475 \text{ watts.}$$

Las pérdidas magnéticas, como se explicó anteriormente dependen de dos fenómenos: histéresis y corrientes parásitas. Con ayuda de las tablas y fórmulas planteadas en el Capítulo III procedemos a calcular estas pérdidas.

$$P_{\text{hist.}} = \eta \beta_{\text{máx}} \exp 1.6 f^{10} \exp -8$$

$$P_{\text{hist.}} = 1.125 \times 16,500 \exp 1.5 \times 60 \times 10 \exp -8$$

$$P_{\text{hist.}} = 3.778 \text{ watts/Kg}$$

Para calcular las pérdidas en todo el núcleo procedemos a calcular su peso total considerando además que la densidad del acero es de 7.68 Kg/dm cúbico.

$$V_{\text{núcleo}} = (155 \times 145 \times 58) - 2 (33.5 \times 58 \times 77)$$

$$V_{\text{núcleo}} = 1,303,550 - 299,222 = 1,004,328 \text{ mm cúbicos}$$

$$\text{Peso Núcleo} = 7.68 \text{ Kg/dm cúbico} \times 1.004328 \text{ dm cúbico}$$

$$\text{Peso Total Núcleo} = 7.71 \text{ Kg.}$$

$$P_{\text{Hist Tot}} = 7.71 \times 3.778 = 29.14 \text{ watts}$$

Calculamos ahora las pérdidas por corrientes parásitas por el método rápido:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{eddy}} &= \int (f \cdot B \cdot 10 \exp - 6)^2 P_{\text{núcleo}} \\
 &= 1.2^2 (60 \times 16,500 \times 10 \exp - 6)^2 \times 1.11 \\
 P_{\text{eddy}} &= 9.06 \text{ watts}
 \end{aligned}$$

por lo que las pérdidas magnéticas totales son:

$$P_{\text{mag}} = P_{\text{hist}} + P_{\text{eddy}} = 38.2 \text{ watts}$$

mismos que deberán ser disipados por el núcleo de acero.

AJUSTE DEL FACTOR DE POTENCIA.

La norma establece que el factor de potencia en todos los casos debe ser constante e igual a 0.075 ± .005. Para ajustar este valor existen dos posibilidades: la primera consiste en colocar taps derivadores en la bobina del reactor con el objeto de adecuar la reactancia inductiva con lo que el ajuste final se logra con una resistencia serie adicional. Esta alternativa presenta algunos problemas, como el del armado de la bobina, ya que se requeriría de un número de taps igual al número de lámparas a probarse. Esto naturalmente complica el diseño.

La segunda alternativa consiste en fabricar una bobina universal capaz de proporcionar la máxima impedancia exigida por la norma y conectarle un capacitor de valor ajustable para compensar su reactancia inductiva, ajustando finalmente el factor de potencia con una resistencia serie adicional, como en el caso

anterior. Este ajuste se puede realizar con facilidad por lo que nos inclinaremos por esta última opción.

Como XL depende de μ , ν de H y H a su vez depende de la corriente, tendremos que encontrar un valor de capacitancia adecuado para cada corriente de lámpara. De acuerdo con la norma calculamos los valores correspondientes para las corrientes que aparecen en la Tabla IV.6. Los valores fueron calculados de la siguiente manera:

Para la lámpara número 1:

$$N = 700 \text{ vueltas} \quad e \quad I = 0.135 \text{ amperes.}$$

$$H = \frac{N I}{l_m} = \frac{700 (0.135)}{0.355} = 266 \text{ Lenz}$$

De la Curva de Magnetización de la figura IV.6 se obtiene que $\beta = 0.78$ Teslas de donde:

$$\mu = \frac{\beta}{H} = \frac{0.78}{266} = 2.93 \text{ mH/m}$$

$$L = \frac{(700)^2 (2.93 \cdot 10^{-3}) (25.24 \cdot 10^{-4})}{0.355} = 10.32 \text{ H}$$

$$X_L = (376.9) (10.32) = 3889.6 \Omega$$

El factor de potencia se obtiene a partir de R y X_L :

$$Z = (0.655^2 \times 3889.6^2)^{1/2} = 3889.6 \Omega$$

$$f.p. = \frac{R}{Z} = \frac{0.655}{1} = 0.000168$$

El f.p. se corrige de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} X_c &= (\tan \text{arc cos } f.p.1 - \tan \text{arc cos } f.p.2) R \\ &= (\tan \text{arc cos } 0.000168 - \tan \text{arc cos } 0.075) 0.655 \\ &= (5952.38 - 13.295) 0.655 \end{aligned}$$

$$X_c = 3890 \Omega$$

$$C = \frac{1}{\omega X_c} = \frac{1}{(377) (3890)} = 0.68 \mu\text{Fd}$$

Los valores restantes de la Tabla IV.6 se calculan de la misma forma. Resulta de aquí que se requiere un capacitor variable o un arreglo serie-paralelo cuya capacitancia pueda variarse entre 0.5 y 4 μFd , además de una resistencia serie no inductiva entre 0 y 100 ohms para dar el ajuste fino.

T A B L A I V . 6

VALORES DE CAPACITANCIA PARA CORRECCION DE FACTOR DE POTENCIA.

Inom (mA)	H (Lenz)	n (Tesla)	f (MHz)	L (Henry)	XL (Ohms)	F.p. 10exp-4	Xc (Ohms)	C (pFd)
135	266	0.700	2.99	10.32	3000	1.61	3041.3	0.69
145	286	0.666	2.81	9.89	2721	1.75	2719.3	0.71
160	315	0.606	2.65	9.98	2905	1.99	2476.3	0.78
300	591	0.340	1.59	5.60	2111	3.10	2102.3	0.82
355	700	0.330	1.40	4.90	1041	3.54	1039.3	1.44
390	749	0.330	1.32	4.64	1749	3.74	1740.3	1.52
390	749	0.330	1.28	4.50	1696	3.86	1667.3	1.57
420	829	1.010	1.22	4.29	1617	4.05	1603.3	1.64
425	848	1.010	1.20	4.22	1590	4.09	1589.3	1.66
430	848	1.014	1.19	4.19	1579	4.15	1570.3	1.69
435	858	1.020	1.19	4.15	1564	4.18	1555.3	1.70
800	1577	1.150	0.729	2.56	965	6.70	256.3	2.77
1500	2957	1.650	0.530	2.04	769	8.71	760.3	3.40

VERIFICACION DEL AISLAMIENTO.

Los conductores que forman el bobinado del reactor deben estar bien aislados entre sí y con respecto al núcleo y caja metálica que contiene al conjunto.

Si la aislación entre el bobinado y la masa es defectuosa, el defecto se traduce en pérdidas de corriente a masa y elevación de temperatura, pero sobre todo en peligro para el usuario. Por ello es conveniente verificar el estado del aislamiento antes de poner en servicio el reactor.

La medición de resistencia de aislamiento se puede efectuar en forma conocida mediante un voltmetro de alta resistencia interna que esté comprendida entre el 50% y el 150% de la resistencia del aislamiento a medir. Sin embargo, el método más conveniente es medirla mediante un Megohmetro o Megger que es el método más utilizado y reconocido por las normas internacionales. El voltaje utilizado en estos aparatos varía generalmente entre 100 y 5000 volts de c.c., dependiendo del equipo eléctrico a probarse, como lo indica la siguiente tabla, que también nos muestra el voltaje apropiado para el equipo bajo prueba.

T A B L A I V . C .**VOLTAJE DEL MEGGER****EQUIPO A PROBARSE (C.A. O C.D.)**

100 y 250 Volts

Hasta 100 volts. Incluye algunos tipos de equipos de señales y de control.

400 volts

Generalmente usado en los cables telefónicos.

500 y 625 volts	Equipo electromecánico a 100 volts o más.
1000 y 1250 volts	Equipo electromecánico a 400 volts o más.
2500 volts o más	Equipo electromecánico a 1000 volts o más.

El cuadro anterior nos da una idea de los múltiples casos en que el Megger puede usarse para medir la resistencia de aislamiento de diversos equipo eléctricos tales como:

- Motores de c.a., c.d. y equipo para arranque.
- Generadores de c.a. y c.d.
- Instalaciones eléctricas.
- Medidores, instrumentos y equipo eléctrico doméstico
- Cables de comunicaciones y control de señales
- Cables de Potencia
- Boquillas, tableros y aislantes
- Transformadores de Potencia y de Instrumento
- Interruptores, etc.

Para medir correctamente el aislamiento debe emplearse una tensión que en ningún caso sea inferior a la normal de servicio, pues los defectos que aparecen cuando se aplica tal tensión pueden no aparecer con tensiones más bajas. Hay normas que especifican cuáles deben ser las tensiones para estas pruebas.

El siguiente problema radica en establecer un criterio para saber cuál es la resistencia mínima de aislamiento que se puede considerar como aceptable para determinado equipo. El valor

de esta resistencia depende de varios factores:

- 1) La tensión nominal del equipo
- 2) La temperatura de prueba y de operación normal del equipo
- 3) El medio en el que se encuentre el aislante.

El primer punto es generalmente un valor que se puede conocer fácilmente ya que es un dato conocido en cualquier equipo. El segundo punto es fundamental porque la resistencia de los aislamientos -a diferencia de los metales- disminuye con los aumentos de temperatura en una proporción no lineal, que, como se demostrará más adelante, puede ser aproximadamente logarítmica. El tercer punto es también determinante porque cada tipo de aislamiento responde de diferente manera a los cambios de temperatura. De aquí se desprende que un aislamiento diseñado para operar en aceite es de diferente naturaleza a un aislamiento diseñado para trabajar en aire.

Los materiales aislantes se clasifican en:

- ^ CLASE O.- Consisten en algodón, seda, papel y materiales orgánicos similares cuando no están sumergidos ni impregnados en un dieléctrico líquido.
- ^ CLASE A.- Consisten primero de algodón, seda, papel y materiales orgánicos similares impregnados o sumergidos en un dieléctrico líquido; segundo, en materiales moldeados o laminados, con relleno de celulosa, resinas fenólicas; tercero, láminas y hojas de acetatos de celulosa; cuarto, barnices como los aplicados a los conductores directamente.
- ^ CLASE B.- Este aislante consisten en mica, amianto, fibra

de vidrio y materiales inorgánicos. Pueden usar materiales de la clase A con fines estructurales.

^ CLASE F.- Consiste en materiales de mica, fibra de vidrio, asbesto y sustancias adherentes; se pueden incluir otros materiales no necesariamente inorgánicos.

^ CLASE H.- Consisten primero de mica, amianto, fibra de vidrio y otros materiales inorgánicos combinados con sustancias aglomerantes compuestas de silicones, segundo, compuestos de silicones o sustancias resinosas que pueden incluir materiales de la Clase A en puntos importantes durante su construcción.

^ CLASE C.- Consisten de mica, porcelana, vidrio, cuarzo y materiales inorgánicos similares.

De las experiencias con aparatos en servicio y de las pruebas hechas en distintos materiales aislantes se han asignado temperaturas de aislamiento límites (temperatura de punto más caliente). La temperatura del punto más caliente es el punto principal de referencia o la temperatura "cota de referencia".

Los valores límites de aumento de temperatura del punto más caliente del aislamiento se obtienen restando 40oC (valor de la temperatura base) de la temperatura límite del punto más caliente como se ve en la siguiente tabla.

T A B L A I V . D

 TEMPERATURA EN GRADOS CENTIGRADOS.

MATERIAL	VALOR LIMITE EN EL PUNTO	AUMENTO LIMITE
----------	--------------------------	----------------

MAS CALIENTE

CLASE O	90	50
CLASE A	105	65
CLASE B	130	90
CLASE F	155	115
CLASE H	180	140
CLASE C	220	180

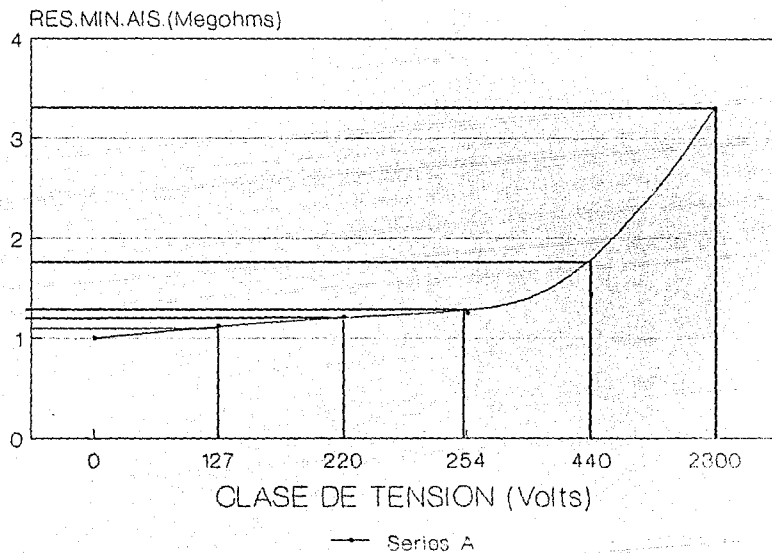
En el caso del reactor patrón el medio en el que se encuentre el aislamiento depende de la elevación máxima de temperatura a que se llegue en operación continua. Como la norma nacional establece un aumento de 250C máximo el enfriamiento en aire puede no ser suficiente si la cantidad de watts por unidad de área son excesivos. En este caso será necesario tener un enfriamiento más eficiente, como el que se obtiene en aceite.

AISLAMIENTO EN AIRE.

No existe norma alguna que determine la resistencia mínima que deben tener los aislamientos que trabajan en aire. Sin embargo, existe una regla empírica establecida a través de muchos años de experiencia que se aplica internacionalmente, aunque no representa un criterio normalizado. La regla dice: "La resistencia de aislamiento mínima a temperatura de operación para cualquier máquina o dispositivo enfriado en aire debe ser mayor o igual a la tensión nominal en KV más uno, estando la resistencia dada en Megohms".

El enunciado anterior puede expresarse de la siguiente manera:

RESISTENCIA MINIMA DE AISLAMIENTO AISLAMIENTO EN AIRE A TEMP. DE OPERACION



$$R \text{ min (M}\Omega) = KV \text{ nom} + 1$$

Para el caso que nos ocupa se tiene que la tensión nominal máxima es de 625 volts (Lámpara 12) por lo que:

$$R \text{ min} = 0.625 + 1 = 1.625 \text{ M}\Omega$$

Este es el valor mínimo a temperatura máxima de operación, que de acuerdo con la norma deberá ser de 50°C. La estabilización de la temperatura máxima puede llevar varias horas por lo que es conveniente establecer un criterio para determinar si la resistencia es suficiente después de medirla a cualquier temperatura ambiente o de operación. Aunque los aislamientos en aire pueden ser de diversos materiales todos ellos responden de una manera similar con los cambios de temperatura.

Existe otra regla empírica que se usa en aplicaciones industriales que dice: "La resistencia de los aislamientos que trabajan en un medio seco se reduce a la mitad con cada 10°C de aumento en la temperatura".

Del enunciado se puede plantear lo siguiente:

R	-----	T
2R	-----	T-10
4R	-----	T-20
8R	-----	T-30

Para encontrar una expresión que nos responda de acuerdo con el enunciado anterior se requiere considerar una temperatura de referencia. Consideraremos 20°C por ser la temperatura ambiente promedio considerada en tablas de conductores.

$$\begin{array}{rcl}
 R(200C) & = & \text{-----} \quad 200C \\
 0.5 R(200C) & = & 1/2 R(200C) \quad \text{-----} \quad 300C \\
 0.25 R(200C) & = & 1/4 R(200C) \quad \text{-----} \quad 400C \\
 0.125 R(200C) & = & 1/8 R(200C) \quad \text{-----} \quad 500C
 \end{array}$$

$$\begin{array}{l}
 1 \\
 \text{-----} R(200C) = R(\text{Temp Op}) \\
 2^{\text{expn}-1}
 \end{array}$$

$$2^{\text{expn}-n} R(200C) = R(\text{Temp Op})$$

$$10 + 10n = 20 + 10(n-1) = R(\text{Temp Op})$$

$$\frac{\text{Temp Op} - 20}{\text{-----}}$$

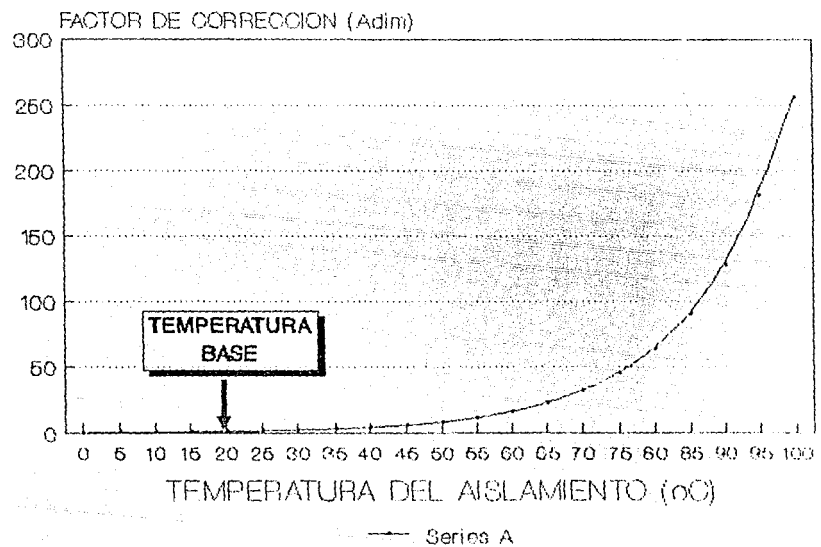
$$10$$

$$R(200C) = 2 \quad R(\text{Temp Op})$$

Asignando diferentes valores de temperatura de operación se construye con la expresión anterior la gráfica de la figura IV.10, lo que facilita el procedimiento para encontrar el factor de corrección por temperatura para aislamientos en aire.

Para nuestro Reactor Patrón la resistencia de aislamiento mínima a temperatura de prueba de 200C se obtiene como sigue:

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO EN AIRE CORRECCION POR TEMPERATURA



$$R(200C) = \frac{50 - 20}{10} (1.625 \text{ M}\Omega) + 2 (1.625 \text{ M}\Omega)$$

por lo que.

$$R \text{ min. } (200C) = 13 \text{ M}\Omega$$

AISLAMIENTO EN ACEITE.

Al igual que para el caso de los aislamientos en aire, no existe ninguna norma que establezca la resistencia mínima de los aislamientos sumergidos en aceite. Por ello, los fabricantes de equipo con aislamiento en aceite han elaborado en base a los muchos años de experiencia, una Tabla que relaciona a la tensión nominal del equipo con la resistencia mínima de aislamiento a temperatura base de 20°C. Esta información se muestra en la Tabla IV.E construyéndose a partir de ella la figura IV. que permite una solución aproximada pero rápida al problema. A partir de esta información se puede ver que corresponde una relación aproximada de 26.7 MΩ por cada KV nominal.

Para el Reactor Patrón se tiene entonces una resistencia mínima de aislamiento a temperatura base de 20°C de.

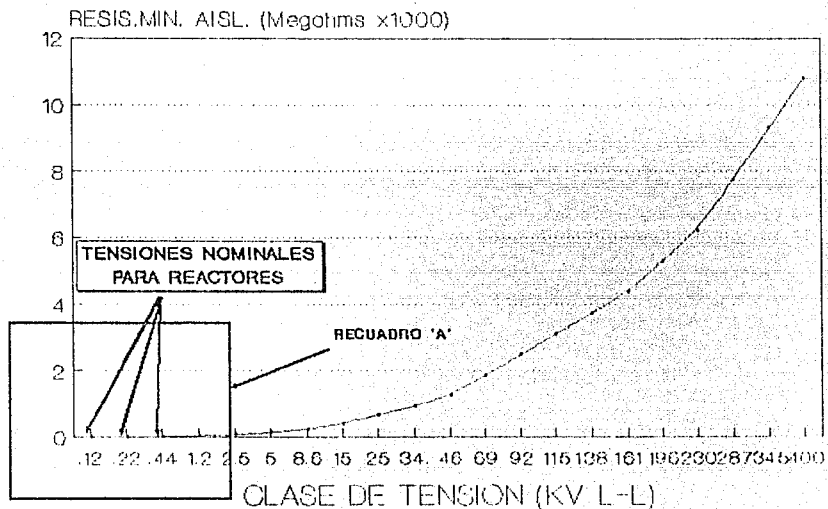
$$R \text{ min } (200C) = 26.7 \text{ M}\Omega/\text{KV} (0.625 \text{ KV}) = 16.68 \text{ M}\Omega$$

RESISTENCIA MINIMA DE AISLAMIENTO EN ACEITE TEMPERATURA BASE 20oC			
CLASE DE VOLTAJE KV	MEGOHMS	CLASE DE VOLTAJE KV	MEGOHMS
0.127	3.38	69	1850
0.220	5.06	92	2480
0.440	11.73	115	3100
1.2	32	138	3720
2.5	68	161	4350
5	135	196	5300
8.66	230	230	6200
15	410	287	7750
25	670	345	9300
34.5	930	400	10782
45	1240		

Al igual que en el caso anterior la temperatura tiene un efecto adverso sobre la resistencia de aislamiento. Como no en todos los casos es factible medir la resistencia a temperatura ambiente -como sucede con las máquinas en operación continua, que pueden tardar varias horas en alcanzar la temperatura ambiente en su Hot Spot- se requiere un criterio que permita conocer el comportamiento de los aislamientos cuando la temperatura varía. Afortunadamente los fabricantes de equipo han establecido valores que permiten conocer rápidamente este comportamiento. En la Tabla IV.F aparece el factor de corrección por temperatura que debe aplicarse para cada temperatura y en la figura IV. se ve la curva que corresponde a los valores que aparecen en dicha tabla, con lo que se tiene la posibilidad de dar una solución gráfica aproximada pero rápida al problema.

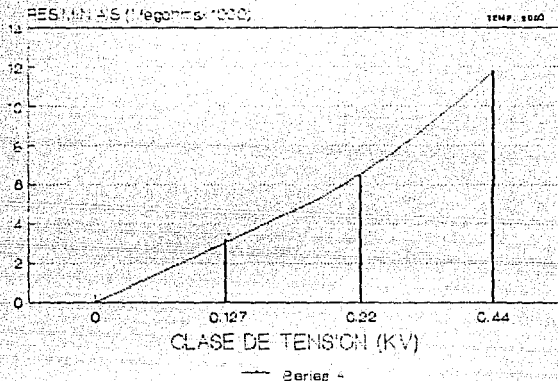
RESISTENCIA MINIMA DE AISLAMIENTO

AISLAMIENTO SUMERGIBLE EN ACEITE A 20oc



Series A

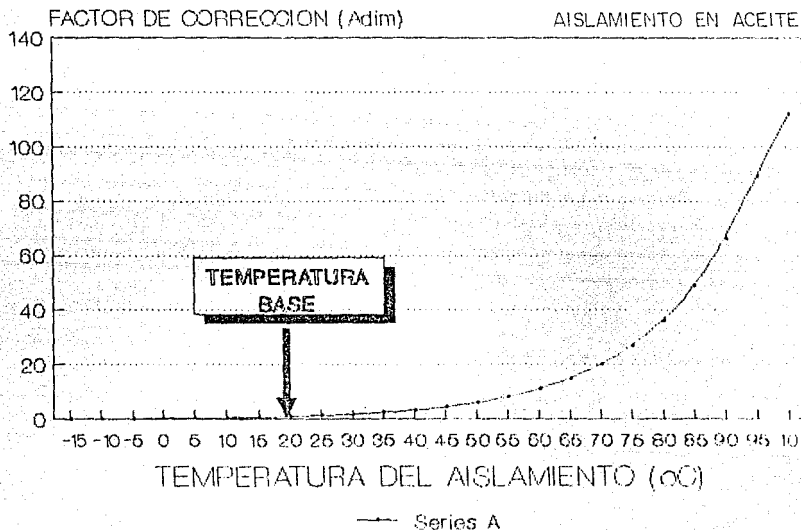
RESISTENCIA DE AISLAMIENTO EN ACEITE RECUADRO 'A'



AGRI 0470/7-69

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO CORRECCION POR TEMPERATURA			
TEMPERATURA DEL AISLAMIENTO	FACTOR DE CORRECCION	TEMPERATURA DEL AISLAMIENTO	FACTOR DE CORRECCION
95	89.0	35	2.5
90	66.0	30	1.8
85	49.0	25	1.3
80	36.2	20	1.0
75	26.8	15	0.73
70	20.0	10	0.54
65	14.8	5	0.40
60	11.0	0	0.30
55	8.1	-5	0.22
50	6.0	-10	0.16
45	4.5	-15	0.12
40	3.3		

RESISTENCIA DE AISLAMIENTO CORRECCION POR TEMPERATURA



Para tener una solución exacta a este problema y al mismo tiempo evitar el manejo de Tablas y gráficas, se puede obtener la ecuación que corresponde a dicho criterio.

Siendo F.C. el factor de corrección por temperatura.

$$F.C. = A \epsilon^{bt}$$

donde ϵ es la base de los logaritmos neperianos
 t es la temperatura en la que se hizo la medición
 A y b son las constantes por determinar

Considerando en la Tabla dos puntos de interés como pueden ser 75 y 85°C se tiene:

$$\ln A + 75 b = \ln 26.8 \dots (1)$$

$$\ln A + 85 b = \ln 49.0 \dots (2)$$

resolviendo por ecuaciones simultáneas.

$$10 b = \ln 49 - \ln 26.8$$

$$b = \frac{\ln 49 - \ln 26.8}{10} = 0.0603418$$

$$A = \epsilon^{\ln 49 - 85b} = 0.29$$

por lo tanto $F.C. = 0.29 \epsilon^{0.0603 \cdot t}$

$$R (200C) = F.C. \cdot R (\text{Temp Prueba})$$

Con la ecuación anterior encontramos con precisión el valor mínimo de resistencia de aislamiento a la temperatura máxima -o a cualquier otra- que en este caso es de 500C.

$$F.C. (500C) = 0.29 \epsilon^{50(0.0603)} = 5.91$$

$$R_{\min} (500C) = \frac{16.68 \text{ M}\Omega}{5.91} = 2.82 \text{ M}\Omega$$

ESTUDIO TERMICO DEL REACTOR.

En lo que se ha visto sobre el diseño del reactor sólo se ha tratado sobre el cálculo de las dimensiones, en lo que al núcleo se refiere y la cantidad de vueltas y calibre de los conductores. Es lógico que falta tener en cuenta un detalle de mucha importancia como es el de la cantidad de calor que debe disiparse al medio ambiente. Se tienen dos fuentes de calor de importancia: el cobre y el hierro.

Las pérdidas en el cobre son producidas por la circulación de corriente en el bobinado -que tiene cierta resistencia óhmica- donde la Ley de Joule especifica bajo qué condiciones se realiza la transformación de la energía eléctrica en calor. Las pérdidas en el hierro se deben a los fenómenos de histéresis y corrientes parásitas inducidas en el núcleo por efecto del campo magnético alterno.

Si bien es cierto que las dos potencias mencionadas son de valor pequeño comparadas con la potencia transferida desde la red al circuito de carga, no puede ignorarse que esa cantidad de calor debe disiparse al ambiente representando unos cuantos watt. Ambas potencias son del mismo orden y pueden en ciertos casos llegar a ser iguales.

Un detalle que conspira contra la disipación de calor en un reactor es que éste no tiene partes en movimiento que produzcan una ventilación forzada. En las máquinas eléctricas rotatorias se dispone de una excelente ventilación en las partes móviles, lo que permite disminuir el problema de calentamiento. Resulta así que el problema de refrigeración es capaz de adquirir gran importancia en los reactores, lo que puede obligar a modificar los cálculos de las dimensiones, por haber resultado de un tamaño

muy pequeño como para disipar todo el calor producido.

Es evidente que existe una relación entre el tamaño y la capacidad de disipación. La transmisión de calor sólo se hace a razón de una fracción por unidad de superficie disipante. Esto implica que tanto en el bobinado como en el núcleo interesará sólo la parte exterior o envolvente ya que es ésta la que se encuentra en contacto con el medio ambiente.

Habrà que calcular entonces la potencia a disipar por cada centímetro cuadrado de superficie disipante, o sea watt/cm². Para el cobre se hará el cálculo dividiendo las pérdidas en los devanados por la superficie externa de todo el devanado ya terminado, descontando las partes que, por estar en contacto con el núcleo, no sirvieran para disipar calor. Para el núcleo, se dividirán las pérdidas totales en el hierro entre la superficie útil disipante que presenten contacto con el ambiente exclusivamente, es decir, descontando también las partes que estén en contacto con el cobre.

Es lógico que si se está diseñando un reactor no se puede aún hacer ensayos en él, de modo que estos cálculos son verificaciones a hacer con las dimensiones que resultaron de la teoría.

El cálculo de las superficies disipantes se reduce a un problema simple de geometría, pero es conveniente disponer de fórmulas simples que eviten cálculos laboriosos que pueden llevar a resultados erróneos además de que son aplicables a cualquier reactor en general.

Superficie de Enfriamiento del Bobinado.- En un reactor, el bobinado terminado forma un cilindro que envuelve a la rama del núcleo, evitándose el contacto directo en la parte interior

usando separadores entre la bobina y el hierro. En el núcleo en anillo lo común es repartir el devanado en dos anillos en serie, uno en cada rama a fin de aumentar la superficie de disipación, pero como lo común es tener un sólo cilindro usaremos esta última alternativa.

El bobinado forma un cilindro como el que ilustra la figura IV.6. El diámetro interno D es el del círculo en el cual queda inscrita la sección del núcleo y es un dato obtenido en el cálculo ya hecho anteriormente. La altura del bobinado es b , que coincide aproximadamente con el alto de la ventana. El espesor del cilindro hueco vale c e interviene en las dimensiones que buscamos.

Calcularemos ahora la superficie de disipación, que es la suma de cuatro partes: un cilindro interno, uno externo y dos coronas circulares, que son las bases de la figura.

La superficie del cilindro interno es:

$$S_{C I} = \pi D b$$

La superficie del cilindro externo es:

$$S_{C E} = \pi b (D + c)$$

La superficie de cada base o corona circular vale:

$$S_{C C} = \frac{\pi}{4} \left(D + \frac{c}{2} + \frac{c}{2} \right)^2 - \frac{\pi D^2}{4} =$$

$$= \frac{\pi}{4} (D + c)^2 - D^2$$

y para las dos coronas:

$$S_{2CC} = \frac{\pi}{2} (D + c)^2 - D^2$$

La Superficie disipante total es:

$$S_{DE} = S_{CI} + S_{CE} + S_{2CC}$$

$$S_{DE} = \pi D b + \pi b (D + c) + \frac{\pi}{2} (D + c)^2 - D^2 =$$

$$= \pi D b + \pi D b + \frac{\pi}{2} (D^2 + 2 D c + c^2 - D^2)$$

$$= 2 \pi D b + \pi b c + \pi D c + \frac{\pi c^2}{2} =$$

$$S_{DE} = \pi (2 D b + b c + D c + 0.5 c^2)$$

y sustituyendo valores:

$$S_{DE} = 3.14 (2 \times 8 \times 1.16 + 1.16 \times 7.28 + 8 \times 2.28)$$

$$+ 0.5 (1.28^2) =$$

$$= 3.14 (119.5 + 52.12 + 58.24 + 20.5)$$

$$\therefore SDE = 790 \text{ cm}^2$$

Hay que aclarar que la superficie obtenida corresponde a un sólo cilindro. Con las fórmulas anteriores es posible obtener el área emisora del cobre, en cm^2 . El cociente entre la potencia perdida en el cobre y la superficie emisora da la potencia unitaria a disipar.

SUPERFICIE DE ENFRIAMIENTO DEL NUCLEO.

Para el hierro debemos hacer consideraciones análogas a las hechas para el cobre, para calcular la superficie exterior capaz de transmitir calor al ambiente.

La superficie disipante del núcleo puede deducirse a partir de cuatro superficies parciales que son (Fig IV.):

1.- La superficie de las dos caras principales:

$$S C P = 2 (a + 2b + 2c) (e + 2d) =$$

$$= 2 (44 + 2 (33.5) + 2 (22)) (77 + 2(34))$$

$$S C P = 2 (155) (145) = 44,950 \text{ mm}^2$$

2.- La superficie de los cuatro costados (2 horizontales y dos verticales):

$$S C C = 2 (f (a + 2b + 2c)) + 2 (f (e + 2d))$$

$$= 2 (58 (155)) + 2 (58 (145)) = 17,980 + 16,820$$

$$S C C = 34,800 \text{ mm}^2$$

3.- La superficie de las caras internas de las ventanas:

$$S C I V = 4 (f e) + 4 (f d) = 4 (58 \times 77) + (58 \times 33.5) =$$

$$S C I V = 17,864 + 7,772 = 25,636 \text{ mm}^2$$

4.- La superficie de las ventanas (ambos lados):

$$S V = 4 (b e) = 4 (33.5 \times 77) = 10,318 \text{ mm}^2$$

De donde se obtiene la superficie total disipante del núcleo (SDN):

$$S D N = S C P + S C C + S C I V - S V$$

$$= 44,950 + 34,800 + 25,636 - 10318$$

$$S D N = 95,068 \text{ mm}^2$$

TRANSMISION DEL CALOR PRODUCIDO.

Las pérdidas en el cobre y en el hierro se transforman en calor, el cual debe ser transmitido al ambiente o al elemento refrigerante. Cuando apenas se conecta el reactor está a la temperatura ambiente, y durante un periodo más o menos corto, sufre una elevación de temperatura, hasta que se llega a un equilibrio entre la cantidad de calor producido y la cantidad de calor transmitido. Ese estado de equilibrio se produce a un nivel térmico determinado, cuya temperatura debe estar dentro de los límites fijados por la norma.

Si la superficie a través de la cual se realiza la transmisión es insuficiente, la cantidad de calor producido será mayor que la absorbida por el aire o el medio refrigerante, lo que producirá una elevación inadmisible de temperatura. Si esta superficie es demasiado grande, la transmisión se realiza en condiciones ventajosas y la temperatura del reactor es menor que la especificada, lo que es normalmente conveniente. Resulta así que es necesario estudiar la forma como se transmite el calor hacia el ambiente.

Distinguimos tres formas distintas de transmisión del calor: por conducción, por convección y por radiación. La transmisión por conducción es la que se realiza dentro de la misma masa sólida o líquida, o entre dos sustancias de la misma naturaleza; en el reactor se produce entre las partes internas del núcleo y las externas, por ejemplo, o entre las espiras del bobinado. También existe conducción del calor a través de la masa líquida del refrigerante, sea agua o aceite.

La transmisión por convección se cumple entre un sólido y un

fluido en movimiento, y es el caso del núcleo o el bobinado, en contacto con el aire o con el aceite de enfriamiento. Asimismo el recipiente que contiene al reactor está en contacto con el ambiente, de modo que se realice una transmisión por convección.

La transmisión de calor se cumple siempre que un cuerpo está a una temperatura mayor que el ambiente. Todo el reactor irradia calor; es el tipo de transmisión que se cumple entre el Sol y la Tierra por ejemplo, y que explica por qué hay más calor bajo los rayos solares que a la sombra.

Estudiaremos separadamente las cantidades de calor que se pueden transmitir en las tres formas distintas, ya sea desde el punto de vista de la temperatura que adquiere el reactor o simplemente calculando la cantidad que se puede emitir en una superficie dada. Es lógico que se parta de dos cantidades fijas: la cantidad de calor (o la potencia eléctrica de pérdidas) y la superficie de transmisión, porque esas dos cantidades ya fueron determinadas al calcular el reactor.

Todo lo que haremos a continuación es verificar si las dimensiones resultantes del cálculo eléctrico son suficientes, para aumentarlas, en caso de no serlo o por lo menos, tratar de mejorar el sistema refrigerante, en caso de no poder alterar las dimensiones. Se trata de un problema de tanteos, porque es muy difícil resolverlo analíticamente y muchas veces se resuelve aplicando un empirismo puro, basado en estadísticas de fabricación.

Transmisión por Conducción.— El calor producido en el interior del núcleo debe ser conducido a la zona externa para que sea absorbido por el aire o por el aceite. Si la sección de pasaje no es suficiente, habrá una diferencia de temperatura entre la parte

interior del núcleo y su contorno. Puede calcularse la cantidad de calor que se transmite por conducción a través de cualquier masa, sea líquida, sólida o gaseosa, aunque esta última no se comporta como conductora del calor, pues la transmisión se hace casi exclusivamente por convección. Esa cantidad de calor es proporcional a la superficie de pasaje normal a la dirección de la conducción y a la diferencia de la temperatura entre la parte caliente y la parte fría; además, será inversamente proporcional a la distancia que debe recorrer el calor y a la resistividad térmica del material o dificultad que oponga a la transmisión del calor.

Todo lo anterior puede ser expresado mediante una relación, pero conviene más referirse a una diferencia de temperatura que habrá entre la parte caliente y la parte fría cuando se debe transmitir una cantidad de calor dada. Tenemos así que la diferencia de temperatura entre la parte más caliente y la fría será:

$$\theta = \frac{W L \beta}{S}$$

donde W es la potencia a transmitir en watts; L es la longitud que debe recorrer el calor, en cm y β es la resistividad térmica del material que conduce el calor, dado en la tabla IV.B; S es la superficie a través de la cual se transmite el calor, medida perpendicularmente a la dirección en que se realiza la transmisión, y tomada en mm^2 .

TABLA IV. H

RESISTIVIDAD TERMICA DE MATERIALES

MATERIAL	θ	MATERIAL	θ
Aceite de Transform...	620	Hierro Laminado	1.3
Agua	180	Laminación de Acero en	
Aire	4400	el sentido de las chapas.	6
Aluminio	0.75	Laminación de Acero a	
Cartón Prensado	1100	través de las chapas	65
Cartón con Aceite	700	Mica	280
Cobre	0.28	Porcelana y Cemento	100
Hierro Fundido	2.5	Tela Barnizada	600

Nuestro núcleo es de laminación, pero vemos en la tabla que el coeficiente de resistividad es muy distinto, según se tome el sentido de esa laminación. Para ponernos en las peores condiciones calcularemos con el valor 65. Lo mismo, al suponer que la longitud a recorrer por todo el calor es máxima, estamos en un terreno hipotético, pues el calor se produce en toda la masa, y no solamente en la parte más interna; de toda la masa del núcleo se transmite calor al exterior, y si se toma para cálculos la mitad del espesor del núcleo en su sección más gruesa, esa es la distancia máxima a recorrer, con lo que estamos suponiendo las peores condiciones. Haciendo operaciones, se tiene:

$$\theta = \frac{39.84 \times 7.25 \times 65}{\dots} = 7.3 \cdot C$$

es decir, que el exceso de temperatura en la parte más interna del núcleo y su contorno será siempre menor a θ oC. lo que es aceptable. Esta cifra será difícilmente alcanzada, dado que la mitad de la transmisión se cumple con resistividad diez veces menor, según se aprecia en la tabla, pues más o menos la mitad de la masa del núcleo puede considerarse en sentido de la laminación.

TRANSMISION POR CONVECCION.

Todas las partes metálicas del reactor como el núcleo, el bobinado, la caja metálica, etc., están en contacto con el aire o con el aceite de refrigeración, y, como cualquiera de los dos fluidos toma calor al paso, se produce la convección de que hablamos. Para que tenga lugar la transmisión en el sentido del sólido al fluido, es condición que el primero esté a mayor temperatura, lo que se cumple siempre en reactores.

Debido a la dirección del movimiento de los fluidos, cuando ellos reciben un incremento de temperatura, la transmisión es de distinto modo en planos horizontales que en verticales. En efecto, un fluido al calentarse pierde densidad y sube, de modo que la aptitud para tomar calor al paso será mayor si el plano que se lo entrega está en posición horizontal.

Haremos dos distinciones, según la posición del plano que está en contacto con el fluido. Para planos verticales, la potencia que se puede disipar, determinada por la cantidad de watt/cm² está dada por:

$$W = 2.2 \times 10 \exp^{-4} \theta^k$$

en cuya expresión el exponente k del exceso de temperatura sobre

el ambiente θ tiene valores comprendidos entre 1.0 para bobinados en contacto con el aire, hasta 1.5 para inmersión en aceite. En valores medios puede tomarse para k el valor de 1.25. Si las superficies no son planas, hay que afectar a la expresión anterior por un coeficiente correctivo. El exceso de temperatura sobre el ambiente θ se toma en $^{\circ}\text{C}$.

La expresión anterior es válida para cierta presión atmosférica, pues es lógico que la altitud del lugar en que se halle al reactor tiene influencia en la transmisión calorífica. A fin de generalizar la fórmula, se le afecta por un coeficiente d , que se da en función de la altura sobre el nivel del mar a la que se encuentre el reactor. La Tabla IV.1 da los valores de ese coeficiente, con lo que la fórmula queda así:

$$W = 2.2 \times 10 \exp^{-4} d \theta^k$$

TABLA IV.1 .

CONSTANTE DE CORRECCION POR EFECTO DE ALTITUD							
Altura sobre el Nivel del Mar	!	d	!	Altura sobre el Nivel del Mar	!	d	!
0	!	1.000	!	2,500	!	0.87	!
500	!	0.975	!	3,000	!	0.84	!
1,000	!	0.950	!	3,500	!	0.81	!
1,500	!	0.922	!	4,000	!	0.78	!
2,000	!	0.895	!	5,000	!	0.72	!

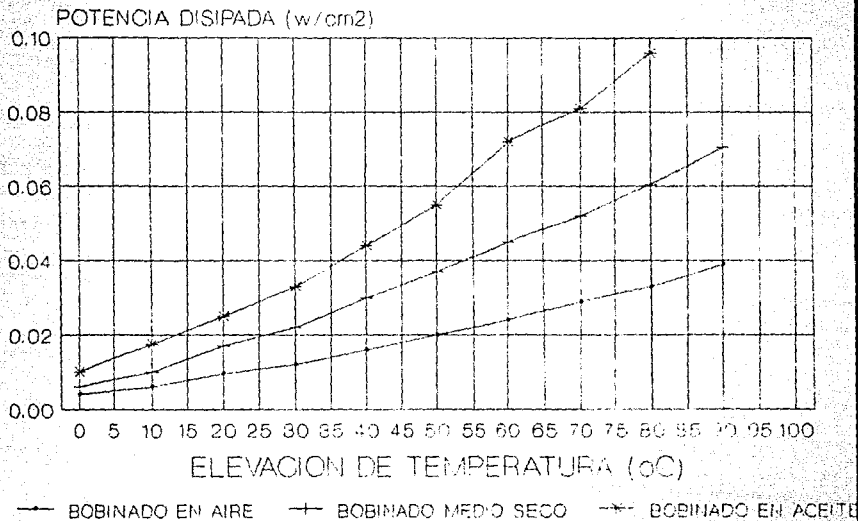
La ecuación que da la potencia a transmitir por cm^2 de superficie de contacto con el fluido, puede ser invertida, a fin de calcular el exceso de temperatura sobre el ambiente, cuando se tiene el valor de watt/cm^2 . Para ello se puede resolver de varias formas a partir de la expresión anterior, pero resulta más cómodo usar la curva de la figura IV.15 que da en abscisas la potencia de pérdidas a transmitir por cm^2 , y en ordenadas el exceso de temperatura sobre el ambiente, en $^{\circ}\text{C}$. Esa gráfica, lo mismo que la fórmula anterior, valen para superficies verticales, que son las que dan las peores condiciones térmicas. Para superficies horizontales la potencia puede aumentarse en un 15% a 20% en promedio.

La gráfica anterior da los valores de la potencia sobre el nivel del mar. Sabemos que si hay una altura apreciable debe aplicarse una constante de corrección menor que la unidad. Si lo que se está buscando es la temperatura, se divide ésta por el factor.

TRANSMISION POR RADIACION.

Un cuerpo caliente irradia calor, en una cantidad que depende de una serie de factores. La Ley de transmisión de calor por radiación fue establecida por Stefan-Boltzmann y establece que la cantidad de calor radiada es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo, y a un coeficiente que depende del estado, color y naturaleza de la superficie del cuerpo emisor. En el caso de reactores es conveniente considerar todos esos factores pues se tienen diversos materiales calientes, teniendo cada uno de ellos una superficie exterior de distinto aspecto, tanto en el estado como en el color, factores que influyen en la cantidad de calor radiada.

TRANSMISION DE CALOR POR CONVECCION



Si el fluido que rodea al cuerpo emisor tiene una temperatura conocida, que es lo común, ya que no es posible suponer que está a 0oK, es decir -273oC, hay que hacer la diferencia entre las cuartas potencias de las temperaturas absolutas del cuerpo radiante y del fluido. Las temperaturas absolutas, en relación con las temperaturas relativas, dadas en oC se relacionan así:

$$T = t + 273$$

La expresión que permite calcular la potencia que se puede radiar desde un cuerpo que está a una temperatura absoluta T_a , hacia un fluido que está a una temperatura absoluta T_b , está dada por la siguiente expresión:

$$W = 5.8 \times 10 \exp^{-12} \epsilon (T_a^4 - T_b^4)$$

Donde la potencia W se da en watt/cm² de superficie emisora, y el factor ϵ es el coeficiente de emisión de calor, y su valor se da en la Tabla adjunta, en función del tipo de material o de la capa que lo cubre. Si el material está pintado debe tomarse el valor que corresponda a la pintura y no al material en sí.

Se nota en la tabla la gran diferencia que resulta en el aluminio, por ejemplo, al pintarlo de negro. Esta es la razón por la que siempre se pinta de ese color la caja de los balastros, aunque también puede ser verde o gris.

La aplicación de la fórmula puede resultar un poco laboriosa debido a las operaciones con las potencias de las temperaturas absolutas. Por ese motivo se han trazado las curvas de la figura

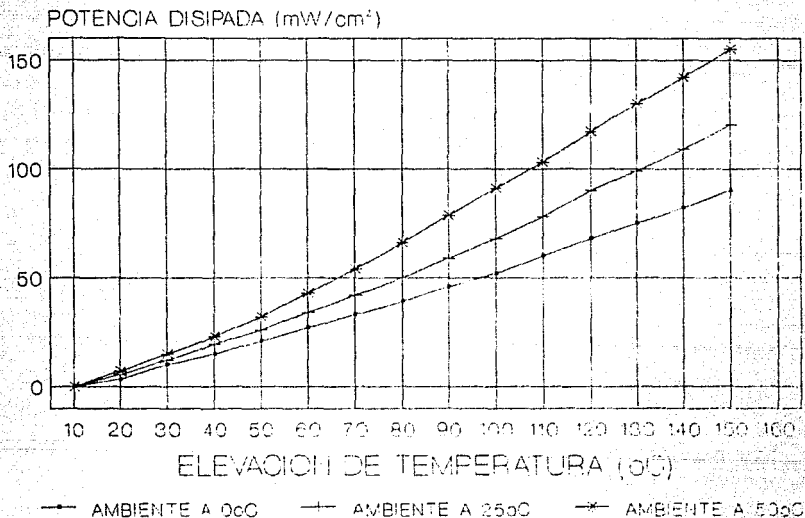
TABLA IV.

COEFICIENTE		DE EMISION		DE CALOR	
MATERIAL EMISOR	€	MATERIAL EMISOR	€		
Acero Oxidado	0.70	Pinturas:			
Aluminio Pulido ..	0.08	De Aluminio	0.55		
Amianto	0.95	De Bronce	0.80		
Bronce Pulido	0.60	Esmalte Blanco	0.95		
Cobre	0.15	Laqué Blanco	0.95		
Cobre Oxidado	0.60	Grís	0.95		
Hierro	0.18	Verde	0.95		
Niquel	0.12	Negro Brillante ...	0.90		
Zinc Pulido	0.05	Negro de Humo	0.95		

IV.16 , que dan en abscisas las potencias de radiación, en watt/cm² para tres temperaturas distintas del ambiente. En ordenadas se leen los excesos de temperatura sobre el ambiente en oC directamente. Si la temperatura ambiente no coincide con ninguna de las tres curvas (como es frecuente) es sencillo hacer una interpolación gráfica, pues las curvas son similares y están bastante próximas. Todas las curvas de esta figura han sido trazadas tomando como base un coeficiente de emisión de 0.95, que es lo común.

En caso de querer calcular la potencia a transmitir por radiación con distinto coeficiente de emisión, la corrección es simple pues dicho coeficiente aparece en la fórmula como factor directo. Luego, no resta más que establecer una proporción entre los dos coeficientes, el real y 0.95, que es el que vale en las

TRANSMISION DE CALOR POR RADIACION



agrr/clyfc/89

FIGURA No IV.16

curvas y multiplicar la potencia que se les lea en las abscisas por ese resultado, que será siempre menor que la unidad, con lo que tendremos evidentemente una potencia menor para irradiar. No debe aplicarse ese factor de corrección a las ordenadas, porque la ley de las curvas sigue una cuarta potencia.

TRANSMISION POR CONVECCION Y RADIACION SIMULTANEAS.

En los reactores no se puede hablar de una transmisión neta por una de las dos formas tratadas anteriormente. El bobinado o el núcleo, ya sea que estén en contacto con el aire o sumergidos en aceite, comunican a cualquiera de los dos fluidos el calor que contienen y lo hacen simultáneamente por convección y por radiación. Puede estimarse el porcentaje o fracción que corresponde a cada tipo de transmisión, pero el proceso analítico resulta largo y no muy exacto, pues hay que adoptar una serie de coeficientes numéricos que intervienen en las expresiones correspondientes.

Se ha visto que la transmisión por convección depende de la altitud sobre el nivel del mar, de la posición de las superficies y del tipo de fluido que rodea a la superficie emisora. En cambio, la transmisión por radiación depende solamente de la temperatura del cuerpo caliente y del estado y color de la misma.

Si se calcula separadamente la potencia a disipar por unidad de superficie en función de un exceso dado de temperatura sobre el ambiente (temperatura de elevación) que en nuestro caso es un límite fijado por la norma NOM-J 197-1977 se podrá apreciar cual fracción sobre el total -que será la suma de las dos cifras obtenidas- corresponde a una forma o a la otra de transmisión.

Así se tiene, de acuerdo con la norma, un exceso de temperatura ílmite de 25°C sobre el ambiente y el ambiente está a 25°C, se tiene para superficies verticales sumergidas en aceite:

Potencia a disipar por convección (Fig IV.): 0.029 W/cm²

Potencia a disipar por radiación (Fig IV.): 0.017 W/cm²

Total : 0.046 W/cm²

de donde se ve enseguida que del total transmitido, corresponde un 63% a la convección y 37% a la radiación. Hay que aclarar que se ha supuesto un coeficiente de emisión de 0.95 pues las curvas de referencia lo toman como base.

CONCLUSIONES.

Una vez terminado el armado y las pruebas reales al reactor se pueden hacer las siguientes conclusiones sobre todo el trabajo en general.

- 1.- Es muy conveniente proporcionar luz en calidad y cantidad adecuada, de acuerdo con la actividad que se requiera desarrollar y con las condiciones ambientales imperantes.
- 2.- Se puede cumplir con el punto anterior optimizando los sistemas de iluminación con lo que es factible ahorrar energía sin disminuir apreciablemente el confort visual y la calidad de vida.
- 3.- La optimización de los sistemas fluorescentes es de primordial importancia, si se considera el peso porcentual que corresponde a este sistema (Fig V.1). Las perspectivas de ahorro son muy amplias si se considera que del total de la generación bruta en México el 20% se destina a la iluminación. De aquí se tiene que el 12% de este total corresponde a fluorescente y si se asume un ahorro promedio de 25% mediante el empleo de productos ahorradores fluorescentes, el ahorro neto potencial puede alcanzar un 3% sobre el gran total de generación bruta, es decir el equivalente a la generación de una planta como Infiernillo.
- 4.- La optimización sólo es alcanzable si se cuenta con instrumentos técnica y legalmente competentes, como es el caso de los Laboratorios de Alumbrado, tanto de fabricantes como de dependencias gubernamentales y de instituciones educativas.

POBLACION PORCENTUAL DE LAMPARAS

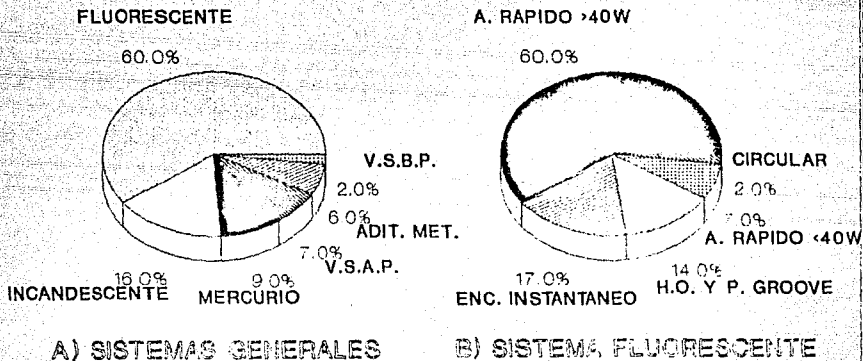


FIGURA V.1

- 5.- El Reactor Patrón, sólo o en combinación con la lámpara Patrón representa un eslabón insustituible en un Laboratorio ya que es la referencia primaria en toda prueba eléctrica, térmica o fotométrica.
- 6.- Se requiere conocer a fondo los componentes principales de un sistema de iluminación (lámpara-balastro-luminario) con objeto de realizar adecuadamente todo tipo de pruebas.
- 7.- El mejor apoyo técnico para el diseño del reactor lo representa la norma nacional correspondiente, en la que se establecen los parámetros y requisitos indispensables para considerar a un reactor como referencia primaria.
- 8.- Los procedimientos, el equipo y el personal encargados de la prueba deberán cumplir con los señalamientos normalizados para que los resultados sean confiables y reproducibles.
- 9.- La aplicación de los fundamentos teóricos complementados con las recomendaciones empíricas emanadas de la práctica dan lugar a una combinación muy eficiente para el diseño de equipo eléctrico.
- 10.- Dado que el reactor patrón es un dispositivo electromagnético, funciona en base a los principios de electricidad y magnetismo, por lo que se reconoce a las Leyes de Faraday y Ohm como el punto de partida para el diseño, en virtud de que aún las ecuaciones más complejas tienen su origen en dichas leyes.
- 11.- El acceso a información técnica-científica completa sobre los materiales magnéticos comercialmente disponibles permite

la optimización de los diseños electromagnéticos.

- 12.- Las restricciones al usar materiales nacionales pueden compensarse implementando pruebas indirectas que nos permitan conocer las características primordiales para cualquier diseño.*
- 13.- El cálculo de permeabilidad, pérdidas eléctricas y magnéticas, fuerza magnetomotriz, elevación de temperatura, resistencia de aislamiento, etc. puede realizarse mediante métodos eminentemente teóricos, comprobando los resultados con procedimientos prácticos.*
- 14.- Es posible llevar a la realidad diseños eficientes usando materiales y tecnología totalmente nacionales.*

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA.

MATERIALES MAGNETICOS EN LA INDUSTRIA ELECTRICA
M.I.E.E. P.R. BARDELL
EDICIONES URMO BILBAO, ESPAÑA 1970.

TRANSFORMADORES

ING. FRANCISCO L. SINGER
EDIT. NEO TECNICA BUENOS AIRES, ARGENTINA 1985.

PRINCIPIOS DE INGENIERIA ELECTRICA
WILLIAM TIMBIE & VANNEVAR BUSH
EDIT. C.E.C.S.A. MEXICO 1956.

INTRODUCCION A LOS CIRCUITOS ELECTRICOS
H. ALEX ROMANOWITZ
EDIT. C.E.C.S.A. MEXICO 1984.

TECNOLOGIA APLICADA EN LA CAPACITACION Y APLICACION
DE LOS ELEMENTOS DE ALUMBRADO.
ING. JUAN IGNACIO LIHA VELASCO
INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL, MEXICO.

CIRCUITOS MAGNETICOS Y TRANSFORMADORES
STAFF DEL M.I.T.
EDITORIAL REVERTE MEXICO 1980.

CATALOGO TECNICO. BALASTROS PARA LAMPARAS FLUORESCENTES, DE MERCURIO, MULTIVAPOR, VAPOR DE SODIO EN ALTA Y BAJA PRESION Y GAS NEON.

MANUFACTURERA DE REACTORES, S.A.

PHILIPS ILUMINACION. BALASTROS ADVANCE PARA LAMPARAS FLUORESCENTES.

PHILIPS LIGHTING.

BALASTROS LUMICON/ADVANCE. BALASTROS PARA LAMPARAS FLUORESCENTES LUMISISTEMAS, S.A.

INDUSTRIA MEXICANA DE REACTORES, S.A.

CATALOGO GUIA DE BALASTROS PARA LAMPARAS FLUORESCENTES.

CURSO DE BALASTROS

ING. ALFREDO BADILLO MEXICO 1986.

LUMISISTEMAS, S.A.

BOLETIN DE INGENIERIA No. 034

LAMPARAS FLUORESCENTES

GTE SYLVANIA.

GUIDE OF ARMCO ELECTRICAL STEELS FOR MAGNETIC CORES

ARMCO INC. MIDDLETOWN, OHIO.

**MANUAL DE LUMINOTECNIA
OSRAM BARCELONA 1975.**

**LAMPARAS ELECTRICAS,
ING. JOSE RAMIREZ VAZQUEZ
MONOGRAFIAS C.E.A.C. DE ELECTRICIDAD
BARCELONA, ESPANA 1975**

**GRAFICAS Y TABLAS PARA EL CALCULO DE LINEAS DE TRANSMISION
REPRESENTACIONES Y SERVICIOS DE INGENIERIA
MEXICO 1985.**

**BOLETIN DE INFORMACION TECNICA 0-306
APLICACIONES: LAMPARAS FLUORESCENTES Y DE VAPOR DE MERCURIO
FOCOS S.A. SOLAR SYLVANIA.**

**MEXICON 1979, MEMORIA TOMO II.
REACTORES
ING. JAVIER GUAJARDO TOUCHE
PRODUCTOS INDUSTRIALES C.H., S.A.**

**NORMA OFICIAL MEXICANA J-198-1977
METODOS DE MEDICION EN BALASTROS PARA LAMPARAS FLUORESCENTES**

NORMA OFICIAL MEXICANA J-295-1983

LAMPARAS FLUORESCENTES DE CATODO CALIENTE PARA ALUMBRADO GENERAL

NORMA OFICIAL MEXICANA J-197-1977

REACTORES PATRON PARA LAMPARAS FLUORESCENTES

NORMA OFICIAL MEXICANA J-156-1977

**BALASTROS PARA OPERAR LAMPARAS FLUORESCENTES DE CATODO CALIENTE
PARA ALUMBRADO GENERAL.**