# RADIACIONES NO IONIZANTES

# PREVENCION DE RIESGOS

INSTITUTO NACIONAL
DE SEGURIDAD E HIGIENE
EN EL TRABAJO

# RADIACIONES NO IONIZANTES
# PREVENCION DE RIESGOS

**INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO**
CENTRO NACIONAL DE NUEVAS TECNOLOGIAS
MAYO 1988

Edita e Imprime:
EDICIONES Y PUBLICACIONES
I.N.S.H.T. Madrid

Depósito Legal M-12676-89
I.S.B.N. 84-7425-302-0
N.I.P.O. 211-89-013-8

# RADIACIONES NO IONIZANTES
# PREVENCION DE RIESGOS

Han participado en la elaboración de este texto:

- D. EMILIO GALLARDO AGUILAR
  *Ldo. en Ciencias Físicas*
  Centro Nacional de Medios de Protección. SEVILLA

- D. MANUEL GOMEZ-CANO HERNANDEZ
  *Ingeniero Industrial*
  CNNT. MADRID

- D. JAVIER MALDONADO GONZALEZ
  *Médico del Trabajo*
  CNNT. MADRID

- D.ª M.ª JOSE RUPEREZ CALVO
  *Dra. en Ciencias Químicas*
  CNNT. MADRID

- D. DARIO SAN MARTIN FERRER
  *Ingeniero de Montes*
  CNNT. MADRID

Edición de texto:

- M.ª José Alcañiz Martínez, CNNT. MADRID
- M.ª José Carbajosa López, CNNT. MADRID
- Silvia de Roque Irache, CNNT. MADRID

Coordinación: D.ª M.ª José Rupérez Calvo

# INDICE


Página

0. INTRODUCCION ..... 11

1. RADIACIONES ELECTROMAGNETICAS. CONCEPTOS BASICOS. Definición y clasificación. Interacción con la materia. Propagación. Terminología y unidades radiométricas. Fundamentos de los efectos biológicos de las radiaciones no ionizantes. ..... 15

2. RADIACIONES ULTRAVIOLETA, VISIBLE E INFRARROJA. Introducción, clasificación espectral. Fuentes de exposición ocupacional y usos industriales. Efectos biológicos de las radiaciones UV. Efectos biológicos de las radiaciones infrarrojas. Límites de exposición. Evaluación y control de riesgos ..... 37

3. RADIACIONES DE MICROONDAS Y RADIOFRECUENCIAS. Generalidades. Bandas del espectro RF. Generación de microondas. Antenas. Usos de microondas como fuente de calor, como fuente de transporte de información. Interacción de la energía de MO y RF con los sistemas biológicos. Efectos biológicos de las radiaciones de microondas y radiofrecuencias. Efectos de la exposición laboral. Control del riesgo en las radiaciones de microondas. Recomendaciones del IRPA/INIRC. Normas de protección del ANSI. Distancia de seguridad. Protección frente a la radiación de microondas .... 63

4. LASERES, RIESGOS Y MEDIDAS PREVENTIVAS. Introducción. Aplicaciones y usos industriales. Riesgos derivados de la utilización de los láseres. Efectos biológicos de la radiación láser. Clasificación de láseres. Límites de exposición ocupacional. Control de riesgos ... 97

5. ULTRASONIDOS. Introducción. Fundamentos físicos. Fuentes de generación y exposición personal. Riesgos. Sistemas de medida. Límites de exposición. Medidas de control ..... 127

6. PROTECCION OCULAR CONTRA RADIACIONES NO IONIZANTES. Oculares filtrantes. Elección del adecuado grado de protección. Equipos de protección en soldadura ..... 149

## PRESENTACIÓN

Dentro del campo de las «Nuevas Tecnologías», los usos y aplicaciones de las Radiaciones No Ionizantes (RNI) en los países desarrollados han experimentado en los últimos años un espectacular avance, tanto en el mundo de las comunicaciones como en el industrial y médico.

Las radiaciones de microondas y radiofrecuencias, láseres, ultrasonidos, etc., han comenzado a implantarse en nuestro país, provocando una serie de dudas y temores en el mundo laboral, debido a la falta general de información respecto a su naturaleza, generación, emisión, niveles permisibles, medidas preventivas y riesgos para la salud.

A la vista de estos problemas, que previsiblemente nos van a afectar de forma progresiva en los próximos años, el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, dentro de su Plan Editorial, presenta este libro que ofrece al lector una visión general y actualizada de las Radiaciones No Ionizantes, su generación, usos, repercusiones para la salud humana y prevención de riesgos derivados de las mismas.

Este interés nuestro coincide con el de la Comunidad Europea que, a partir de la entrada en vigor del Acta Unica (1-12-87) y mediante su tercer Programa de Acción en Materia de Seguridad y Salud en el Trabajo, se propone la consecución del Espacio Social Europeo, en el que el trabajo se desarrolle en «un medio que sea sano y carente de peligro». Esto se logrará mediante el «nuevo enfoque» que busca la *seguridad en el origen* mediante directivas que obliguen a cumplir exigencias básicas de seguridad, en los lugares y equipos de trabajo.

En el caso de las RNI, el objetivo es conseguir un elevado nivel de seguridad en los equipos generadores de radiaciones, fijando requisitos de fabricación que

impidan la exposición de los usuarios a niveles de radiación potencialmente peligrosos. En pocas palabras, esto quiere decir que, en el futuro, se comercializarán preferentemente los equipos emisores de láser, microondas, ultravioleta, etc., que garanticen que el usuario no va a recibir niveles de radiación superiores a los niveles máximos permisibles establecidos para cada tipo de RNI, y que, además, contendrán la información apropiada advirtiendo al usuario del posible riesgo.

En tanto se logran estos objetivos comunitarios, el presente libro puede servir de información y guía a todos los profesionales cuyo trabajo se relacione con este tipo de radiaciones, así como a todas aquellas personas que sientan alguna curiosidad por estos temas.

Finalmente, agradecer su dedicación a los técnicos del Centro Nacional de Nuevas Tecnologías que han hecho posible la redacción de este libro, así como a todas las personas de este Instituto, que han colaborado de alguna forma, en la publicación del mismo.

CONCEPCION SERRANO HERRERA

Directora del Instituto Nacional
de Seguridad e Higiene en el Trabajo

## INTRODUCCION

Radiación no ionizante (RNI) es un término de amplio significado que se utiliza para denominar a todas las radiaciones que, al interaccionar con la materia biológica no poseen suficiente energía para provocar una ionización, y engloba a las radiaciones ultravioleta, visible, infrarroja, láser, microondas y radiofrecuencias.

Se suele incluir en las RNI a los ultrasonidos debido a que, desde el punto de vista de la prevención, los riesgos planteados por las vibraciones acústicas no audibles son muy similares o los de las RNI debido a su naturaleza ondulatoria y su baja frecuencia.

En los últimos veinticinco años, los progresos tecnológicos han permitido el desarrollo de múltiples aplicaciones de estas radiaciones tanto industriales como de uso en la vida común, incrementándose progresivamente el número de trabajadores y de población en general expuestos a nuevos riesgos potenciales.

Cada vez es mayor la utilización de lámparas UV de alta intensidad, con fines germicidas o cosméticos, en arcos de soldadura abiertos, etc., pero el grupo de riesgo más numeroso lo componen los trabajadores al aire libre que están expuestos a la luz solar durante gran parte de su jornada laboral; los órganos dañados son los ojos y la piel, y puede desarrollarse un cáncer de piel con el paso de los años.

La radiación IR se utiliza en muchas industrias como fuente directa de calor, siendo afectados por ella los trabajadores de hornos, fundiciones, etc. Un ejemplo clásico son las cataratas del soplador de vidrio, producidas por exposiciones prolongadas a radiación IR.

En cuanto a los láseres, además de ser apreciados por su alta potencia en la industria y en Defensa, son muy numerosas las aplicaciones de láseres de menor

potencia en investigación, medicina, espectáculos, ensayos de materiales, etc. El desconocimiento de sus riesgos, amplía la posibilidad de exposición de las personas a radiación óptica.

De todas las RNI, las radiaciones de microondas y radiofrecuencias son las menos conocidas por el hombre. Se emplean cada vez más como fuentes de calor en secaderos, hornos, estando muy generalizada su utilización en el campo de las comunicaciones como medio de transporte de información. Al riesgo procedente de su posibilidad de penetración en el cuerpo humano, se une la dificultad de controlarlas, ya que la polución electromagnética se distribuye por todo el medio ambiente.

Los ultrasonidos se usan cada vez con más frecuencia en operaciones tales como soldadura, limpieza de piezas, etc.; sus efectos sobre el organismo humano, son poco conocidos, yendo desde dolores de cabeza, calentamientos locales y cambios biológicos a efectos de tipo psicológico.

El aumento progresivo de los riesgos potenciales derivados de la exposición a RNI, ha hecho plantearse a los responsables de salud de la Comunidad Internacional, las posibles consecuencias que puede tener el uso generalizado de estas radiaciones. Como consecuencia de dicha preocupación, organismos internacionales tales como la Organización Mundial de la Salud (OMS), el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), y la Asociación Internacional de Radioprotección (IRPA), han realizado publicaciones sobre los riesgos de las radiaciones no ionizantes, fruto de sus programas de actuación conjunta, estableciendo recomendaciones sobre límites de exposición y medidas de prevención.

Hay que destacar el hecho de que, en 1984, el IRPA, tras publicar sus recomendaciones sobre los límites de exposición a radiofrecuencias y ultrasonidos, es el primer organismo internacional que hace una llamada de atención sobre la necesidad de una armonización internacional de las medidas de protección.

La legislación que regula el uso de las RNI es muy escasa, sólo los productos láser disponen desde 1984 de una norma de la Comisión Electrotécnica Internacional (CEI), aunque existen otras normas CEI que regulan aspectos parciales relacionados con las RNI, por ejemplo la seguridad eléctrica en emisiones de radio.

A pesar de esta carencia de normas internacionales, se dispone de recomendaciones a nivel nacional, por ejemplo los valores límite umbral (TLV's) establecidos por la Conferencia Americana de Higienistas Gubernamentales (ACGIH), para láseres, ultravioleta, microondas/radiofrecuencias y ultrasonidos, y de un intento de establecer un TLV para radiación visible e infrarroja, que fijan los límites de exposición para la evaluación de los puestos de trabajo.

En España va a aprobarse en breve la norma CEI-825-84 sobre láseres, y es de esperar que en un futuro no muy lejano se irá disponiendo de legislación para el resto de las RNI.

El objetivo de este documento, es hacer una revisión general y actualizada, en idioma español, de las características, efectos biológicos, límites de exposición y medios de evaluación y control de las radiaciones de microondas, radiofrecuencias, láser, ultravioleta, visible e infrarrojo, para lo cual se ha utilizado la bibliografía más reciente de que ha sido posible disponer hasta la fecha y las experiencias de los Técnicos Prevencionistas del INSHT.

# CAPITULO 1

## RADIACIONES ELECTROMAGNETICAS. CONCEPTOS BASICOS

DRA. D.ª MARIA JOSE RUPEREZ CALVO Y DR. D. JAVIER MALDONADO GONZALEZ

# RADIACIONES ELECTROMAGNETICAS. CONCEPTOS BASICOS

1. DEFINICION Y PROPIEDADES. CLASIFICACION.
2. INTERACCION CON LA MATERIA. PROCESOS DE ABSORCION, TRASMISION Y EMISION.
3. PROPAGACION DEL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO. SUPERPOSICION DE ONDAS, REFLEXION, REFRACCION, POLARIZACION, DISPERSION, DIFRACCION.
4. TERMINOLOGIA Y UNIDADES RADIOMETRICAS.
5. FUNDAMENTOS DE LOS EFECTOS BIOLOGICOS DE LAS RADIACIONES NO IONIZANTES.

# RADIACIONES ELECTROMAGNETICAS. CONCEPTOS BASICOS

El objetivo de este capítulo es el de revisar superficialmente algunos conceptos básicos sobre el comportamiento de las radiaciones electromagnéticas para permitir una mejor comprensión de los capítulos dedicados a cada tipo de radiación no ionizante.

## 1. DEFINICION Y PROPIEDADES

Comenzaremos por definir el **Espectro Electromagnético:** Es el conjunto de todas las formas de energía radiante que existen en el Universo, tales como luz solar, rayos X, rayos $\gamma$, ondas de radio, etc.

### ¿Qué es una radiación electromagnética?

Se puede considerar como un campo eléctrico oscilante ( $\vec{E}$) asociado a un campo magnético ($\vec{B}$), que viaja a través del espacio mediante ondas; se le asigna una doble naturaleza onda-partícula, y se supone que son corrientes de fotones que se desplazan por medio de ondas a una velocidad única en el vacío, $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, y variable en función de los distintos materiales y longitudes de onda. Los campos magnético y eléctrico son perpendiculares entre sí, y ambos forman un ángulo recto con la dirección de propagación (ver fig. 1).

Los procesos tales como la propagación, reflexión y refracción, interferencias o superposición de ondas, polarización, etc., se explican bastante satisfactoria-

mente considerando la radiación como una onda y cumplen las leyes de la mecánica ondulatoria. Sin embargo, los procesos de emisión, absorción, transmisión, efecto fotoeléctrico, etc., están regidos por los postulados de Bohr, de la mecánica cuántica, considerando la radiación como una partícula.

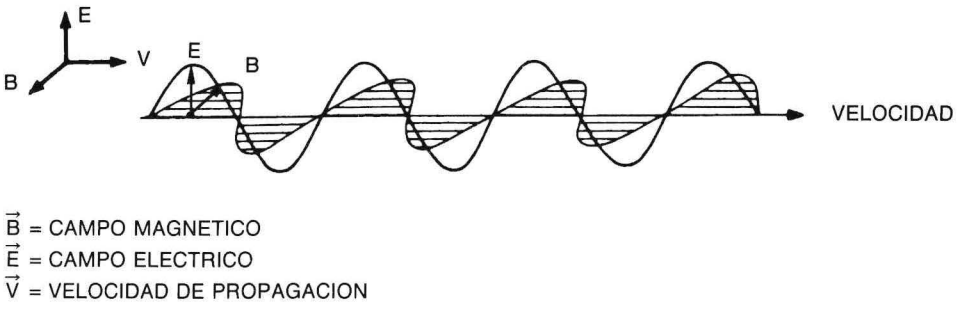


**Fig. 1.** *Propagación del campo EM.*

## CLASIFICACION

Las radiaciones electromagnéticas pueden clasificarse de tres formas:

- **Por su frecuencia** ($\nu$), que se define como el número de ondas que pasan por un punto del espacio en la unidad de tiempo; se mide en n.º de ciclos/segundo o Hertzio (Hz) y sus unidades son [$s^{-1}$]. Otra unidad de frecuencia es el fresnel = $10^{12}$ oscilaciones/s.
- **Por su longitud de onda** ($\lambda$), que es la distancia, medida a lo largo de la línea de propagación, entre dos puntos en fase en ondas adyacentes; se mide en unidades de longitud, que pueden variar entre el nm y el km (ver fig. 2).
- **Por su energía** (E), que es proporcional a la frecuencia; se suele medir en energía por fotón , y su unidad es el electronvoltio (eV).

La frecuencia y la longitud de onda están relacionados entre sí por la ecuación:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

en la que c es la velocidad de la luz en el vacío ($3 \cdot 10^8$ m/s).

Por supuesto, la longitud de onda de una radiación de frecuencia $\nu$ variará cuando cambie la velocidad de la radiación, por ejemplo al atravesar un material de diferente densidad.

El espectro electromagnético se compone de diferentes regiones espectrales cuya clasificación atendiendo a frecuencias, longitudes de onda y energía fotóni-

ca se expone en la Tabla 1, advirtiendo que las separaciones entre cada región espectral son graduales y no deben considerarse como estrechos límites entre una y otra región.

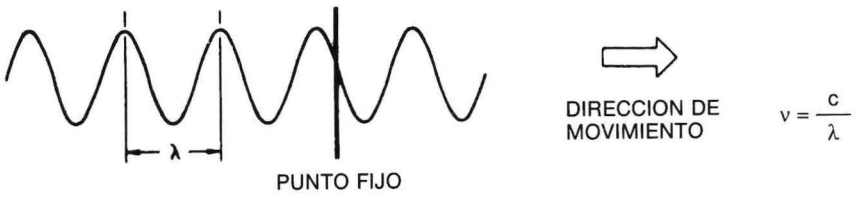


**Fig. 2.** *Onda en movimiento.*

## 2. INTERACCION CON LA MATERIA

Cuando la radiación electromagnética interacciona con la materia, tienen lugar procesos de absorción, transmisión y emisión; en estos procesos se producen cambios de energía que están regidos por los postulados de Bohr de la mecánica cuántica, que expuestos de forma muy sencilla pueden resumirse como sigue:

**1.er Postulado.** La variación de energía producida por absorción de radiación tiene lugar únicamente en cantidades de energía que son múltiplos enteros de una unidad fundamental de energía llamada «cuanto», y son características de cada especie absorbente.

**2.º Postulado.** Para que se produzca una variación de energía, debe realizarse una transición de una órbita, o estado cuántico, a otro.

$$E_f - E_i = h\nu$$

donde h es la constante de Planck ($6.6 \times 10^{-27}$ erg · s), $\nu$ es la frecuencia en $s^{-1}$, y $E_f$ y $E_i$ las energías de un átomo o molécula en los estados final e inicial.

Cuando el término $E_f$-$E_i$ es negativo, se trata de un proceso de emisión, mientras que cuando la diferencia de energía es positiva, está teniendo lugar un proceso de absorción.

Cuando un átomo o molécula, recibe o emite una radiación, pasa de un estado energético a otro, o lo que es lo mismo, su nivel de energía cambia.

### Estados o niveles energéticos de una molécula

Pueden ser de dos clases: estado fundamental (o estado de más baja energía,

**Tabla 1**

**ESPECTRO ELECTROMAGNETICO**

| Tipo de radiación | | Frecuencia | Longitud onda | Energía/ fotón |
|---|---|---|---|---|
| Ionizante | | > 3.000 THz | < 100 nm | > 12,40 eV |
| No Ionizante | Ultravioleta (UV) | 3.000 – 750 THz | 100 – 400 nm | 12,40 – 3,10 eV |
| | Visible | 750 – 385 THz | 400 – 780 nm | 3,10 – 1,59 eV |
| | Infrarrojo (IR) | 385 – 0,3 THz | 0,78 – 1.000 μm | 1.590 – 1,24 meV |
| | Microondas (MO) | 300 – 0,3 GHz | 1 – 1.000 mm | 1.240 – 1,24 μeV |
| | Radiofrecuencias (RF) | 300 – 0,1 MHz | 1 – 3.000 m | 1.240 – 0,41 neV |
| | Extrem. bajas frecuencias (ELF) | 300 Hz – 0 | ≃ 5.000 km | |
| | Ultrasonidos | > 20 KHz | < 17 mm | |

al cual tienden todos las moléculas en equilibrio), y estados excitados, cuya energía es superior a la del estado fundamental.

A su vez , los estados excitados o los niveles energéticos de una molécula pueden ser de tres tipos, que citaremos en orden creciente de energías:

a) **Niveles rotacionales.** Su energía es muy baja, del orden de 0,001 a 0,1 eV, y se emplea en movimientos de rotación de los átomos que componen la molécula. Esta energía corresponde a las radiaciones de Microondas e Infrarrojo lejano.
b) Niveles vibracionales. Cuya energía varía de 0,1 a 1 eV, la necesaria para producir los diversos tipos de vibraciones moleculares (tensión simétrica y antisimétrica, deformación, flexión, etc.). Una variación entre niveles vibracionales va acompañada por cambios en los niveles rotacionales intermedios. Su energía corresponde al Infrarrojo Medio.
c) **Niveles electrónicos.** La energía necesaria para producir cambios en los niveles electrónicos de una molécula suele superar 1 eV; se producen diferencias de energía relativamente grandes, que corresponden a radiaciones de frecuencias más altas (λ más corta), las radiaciones ultravioleta y visible. Inevitablemente, tendrán lugar cambios simultáneos en los estados vibracionales y rotacionales.

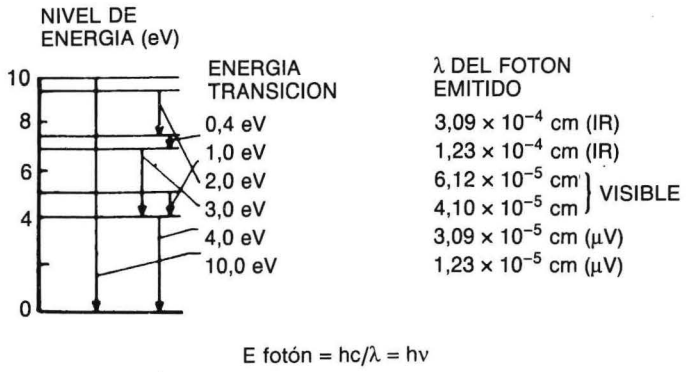


**Fig. 3.** *Transiciones electrónicas entre diferentes niveles energéticos.*

En los dos primeros casos, la energía empleada en rotaciones y vibraciones de las moléculas, se transforma en energía térmica. En el caso de transiciones electrónicas, la energía puede transformarse en energía térmica o producir reacciones fotoquímicas. Por consiguiente, la energía de una radiación es la responsable de que los efectos en la materia biológica sean térmicos o fotoquímicos.

Para una sola transición, se producirá una línea de emisión mientras que si existen varias transiciones, se producirá un espectro de emisión.

## Absorción

La absorción es el proceso inverso de la emisión. La radiación electromagnética que incide sobre un material, puede ser absorbida si tiene una $\lambda$ tal que su energía fotónica es capaz de producir una transición. La radiación cuya energía fotónica no es la adecuada para producir una transición es transmitida o reflejada por el material. Cada material tiene un espectro de absorción característico, determinado por los niveles de energía de sus estados excitados. Un ejemplo es el cristal normal, que absorbe muy poco la radiación Visible e IR pero absorbe la radiación UV.

### *Leyes de la Absorción*

Si una radiación de intensidad $I_o$, de una longitud de onda $\lambda$ atraviesa un material de espesor x, la intensidad de la radiación de salida $I_f$, estará dada por la ley de Lambert:

$$I_f(\lambda) = I_o(\lambda) \cdot e^{-K(\lambda) \cdot x}$$

Siendo:

x = espesor
$K(\lambda)$ = coeficiente de absorción, que varía con la longitud de onda y es una característica de cada material absorbente.
$I_o(\lambda)$ = Intensidad incidente
$I_f(\lambda)$ = Intensidad final o de salida

La radiación EM absorbida en el material se convierte en otras formas de energía, tales como calor, movimiento molecular (vibración y rotación), choques moleculares, etc.

La parte de radiación cuya energía fotónica no es absorbida, se transmitirá a través del material, y será de menor energía que la radiación incidente, por tanto, su longitud de onda será mayor.

## Atenuación. Ley de la inversa del cuadrado

La radiación EM cumple generalmente la ley de la inversa del cuadrado.

A distancias d, suficientemente lejos de la fuente para que ésta se considere como un punto, la intensidad varía de acuerdo con la expresión:

$$I(d_2) = I(d_1)\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2$$

Para un ejemplo, en el que $d_1 = 3$ m, $d_2 = 10$ m e $I_1 = 500$ unidades de flujo luminoso, tendríamos que la I a 10 m de distancia de la fuente sería:

$$I_2 = 500\left(\frac{3}{10}\right)^2 = 45 \text{ u. flujo luminoso}$$

Como la energía radiada por la fuente se dispersa sobre superficies mayores al expandirse la onda, el flujo de energía por unidad de área depende de la distancia a la fuente.

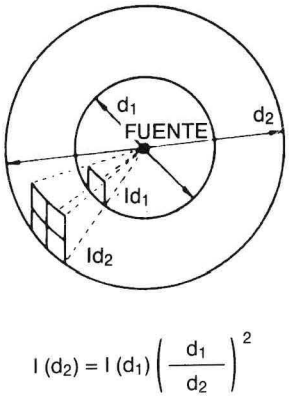


**Fig. 4.** *Ley de la inversa del cuadrado.*

## 3. PROPAGACION DEL ESPECTRO ELECTROMAGNETICO

Los procesos de propagación de la radiación EM, como se dijo al principio del capítulo, se explican bien si la radiación se considera como una onda, y cumplen las leyes de la mecánica ondulatoria. Así pues las radiaciones EM avanzan en una dirección perpendicular a los campos eléctrico y magnético.

Vamos a describir brevemente algunos de los procesos de propagación que pueden tener interés en el estudio posterior de las radiaciones no ionizantes.

## Superposición de ondas

Cuando una onda estacionaria se refleja con un cierto ángulo, el tren de ondas reflejado corta al tren de ondas incidente. En los puntos donde se encuentran la cresta de una onda y el valle de la otra, se produce una interferencia que anula la onda en ese plano (plano nodal); en los puntos donde coinciden cresta con cresta y valle con valle, la intensidad del campo eléctrico es máxima (planos ventrales).

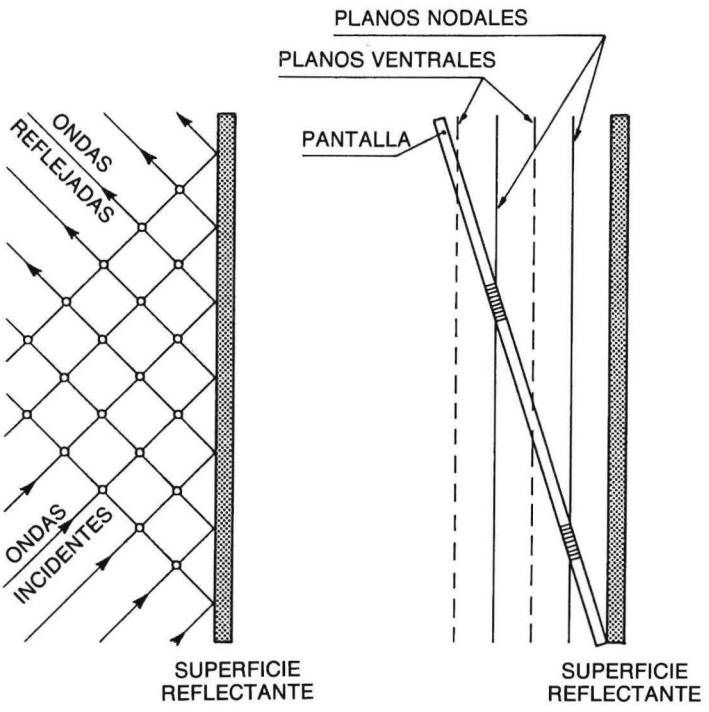


**Fig. 5.** *Interferencias.*

La imagen perpendicular a la dirección de la reflexión es la de un plano con rayas oscuras y rayas luminosas, y recibe el nombre de espectro de interferencia.

## Reflexión

La radiación EM, si no es absorbida o transmitida por completo por un material, se refleja parcialmente.

Según la ley básica de la reflexión, el ángulo de incidencia de la radiación, será igual al ángulo de reflexión (ver fig. 6).

La reflexión puede ser de dos tipos:

- Difusa, sobre superficies rugosas o granulares, orientadas al azar.
- Especular, sobre superficies pulidas.

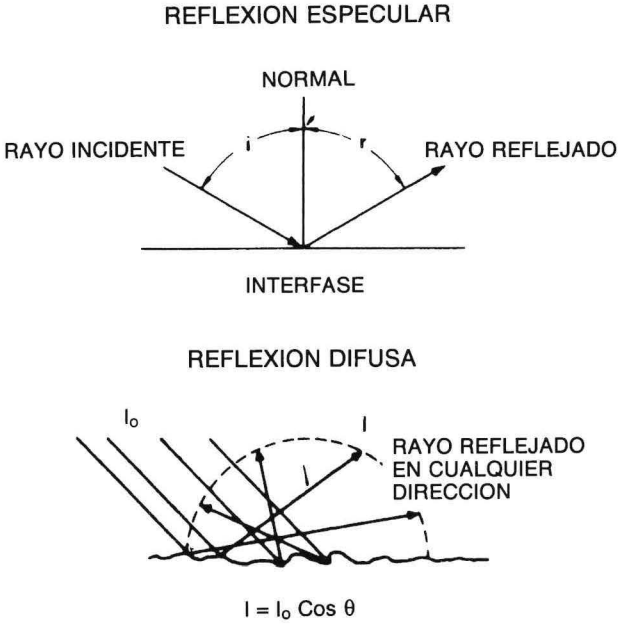


**Fig. 6.** *Reflexión de una radiación EM.*

## Refracción

Cuando una onda EM incide sobre una interfase de dos medios transmisores, parte de la onda puede reflejarse, y parte se transmite en el segundo medio. Su velocidad variará de un medio a otro, produciéndose un cambio en la dirección de la onda que consigue atravesar la superficie. Este fenómeno se conoce como refracción.

El nuevo ángulo que forma el haz refractado con la normal a la interfase, está regido por la ley de SNELL, que relaciona los ángulos incidente y refractado con las velocidades de propagación en los medios 1 y 2 según la expresión:

$$\frac{\text{seno } \theta}{\text{seno } \varphi} = \frac{v_1}{v_2} \qquad (1)$$

Siendo:

$\theta$ = ángulo incidente
$\varphi$ = ángulo refractado
$v_1$ = velocidad de propagación en el medio 1
$v_2$ = velocidad de propagación en el medio 2

El esquema se puede ver en la fig. 7.

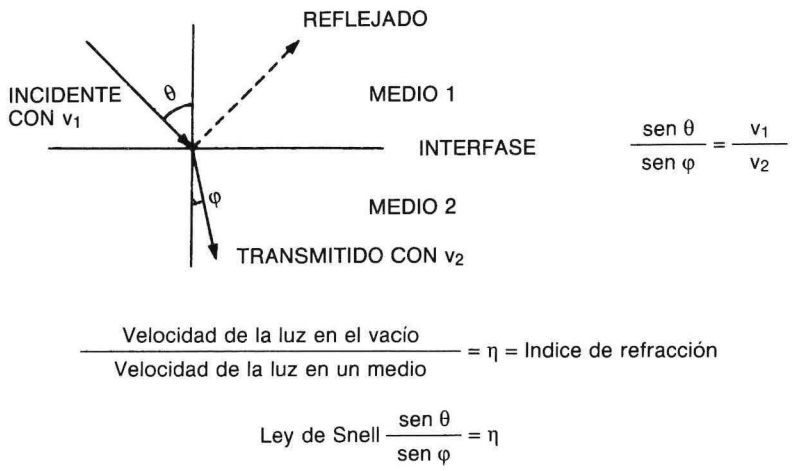


**Fig. 7.** *Ley de Snell de la refracción.*

La expresión de la ley de Snell puede tomar otra forma si sustituimos la velocidad por el índice de refracción.

El índice de refracción ($\eta$) se define como el coeficiente entre la velocidad de la luz en el vacío y la velocidad de una longitud de onda determinada en una sustancia

$$\eta = \frac{c}{v}$$

Haciendo el cociente entre los índices de refracción en dos medios diferentes:

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{c/v_1}{c/v_2} = \frac{v_2}{v_1}$$

que sustituido en la fórmula (1), quedaría como sigue:

$$\frac{\text{sen } \theta}{\text{sen } \varphi} = \frac{\eta_2}{\eta_1} \qquad \eta_1 \cdot \text{sen } \theta = \eta_2 \text{ sen } \varphi$$

Tiene particular interés, el caso del ángulo límite: Cuando la luz pasa de un medio de mayor densidad óptica, a otro de menor densidad, el rayo se aleja de la normal a la superficie de separación. Cuando el ángulo de incidencia es mayor que el ángulo límite, no se produce rayo refractado, es decir, los rayos incidentes, se reflejan totalmente.

## Polarización

La polarización de una onda electromagnética es una propiedad relacionada con la dirección del campo eléctrico. La dirección del campo eléctrico forma un ángulo de 90° con la dirección de propagación de la onda, y puede tomar cualquier orientación en el plano perpendicular a ella. Si el campo eléctrico de la onda se distribuye al azar en todas las direcciones de este plano, se dice que la onda no está polarizada. Si el campo eléctrico está orientado en una dirección determinada, se dice que la onda está polarizada en un plano. También son posibles otros tipos de polarización.

La radiación EM se polariza por medio de reflexiones o refracciones a través de diversos materiales capaces de producir polarización (por ejemplo el material Polaroid).

Algunos instrumentos de supervisión y control de radiación EM, son sensibles a la polarización del campo eléctrico. Cuando se utilizan en situaciones en las que la radiación se refracta o se refleja, se pueden cometer errores de lectura si no se tienen en cuenta estos efectos.

Un caso especial es el **ángulo de Brewster** utilizado en la construcción de láseres, para evitar pérdidas por reflexión. El **ángulo de Brewster,** o ángulo de polarización $\varphi_B$, es característico de las sustancias dieléctricas, y es aquel en el cual la luz, cuyo campo eléctrico está polarizado paralelamente al plano de inciencia no se refleja en absoluto.

## Dispersión

Cuando una radiación atraviesa un fluido transparente con partículas en suspensión, parte se transmite y parte emerge en todas direcciones.

Este fenómeno se conoce como dispersión y puede ser de dos clases:

a) Dispersión difusa, cuando el tamaño de partícula es superior a la longitud de onda de la radiación incidente.
b) Dispersión Rayleigh, cuando el tamaño de partícula es menor o igual que la longitud de onda de la radiación incidente; la difusión es esférica convirtiéndose las partículas en nuevos centros emisores de radiación, de intensidad proporcional a $1/\lambda^4$.

En el primer caso, el proceso no depende de la longitud de onda, mientras que en el segundo caso sí, siendo más dispersadas las radiaciones con longitudes de onda más cortas.

En la figura 8 se pueden ver los dos tipos de dispersión.

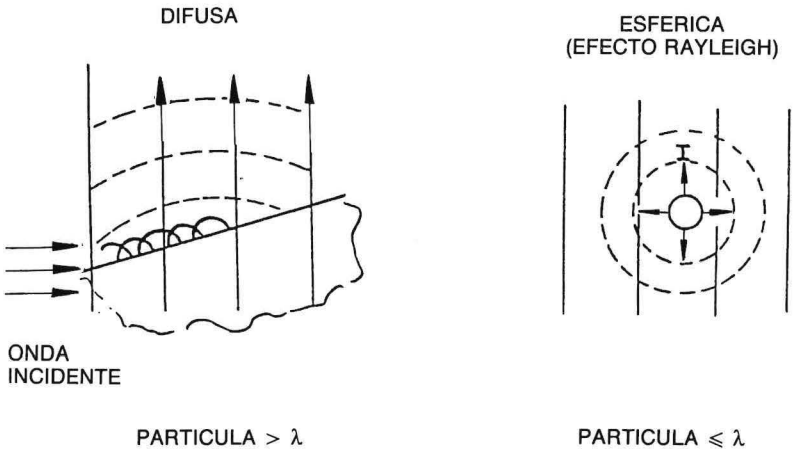


**Fig. 8.** *Dispersión.*

El fenómeno de la dispersión es importante al evaluar los riesgos de las radiaciones EM ya que puede reducir la energía del haz radiante sin absorberlo.

La luz dispersa que aparece en otras direcciones puede originar riesgos, pero también puede utilizarse como un método de protección, para diluir la radiación no deseada por reflexión difusa en muchas direcciones, manteniendo la intensidad en cualquier punto por debajo de los límites permitidos.

## Difracción

Cuando las ondas pasan a través de una abertura, o del extremo de un obstáculo, se extienden a la región que no está directamente expuesta a las ondas

incidentes (es decir, invaden la sombra geométrica). Este fenómeno recibe el nombre de difracción.

El principio de Huygens explica este fenómeno estableciendo que cada punto de un frente de onda es el origen de una onda secundaria que se propaga en todas direcciones.

En la figura 9, se muestran los ejemplos clásicos de la difracción de la luz que atraviesa el extremo de un obstáculo, y el del experimento de Young a través de una doble rendija.

En el caso de la doble rendija, su imagen en una pantalla no son dos puntos luminosos sino una serie de franjas claras (reforzamiento de ondas), con otras oscuras (anulación de ondas). Se produce un fenómeno de **interferencia,** que puede tener lugar en todo el espectro EM.

Es preciso tener en cuenta las interferencias cuando se intenta medir radiaciones NI, ya que se puede encontrar una intensidad muy baja en un punto, lo que nos puede llevar a pensar que no hay riesgo, mientras que a escasa distancia la intensidad puede aumentar debido a un efecto de interferencia; un ejemplo muy ilustrativo de interferencias es el caso de las antenas que emiten en el rango espectral de las radiofrecuencias.

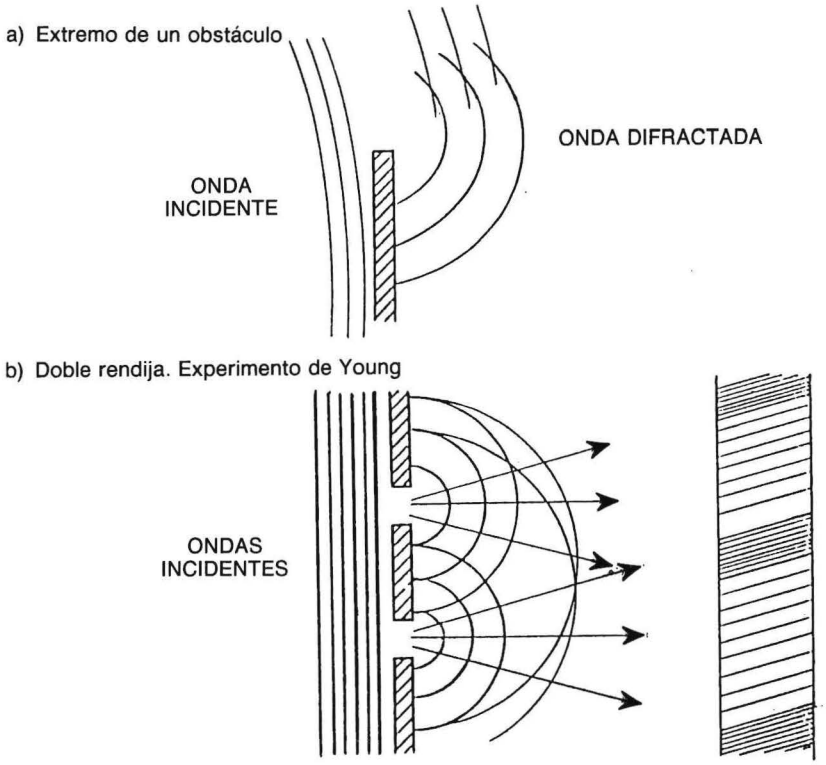


**Fig. 9.** *Difracción.*

## 4. TERMINOLOGIA Y UNIDADES RADIOMETRICAS

Definiremos brevemente algunas de las magnitudes radiométricas más utilizadas para cuantificar la energía emitida por la fuente luminosa, o la energía que llega a la superficie receptora, advirtiendo que en este caso, las superficies receptoras que nos interesan son la piel y los ojos del propio trabajador.

- **Energía radiante.** Es la energía emitida por la fuente de radiación. Su símbolo es Q y sus unidades julios [J] o Watios por segundo [W · s].
- **Flujo radiante,** o energía emitida por la fuente en la unidad de tiempo. Su símbolo puede ser $\Phi$ o P, y se mide en watios.
- **Intensidad radiante.** Es el flujo radiante emitido por unidad de ángulo sólido. Su símbolo es I. Se mide en watios dividido por estereorradian [W/sr].
- **Irradiancia,** se define como flujo radiante recibido por unidad de superficie receptora. Se representa por la letra E, y se mide en ($W/cm^2$). Se usa para medir fuentes cuya emisión es continua.
- **Exposición radiante.** Su símbolo es H, y representa la energía total incidente por unidad de superficie receptora. Se mide en julios dividido por centímetro cuadrado ($J/cm^2$), y se utiliza para medir la cantidad de energía que llega a un receptor cuando la fuente es pulsada.
- **Decibelio.** Es una unidad que permite la comparación de los niveles de potencia de dos fuentes, una de las cuales se toma como referencia. Se define como sigue:

$$NdB = 10 \log_{10} \frac{P_m}{P_s}$$

siendo $P_s$ la potencia de la fuente estándar, $P_m$ la potencia de la fuente comparada, y N el número de decibelios. Como es una relación de potencias, el decibelio es adimensional.

## 5. FUNDAMENTOS DE LOS EFECTOS BIOLOGICOS DE LAS RADIACIONES NO IONIZANTES

Tras la revisión de las propiedades y el comportamiento de las radiaciones electromagnéticas, nos queda describir su interacción con los sistemas biológicos y los efectos que desencadenan. En los sucesivos capítulos se tratará sobre los efectos biológicos de cada tipo de radiación no ionizante.

## INTERACCION DEL ESPECTRO ELETROMAGNETICO CON LOS SISTEMAS BIOLOGICOS

Como resultado de la interacción de las radiaciones no ionizantes con la materia viva molecular se produce una conversión de la energía radiante incidente en energía rotacional, vibracional y con capacidad de modificar la configuración electrónica en aquellas regiones del espectro electromagnético con frecuencias más altas (radiación ultravioleta).

Este tipo de radiaciones se diferencian de las ionizantes en que su poder energético no es suficiente para ionizar las estructuras atómicas o moleculares.

A continuación revisaremos las diferentes regiones del espectro electromagnético de las radiaciones no ionizantes.

### Radiaciones ultravioleta

En esta región están comprendidas las radiaciones no ionizantes emitidas en el intervalo más alto de frecuencias, por lo tanto poseerán mayor poder energético que las demás.

Son capaces de producir cambios en la configuración electrónica de la materia viva lo que ocasionará la producción de reacciones fotoquímicas.

En los sistemas biológicos expuestos se transforma la energía incidente en energía rotacional y vibracional con el consiguiente aumento de la energía cinética molecular y producción de calor.

### Radiación visible

De rango energético menor, producen los siguientes efectos:

- Efectos fotoquímicos: Por su capacidad de alterar la configuración electrónica.
- Efectos térmicos: Como consecuencia de la transformación en energía rotacional y vibracional.

### Radiación infrarroja

No tiene un poder energético suficiente por fotón para modificar la configuración electrónica de los átomos. Por tanto sus efectos serán únicamente de carácter térmico.

## Microondas y Radiofrecuencias

Es la región del espectro electromagnético con poder energético más bajo. Cuando este tipo de radiación incide sobre un sistema biológico, se producen unas pérdidas energéticas que pueden ser:

- De conducción: Por el movimiento de iones libres
- Dieléctricas: Por la rotación de moléculas que ocasionan.

De esta interacción entre las ondas electromagnéticas y el sistema biológico resulta una transferencia de energía con producción de calor (Tabla 1).

**Tabla 1**

| Tipo de radiación | Interacción físico-química | Efecto biológico |
|---|---|---|
| Ionizante | Ionización de la materia | |
| Ultravioleta | Rotacional-vibracional → cambios configuración electrónica | Térmico → Fotoquímico |
| Luz visible | Rotacional-vibracional → cambios configuración electrónica | Térmico → Fotoquímico |
| Infrarrojos | Rotacional-vibracional | Térmico |
| Microondas | Rotacional | Térmico |
| Radiofrecuencias | Rotacional | Térmico |

Como hemos podido observar el poder energético o rango de energía por fotón emitido es:

- Directamente proporcional a la frecuencia de la radiación.
- Inversamente proporcional a la longitud de onda.

Por lo tanto la absorción de la radiación por un sistema biológico es función de la distribución de la energía y constituye un proceso específico de cada longitud de onda.

El comportamiento de cada tipo de radiación de las diferentes regiones del espectro, ante un sistema biológico interpuesto será diferente:

- Las radiaciones ionizantes por su alto poder energético penetran ionizando la materia.
- Las radiaciones ultravioleta, visible e infrarroja, se comportan igual que la luz que incide sobre un sistema biológico. Pueden ser reflejadas, transmitidas o absorbidas; dependiendo de su longitud de onda, la luz incidente y el órgano implicado.

- Las Microondas y Radiofrecuencias tienen un gran poder de penetración pero con una energía muy baja, creando campos electromagnéticos en el interior de la materia viva.

## ETIOPATOGENIA DE LOS EFECTOS BIOLOGICOS DE LAS RADIACIONES NO IONIZANTES

A continuación estudiaremos por separado los efectos biológicos producidos por:

- Radiaciones ultravioleta, visible e infrarroja.
- Microondas y Radiofrecuencias.

Aunque su comportamiento frente a un sistema biológico interpuesto es diferente, el mecanismo etiopatogénico de sus efectos es similar.

### Radiación ultravioleta, visible e infrarroja

Cuando inciden sobre el organismo pueden ser reflejadas, transmitidas o absorbidas por él mismo. Los órganos del cuerpo humano afectados por este tipo de radiaciones no ionizantes son fundamentalmente piel y ojos, debido a la escasa capacidad de penetración en la materia de las radiaciones emitidas en este tipo de intervalo de longitud de onda.

### a) *Piel*

La penetración en la piel es función de la longitud de onda de las diferentes regiones de espectro, como veremos en la Tabla 2.

**Tabla 2**

**PENETRACION DE LA RADIACION EN LA PIEL HUMANA**

| Región espectral | | Penetración en milímetros | |
|---|---|---|---|
| Ultravioleta lejano: | 180 – 290 nm | Superficial: | 0,01 – 01 |
| Ultravioleta próximo: | 290 – 300 nm | Superficial: | 0,1 – 1 |
| Espectro visible: | 390 – 760 nm | Profunda: | 1 – 10 |
| Infrarrojo próximo: | 760 – 1.500 nm | Profunda: | 10 – 1 |
| Infrarrojo lejano: | 1.500 – 15.000 nm | Superficial: | 1 – 0,05 |

La reflectancia es función también de la longitud de onda, siendo diferente para los distintos tipos de pigmentación de la piel. Esta última característica es de gran importancia para explicar los efectos biológicos de las radiaciones ultravioleta, especialmente su potencial cancerígeno.

Si observamos la figura 10, vemos que la reflectancia es mayor en las pieles claras, de menor contenido en melanina, lo que las hace más indefensas a la acción de estas radiaciones. La reflectancia actuaría como un mecanismo de defensa en este tipo de piel.

Estas características descritas, determinarán el grado de lesión dérmica que se produzca: aumento de la pigmentación, eritema, pérdida de elasticidad, reacciones de fotosensibilidad, quemaduras y efectos cancerígenos.

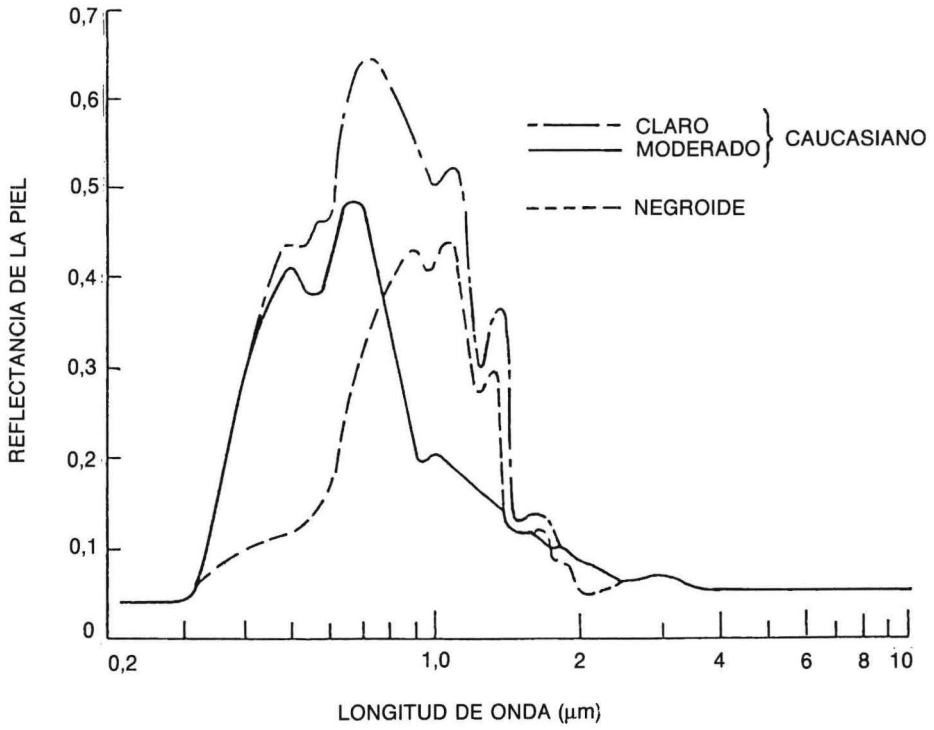


**Fig. 10.** *Reflectancia de la piel en función de la longitud de onda para diferente pigmentación.*

## b) *Ojos*

El sistema visual (impresión retiniana) responde dentro de un intervalo de longitudes de onda entre 400 y 750 nm (luz visible).

Sólo las regiones del espectro electromagnético comprendidas entre 400 y 1400 nm (radiación visible e infrarroja-A) son fácilmente transmitidas a través del medio ocular, atravesando córnea, iris, humor acuoso, cristalino, humor vítreo, llegando hasta la retina.

Por encima de 1.400 nm (infrarrojo-B) la radiación incidente es absorbida en las primeras capas, conjuntiva y córnea; y por encima de 2.000 nm (infrarrojos B y C) la córnea se vuelve también opaca. En ambos casos la radiación infrarroja puede producir quemaduras corneales.

En la región del espectro de las radiaciones ultravioleta, sólo los UV-A, cuya longitud de onda se aproxima a la de la luz visible, pueden atravesar la córnea, penetrar en el cristalino y muy raramente (longitudes de onda mayores de 380 nm) inciden en la retina. Por tanto, pueden lesionar el cristalino y en un porcentaje mínimo la retina.

Los UV-B y UV-C al no poder atravesar la córnea producirán lesiones como la fotoqueratitis.

## Microondas y Radiofrecuencias

Esta región del espectro de las radiaciones no ionizantes, a diferencia de las anteriores, penetran en la materia viva produciendo en su interior campos electromagnéticos.

La piel por lo tanto, no constituye ningún tipo de barrera al ser los efectos biológicos predominantemente internos; pero sí juega un papel clave en la termorregulación del organismo.

Lo mismo sucede con sus efectos biológicos oculares, ya que la lesión se produce como consecuencia de los gradientes térmicos internos.

## *BIBLIOGRAFIA*


- NIOSH. «Non-ionizing radiation course» (583). Ed. NIOSH, mayo 1976.
- WHO. «Non Ionising Radiation protection», WHO Regional Publications, European Series, núm. 10, 1982.
- ILO. «Occupational Hazards from non-ionising electromagnetic radiation», ILO Occupational Safety and Health Series, núm. 53, 1985.

# CAPITULO 2

## RIESGOS DE LAS RADIACIONES ULTRAVIOLETA, VISIBLE E INFRARROJA

DRA. D.ª MARIA JOSE RUPEREZ CALVO Y DR. D. JAVIER MALDONADO GONZALEZ

# RIESGOS DE LAS RADIACIONES ULTRAVIOLETA, VISIBLE E INFRARROJA

1. INTRODUCCION.
2. DESCRIPCION FISICA, CLASIFICACION ESPECTRAL.
3. FUENTES DE EXPOSICION OCUPACIONAL.
4. EFECTOS BIOLOGICOS DE LAS RADIACIONES UV.
5. EFECTOS BIOLOGICOS DE LAS RADIACIONES IR.
6. LIMITES DE EXPOSICION OCUPACIONAL.
7. INSTRUMENTACION DE MEDIDA.
8. MEDIOS DE PROTECCION Y CONTROL.
9. BIBLIOGRAFIA.

# 1. INTRODUCCION

En este capítulo trataremos conjuntamente de tres tipos de RNI, las radiaciones Ultravioleta, Visible e Infrarroja del espectro electromagnético. Reciben a veces la denominación de radiación óptica, porque en esta zona del espectro es donde se han estudiado los fenómenos de la óptica clásica, y abarcan el intervalo de longitudes de onda entre 100 nm y 1 mm, que expresado en frecuencias equivale a un intervalo entre $3 \cdot 10^{16}$ y $3 \cdot 10^{11}$ Hz; en niveles de energía fotónica el rango va de 12.4 eV a 1.24 eV.

Se estudian en conjunto porque son las responsables de muchos e importantes procesos biológicos, y tanto la ausencia, como la exposición excesiva a las mismas, pueden provocar alteraciones en las funciones del organismo humano.

Otra razón para agruparlas es la emisión conjunta, por fuentes potentes de banda ancha, de los tres tipos de radiación, manifestándose efectos fotoquímicos (radiación UV y Visible) y térmicos (Visible e IR) conjuntamente.

De todas ellas, la radiación UV va a ser la responsable de los riesgos más importantes debido a su mayor energía fotónica y consecuentemente de mayores variaciones en la respuesta biológica; por ello se estudiará con mayor profundidad que las otras dos.

La radiación IR se utiliza cada vez más ampliamente en la industria y se dispone de muy poca información sobre efectos biológicos significativos.

# 2. DESCRIPCION FISICA. CLASIFICACION ESPECTRAL

Las radiaciones UV, visible e infrarroja, se encuentran unas a continuación de otras en el espectro electromagnético.

La radiación UV es inmediatamente inferior en energía a las radiaciones ionizantes, y sus límites se han fijado de forma convencional entre 100 y 400 nm.

Entre 10 nm (límite inferior de las radiaciones no ionizantes) y unos 190 nm se halla una región denominada ultravioleta de vacío porque suele ser absorbida por la atmósfera y no llega a producir efectos biológicos; por ello hay una propuesta de modificación del límite superior de 100 a 200 nm.

El límite inferior del UV, 400 nm, coincide con el límite superior del Visible, que es la región a la cual es sensible el ojo humano. El límite superior no está muy definido y oscila entre 760 y 780 nm; así pues el Visible se extiende de 400 a 780 nm. aproximadamente.

A continuación a longitudes de onda crecientes, y energías más bajas, tenemos la radiación IR, cuyos límites se han fijado entre 780 y $10^6$ nm.

El paso de una región a otra es gradual, sin embargo, por conveniencia se han fijado unos intervalos de longitudes de onda para cada una de ellas, que no deben considerarse como estrechos límites de separación espectral.

Los tres tipos de radiación estudiados se subdividen a su vez en varias zonas, utilizando diferentes criterios; algunas veces se clasifican por sus propiedades físicas (como es el caso de los espectroscopistas, que aplican al UV e IR denominaciones de próximo, medio y lejano, tomando como punto de partida la región visible del espectro). Otras veces, se subclasifican atendiendo fundamentalmente a consideraciones biológicas, dividiéndose el UV e IR en zonas A, B, y C, tomando también como origen el Visible. Por ello, las diferentes zonas no coinciden exactamente entre sí.

Desde nuestro punto de vista tienen mayor interés las denominaciones A, B y C y a ellas nos referiremos en adelante. Existen además otras denominaciones que se refieren a la utilización de la radiación, tales como germicida, eritémica y «luz negra», muy usadas en algunos sectores laborales.

En la Tabla 1, se exponen las diversas clasificaciones espectrales y sus diferentes denominaciones.

Tabla 1

DIVISION DE LAS REGIONES ESPECTRALES
UV, VIS E IR

| Denominación biológica | λ (nm) | Otras denominaciones |
|---|---|---|
| | (10 – 190) | UV de vacío |
| UV-C | 100 – 280 | Germicida |
| | (200 – 315) | Actínica |
| UV-B | 280 – 315 | Eritémica |
| UV-A | 315 – 400 | «Luz negra» |
| Violeta | 400 – 424 | |
| Azul | 424 – 491,2 | |
| Verde | 491,2 – 575 | |
| Amarillo | 575 – 585 | |
| Naranja | 585 – 647 | |
| Rojo | 647 – 780 | |
| IR-A | 780 – 1.400 | |
| IR-B | 1.400 – 3.000 | |
| IR-C | 3.000 – $10^6$ | |

## 3. FUENTES DE EXPOSICION OCUPACIONAL Y USOS INDUSTRIALES

Las fuentes de emisión de radiación óptica, pueden ser de dos tipos: naturales y artificiales.

La primera fuente natural es obviamente el sol, que emite radiación UV, Visible e IR. Los efectos de una sobreexposición alcanzan a los trabajadores que realizan trabajos en ambientes exteriores, tales como obras públicas, trabajos en el mar, agricultura, etc.

Las fuentes artificiales de radiación óptica pueden agruparse en tres categorías:

a) **Arco eléctrico.** Está rodeado por aire o gases especiales, por ejemplo mercurio o xenon; las lámparas de arco para iluminación suelen estar al aire o rodeadas de cristal o cuarzo, y la presión en su interior puede llegar hasta 100 atm; cuando la presión es baja, en el espectro de emisión se marcarán líneas específicas; al aumentar la presión las líneas de emisión se ensanchan y aparece un espectro más o menos continuo, o de banda ancha.

b) **Fuentes incandescentes.** Emiten de forma continua en una ancha banda de longitudes de onda. Las sustancias sólidas calentadas a temperaturas superiores a 2.500 ° K pueden emitir suficiente radiación UV para ser tenida en cuenta, pero la mayoría de las fuentes «calientes» tales como metales fundidos, emiten la mayor parte de su radiación en el IR.
c) **Láseres.** Se tratará sobre ello en un capítulo posterior.

## FUENTES DE RADIACION UV

Pueden ser de muchos tipos, pero se dividen generalmente en dos grupos: Baja y Alta intensidad.

### Baja intensidad

- **Lámparas de vapor de mercurio a baja presión,** emiten una línea a 253.7 nm, cerca del pico de efectividad germicida de 265 nm. Se usan como germicidas en zonas estériles de hospitales, quirófanos, laboratorios biológicos y farmacéuticos, conductos de aire acondicionado, potabilización de agua, etc.
- **Tubos fluorescentes.** Emiten también radiación germicida.
- **Lámparas de descarga.** Emiten radiación UV de $\lambda$ muy variada dependiendo de la presión de los gases en cuyo seno se realiza la descarga, y de la transmisión de la envoltura que rodea el arco de descarga.
- **Llamas de corte.** Los sólidos calentados con llama oxiacetilénica, muy superior a 2000 °C, pueden radiar ultravioleta.

### Alta intensidad

- **Lámparas de vapor de mercurio de alta presión.** Utilizadas en reacciones fotoquímicas, identificación de minerales, diagnosis en dermatología, etc.
- **Arcos de cuarzo y mercurio.** Emiten casi todo el espectro UV.
- **Arcos de Xenon de alta presión.** Emiten un espectro parecido a la luz solar.
- **Arcos de carbono.** Los electrodos incandescentes emiten un espectro continuo, al cual se superpone el espectro de los gases que rodean al arco.
- **Antorcha de plasma.** Produce temperaturas superiores a 6000 ° K, resultando una intensa radiación ultravioleta.
- **Arco de soldadura.** Emite radiación UV en bandas anchas que frecuentemente aparecen como un espectro continuo. La intensidad de las bandas depende de: materiales usados en los electrodos, corriente de descarga y gases que rodean al arco.

La exposición ocupacional a radiación ultravioleta es muy amplia ya que sus usos industriales son muy variados; entre ellos podemos citar:

- **Lámparas germicidas,** para esterilización y mantenimiento de material quirúrgico, zonas de paso de alto riesgo y conductos de aire acondicionado (UV-C).
- **Lámparas de fototerapia y solares,** utilizadas en dermatología, odontología, bronceado con fines estéticos.
- **Lámparas de «luz negra» o lámparas UV-A,** utilizadas para detección de materiales fluorescentes, en ensayos no destructivos, para efectos especiales en espectáculos o usos cosméticos.
- **Cabinas de simulación solar,** para ensayo de materiales; para aplicaciones de alta irradiancia se suelen emplear lámparas de arco de carbono, xenon y mercurio.
- **Arcos de soldadura y corte,** y arco eléctrico en procesos de metalizado.
- **Arco eléctrico** en hornos de fundición.
- **Fotocopiadoras** de oficinas y artes gráficas.
- **Reflectores de alta intensidad,** de usos militares y en espectáculos, que utilizan el arco de carbono, emisor de niveles peligrosos de UV.
- **Procesado** químico de la superficie de algunos materiales.

## FUENTES DE RADIACION VISIBLE

Pueden ser de dos tipos: **incandescentes** y de **descarga de gases.** Entre las incandescentes se pueden citar las lámparas incandescentes de alta intensidad y los arcos de soldadura. En el grupo de fuentes de luz visible por descarga de gases, cuyos átomos se excitan eléctricamente, se encuentran entre otros los tubos de neón, los tubos fluorescentes, tubos flash o de destello y antorchas de plasma.

Estas fuentes, suelen ser de banda ancha y necesitan filtros para limitar la salida a una longitud de onda concreta.

## FUENTES DE RADIACION INFRARROJA

Se suelen dividir en dos grupos, según el tipo de exposición ocupacional: Exposición directa a IR y exposición a equipos y sistemas IR.

Las fuentes de exposición directa a IR pueden estar en muchas industrias, ya que la radiación proviene no sólo de los cuerpos incandescentes sino también de superficies muy calientes: es el caso de los trabajos con metales en caliente, fabricación de vidrio, fotograbado, secado de pinturas y esmaltes y soldadura entre otros.

Los sistemas IR pueden ser pasivos (que utilizan sensores IR para detectar la presencia de cuerpos calientes) y activos, que emiten bandas estrechas de una intensidad relativamente alta, tales como los radares. Los sistemas IR activos son más peligrosos, ya que el haz producido se filtra para eliminar cualquier forma de radiación visible asociada al IR, y no puede ser detectado por las personas.

## 4. EFECTOS BIOLOGICOS DE LAS RADIACIONES ULTRAVIOLETA

Los efectos biológicos de las radiaciones UV son de muy diversos tipos. Para estudiarlos en la forma más sencilla posible, se tratará en primer lugar sobre cómo actúan las radiaciones UV en los tejidos biológicos y cuáles son las reacciones fotoquímicas más importantes, para continuar con los efectos sobre el hombre.

### TRANSMISION Y ABSORCION DE LAS RADIACIONES ULTRAVIOLETA EN LOS TEJIDOS BIOLOGICOS

Toda respuesta fotobiológica a las radiaciones ultravioleta depende de:
- La energía de incidencia del flujo de fotones.
- La eficacia relativa de dicha energía para producir un efecto biológico específico a una longitud de onda determinada.

#### Transmisión a través de la piel

El grado de penetración de las radiaciones UV que inciden en la piel depende de dos factores: la longitud de onda y la pigmentación.

Así en las pieles menos pigmentadas aumentará el riesgo como consecuencia de la mayor penetración.

Las radiaciones UV-B y C, comprendidas en la región del espectro de menor longitud de onda, tienen restringida su penetración a la epidermis.

Los UV-A ($\lambda > 315$ nm) atraviesan la epidermis y penetran en la dermis donde pueden producir lesiones en la red capilar y terminaciones nerviosas.

#### Transmisión a través del ojo

La mayoría de las radiaciones ultravioleta son absorbidas en la córnea y regiones adyacentes (esclerótica y conjuntiva).

Sólo aquellas radiaciones emitidas en un intervalo de longitudes de onda mayor de 295 nm, son capaces de penetrar en la cámara anterior y llegar al cristalino.

La retina sólo quedará expuesta en muy especiales circunstancias (UV-A muy próximos a la luz visible).

### Espectro de Absorción y Reacciones Fotoquímicas.

Las radiaciones ultravioleta son las que poseen mayor energía fotónica, dentro del espectro de radiaciones no ionizantes. Son capaces por tanto de producir cambios en la configuración electrónica dentro de la molécula.

Se denomina espectro de absorción de una sustancia a la descripción cuantitativa de su capacidad para absorber fotones emitidos a una longitud de onda determinada.

En la materia viva los compuestos orgánicos insaturados son capaces de absorber radiación UV en bandas bien definidas. De todos ellos los ácidos nucleicos y las proteínas son los de mayor importancia biológica siendo a su vez los que presentan una mayor capacidad de absorción. Por ello la exposición a radiaciones ultravioleta, puede modificar los enlaces químicos moleculares, produciendo efectos destructivos sobre estas macromoléculas.

Así en el DNA, las bases pirimidínicas son las más absorbentes de radiación UV, lo que le convierte en una de las más importantes moléculas diana para efectos fotobiológicos. Su pico de absorción se produce a una longitud de onda de 265 nm (UV-C).

En las proteínas son sus aminoácidos aromáticos y sus enlaces peptídicos los compuestos de mayor absorción ultravioleta, fijándose su pico de absorción entre 270 y 290 nm.

En conclusión: los efectos fotobiológicos y fotoquímicos de las radiaciones ultravioleta son el resultado de las alteraciones del código de las macromoléculas celulares.

## EFECTOS SOBRE EL HOMBRE

Como consecuencia de su limitada penetración, los efectos de las radiaciones ultravioleta sobre el hombre, están restringidos a piel y ojos. Solo en circunstancias muy especiales se ve afectada la cavidad oral, como consecuencia de la aplicación de técnicas odontológicas nuevas.

Podemos clasificar los efectos en dos tipos:

- No estocásticos: Son generalmente agudos, relacionados directamente con la exposición, y necesitan para su aparición que se supere un valor umbral.

- Estocásticos: Son de aparición tardía, y la exposición sólo supone un incremento del riesgo, una probabilidad mayor de que se produzcan este tipo de efectos.

## Efectos agudos no estocásticos

### a) *Piel*

Nos podemos encontrar con cuatro tipos de alteraciones dérmicas agudas.

- **Oscurecimiento, bronceado o pigmentación de la piel**

Es una reacción inmediata a la irradiación siendo más marcada en las pieles pigmentadas. Se produce de forma más efectiva en exposiciones cuya longitud de onda es de 360 nm (UV-A). Se piensa que el mecanismo etiopatogénico es producido por fotooxidación de los gránulos de premelanina existentes.

- **Eritema**

Se trata de una reacción vascular bifásica, en la que se produce vasodilatación, aumento del flujo sanguíneo, aumento de la permeabilidad vascular y exudación celular. La primera fase, el eritema inmediato aparece en una o dos horas, para longitudes de onda mayores de 300 nm. La segunda fase es tardía, de dos a diez horas y su duración depende de la gravedad de la exposición. Pueden llegar a producirse edemas y ampollas como consecuencia del aumento de la permeabilidad, siendo el mecanismo desconocido aunque pudieran estar implicadas la histamina y la 5 hidroxitriptamina.

Se define como MED, la dosis mínima de eritema, y depende de la edad, raza, coloración y región de la piel.

- **Pigmentación retardada**

Se trata fundamentalmente de un fenómeno producido por la propagación de la melanina a capas superiores de la piel.

- **Interferencias con el crecimiento celular de la piel**

De forma casi inmediata a la exposición (veinticuatro horas), cesa el crecimiento de alguna células basales y epidérmicas; produciéndose a continuación un aumento de la tasa de crecimiento, que es máxima a las setenta y dos horas. El resultado es una hiperplasia epidérmica de cinco a seis días de duración.

### b) *Ojos*

La mayoría de las radiaciones ultravioleta son absorbidas por la córnea y regiones adyacentes, esclerótica y conjuntiva. Solo aquellas emitidas en la región

del espectro con longitudes de onda mayores de 300 nm son capaces de penetrar en la cámara anterior del ojo y cristalino.

Por lo tanto el cuadro clínico más común es la **fotoqueratitis** o **fotoqueratoconjuntivitis.**

- Aparece de dos a veinticuatro horas después de la exposición.
- Es muy dolorosa y se acompaña de hiperemia, lagrimeo, fotofobia y blefaroespasmo.
- El cuadro dura de uno a cinco días.
- Si utilizamos una tinción con fluoresceína se visualizan infinidad de pequeñas erosiones epiteliales en córnea.
- El pronóstico es benigno, y no suele dejar lesiones residuales.
- La córnea es especialmente sensible a la exposición a radiaciones UV con longitudes de onda comprendidas entre 270 y 280 nm.
- El grado de las lesiones es función del total de la energía absorbida y de la duración de la exposición. En consecuencia la dosis de exposición puede ser controlada modificando el tiempo de exposición.
- Es importante hacer el diagnóstico diferencial con «el golpe de arco» o deslumbramiento eléctrico. Es un fototraumatismo, con síntomas semejantes pero sin lesión anatómica en el segmento anterior del ojo.

A continuación describiremos otras lesiones oculares más profundas, pero advirtiendo que los datos de los que se dispone no son absolutamente significativos.

- Uveítis anterior: no se han encontrado lesiones entre 315 y 325 nm.
- Lesiones en el cristalino: Se describen en exposiciones a longitudes de onda entre 295 y 320 nm ya que si fuesen mayores lo atravesarían sin producir daño. Existen evidencias en experimentación animal y en estudios epidemiológicos en hombres expuestos a UV-A solares. Se han diagnosticado opacidades del cristalino pero con dosis de exposición muy altas (aproximadamente 1.500 julios/$m^2$).
- En retina existe alguna evidencia de daño por exposición a radiaciones ultravioleta (eritropsia) en ojos en los que se extirpó el cristalino.

## Fotosensibilizacion química

La fotosensibilización química tiene una gran importancia en la exposición a radiaciones ultravioleta, y es producida por agentes fotosensibilizadores exógenos o endógenos.

La acción fotodinámica está presente en numerosas sustancias orgánicas, con capacidad para absorber radiación a una longitud de onda determinada. Generalmente son sustancias de bajo peso molecular que contienen las células y ac-

túan transfiriendo la energía a las moléculas diana del organismo, utilizando el $O_2$ como intermediario.

El mecanismo etiopatogénico de la lesión consiste en que las bases componentes del DNA (molécula diana), cuando entran en contacto con sustancias fotodinámicas orgánicas (pigmentos fluorescentes, riboflavinas, acridinas...), o exógenas (psoralenos, medicamentos...), reaccionan con ellas, induciendo una oxigenación del DNA con el consiguiente daño.

Desde un punto de vista clínico, la fotosensibilidad que es un término genérico se puede clasificar en:

### *Fototoxicidad*

Es la respuesta más común y se produce en aquellas personas que ingieren o están en contacto con sustancias fototóxicas y son irradiadas por radiaciones ultravioletas a la longitud de onda específica de dichas sustancias. La reacción más común que se produce es el bronceado o quemadura de la piel. Por ejemplo las lámparas ultravioleta que inducen quemaduras solares en asociación con fotosintetizadores (ciertos vegetales, higos, alquitranes, antibióticos, contraceptivos orales, etc.)

### *Fotoalergia*

Son poco comunes y son debidas a reacciones de tipo Ag-Ac o con células mediadoras de la hipersensibilidad al fotosintetizador.

El cuadro clínico puede ser inmediato (urticarias, pápulas, eczema) e incluso aparecer con posterioridad a la exposición y sin que esté presente ya el fotosintetizador.

## Efectos Crónicos

Los podemos clasificar nuevamente en estocásticos y no estocásticos.

### *Efectos crónicos no estocásticos*

a) **Piel**

Después de prolongadas exposiciones a las radiaciones ultravioleta se produce una alteración en el desarrollo normal de la dermis, con degeneración de las

fibras colágenas y cambios histológicos, que traen consigo una pérdida de elasticidad en la piel.

Se trata de exposiciones a radiaciones UV-A, y la piel toma el aspecto de arrugada y con profundos surcos, típico de los trabajadores del campo y marinos.

La epidermis también se puede afectar tras exposiciones crónicas produciéndose una lesión denominada queratitis actínica.

b) **Ojos**

Los efectos crónicos no estocásticos descritos son la aparición de opacidades en el cristalino y cataratas. La evidencia es escasa en la literatura revisada, aunque sí parece confirmado en experimentación animal. Tampoco se ha podido establecer la relación dosis/respuesta para exposiciones crónicas.

### *Efectos crónicos estocásticos*

Se definen como aquellos efectos que tras una exposición crónica tienen una probabilidad mayor de aparecer en función de la dosis. En este apartado estudiaremos la carcinogénesis en la piel como riesgo en la exposición a radiaciones ultravioleta.

Es un efecto reconocido tanto en experimentación animal como en el hombre, habiéndose descrito casos en trabajadores a la intemperie, pescadores, marinos y agricultores.

Los tres tipos de tumores diagnosticados son:

- Carcinoma basocelular o de células basales.
- Carcinoma espinocelular o de células escamosas.
- Melanoma.

Los datos más importantes extraídos de la experimentación con animales son:

- Generalmente se producen en exposiciones a longitudes de onda de 260 a 270 nm que coinciden con el pico de absorción de los ácidos nucleicos.
- Aparecen en exposiciones de larga duración, y más frecuentemente en animales fotosensibilizados.
- En condiciones experimentales se han producido carcinomas basocelulares y espinocelulares.

En el hombre existe una evidencia epidemiológica de aparición de carcinomas basocelulares y espinocelulares en pieles descubiertas, en personas pálidas y cuya incidencia aumenta con el grado de exposición a la luz solar. Lo mismo ocurre para el melanoma. Sin embargo no se ha podido establecer cuantitativamente la relación dosis/repuesta.

El mecanismo etiopatogénico no es conocido todavía plenamente, existiendo numerosas teorías:

- Rulfo propuso que a longitudes de onda entre 250 y 320 nm aumentaba el colesterol activado en la capa basal de la epidermis produciéndose una hipercolesterosis cancerígena.
- Lo que sí parece confirmado en los estudios revisados es que la carcinogénesis asienta en individuos predispuestos, lo cual es de gran importancia para la prevención del cáncer de piel. Existirán dos tipos de predisposición:
  a) Una predisposición genética en individuos que padecen albinismo o xeroderma pigmentario.
  b) Una predisposición local en la que el carcinoma se asienta sobre un tejido patológico: cicatrices simples o queloidianas, hiperqueratosis actínica, verrugas seborreicas, nevus, lupus, callos óseos, etc.
- Otra teoría se inclina a pensar en un mecanismo fototóxico como responsable de la aparición del carcinoma.

Se puede concluir de todo esto que no deberían producirse exposiciones innecesarias a radiación UV y en el caso de una exposición profesional, la exposición debería realizarse con las precauciones necesarias.

## 5. EFECTOS BIOLOGICOS DE LA RADIACION INFRARROJA

La radiación infrarroja, como ya hemos expuesto anteriormente, no reacciona fotoquímicamente con la materia viva, debido a su bajo nivel energético.

La etiopatogenia de las lesiones que ocasionan es de naturaleza térmica, y depende sobre todo de la irradiancia (watios/cm$^2$), más que de la longitud de onda. Igual que en las radiaciones ultravioleta, los efectos biológicos en el hombre aparecen en la piel y ojos.

La exposición a radiaciones infrarrojas, incluyendo todas las fuentes ya sean naturales o artificiales e industriales, forman parte del microclima junto con la temperatura, presión atmosférica, vapor de agua y velocidad de aire. Tradicionalmente los IR-lejanos (IR-B y C) han sido sinónimos de calor radiante y productores del stress térmico en determinadas profesiones: vidrieros, sopladores de vidrio, fundiciones, etc.

### RIESGOS OCULARES

En general el ojo es tan efectivo como la piel, para protegerse de las radiaciones infrarrojas. Existen unos mecanismos de protección naturales, como son el parpadeo y reflejo pupilar, de gran eficacia ya que la radiación infrarroja se acompaña generalmente de intensa radiación visible.

La córnea es transparente a radiaciones emitidas con longitudes de onda

menores de 1.300 nm (IR-A) y se vuelve opaca por encima de los 2.000 nm. Por lo tanto las lesiones corneales, eritemas y quemaduras serán producidas por los IR-B y C. Existen unos procesos de reparación fisiológicos que impiden las lesiones permanentes, salvo si se afecta la línea basal proteica (opacidades corneales).

Los tejidos profundos del ojo, pueden ser lesionados por los IR-A, transmitiéndose a través del medio ocular y siendo enfocados por el cristalino hasta la retina. Podrán aparecer entonces opacidades y cataratas en el cristalino; y en ocasiones, confundiéndose con la radiación visible lesiones térmicas en retina, esclerótica y coroides.

## EFECTOS SOBRE LA PIEL

La radiación infrarroja tiene un pico de máxima transmitancia o penetración en la piel, en la emitida a 1200 nm, pudiendo alcanzar una profundidad de 0,8 mm, lo que ocasiona lesiones en capilares y terminaciones nerviosas. Por encima de 2.000 nm, la piel se hace opaca a este tipo de radiación.

Podemos diferenciar entonces dos regiones espectrales con diferente mecanismo de acción:

- La región de los IR-A: de mayor riesgo y con capacidad de producir lesiones estructurales y funcionales.
- La región de los IR-B y C: en la que se producirá un calentamiento superficial y el riesgo es consecuencia de que se supere la capacidad de termorregulación del organismo, como ocurre en ciertos trabajos (fundiciones y hornos).

Conviene recordar que en los riesgos industriales por radiación infrarroja, existen unas variables a considerar que son de gran importancia.

- Características individuales: color de la piel, nutrición, hidratación, estado de salud general, etc.
- Condiciones ambientales: Temperatura, humedad y velocidad del aire.
- Area corporal expuesta.
- Protección mediante la ropa.
- Situación individual y antecedentes personales.

Por lo tanto a la hora de valorar la exposición industrial y los riesgos para la salud; habrá que conocer y valorar todos estos factores que condicionarán la respuesta de cada trabajador.

## OTROS RIESGOS

Vamos a recoger aquí aquellos efectos biológicos no relacionados directamente con el calor, y que aparecen en la bibliografía revisada, teniendo en cuenta que

generalmente se trata de estudios aislados, incompletos y en muchos casos basados en la experimentación animal.

- Estudios sobre degeneración tisular en región esplécnica y renal.
- Disminución de la reactividad inmunológica.
- Efectos sobre la conducción nerviosa.
- Descripción de patologías otorrinolaringológicas en exposiciones crónicas a IR-C: rinitis, sinusitis y laringitis crónica.
- Efectos genéticos y cancerígenos exclusivamente en experimentación animal.

## 6. LIMITES DE EXPOSICION OCUPACIONAL

Desde hace algunos años se ha hecho evidente la necesidad de establecer límites de exposición para radiación óptica con objeto de prevenir los efectos agudos y limitar los riesgos a largo plazo, derivados de una exposición crónica, siendo éstos más difíciles de determinar.

Diversos organismos internacionales, cuyo objetivo es la prevención, tales como la Asociación Internacional de Protección contra Radiaciones (IRPA) con su Comité Internacional para radiaciones no ionizantes (INIRC), y la División de Salud Ambiental de la Organización Mundial de la Salud (OMS), han incluido el estudio de los riesgos de las radiaciones ópticas en sus programas de trabajo.

El IRPA/INIRC, en colaboración con la OMS ha desarrollado unos criterios de salud para las radiaciones UV (1) que fijan los principios básicos de protección contra radiaciones basados en los efectos obtenidos por experimentación sobre animales y extrapolando al hombre.

Son límites de protección bastante complejos en su aplicación ya que el umbral de daño varía con la longitud de onda, el tiempo de exposición, la densidad de potencia de la radiación, el tipo de piel de cada individuo y las diferentes posibilidades de aplicación.

Estos criterios coinciden con los adoptados por la American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) cuyos valores límite (TLV's) para radiación ultravioleta, visible e infrarrojo vamos a comentar(2).

Los TLV's representan las condiciones bajo las cuales la mayoría de los trabajadores pueden estar expuestos a radiación óptica sin efectos adversos. Deben usarse como guías en el control de la exposición y no ser considerados como estrechos límites de separación entre niveles seguros y niveles peligrosos.

## TLV's PARA RADIACION ULTRAVIOLETA

Las recomendaciones existentes para la protección frente a radiación UV en exposiciones agudas, están basadas en la dosis mínima necesaria para producir

eritema y fotoqueratitis. Todavía no se dispone de suficientes datos cuantitativos sobre los efectos de una exposición crónica.

Los TLV's 1987-1988 se refieren a la radiación UV en la región espectral entre 200 y 400 nm. Estos valores para exposicion de ojos y piel se aplican a radiación UV procedente de arcos, descargas en gases y vapores, fuentes fluorescentes e incandescentes y radiación solar, pero no se aplican a láseres UV, que tienen sus propios TLV's. Tampoco se aplican a la exposición a radiación UV de individuos fotosensibles o individuos expuestos conjuntamente a radiación UV y a agentes fotosensibilizantes. Estos valores deberían usarse como guías en el control de exposición a fuentes continuas cuando la duración de la exposición no sea menor de 0,1 s.

Los valores límite umbral o TLV's para exposición ocupacional a radiación UV de los ojos o la piel cuando se conocen los valores de irradiancia y se controla el tiempo de exposición, son los siguientes:

1. Para la región espectral UV próximo (320 a 400 nm) la irradiancia total incidente sobre la piel o los ojos sin proteger no debería exceder 1 $mW/cm^2$ (10 $W/m^2$) para períodos de tiempo mayores de $10^3$ segundos (aproximadamente 16 minutos) y para tiempos de exposición menores de $10^3$ segundos no debería exceder 1 $J/cm^2$ (10 $KJ/m^2$).

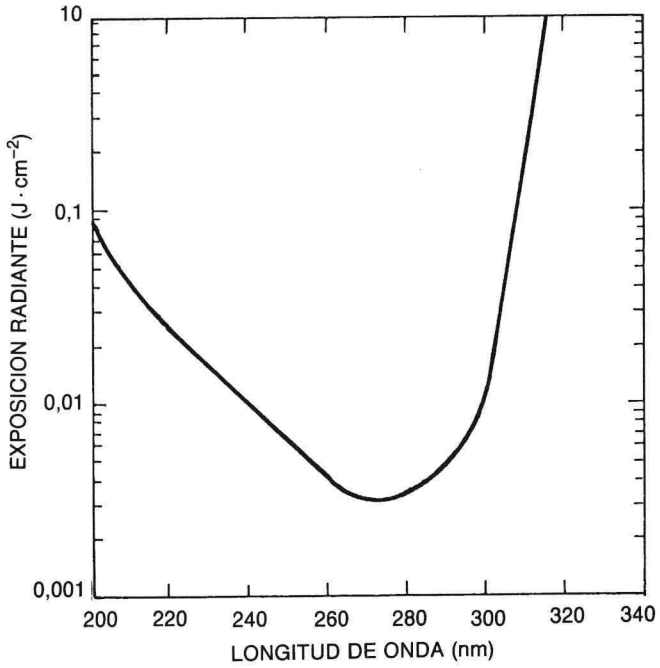


**Fig. 1.** *TLV's para radiación ultravioleta.*

2. Para la región espectral UV actínica (200-315 nm), la exposición radiante incidente sobre la piel o los ojos desprotegidos no debería exceder los valores que se dan en la Tabla 2 o en la figura 1 en un período inferior a ocho horas.

**Tabla 2**

**EFECTIVIDAD ESPECTRAL RELATIVA SEGUN LA LONGITUD DE ONDA**

| Longitud de onda (nm) | T.L.V. ($mJ/cm^2$) | Efectividad espectral relativa $S_\lambda$ |
|---|---|---|
| 200 | 100 | 0,03 |
| 210 | 40 | 0,075 |
| 220 | 25 | 0,12 |
| 230 | 16 | 0,19 |
| 240 | 10 | 0,30 |
| 250 | 7,0 | 0,43 |
| 254 | 6,0 | 0,5 |
| 260 | 4,6 | 0,65 |
| 270 | 3,0 | 1,0 |
| 280 | 3,4 | 0,88 |
| 290 | 4,7 | 0,64 |
| 300 | 10 | 0,30 |
| 305 | 50 | 0,06 |
| 310 | 200 | 0,015 |
| 315 | 1.000 | 0,003 |

3. Para determinar la irradiancia efectiva de una fuente de banda ancha ponderada frente al pico de la curva de efectividad espectral (270 nm), debería usarse la siguiente fórmula ponderante:

$$E_{eff} = \sum E_\lambda S_\lambda \Delta\lambda$$

Donde:

$E_{eff}$ = irradiancia efectiva relativa a una fuente monocromática a 270 nm en $W/cm^2 (J/s/cm^2)$

$E_\lambda$ = irradiancia espectral en $W/cm^2$ /nm.

$S_\lambda$ = efectividad espectral relativa (sin unidades)

$\Delta\lambda$ = anchura de banda en nanometros.

4. El tiempo de exposición permitido en segundos para exposición a radiación UV actínica incidente sobre los ojos o la piel no protegidos puede calcularse dividiendo 0.003 J/cm$^2$ por $E_{eff}$ en W/cm$^2$. El tiempo de exposición puede determinarse también usando la Tabla 3, que proporciona los tiempos de exposición correspondientes a las irradiancias efectivas en $\mu$W/cm$^2$.

Tabla 3

EXPOSICIONES PERMISIBLES AL ULTRAVIOLETA

| Duración de la exposición por día | Irradiancia efectiva $E_{eff}$ ($\mu$W/cm$^2$) |
|---|---|
| 8 h | 0,1 |
| 4 h | 0,2 |
| 2 h | 0,4 |
| 1 h | 0,8 |
| 30 min | 1,7 |
| 15 min | 3,3 |
| 10 min | 5 |
| 5 min | 10 |
| 1 min | 50 |
| 30 seg | 100 |
| 10 seg | 300 |
| 1 seg | 3.000 |
| 0,5 seg | 6.000 |
| 0,1 seg | 30.000 |

5. Todos los TLV's anteriores para energía UV se aplican a fuentes que subtienden un ángulo menor de 80 °. Las fuentes que subtienden un ángulo mayor deben medirse solamente sobre un ángulo de 80 °.

La ACGIH hace una observación sobre los individuos adaptados (de piel bronceada) que pueden tolerar exposiciones que sobrepasen el TLV sin efectos eritémicos, pero no obstante tal adaptación puede no proteger a las personas frente al cáncer.

El IRPA/INIRC añade algunas consideraciones interesantes:

- Los límites de exposición (LE) son niveles inferiores a los usados para exposiciones terapéuticas o cosméticas. Se sobrepasan en un mediodía soleado del verano en paises entre 0 ° y 40 ° de latitud y un tiempo de exposición entre cinco y diez minutos.

- Los LE deberían aplicarse a exposiciones en una dirección perpendicular a la fuente de radiación, medida con un instrumento que tenga una respuesta coseno angular. La irradiancia y la exposición radiante deberían promediarse sobre una superficie circular con un diámetro de abertura inferior a 1 mm.
- Las personas expuestas a agentes fotosensibilizantes (productos químicos ingeridos o aplicados externamente en cosméticos, drogas, alimentos etc.) probablemente no son conscientes de su elevada sensibilidad. Los individuos poco pigmentados adaptados por exposiciones previas a radiación UV (bronceado e hiperplasia) y los individuos muy pigmentados, pueden tolerar exposiciones de la piel que sobrepasen el límite de exposición sin efectos eritémicos. No obstante, el bronceado de forma repetida puede aumentar el riesgo en personas que desarrollan después signos de envejecimiento acelerado de la piel, incluso cáncer de piel. Debería comprenderse el alcance de estos riesgos antes de usar radiaciones UV en fototerapia médica o exposiciones cosméticas.

## TLV's PARA RADIACION VISIBLE E INFRARROJO PROXIMO

Todavía no están aprobados como tales, pero desde hace algunos años aparece un anuncio de intento de establecimiento de TLV's para visible e IR próximo. Se refiere por consiguiente a la región espectral entre 400 y 1.400 nm.

### Valores recomendados

Los TLV's para exposición ocupacional de los ojos a radiación visible e IR próximo de banda ancha se aplican a exposiciones de una jornada laboral de ocho horas y requieren el conocimiento de la radiancia espectral ($L_\lambda$) y la irradiancia total (E) de la fuente, medida en la posición de los ojos del trabajador. Estos datos espectrales tan detallados de una fuente de luz blanca, en general sólo se necesitan si la luminancia de la fuente excede 1 $cd \cdot cm^2$. A luminancias menores de este valor, no se debería sobrepasar el TLV.

Son los siguientes:

1. Para proteger la retina contra un daño térmico, la radiancia espectral de la lámpara, ponderada mediante la función R (Tabla 4) no debe superar:

$$\sum_{400}^{1.400} L_\lambda R_\lambda \Delta\lambda \leq \frac{1}{\alpha t^{1/2}} \qquad (1)$$

donde $L_\lambda$ viene expresada en $W \cdot cm^{-2}\ sr^{-1}\ nm^{-1}$, t es la duración de la visión (o la duración del pulso si la lámpara es pulsada), limitada a un intervalo entre 1 μs y 10 s, y α es el ángulo subtendido por la fuente expresado en radianes. Si la lámpara es oblonga, α se refiere a la dimensión mayor

que pueda apreciarse. Por ejemplo, a una distancia r = 100 cm de una lámpara tubular de longitud l = 50 cm, el ángulo de visión es:

$$\alpha = \frac{l}{r} = \frac{50}{100} = 0{,}5 \text{ rad} \qquad (2)$$

**Tabla 4**
**FUNCIONES DE PONDERACIÓN ESPECTRAL PARA EL ESTABLECIMIENTO DE RIESGOS REFERENTES A LA RETINA CAUSADOS POR FUENTES OPTICAS DE BANDA ANCHA**

| Longitud de onda (nm) | Función de riesgo para la luz azul: $B_\lambda$ | Función de riesgo de quemaduras: $R_\lambda$ |
|---|---|---|
| 400 | 0,10 | 1,0 |
| 405 | 0,20 | 2,0 |
| 410 | 0,40 | 4,0 |
| 415 | 0,80 | 8,0 |
| 420 | 0,90 | 9,0 |
| 425 | 0,95 | 9,5 |
| 430 | 0,98 | 9,8 |
| 435 | 1,0 | 10,0 |
| 440 | 1,0 | 10,0 |
| 445 | 0,97 | 9,7 |
| 450 | 0,94 | 9,4 |
| 455 | 0,90 | 9,0 |
| 460 | 0,80 | 8,0 |
| 465 | 0,70 | 7,0 |
| 470 | 0,62 | 6,2 |
| 475 | 0,55 | 5,5 |
| 480 | 0,45 | 4,5 |
| 485 | 0,40 | 4,0 |
| 490 | 0,22 | 2,2 |
| 495 | 0,16 | 1,6 |
| 500-600 | $10^{[(450 - \lambda)/50]}$ | 1,0 |
| 600-700 | 0,001 | 1,0 |
| 700-1.050 | NA* | $10^{[(700 - \lambda)/505]}$ |
| 1.050-1.400 | NA | 0,2 |

* NA = No aplicable.

2. Para proteger la retina contra el daño fotoquímico derivado de una exposición crónica a luz azul, la radiancia espectral integrada de una fuente luminosa, ponderada con respecto a $B_\lambda$, función del riesgo creado por la luz azul (Tabla 4), no debe superar:

$$\sum_{400}^{700} L_\lambda \, tB_\lambda \, \Delta\lambda \leq 100 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \qquad (t \leq 10^4 \text{ s}) \qquad (3a)$$

$$\sum_{400}^{700} L_\lambda \, B_\lambda \, \Delta\lambda \leq 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \qquad (t > 10^4 \text{ s}) \qquad (3b)$$

El producto promedio de $L_\lambda$ y $B_\lambda$ se denomina L (azul). Para una fuente de radiancia L ponderada mediante la función del riesgo por luz [L(azul)], que exceda de 10 $\text{mW} \cdot \text{cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}$ en la región espectral azul, la duración máxima permitida $t_{máx}$ en segundos, viene dada por:

$$t_{máx} = 100 \text{ J cm}^{-2} \text{ sr}^{-1}/\text{L (azul)} \qquad (4)$$

Estos últimos límites son mayores que los límites de exposición máximos permitidos para radiación láser de 440 nm (ver TLV láser) debido a que se ha supuesto una pupila de 2-3 mm de diámetro, en lugar de la pupila de 7 mm supuesta para el láser. Para una fuente luminosa que subtienda un ángulo menor que 11 mrad (0.011 rad) los límites superiores se rebajan de forma que la irradiancia espectral ponderada respecto a la función de riesgo por luz azul B no sobrepase a E (azul).

$$\sum_{400}^{700} E_\lambda \, tB_\lambda \, \Delta\lambda \leq 10 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2} \qquad (t \leq 10^4 \text{ s}) \qquad (5a)$$

$$\sum_{400}^{700} E_\lambda \, B_\lambda \, \Delta\lambda \leq 1 \, \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2} \qquad (t \geq 10^4 \text{ s}) \qquad (5b)$$

Para una fuente cuya irradiancia ponderada para luz azul E(azul) excede de $1 \mu\text{W} \cdot \text{cm}^{-2}$,la duración de la exposición máxima permitida $t_{máx}$ en segundos es:

$$t_{máx} = 10 \text{ mJ} \cdot \text{cm}^{-2}/\text{E(azul)} \qquad (6)$$

3. Radiación Infrarroja: Para evitar posibles efectos retardados sobre el cristalino (cataratogénesis), la radiación infrarroja ($\lambda = 770$ nm) deberá limitarse a 10 $mW \cdot cm^{-2}$. Para una lámpara de calor infrarroja o cualquier fuente de infrarrojo próximo en las que no existe un fuerte estímulo visual, la radiancia en el infrarrojo próximo (770-1400 nm) que llega al ojo debería limitarse a:

$$\sum_{770}^{1.400} L_\lambda \Delta\lambda \leq \frac{0{,}6}{\alpha} \qquad (7)$$

para exposiciones prolongadas. Este límite está basado en un diámetro de pupila de 7 mm.

* Las fórmulas (1) y (7) son empíricas y no son correctas dimensionalmente. Para corregirlas, se debería introducir un factor de corrección dimensional K en el numerador del lado derecho de cada fórmula. Para la fórmula (1), sería:

$$K_1 = 1\ W \cdot rad \cdot \frac{s^{1/2}}{(cm^2 \cdot sr)},$$

y para la fórmula (7): $K_2 = 1\ W \cdot rad/(cm^2 \cdot sr)$.

## 7. INSTRUMENTACION DE MEDIDA

Es muy necesario disponer de instrumentos de medida de radiaciones que nos permitan relacionar la cantidad de radiación emitida por un cuerpo, o la recibida por un medio biológico, con los efectos o daños biológicos provocados en ese medio, con objeto de establecer límites de exposición individuales y para la población en general.

Los niveles de radiancia e irradiancia de las fuentes industriales de radiación son difíciles de medir. En la actualidad la evaluación de los riesgos derivados del uso de radiación óptica es compleja, utilizándose sólo los medidores UV.

La medición de la radiación UV, desde el punto de vista de la prevención, requiere como condición previa el conocimiento de la distribución espectral, que sólo puede obviarse en el caso de lámparas cuyos espectros de emisión sean líneas concretas, por ejemplo las lámparas de vapor de mercurio a baja presión (257.7 nm).

Los únicos detectores absolutos de luz UV son el termopar y el bolómetro, cuya respuesta es lineal para variaciones en la longitud de onda y la intensidad,

y miden la irradiancia total. El resto de los detectores no tienen estas especificaciones y deben ser calibrados frente a sistemas absolutos (3).

Por todo ello para medir radiación óptica, hay que tener en cuenta los siguientes puntos, que pueden ser fuente de importantes errores en la medida:

a) La distribución espectral de la fuente (lineal o de banda ancha). Cuando se utilizan otros elementos ópticos la distribución espectral puede variar.
b) El tamaño, o tamaño proyectado de la fuente, debe considerarse en la región espectral 400-1.400 nm ya que influye en el daño retiniano.
c) Respuesta espectral del detector.
d) Espectro de acción biológica de la radiación óptica.

Un requerimiento importante en la medición de la radiación UV es que la respuesta en longitudes de onda del detector, sea lo más parecida posible al espectro de acción biológica, es decir, lo ideal sería encontrar instrumentos cuya respuesta integrada promediada espectralmente, pudiera ser comparada con la curva de efectividad espectral relativa de los TLV's de la ACGIH.

Por el momento, no se dispone de aparatos comerciales que permitan aplicar los TLV's de forma directa.

En el caso de la radiación visible, existe alguna experiencia de laboratorio sobre medición de la radiancia efectiva de la luz azul en diversos arcos de soldadura (4), por medio de detectores comerciales UV modificados.

Son necesarios más esfuerzos para desarrollar instrumentación más barata y de manejo sencillo que pueda usarse en laboratorios, controles ambientales y muestreo personal.

## 8. MEDIOS DE PROTECCION Y CONTROL

En la adopción de medidas de protección frente a los riesgos derivados del uso de radiaciones ultravioleta, visible e infrarroja se siguen los criterios utilizados habitualmente en prevención.

1. **Actuar sobre la fuente** (que es lo más deseable puesto que se protege a todos los trabajadores). Puede hacerse mediante:
   - Diseño adecuado de la instalación.
   - Cerramientos (cabinas o cortinas).
   - Pantallas y atenuadores.
   - Empleo de conectores de enclavamiento.
2. **Actuar sobre el ambiente** que rodea a la fuente, por medio de:
   - Recubrimiento antirreflectante en las paredes.
   - Señalización (las fuentes no visibles son un caso especial).
   - Limitando el acceso a personas autorizadas.
   - Ventilación adecuada para UV de longitud de onda corta, ya que se desprende ozono.

3. **Actuar sobre las personas**
   - Utilizando protecciones oculares, tales como cascos, caretas o gafas. Este tema se tratará en profundidad en otro capítulo.
   - Utilizando protecciones de la piel como ropa protectora, guantes y/o cremas barrera. Hay que advertir que la ropa de fibras artificiales no protege o protege parcialmente de las radiaciones UV, puesto que las absorbe. Puede ser origen de quemaduras, por lo que deben utilizarse prendas de lino o algodón.
   - Informando a los trabajadores de los riesgos de una exposición excesiva a radiaciones ópticas y las precauciones a adoptar.

Aunque cada vez, la extensión en el uso de radiaciones UV es mayor, las diferentes instituciones dedicadas a su estudio recomiendan «evitar cualquier exposición innecesaria aún con los ojos y piel cubiertos».

## *BIBLIOGRAFIA*


1. INIRC/IRPA. «Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation)», *Health Physics,* 49 (2), 1985, 331-340.
2. ACGIH. «Threshold Limit Values for Physical Agents in the Work Environment adopted by ACGIH», 1987-88
3. OBERHOFER M. «Radiation protection. Non-ionising radiation dosimetry», Report EUR 9110 EN, Commission of the European Communities, 1984.
4. OKUNO T. «Measurement of blue-light effective radiance of welding arcs», *Industrial Health,* 24, 1986, 213-226


### OBRAS DE CONSULTA GENERAL


- NIOSH. «Non ionising radiation course», 583, ed. Niosh, mayo 1986.
- WHO. «Ultraviolet radiation». Environmental Health Criteria núm. 14, ed. WHO Ginebra, 1979.
- WHO. «Non Ionising Radiation protection». WHO Regional Publications, European Series, núm. 10, 1982.
- ILO. «Occupational Hazards fron non-ionising electromagnetic radiation». ILO Occupational Safety and Health Series, núm. 53, 1985.

# CAPITULO 3

## RADIACIONES DE MICROONDAS Y RADIOFRECUENCIAS

D. DARIO SAN MARTIN FERRER Y DR. D. JAVIER MALDONADO GONZALEZ

## RADIACIONES DE MICROONDAS Y RADIOFRECUENCIAS

1. GENERALIDADES. BANDAS DEL ESPECTRO RF.
2. GENERACION DE MICROONDAS. ANTENAS.
3. USOS DE MICROONDAS. COMO FUENTE DE CALOR, COMO FUENTE DE TRANSPORTE DE INFORMACION.
4. INTERACCION DE LA ENERGIA DE MO Y RF CON LOS SISTEMAS BIOLOGICOS.
5. EFECTOS BIOLOGICOS DE LAS RADIACIONES DE MICROONDAS Y RADIOFRECUENCIAS.
6. EFECTOS DE LA EXPOSICION LABORAL.
7. CONTROL DEL RIESGO EN LAS RADIACIONES DE MICROONDAS. RECOMENDACIONES DEL IRPA/INIRC. NORMAS DE PROTECCION DEL ANSI. DISTANCIA DE SEGURIDAD. PROTECCION FRENTE A LA RADIACION DE MICROONDAS.

## 1. GENERALIDADES

Desde los tiempos más remotos, han existido radiaciones electromagnéticas sobre la corteza terrestre, dado que fenómenos naturales como la influencia del sol, o las tormentas con fuerte aparato eléctrico dan lugar a radiaciones de este tipo, pero la repercusión sobre los seres humanos es prácticamente nula debido a que sus potencias son pequeñísimas. Por ejemplo, la exposición sobre la Tierra debida al Sol es aproximadamente $10^{-5}$ a $10^{-3}$ $\mu W/cm^2$ con una frecuencia de 300 GHz.

El gran desarrollo en los últimos años de la tecnología de sistemas de comunicación como son la radio, la TV, el rádar, líneas telefónicas, satélites, etc., ha dado lugar a la llamada «polución electromagnética» que es debida a las radiaciones electromagnéticas producidas al generar, transmitir u operar con altas corrientes eléctricas en estos tipos de instalaciones.

Estas radiaciones artificiales sí alcanzan altas potencias y longitudes de onda que pueden hacerlas peligrosas en determinadas circunstancias.

Al igual que ha despertado interés el tema de la contaminación industrial y se estudian los problemas producidos por vertidos de productos químicos, humos y gases contaminantes, polvo en la atmósfera, etc., tambien empezó a tomarse conciencia en los años cuarenta, a raíz de la Segunda Guerra Mundial, de los problemas de la «polución electromagnética» y sus posibles consecuencias para la salud.

En los años 1971 y 1973 se celebraron reuniones en las que se aprobó la creación de un programa para combatir radiaciones no ionizantes que sería llevado a cabo por un organismo internacional. Se hizo cargo el IRPA (Asociación Internacional para la Protección contra las Radiaciones). Este grupo de trabajo se convirtió más tarde en el Comité Internacional sobre Radiaciones no Ionizantes (IRPA-INIRC) París 1977.

En 1978 se reunió en Ginebra un grupo mixto de trabajo OMS/IRPA que estudió criterios de salud ambiental aplicables a radiofrecuencias y microondas para evaluar riesgos y considerar argumentos que justificasen la fijación de límites para las exposiciones.

Veamos ahora unos cuantos conceptos sobre las radiaciones electromagnéticas, y en particular sobre radiofrecuencias y microondas, para darnos una idea de lo que son y en qué frecuencias y longitudes de onda se mueven.

Una representación del espectro de la radiación electromagnética, puede ser el siguiente:

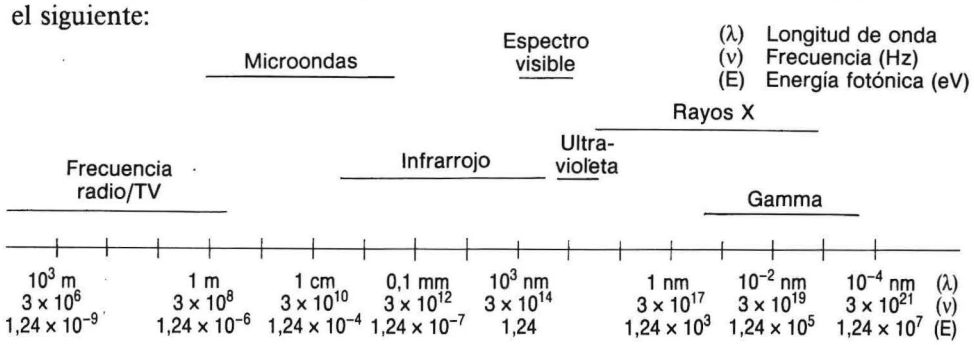


**Fig. 1.** *Espectro de la radiación electromagnética.*

Este espectro abarca desde la radiación ionizante de gran energía con frecuencias muy elevadas y longitudes de onda cortas, a radiación no ionizante de menos energía, con frecuencias mucho más bajas y mayores longitudes de onda.

De manera convencional se ha establecido que una energía fotónica de 12 eV, correspondiente a una longitud de onda de 100 nm, constituye la línea divisoria entre la radiación ionizante y la no ionizante. Las radiaciones de microondas tienen una energía mucho menor. Su energía por fotón equivale a $1{,}25 \times 10^{-3}$ eV en los 300 GHz y a $4{,}1 \times 10^{-10}$ eV en los 100 KHz, demasiado baja para causar ionización.

Las frecuencias que más nos interesan, dentro de las radiaciones electromagnéticas, son las comprendidas entre 100 KHz y 300 GHz.

Las radiofrecuencias propiamente dichas se encuentran entre 100 KHz y 300 MHz y tiene longitudes de onda en el aire comprendidas entre 3 km y 1 m.

Los microondas tienen frecuencias de 300 MHz a 300 GHz y unas longitudes de onda en el aire comprendidas entre 1 m y 1 mm.

Veamos sucintamente lo que son las microondas:

Si tenemos una corriente eléctrica en una antena y la hacemos oscilar a una cierta frecuencia, se producen un campo eléctrico y otro magnético en las proximidades de la antena, que se propagan desde la misma a la frecuencia de la corriente de oscilación.

Un campo eléctrico es algo que ejerce una fuerza en una carga eléctrica, por tanto tiene magnitud y dirección, es decir, es un vector cantidad. De la misma manera le pasa al campo magnético.

Las ondas de los campos eléctrico y magnético son transversales, es decir, que forman ángulos rectos en la dirección de propagación:

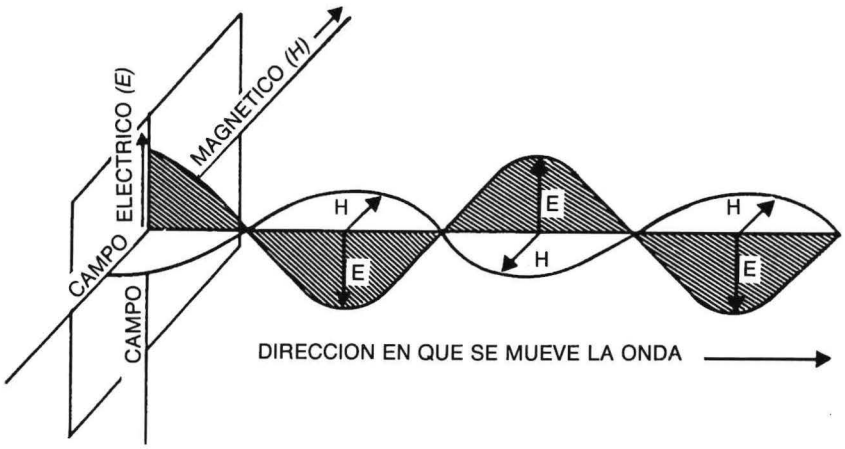


**Fig. 2**

Se propagan a la velocidad de la luz ($3 \times 10^8$ m/sg en el aire) y depende del medio que atraviesa.

La velocidad disminuye y la onda se hace correlativamente más corta cuando la radiación de microondas entra en medios biológicos, especialmente cuando éstos contienen una gran proporción de agua. Las condiciones de exposición en la gama de microondas, se describen de acuerdo con la **«densidad de potencia»**, y se calcula en $W/m^2$, $mW/cm^2$, y $\mu W/cm^2$.

No obstante, en las cercanías de fuentes de microondas y RF con mayores longitudes de onda, los valores de la intensidad de campo eléctrico (V/m) y la intensidad de campo magnético (A/m) proporcionan una descripción más apropiada de la radiación.

La energía que se absorbe puede convertirse en otras formas de energía y causar interferencias en el organismo. La mayor parte de esta energía se convierte en calor. Sin embargo, no todos los efectos se explican por absorción de energía y su conversión en calor, se ha comprobado en forma teórica y con experimentos, que existen interacciones a nivel microscópico que causan alteraciones en los sistemas biológicos macromoleculares y se considera que ello dependa tal vez de la frecuencia de resonancia.

Las frecuencias de microondas tienen poca energía para ionizar los átomos,

pero pueden excitar los estados de rotación y vibración de átomos y moléculas. La absorción de energía depende de las propiedades dieléctricas y conductoras del material.

Una antena de microondas concentra la energía en un campo de radiación. Este campo está formado por un campo eléctrico (E) y un campo magnético (H). Como ya hemos visto estos campos forman un ángulo recto y se propagan a la velocidad de la luz.

La polarización de una antena se define como la orientación del vector del campo eléctrico en el campo radiado.

Para que haya la máxima transferencia de energía, la antena receptora debe tener la misma polarización que la transmisora. Cuando no tienen la misma, la energía transferida depende de la polarización de cada antena. Por ejemplo, si la transmisora está polarizada circularmente y la receptora linealmente, entonces esta última sólo detecta la mitad de la energía transmitida, y las distintas combinaciones que se puedan dar, deberán ser analizadas en cada caso.

Veamos finalmente cómo se divide el espectro RF según distintas bandas. Dentro de dicho espectro se distinguen varias zonas a fin de estudiar los fenómenos que se producen. Así por ejemplo las ondas de radio son la banda HF; la TV las bandas UHF y VHF, etc.

Se ha hecho una clasificación de bandas del espectro RF, generalmente aceptada, según los siguientes límites:

| Designación de la banda | Frecuencia | Límites |
|---|---|---|
| ELF | Extremadamente baja | 0-3 KHz |
| ULF | Muy baja | 3-30 KHz |
| LF | Baja | 30-300 KHz |
| MF | Media | 300-3.000 KHz |
| HF | Alta | 3-30 MHz |
| VHF | Muy alta | 30-300 MHz |
| M.O. UHF | Ultra alta | 300-3.000 MHz |
| M.O. SHF | Super alta | 3-30 GHz |
| M.O. EHF | Extremadamente alta | 30-300 GHz |

La región de microondas se encuentra a su vez dividida en diferentes bandas designadas por las letras (P, L, S, C, X, etc.) según sus frecuencias y longitudes de onda, pero no hacemos mención expresa de estas divisiones, ya que no hay un acuerdo oficial respecto a los límites asociados a cada banda.

## 2. GENERACION DE MICROONDAS

Un equipo para generar radiaciones de microondas consta generalmente de los elementos del siguiente esquema:

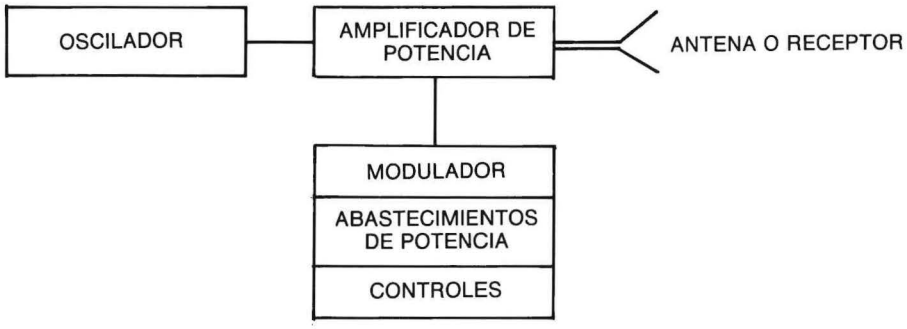


**Fig. 3.** *Generación de microondas.*

Los amplificadores de potencia suelen ser tubos de vacío de diversas características, entre ellos se pueden citar:

MAGNETRON: Un oscilador Magnetrón se usa para proporcionar pulsos de corta duración y una potencia de pico de Megawatios en los trasmisores de Rádar.

En la figura 4 se muestra la construcción de un oscilador Magnetrón.

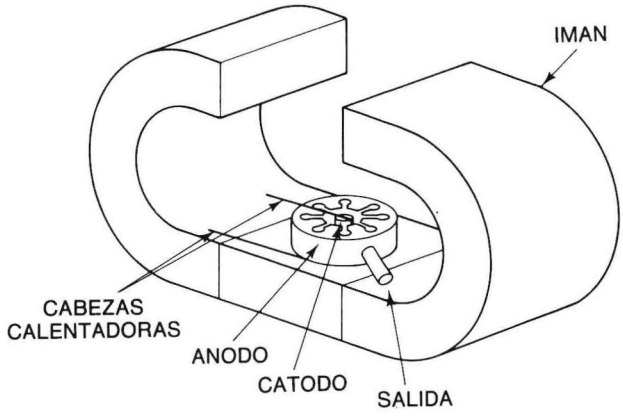


**Fig. 4.** *El Magnetrón es un diodo con un ánodo y un cátodo caliente. El ánodo es una pieza de metal con pequeñas cavidades, cuyo tamaño determina la frecuencia de oscilación.*

Cuando el campo magnético no está presente, el cátodo caliente emite un flujo uniforme de electrones (emisión termoiónica) hacia el ánodo del Magnetrón. Sin embargo, si montáramos un imán alrededor del diodo e incrementásemos el flujo magnético, los electrones avanzarían realmente hacia el ánodo siguiendo una curva más que un camino directo (fig. 5).

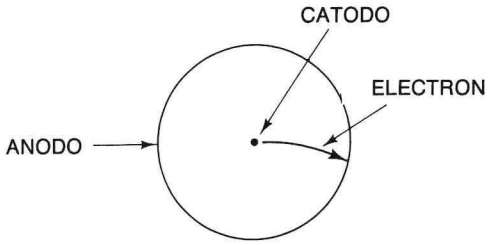


**Fig. 5.** *Trayectoria del electrón hacia el ánodo.*

Si incrementamos el campo magnético hasta conseguir que la trayectoria de los electrones se curve, éstos buscarán el ánodo según una órbita circular. Esta magnitud del flujo magnético es conocida como VALOR CRITICO (fig. 6).

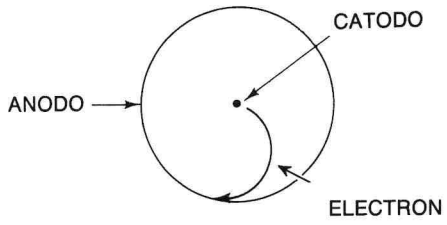


**Fig. 6**

Para terminar de ver la influencia del campo magnético sobre los electrones, si incrementamos dicho campo por encima del VALOR CRITICO, haremos que los electrones viajen en una órbita circular que será ahora más pequeña (fig. 7).

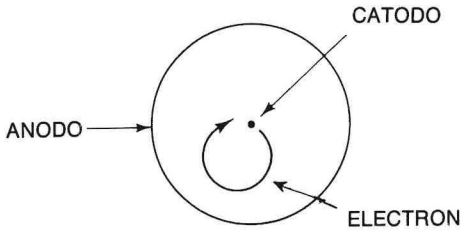


**Fig. 7**

La pieza del ánodo tiene una serie de cavidades de resonancia, todas ellas del mismo tamaño y por tanto de la misma frecuencia. Cada ranura y cavidad es equivalente a un valor de capacitancia e inductancia, como se muestra en la figura 8.

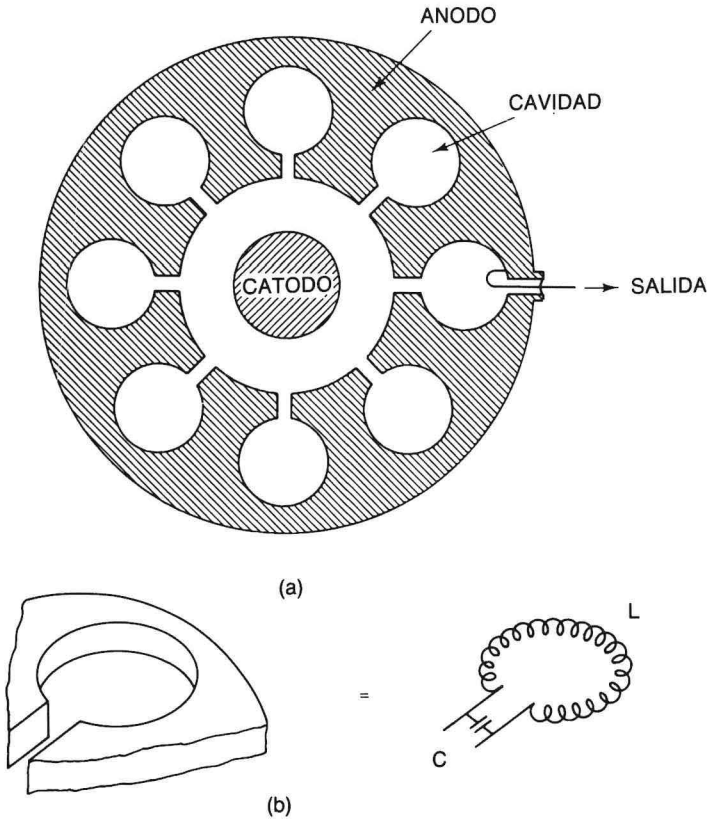


**Fig. 8.** *(a) Cátodo, ánodo y acoplamiento de salida; (b) Una cavidad con su Capacitancia (c) e Inductancia (L).*

Si un rayo de electrones fuera hecho pasar por las aberturas de un anillo de cavidades de resonancia, la energía sería liberada en todas las cavidades y se produciría una resonancia a su frecuencia de oscilación.

El ánodo es un potencial positivo respecto al cátodo, y origina la aceleración de los electrones en su trayectoria curva hacia las cavidades. Las oscilaciones dentro de la pieza de cavidades del ánodo provocan una interacción en el espacio del tubo con los electrones que viajan hacia las cavidades. Estas oscilaciones producen unas aceleraciones y deceleraciones en los electrones cuando llegan a las cavidades, dando al mismo tiempo la energía adicional necesaria para mantener el movimiento circular.

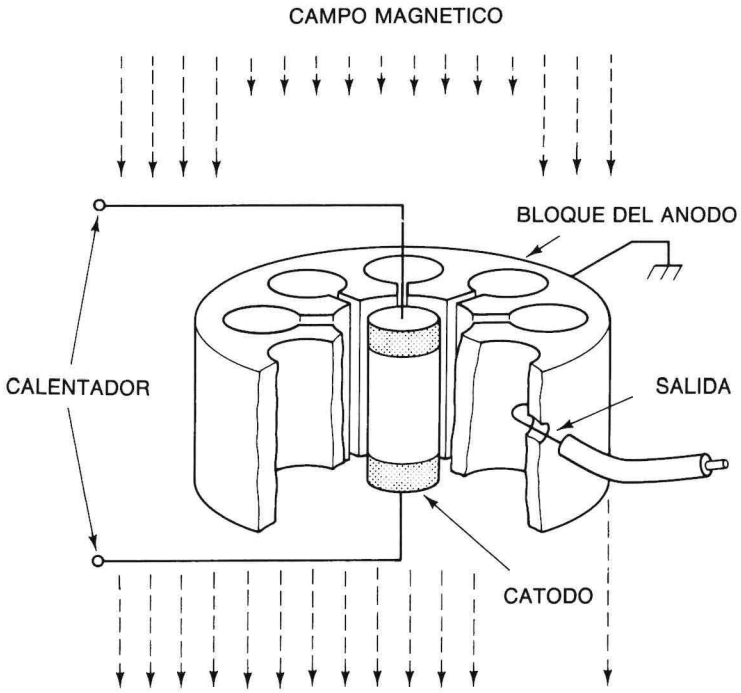


**Fig. 9.** *Magnetrón con acoplamiento de salida.*

En la figura vemos una especie de pequeño gancho en una de las cavidades. Este pequeño gancho actúa como un extractor de la energía de microondas de esta cavidad (y de las demás) cuando el magnetrón oscila.

Las dos aplicaciones principales de este magnetrón son para los hornos de microondas y en equipamientos de rádar para proporcionar microondas de alta potencia y corta duración.

## KLYSTRON DE DOS CAVIDADES

La estructura de un Klystron de dos cavidades se representa en la figura 10.

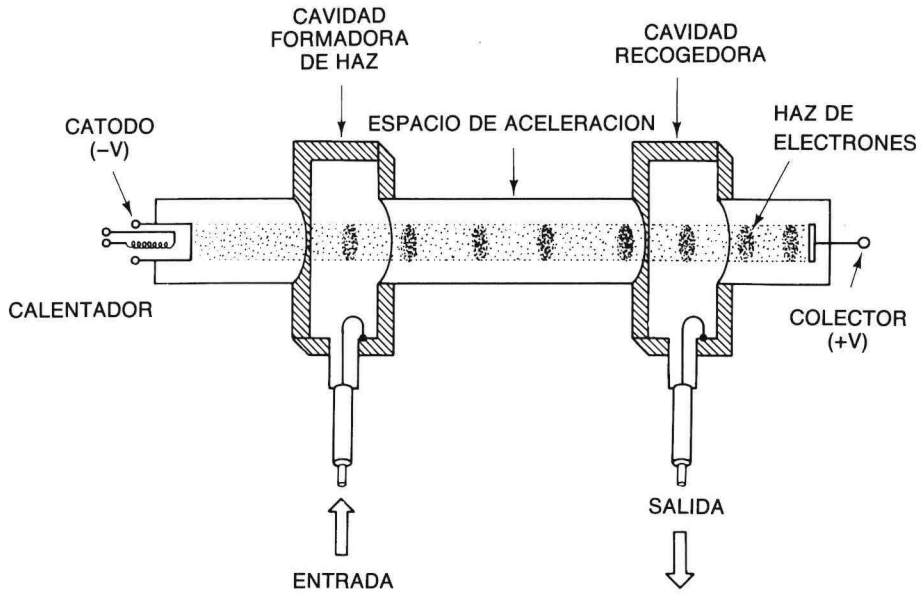


**Fig. 10.** *Klystron de dos cavidades.*

Un cátodo termoiónico emite un chorro de electrones que inmediatamente son atraídos y viajan hacia el potencial positivo del colector pasando por dos cavidades llamadas Formadora de Haz y Recogedora.

Una señal de entrada aplicada a la Formadora de Haz provoca unas oscilaciones dentro de esa cavidad.

Esas oscilaciones causan aceleraciones y deceleraciones en el chorro de electrones que viaja del Cátodo al Anodo. Podemos poner un ejemplo que explique el efecto a que daría lugar. Si unos cuantos coches en diferentes puntos de una carretera fueran frenando y otros acelerando, los coches rápidos terminarían chocando con los lentos, y darían lugar a espacios y haces sucediéndose en la carretera.

Las oscilaciones de la Cavidad de Haces dan lugar a haces de electrones a la frecuencia de la señal de entrada. Los haces de electrones de velocidad modulada, se mueven y entran en el espacio de impulso o aceleración. Este espacio, de hecho, es donde los electrones acelerados tienden a chocar con los retardados dando lugar a los haces.

Los electrones pasan a la cavidad recogedora en la proporción de un haz por ciclo de la señal de entrada. Estos haces producen oscilaciones que son transferidas fuera de la cavidad mediante el acoplamiento de salida. Los haces, después de excitada la cavidad, alcanzan finalmente el colector formando ondas.

Una pequeña señal de entrada a una velocidad modulada da lugar a un rayo de electrones tal que en la sonda del acoplamiento de salida se produce una amplificación de la señal de entrada. Por ello el Klystron de dos cavidades se utiliza como un amplificador de microondas.

Un amplificador, como sabemos, se puede hacer oscilar mediante un alimentador de las amplificaciones de salida, en nuestro caso desde la cavidad recogedora volviendo a la entrada de la cavidad de haces. Esto es conocido como ALIMENTACION REGENERATIVA DE RETORNO. La figura 11 muestra un Klystron de dos cavidades con una conexión coaxial externa de alimentación de retorno.

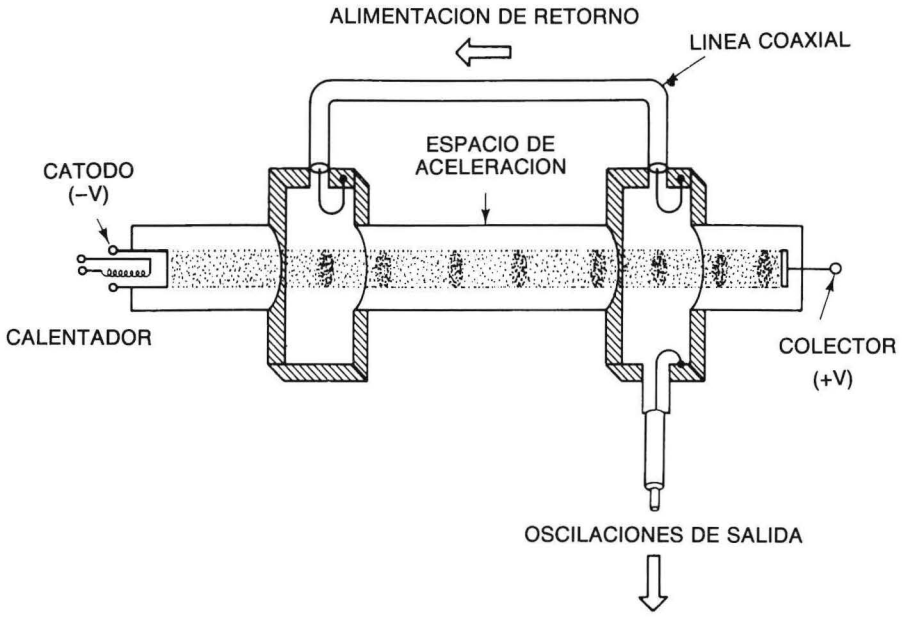


**Fig. 11.** *Klystron de dos cavidades como oscilador.*

## TRAVELING WAVE TUBE (TWT)

La figura 12 muestra la estructura interna del tubo.

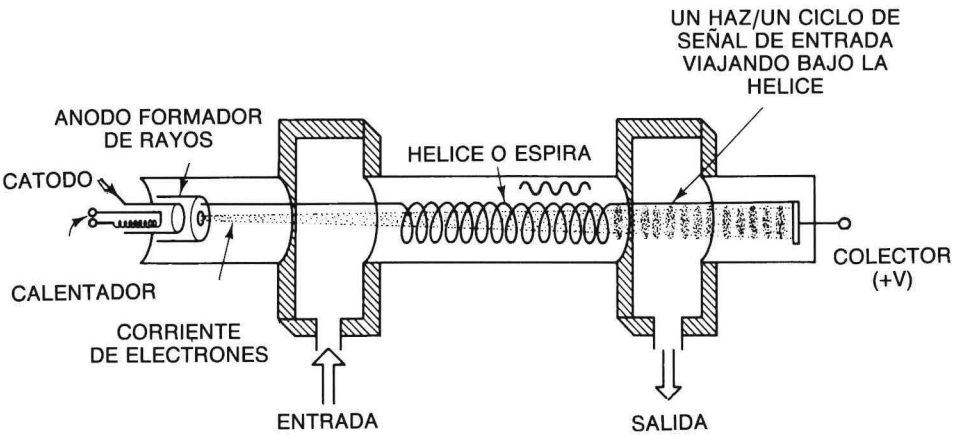


**Fig. 12.** *Tubo amplificador (TWT).*

De nuevo un cátodo termoiónico emite electrones que son acelerados hacia un potencial positivo en el colector, pero contrariamente a otros amplificadores de microondas, este tubo no alberga una cavidad de resonancia. La señal que va a ser amplificada es aplicada al conductor de ondas de entrada y viaja a lo largo de la espira, la cual es como un gran inductor en el interior del tubo. El enrollamiento es de hecho bastante largo y a las frecuencias de microondas nuestra longitud de onda, como ya sabemos, es muy pequeña, así muchos ciclos de RF ocurren dentro de la longitud de la espira. Estos ciclos pertenecientes a campos electromagnéticos interaccionan con la corriente de electrones que viaja del cátodo al ánodo.

En puntos donde el voltaje de RF es positivo, los electrones son acelerados; donde el voltaje de RF es negativo los electrones sufren una deceleración. De esta forma se producen haces de electrones a lo largo de todo el tubo dentro de la espira. Como estos haces de electrones se mueven hacia el colector, sus cargas inducen voltajes en la espira que se añaden a las ondas electromagnéticas de la señal de entrada de RF. Esta interacción tiene lugar a lo largo de todo el tubo, causando continuas interacciones y como consecuencia una amplificación.

Consecuentemente, la ganancia de un TWT es proporcional a la longitud del tubo, o más importante, a la longitud de la espira.

## ANTENAS

En la frecuencia de microondas es posible radiar energía electromagnética de forma que ésta aumente su potencia mediante las antenas.

En la región de las radiofrecuencias se utiliza una simple varilla metálica vertical, mientras que en las frecuencias de TV, a causa de la necesidad de la direccionabilidad, la antena consiste en una varilla horizontal con una segunda varilla usada como reflector.

En las frecuencias de microondas la configuración de la antena consiste en una sección parabólica de metal, circular o rectangular, con un diámetro que suele variar entre 75 cm y 45 m.

# 3. USOS DE MICROONDAS

Se pueden distinguir dos aplicaciones fundamentales: como fuente de calor y como transporte de información.

## COMO FUENTE DE CALOR

Los usos más comunes son:

### Horno de microondas

Se usa en la preparación de alimentos en restaurantes, cafeterías y hoy en día hasta en usos domésticos. Las principales ventajas son:

- Solamente se calienta el alimento, siendo la limpieza mas fácil y la cocción más eficaz.
- El alimento es cocinado no sólo en la superficie sino a su través.
- El tiempo de cocción es de algunos minutos frente a horas en la cocina convencional.

Los hornos de microondas suelen operar a frecuencias de 915 o 2.450 MHz.

### Secadero de patatas fritas

Se utiliza una potencia de 50 Kw a una frecuencia de 916 MHz.

Se puede obtener una velocidad de producción de 700 a 1.000 kg/h, dependiendo del contenido de humedad de entrada.

### Secado de papel

Con este secado se obtiene una igualdad de humedad tridimensional sin sobresecado. Este secado está autocompensado, ya que las áreas más húmedas

reciben automática e instantáneamente mayor cantidad de energía. El resultado es un producto con mayor fuerza, mejor imprentabilidad y una mayor calidad de acabado.

Utiliza fuentes de 2.450 MHz y potencia 50 Kw.

### Secado de chapas de madera

Al igual que en el papel, el secado por microondas tiene tendencia natural a concentrar energía donde la humedad es mayor. El contenido de humedad de la chapa es muy variado debido a las diferencias entre el corazón y la savia de la madera, nudos, tamaño de vetas, etc.

Con este procedimiento se consigue secar las zonas húmedas sin hacerlo con las que inicialmente son aceptables. Esta ha sido la meta que se ha perseguido durante años y que era inalcanzable con las fuentes de calor convencionales.

### Cocción de pollos

Los pollos pasan a una velocidad aproximada de una tonelada a la hora. Antes de los microondas era muy difícil cocinar los trozos de pollo debido a su distinta forma y tamaño. Ahora se consigue mayor producción a menor coste.

### Pasteurización

Es muy efectivo, especialmente en el caso de hongos, mohos y bacterias.

El tiempo de pasteurización es mucho más corto debido a la rápida y profunda penetración del calor. Suelen durar de dos a tres minutos, frente a los diez-cien minutos usando fuentes convencio nales.

### Cerámica

También para esta actividad se pueden emplear hornos de microondas. La fuente suele ser un Magnetrón que opera a una frecuencia de 2450 MHz y una potencia de 2 Kw.

### Otros usos

Se utiliza también en medicina para la diatermia clínica, con una potencia aproximada de 1 Kw suministrada por una fuente de radiofrecuencias.

## COMO FUENTE DE TRANSPORTE DE INFORMACION

Los usos más frecuentes son:

### Radio

Los enlaces de retransmisión pueden verse a lo largo de todo el continente. En estos sistemas la potencia total radiada es tan pequeña que en cualquier parte de la antena las condiciones son seguras.

### Teléfono

La potencia de los transmisores empleados es lo suficiente mente alta como para garantizar un campo de fuerzas que debe vi gilarse por delante y alrededor de la antena.

Los cálculos que se hicieron en estos sistemas indicaron que era necesario instalar defensas protectoras. Después de erigida la defensa, las mediciones indicaron que la densidad de potencia, fuera de la defensa, era menor de 10 $mW/cm^2$, valor considerado como seguro para una exposición in definida.

### Televisión

El último avance en la comunicación por microondas para dis minuir el problema de la «línea recta» (radiotransmisión que sigue la curvatura terrestre) es la comunicación por satélites.

Los dos tipos de satélites hoy en uso, son los activos (contiene receptores y transmisores de forma que una señal reci bida es transmitida por el satélite) y pasivos (que simplemente actúan como receptor). Ya que éstos últimos sólo reflejan la señal, usando este tipo de sistemas la potencia de transmisión es mayor.

### Detectores de rádar

Rádar para detectar el tiempo atmosférico.

Normalmente se utilizan frecuencias de 3.900 a 10.900 MHz, y las distancias de riesgo varían considerablemente debido a los diferentes tipos de aviones que usan el sistema.

### Otros usos

Se pueden emplear monitores de microondas en los coches de policía. Otro uso puede ser el rádar por microondas para controles de velocidad. También se pueden usar como alarmas antirrobo en almacenes y edificios.

## 4. INTERACCION DE LA ENERGIA DE MO Y RF CON LOS SISTEMAS BIOLOGICOS

En todo sistema biológico expuesto a una fuente de energía de MO y RF se producen en su interior campos eléctricos y magnéticos. Por lo tanto, los efectos biológicos resultantes dependerán de la capacidad de absorción de la materia viva y de la intensidad de los campos inducidos.

De la interacción de las ondas electromagnéticas absorbidas y el sistema biológico, resulta una transferencia de energía, con aumento de la energía cinética molecular y el consiguiente calentamiento. Al ser el grado de vascularización tisular en el organismo diferente de unos órganos a otros, la distribución y depósito de la energía absorbida no será uniforme, estableciéndose gradientes térmicos internos (1).

En general podemos decir que existirá un aumento de la temperatura corporal como consecuencia de la exposición a MO y RF, cuando la tasa de absorción de energía sea mayor que la capacidad de disipación térmica; en el sistema biológico este calentamiento corporal será total o parcial dependiendo de:

- La distribución interna de los campos electromagnéticos en el cuerpo.
- Los mecanismos de termorregulación pasivos (radiación, conducción, convección y evaporación); y activos (circulación sanguínea, vasodilatación cutánea, sudoración y respiración).

Como consecuencia de lo anterior, observamos que los órganos más sensibles a los efectos de este tipo de radiación son aquellos menos vascularizados (ojo y testículo).

Experimentalmente, se ha demostrado que para que exista un aumento de la temperatura corporal como resultado de la absorción de energía electromagnética, es necesario que el cuerpo tenga un diámetro mayor o igual a un décimo de la longitud de onda. Aplicando este modelo teórico tendremos que, para el hombre, las radiofrecuencias menores de 15 MHz (longitudes de onda mayores de 20 m) no constituirán un riesgo térmico.

No obstante, no podemos excluir, como estudiaremos a continuación, la existencia de otros efectos no térmicos.

En el hombre el índice de absorción puede alcanzar un valor máximo para radiaciones emitidas en el intervalo de frecuencias de 30 a 200 MHz.

## 5. EFECTOS BIOLOGICOS DE LAS RADIACIONES DE MICROONDAS Y RADIOFRECUENCIAS

La energía electromagnética emitida en este intervalo de frecuencias (MO y RF) interactúa con los sistemas biológicos produciendo una serie de efectos,

pudiendo constituir alguno un riesgo para la salud. Como consecuencia de esta interacción directa con procesos biofísicos o bioquímicos, los órganos o sistemas afectados son susceptibles de sufrir una alteración estructural, trastorno funcional o ambos.

Puede existir un período de latencia entre la interacción primaria y la detección del efecto biológico. También pueden producirse con posterioridad efectos indirectos o secundarios en otros órganos o sistemas, inducidos desde el lugar donde ocurre la interacción primaria.

Podemos clasificar estos efectos en dos tipos:

### Efectos térmicos

Son los más estudiados y resultan de la conversión de la energía electromagnética en energía térmica.

En este intervalo de frecuencias (MO y RF), las radiaciones emitidas no tienen un poder energético suficiente para ionizar la materia; pero sí son capaces de transformar la energía radiante incidente en energía rotacional. Aumenta por tanto la energía cinética molecular y se produce el calentamiento. Este incremento de la temperatura corporal se distribuye irregularmente en el interior del organismo, estableciéndose gradientes térmicos.

### Efectos no térmicos

Posteriormente se observó que se producían lesiones en órganos internos sin que se produjese una elevación de la temperatura corporal. Estos efectos de carácter no térmico se han tratado de explicar desde diferentes teorías:

- Interacción a nivel molecular, celular o tisular (membranas biológicas) (7).
- Interferencia directa con fenómenos bioeléctricos (alteraciones registradas en el electroencefalograma y electromiograma) (2).
- Alteraciones en la transmisión de la información genética (2).

A continuación revisaremos los efectos biológicos más importantes, estudiados fundamentalmente mediante la experimentación animal.

## HIPERTERMIA

No se puede elaborar un modelo predictivo de las consecuencias biológicas de la exposición a MO y RF, debido a que existe una impredecible y no uniforme absorción y distribución de la energía. Cuando el aumento de la temperatura exceda la capacidad de disipación del sistema termorregulador del organismo, se producirá una hipertermia, que puede dar lugar a lesiones locales, quemaduras, hemorragias, necrosis y muerte tisular (Cleary, 1978) (3).

Las exposiciones de densidad de potencia alta (mayores de 10 $mW/cm^2$) serán capaces de producir un aumento de la temperatura corporal. Lógicamente, las regiones y órganos con una pobre vascularización serán las más suceptibles al daño térmico (ojo y testículo).

Otra característica específica de este tipo de radiaciones, como veremos al estudiar los efectos biólogicos en otros órganos, es la diferencia en el tipo de lesión térmica producida por MO y RF a las producidas por otros métodos de calentamiento (por ejemplo, baños en agua caliente). La explicación de este fenómeno la encontramos en que las MO y RF producen gradientes térmicos internos, mientras que otros métodos generalmente calientan desde la superficie.

## EFECTOS SOBRE EL SISTEMA NERVIOSO Y COMPORTAMIENTO

Existen numerosos estudios que recogen este tipo de efectos, tanto en experimentación animal (Marha *et al.*, 1971) (3), como en investigaciones efectuadas en población laboral expuesta (4). Fundamentalmente se describen cambios en la función mental y trastornos fisiológicos del sistema nervioso, aunque no se ha podido establecer una relación causal directa con el grado de exposición.

En lo que sí coinciden numerosos trabajos es en referir la existencia de un síndrome neurasténico en el hombre, con su cortejo sintomático característico: cefaleas, astenia, anorexia, fatiga, confusión, mareos, temblores, insomnio, etc. (5, 6).

En experimentación animal, con exposiciones de densidad de potencia alta (mayores de 10 $mW/cm^2$) se producen alteraciones de los reflejos condicionados, lo que sugiere la posible existencia de transtornos funcionales en el sistema nervioso. También se han descrito modificaciones en la conducta, alteraciones del aprendizaje, del ritmo vigilia/sueño, de la actividad locomotriz, o de la ingesta de alimentos; relacionadas todas ellas, principalmente con exposiciones a dosis pulsadas.

También hemos recogido de estudios experimentales (1, 3, 7) los siguientes datos:

- Alteraciones transitorias del electroencefalograma,tanto de activación como de inhibición.
- Interacción de la energía absorbida con ciertos medicamentos, aumentando la sensibilidad a los fármacos convulsionantes o potenciando la acción de los depresores del sistema nervioso central.
- Modificaciones estructurales del tejido nervioso (hiperemia, picnosis y vacuolización) y posible aumento de la permeabilidad de la barrera hematoencefálica.

En todos estos efectos descritos no podemos excluir la existencia de otros mecanismos de interacción diferentes al térmico.

## EFECTOS SOBRE EL SISTEMA CARDIO-VASCULAR

Como consecuencia de la estimulación térmica, las terminaciones nerviosas sensitivas de la piel (fibras III y IV), transmiten sus señales aferentes a través de la médula espinal hasta la región preóptica hipotalámica, ocasionando una respuesta neurovegetativa adrenérgica sobre el corazón y el sistema vascular.

Los signos que detectamos en la exploración clínica son:

- Alteraciones de la Tensión Arterial (1), sobre todo hipotensión en exposiciones crónicas a bajos niveles.
- Alteraciones del ritmo cardiaco (7): bradicardia en exposiciones crónicas a bajos niveles, y taquicardia como consecuencia del efecto térmico en exposiciones de densidad de potencia alta.
- Cambios en el volumen sistólico en exposiciones agudas.

En cambio, alteraciones en el registro electrocardiográfico, no han sido descritas en ningún trabajo de los revisados.

### EFECTOS OCULARES

El ojo es un órgano especialmente sensible a la radiación de microondas, debido a su escasa vascularización y a la lentitud con la que actúan sus mecanismos termorreguladores.

Las lesiones más importantes, opacidades y cataratas, se localizan en el cristalino. Su mecanismo etiopatogénico es por un fenómeno de sobrecalentamiento, que producirá un daño en las células capsulares y una desnaturalización de las proteínas. Las cataratas sólo se producen en exposiciones agudas y en un intervalo de frecuencias mayor de 500 MHz (sobre todo a 2.500 MHz). También se ha comprobado experimentalmente que son necesarias exposiciones a densidades de potencia muy altas (mayores de 150 $mW/cm^2$) para poder producir dichas lesiones; y que no existen efectos acumulativos (Kramer *et al.*, 1974 y Guy *et al.*, 1975) (3). En conclusión, la exposición tendrá que sobrepasar un umbral mínimo de densidad de potencia, para que aparezcan las cataratas.

Otras lesiones oculares descritas, aunque sin contar con el apoyo de un número suficiente de estudios son:

- Lesiones en córnea: se han diagnosticado queratitis en exposiciones a MO milimétricas, muy próximas a la región del espectro de la radiación infrarroja.
- Alteraciones retinianas de tipo degenerativo.

## EFECTOS NEURO-ENDOCRINOS

La radiación de MO puede provocar alteraciones endocrinas, mediante la interacción en los diferentes niveles del eje hipotálamo-hipofisario (Michaelson *et al.*, 1975 y Cleary, 1977) (3).

Al tratarse de un sistema homeostático será muy difícil diferenciar las modificaciones transitorias y funcionales del sistema, con las posibles alteraciones patológicas; además algunos de los cuadros descritos coinciden con los efectos biológicos producidos por un síndrome de adaptación (aumento de la ACTH y corticoesteroides, y alteraciones del equilibrio iónico).

Por lo tanto las alteraciones hormonales detectadas pueden ser debidas al estrés inherente a la experimentación, o al posible daño térmico; aunque no se puede excluir la posibilidad de una interacción directa, no térmica, de este tipo de radiación sobre el sistema neuroendocrino.

## EFECTOS HEMATOPOYETICOS

De los estudios revisados (1, 2, 3) se extraen las siguientes conclusiones:

- Existen modificaciones en el número de eritrocitos y leucocitos, que guardan relación con la densidad de potencia. (Posible etiología por daño térmico.)
- Alteraciones en los leucocitos en exposiciones mayores de 10 $mW/cm^2$.
- Modificaciones de la respuesta inmune y estimulación de la linfopoyesis, que cesan cuando la exposición se hace continua, lo cual sugiere un mecanismo de adaptación.
- No hay evidencia de lesiones en la médula ósea.

## EFECTOS SOBRE LA AUDICION

La absorción de energía de MO produce una expansión termoelástica del tejido cerebral, que origina una onda de presión acústica que es detectada por vía ósea por las células del órgano de Corti.

## EFECTOS GENETICOS Y ACCION A NIVEL CELULAR

Dichos efectos han podido ser bien estudiados debido a la fácil reproducción de las condiciones de experimentación y a las mejores mediciones dosimétricas. El problema se plantea en cuanto que los resultados obtenidos no son extrapolables a las condiciones normales de exposición.

Aun existiendo numerosas discrepancias en los diferentes estudios (3, 4, 7), podemos enumerar algunos de los efectos descritos:

- Aberraciones cromosómicas y alteraciones de la mitosis.
- Estudios sobre proliferación celular y síntesis del DNA.
- Alteraciones en la actividad respiratoria mitocondrial.
- Acción sobre la membrana citoplasmática, modificando el equilibrio electroquímico entre iones, macromoléculas y glicoproteínas de la superficie celular.

Sí hay coincidencia en la etiopatogenia de dichos efectos, reconociéndose en todos ellos la existencia de un daño térmico.

## EFECTOS SOBRE LA REPRODUCCION Y EL DESARROLLO

Exposiciones a MO y RF mayores de 10 $mW/cm^2$, son capaces de interferir en la reproducción y el desarrollo, debido a la alta sensibilidad al stress térmico que tienen ambas funciones (aunque no se pueda excluir la existencia de otros efectos no térmicos).

El órgano diana principal es el testículo, debido a su escasa vascularización. Existe una afectación de la espermatogénesis, evidenciada en animales de experimentación (Ely *et al.*, 1964) (3). Estas lesiones suelen ser reversibles, excepto cuando se produce necrosis (4).

Las diferencias entre los efectos térmicos inducidos por MO y los producidos por otros métodos de calentamiento se atribuyen a las diferencias en la distribución espacial del calor interno y a las diferentes tasas de calentamiento. En los efectos sobre el desarrollo, influye además el tiempo de exposición.

## 6. EFECTOS DE LA EXPOSICION LABORAL

La mayoría de los estudios existentes sobre población trabajadora expuesta a MO y RF padecen serias limitaciones, no pudiendo establecerse una relación causal entre las condiciones y grados de exposición, y los efectos biológicos observados.

El problema principal estriba en la no utilización de una adecuada instrumentación, especialmente dosímetros personales, por lo que no pueden definirse claramente las condiciones de la exposición. Falta información sobre todos o alguno de los siguientes parámetros:

- Densidad de potencia.
- Tiempo de exposición.
- Posición y orientación del trabajador con respecto al campo.
- Area efectiva de irradiación.

Otro problema ha sido la selección inadecuada de los grupos de trabajadores a estudiar. La Organización Mundial de la Salud recomienda la realización de estudios epidemiológicos sobre grandes grupos de trabajadores expuestos (3), reconociendo que los exámenes médicos tradicionales no proporcionan información suficiente. De los trabajos revisados muy pocos cumplen estos requisitos, por lo que sus resultados pueden ser cuestionables.

A continuación trataremos de resumir los principales hallazgos obtenidos en estudios sobre población laboral expuesta, siendo discutible la etiopatogenia de los efectos descritos, por no figurar generalmente en dichos trabajos el grado de exposición. Además, dichos estudios no suelen aportar grupos control y al tratarse los hallazgos obtenidos, en su mayoría de síntomas y signos inespecíficos, no podremos asegurar la relación de los mismos con la exposición, sin antes descartar otros factores o cofactores de tipo individual, familiar o dependientes de las condiciones laborales (ejemplos: personalidades hipocondríacas, carga mental o física, estrés ...).

La mayoría de los estudios revisados (nos remitimos a la bibliografía), coinciden al recoger alguno de los efectos siguientes: síndrome asténico, alteraciones funcionales del sistema nervioso, trastornos cardiovasculares, efectos oculares aislados y alteraciones analíticas inespecíficas.

- **Trastornos subjetivos:** cefaleas, astenia, irritabilidad, insomnio, disminución de la líbido, opresiones torácicas, precordialgias, sensación de fatiga, debilidad y malestar poco definidos.
- **Alteraciones funcionales del sistema nervioso:** temblores, aumento de la sudoración, hipotonía, cansancio de las extremidades y trastornos neurovegetativos (8).
- **Trastornos cardio-vasculares:** alteraciones del ritmo cardiaco y de la tensión arterial. Trastornos vasomotores distales.
- **Efectos oculares:** no se recoge en estudios epidemiológicos la existencia de dichas lesiones, aunque sí se han diagnosticado aisladamente y tras exposiciones crónicas, opacidades cristalinianas y cataratas.
- **Efectos sobre la reproducción y el desarrollo:** se dispone de escasa información, y sólo en un trabajo (Marha, 1971) se describen estos efectos en mujeres embarazadas, expuestas a densidades de potencia mayores de 10 $mW/cm^2$. No se define en cambio la existencia de otros cofactores, como el ruido o las propias condiciones de trabajo, que pudieran ser responsables de dichos efectos.

  Sí existen descritos algunos casos individuales de infertilidad y oligospermia, en exposiciones crónicas a MO.
- **Alteraciones analíticas:** son de carácter inespecífico y contradictorias, fundamentalmente afectando a la serie blanca, proteinograma y metabolismo lipídico.

Podemos concluir que no se ha establecido de una forma clara la relación causal entre la exposición a RF y MO, y los efectos sobre la salud observados, siendo necesario aportar en estudios futuros datos sobre las condiciones de la exposición. Habrá que considerar también la existencia en la población laboral expuesta de otros factores capaces de producir una sintomatología similar.

Y por último, el otro campo de acción es la realización de estudios epidemiológicos en la población trabajadora expuesta, que nos permitan confirmar o descartar los efectos observados experimentalmente y cuyos resultados sean estadísticamente significativos.

## 7. CONTROL DEL RIESGO EN LAS RADIACIONES DE MICROONDAS

La primera norma de protección contra las microondas fue introducida en EE. UU. en 1953. Se propuso un límite de 10 $mW/cm^2$ para la exposición profesional continua. Este límite basado en el calor producido por el metabolismo basal (5 a 10 $mW/cm^2$) y la carga térmica adicional que el organismo humano puede tolerar fue confirmada por el ANSI en los años 1966 y 1974.

Otras fueron las consideraciones que sirvieron para fijar las primeras normas de seguridad en la Unión Soviética en 1959. De una parte se observaron modificaciones funcionales en animales expuestos una hora a 1 $mW/cm^2$, y de otra parte observaciones hechas sobre personas expuestas profesionalmente a las microondas señalaron perturbaciones de funcionamiento de los sistemas nervioso y cardiovascular para densidades de potencia inferiores a 0,1 $mW/cm^2$. A estos valores se les aplicaron factores importantes de seguridad que daban límites extremadamente prudentes del orden de 10 $\mu W/cm^2$ para una exposición profesional de ocho a diez horas al día.

Las nuevas experiencias sobre efectos biológicos de las radiofrecuencias y el mejor conocimiento de los procesos biofísicos de interacción han animado a ciertos organismos como el Comité Internacional de Radiaciones No Ionizantes de la Asociación Internacional de Radioprotección (IRPA/INIRC) y el American National Standards Institute (ANSI) a proponer un nuevo sistema de límites de exposiciones a las radiaciones electromagnéticas de frecuencias comprendidas entre 100 KHz y 300 GHz.

Para fijar estos límites de exposición hay que tener en cuenta muchos factores, tales como los físicos ligados a la radiación incidente, factores ligados a la forma de exposición y factores ligados a las características biológicas.

Desde el punto de vista de la interacción de la radiación y del organismo humano, el dominio de las radiofrecuencias se puede dividir a grandes rasgos en cuatro apartados:

1. La región de frecuencias inferiores a 30 MHz, en la cual no hay resonancias;

la absorción de energía es superficial en el tronco, pero no al nivel de cuello o tobillos, y decrece rápidamente con la frecuencia.

2. La región de resonancias, comprendida entre 30 y 300 MHz para resonancias en todo el organismo, y alrededor de 400 MHz si se consideran resonancias a nivel de la cabeza.
   La frecuencia a la cual la absorción de energía es máxima depende de la talla de un sujeto, 70 MHz para una persona de 1,75 m; > 100 MHz para los niños. Los límites deberán fijarse a un nivel bastante bajo para que comprendan los casos desfavorables.
3. La región de «puntos calientes», entre 400 y 2.000 MHz. El porcentaje de energía absorbida decrece en 1/f según crece la frecuencia, pero se observan puntos calientes, es decir, regiones localizadas donde la absorción de energía es elevada.
   La dimensión de estos «puntos calientes» es de varios centímetros a 915 MHz y disminuye según crece la frecuencia.
4. La región de absorción superficial a partir, 2000 MHz, donde la elevación de temperatura está localizada principalmente en la superficie, con un efecto análogo al producido por la radiación infrarroja a frecuencias netamente superiores.

En el plan de protección contra radiofrecuencias, la introducción reciente de una nueva magnitud que permite expresar cuantitativamente el cambio de energía entre la radiación y la materia viva, constituye, sin ninguna duda, un paso importante.

Esta magnitud, definida en inglés como Specific Absorption Rate (SAR), es la energía absorbida por unidad de tiempo y de masa y se expresa en watios por kilogramo. En Francia se conoce generalmente bajo el nombre de Taux d'Absorption Spécifique (TAS). Sin embargo parece que esta denominación no es muy acertada, puesto que el término *taux* designa un porcentaje o fracción decimal, que no corresponde al inglés *rate,* el cual implica una noción de tiempo. Parece, por tanto, preferible designar esta magnitud por la denominación más exacta de Debit d'Absorption Spécifique (DAS).

Este DAS puede ser calculado, y en ciertos casos medido. En la práctica estas medidas son difíciles de efectuar, y la protección se asegura limitando los parámetros característicos del campo de radiación, que son más fácilmente medibles. Se mide por ejemplo la Densidad de Potencia en $mW/cm^2$, la intensidad del campo eléctrico (E), o la del campo magnético (H) en V/m y A/m.

Cuando la distancia a la fuente es superior aproximadamente a una longitud de onda, los dos campos están en fase y la densidad de potencia es igual al producto $E \times H$. A una distancia suficientemente alejada de la fuente como para que pueda ser considerada puntual (condiciones de campo lejano), la fracción

E/H es igual a 377 ohmios, y la densidad de potencia puede ser obtenida por la relación $E^2/377$ o $H^2 \times 377$.

En campo próximo, esta relación no es aplicable y se deberán determinar separadamente la intensidad del campo eléctrico y del campo magnético.

Los efectos biológicos producidos por las radiaciones electromagnéticas en el dominio de las radiofrecuencias han sido objeto de un gran número de publicaciones. La literatura sobre este tema ha sido analizada y evaluada por IRPA/INIRC y por el ANSI.

En el caso de exposición profesional, las recomendaciones hechas por los dos Organismos tienen el mismo objetivo, que es limitar el (DAS) a 0,4 W/kg de media sobre el organismo. Algunas diferencias de opinión sobre los factores de seguridad a adoptar hacen que se recomienden límites prácticos ligeramente diferentes.

## RECOMENDACIONES DEL IRPA/INIRC

Los límites presentados han sido aprobados por el Consejo Ejecutivo del IRPA en julio de 1983. Hay que hacer notar que son los primeros límites recomendados en este campo por un organismo internacional.

### Límites de exposición para los trabajadores

A frecuencias iguales o superiores a 10 MHz, el DAS resultante de una exposición profesional no debe pasar de 0,4 W/kg si está evaluado como media del organismo entero, y 4 W/kg si se toma como media sobre un gramo de tejido. Además este límite debe ser respetado durante todo el período de seis minutos.

El DAS no puede ser determinado por cálculo o calorimetría, para deducir los límites prácticos que conviene aplicar a la intensidad de campo o a la densidad de potencia para que la energía media depositada en el organismo no pase de 0,4 W/kg. Teniendo en cuenta las variaciones de la energía absorbida según la frecuencia, estos límites prácticos variaron aproximadamente según los intervalos de frecuencia que se determinan más adelante.

A frecuencias inferiores a 10 MHz, donde la energía absorbida es muy débil y decrece rápidamente con la frecuencia, los límites están basados en consideraciones diferentes y el INIRC ha tenido particularmente en cuenta las quemaduras y choques eléctricos que el individuo puede recibir por contacto con objetos suficientemente grandes sin puesta a tierra cuando el campo es superior a 200 V/m.

Por otro lado, estando dadas las longitudes de onda correspondientes a estas frecuencias, se encuentra entonces en condiciones de campo próximo, y las in-

tensidades efectivas de los campos eléctricos y magnéticos deberan ser determinadas por separado y respetar los límites indicados.

Los límites recomendados por el INIRC para la exposición profesional están dados en la siguiente tabla:

| Intervalos de frecuencia MHz | Campo eléctrico V/m | Campo magnético A/m | Densidad de potencia (ondas planas) | |
|---|---|---|---|---|
| | | | $W/m^2$ | $mW/cm^2$ |
| 0,1-1 | 194 | 0,51 | 100* | 10* |
| 1-10 | $194/f^{1/2}$ | $0,51/f^{1/2}$ | 100/f* | 10/f* |
| 10 - 400 | 61 | 0,16 | 10 | 1 |
| 400-2.000 | $3\ f^{1/2}$ | $0,008\ f^{1/2}$ | f/40 | f/400 |
| 2.000-300.000 | 137 | 0,36 | 50 | 5 |

f = frecuencia en MHz
* = valores dados solamente a título indicativo.

Estos límites se aplican a la exposición total o parcial del organismo a partir de una o varias fuerzas. Deben ser respetados como media en todo período de seis minutos durante la jornada de trabajo. No obstante, a frecuencias inferiores o iguales a 10 MHz, los límites pueden ser rebasados eventualmente a condición de que sean tomadas todas las precauciones necesarias para evitar quemaduras o choques eléctricos y que la intensidad del campo no sobrepase los 615 V/m o los 1,6 A/m.

A frecuencias superiores a 10 MHz, la derogación de estos límites estará subordinada a que el DAS sea inferior a 0,4 W/kg de media sobre todo el organismo y a 4 W/kg como media por gramo de tejido.

Dado que se dispone de muy pocas informaciones sobre efectos asociados a impulsos de potencia elevada, se recomienda que los valores de cresta instantáneos de campos pulsados, no sobrepasen 100 veces los límites indicados.

## Límites de exposición para público en general

Para la exposición del público en general se ha incorporado un factor adicional de seguridad igual a 5 sobre los límites fijados para los trabajadores, a fin de tener en cuenta la posible presencia de individuos más sensibles a las radiaciones y que este público pueda estar expuesto veinticuatro horas al día durante períodos prolongados.

## Exclusión

Una derogación de estos límites ha sido prevista para aparatos de baja potencia, tales como los emisores-receptores portátiles o móviles, a condición de que su potencia de salida sea a lo sumo igual a 7 watios. Estos aparatos, en efecto, no engendran campos extremadamente localizados, pero su valor puede a veces sobrepasar los límites.

Salvo en el dominio de frecuencias inferiores a 30 MHz, los límites de exposición recomendados por el INIRC estan muy próximos a las normas de protección adoptadas por el ANSI en julio de 1982.

## NORMAS DE PROTECCION DEL ANSI

Las normas de protección recomendadas por el ANSI para la exposición a campos electromagnéticos de frecuencia comprendida entre 300 KHz y 100 GHz están expresadas por el cuadrado de la intensidad del campo eléctrico ($E^2$) y el cuadrado de la intensidad del campo magnético ($H^2$), así como la densidad de potencia equivalente.

El siguiente gráfico permite comparar los límites propuestos por el ANSI en términos de densidad de potencia, a los recomendados por el IRPA/INIRC:

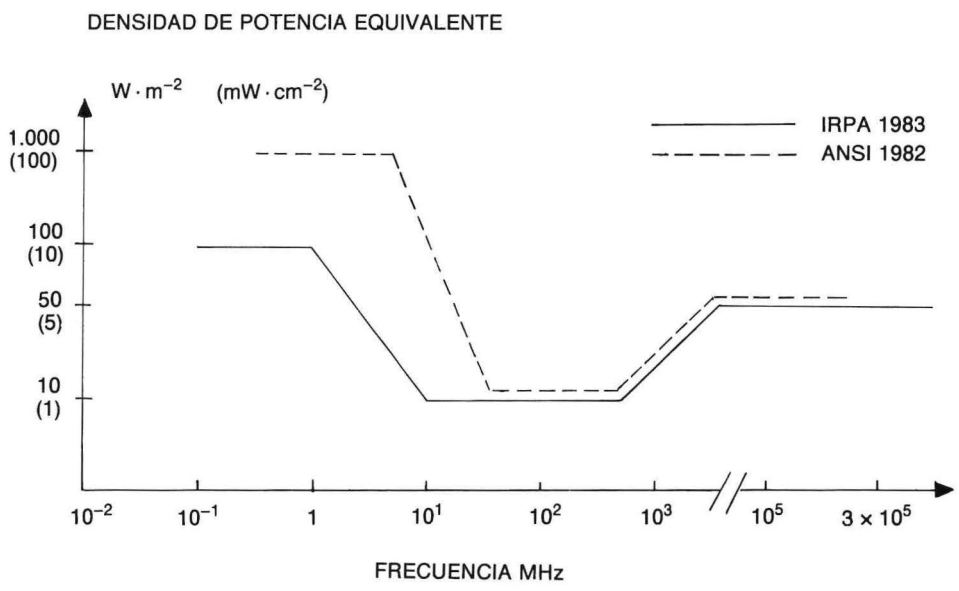


**Fig. 13**

En resumen, las recomendaciones del ANSI y del INIRC difieren principalmente en los siguientes puntos:

- Para frecuencias inferiores a 30 MHz, los límites del ANSI son netamente más elevados. A intensidades de campo próximas a estos valores, existen ciertos riesgos de quemaduras y choques eléctricos y convendrá que los objetos metálicos suficientemente grandes sean eliminados, puestos a tierra o manejados con guantes aislantes.
- Entre 300 MHz y 2.000 MHz, los límites de exposición recomendados por el INIRC son un poco más bajos, porque tiene en cuenta un pico de resonancia hacia los 350 MHz que ha sido confirmado recientemente.
- El límite adoptado por el ANSI para el DAS evaluado como media para cada gramo de tejido es de 8 W/kg.
- Ningún factor suplementario de seguridad es recomendado por el ANSI para la exposición del público en general.

En los Estados Unidos los proyectos para efectuar recomendaciones sobre los límites de exposición están actualmente en estudio en el seno de diversos organismos como el National Council on Radiation Protection and Measurements (NCRP) y Environmental Protection Agency (EPA), organismo federal encargado de la protección de la población y medio ambiente. El American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) ha modificado sus recomendaciones en 1983, manteniendo sin embargo el límite de 10 $mW/cm^2$ para frecuencias superiores a 1 GHz.

En Europa, la Comisión de Comunidades Europeas (CCE) se ha encargado de revisar el «Proyecto de directiva para la protección de trabajadores y público en general contra los peligros de los microondas» publicado en 1980, a fin de estudiar el campo de aplicación de las radiaciones electromagnéticas de frecuencia comprendida entre 100 KHz y 300 GHz, y tener en cuenta los nuevos datos científicos publicados en los últimos años.

Aunque, como se ha visto, existe diversidad de opiniones según los distintos países y organismos que han estudiado el problema, en cuanto a densidades de potencia, frecuencias, tiempo de exposición y consecuencias para la salud humana, vamos a dar unos niveles máximos permisibles que puedan ser aceptados mayoritariamente.

También se pueden calcular unas distancias mínimas al foco de radiación que se puedan considerar seguras, según las distintas densidades de potencia.

Finalmente veremos algunos elementos de protección frente a las radiaciones de microondas y RF.

Existen unos TLV'S establecidos que se refieren a la radiación de microondas en la gama de frecuencias comprendidas entre 100 MHz y 100 GHz.

El TLV para exposiciones laborales a microondas de densidad de potencia y tiempos de exposición conocidos, es el siguiente:

- Para niveles de densidad media de potencia que no superen los 10 $mW/cm^2$, el tiempo total de exposición se limitará a 8 h/día (exposición continua).
- Para niveles de densidad media de potencia a partir de 10 $mW/cm^2$, pero sin superar 25 $mW/cm^2$, el tiempo de exposición se limitará a un máximo de diez minutos en cada período de una hora, durante la jornada laboral de ocho horas (exposición intermitente).
- No se debe permitir la exposición a niveles superiores a los 25 $mW/cm^2$.

Vamos a ver ahora cómo se puede calcular la distancia de seguridad a distintas densidades de potencia.

La intensidad del campo puede ser calculada mediante la siguiente ecuación.

$$W_f = \frac{P_t G_t}{4 \pi D^2}$$

Siendo:

$W_f$ = Densidad de potencia del campo $W/cm^2$.
$P_t$ = Potencia media transmisora en W.
$G_t$ = Ganancia de potencia de la antena.
D = Distancia a la antena en cm.

Otro método que permite calcular la distancia de seguridad, es mediante la ecuación:

$$d = \sqrt{\frac{0{,}08\ P_t G_t}{P\ (W/m^2)}}$$

Siendo:

d = Distancia en metros.
$P_t$ = Potencia media de entrada en W.
$G_t$ = Relación de ganancia de potencia de la antena.
P = Densidad de potencia ($W/m^2$).

Sustituyendo en la ecuación el valor de seguridad de 10 $mW/cm^2$ y transformando unidades, la expresión simplificada quedaría:

$$d = \sqrt{\frac{0{,}000008\ G_t\ P_t}{P\ (W/cm^2)}} = \sqrt{0{,}0008\ G_t\ P_t}\ \text{metros}$$

Aunque las antenas vienen de fábrica con una ganancia conocida, ésta se puede calcular por la expresión:

$$G = \frac{4\ \pi\ A}{\lambda^2}$$

Siendo:

A = Area efectiva de la sección de la antena en $cm^2$.
$\lambda$ = Longitud de onda en cm de la radiación de microondas.

## Protección frente a la radiación de microondas.

Para proteger a las personas frente a la radiación de microondas se pueden construir habitaciones protegidas. Están construidas con dos láminas de madera contrachapada entre láminas de metal. Todas las aberturas están apantalladas para absorber cualquier RF que pueda ser reflejada.

Cuando no se puede utilizar este sistema se han de atenuar los niveles de densidad de potencia mediante un adecuado apantallamiento.

Estos consisten en pantallas de mallas metálicas de distinto número de hilos por centímetro cuadrado, ventanas de cristal, revestimientos de madera, bloques de hormigón, etc. Existen tablas que dan los distintos factores de atenuación según las diversas pantallas y frecuencia de las radiaciones.

También se puede proteger a los individuos expuestos mediante trajes absorbentes y protectores de ojos.

Las gafas protectoras no existen prácticamente en el mercado, y utilizan una malla muy fina embutida en el cristal y materiales absorbentes en los lados. La visión queda poco afectada y se consiguen atenuaciones importantes para radiaciones de frecuencias de hasta 40 GHz. Tienen el gran inconveniente de ser voluminosas e incómodas.

Los trajes absorbentes reducen los campos de altos niveles y a la vez sirven como protección frente al alto voltaje. El operario puede estar seguro con ellos en campos electromagnéticos con una densidad de potencia 10.000 veces mayor que el límite de seguridad (unos 100 $W/cm^2$).

## *BIBLIOGRAFIA*


1. OIT. «Occupational Hazards from Non-Ionizing Electromagnetic Radiation» (Occupational Safety and Health series núm. 53) OIT, 1985.
2. WHO. «Non Ionizing Radiation Protection». WHO Regional publications, European series núm. 10 , 1982.
3. *Criterios de Salud ambiental,* 16. Radiofrecuencias y microondas. OMS, núm. 468, 1984.
4. BARANSKI, S., & CZERSKI (1976). «Biological effects of microwave». Stroudsburg, Dowden, Hutchinson and Ross.
5. HORNOWSKI, J., *et al.* «Rechercher sur l'action pathogène des microondes chez l'homme». Traduction INRS 63. B-74. Institut Nacional de Recherche et de Sécurité, 1974.
6. BOZIK, L. *et al.* «Effects des ondes á fréquences radioélectriques sur le système nerveux». Traduction INRS 117. B-73. Institut National de Recherche et de Sécurité, 1974.
7. DARDALHON. «Les effects biologiques des microondes». Radioprotection, 1984, supplément au núm. 1, Rayonnements non Ionisants. Societé Francaise de Radioprotection, 1984.
8. DESIDERI, E.; FANTACC, M. *et al.* «Indagine Ambientale e Sanitaria tra lavoratrici esposte a campi electromagnetici a radiofrequenza».


### OTRAS OBRAS CONSULTADAS


- NIOSH. «Non Ionizing Radiation Course 583». Ed. Niosh, mayo, 1976.
- NIOSH. «Measurement of REF Power-absortion in biological specimens». Niosh, *Technical Information,* feb., 1977.
- TREMOLIERE, JACQUES. «Les Ondes Electromagnétiques, un risque à connaître». RGS, núm. 45, décembre, 1985.
- ACGIH. «TLV's, Threshold limit values and biological exposure indices for 1986-1987».
- CLINTON COS *et al.* «Ocuppational exposures to radiofrequency radiation (18-31 MHz) from RF dielectric heat sealers». *American Industrial Hygiene Association Journal* (43) 3/82.
- NIGEL, P. COOK. «Microwave Principles and Systems».

- DECAREAU, R. V., and PATERSON, R. A. «Microwave Procesing and Engineering».
- DAVID A. SAVITZ and EUGENIA E. CALLE. «Leukemia and Occupational Exposure to Electromagnetic Fields: Review of Epidemiologia Surveys». *Journal of Occupational Medicine,* volumen 29, núm. 1, January, 1987:47-51.
- PAZ *et al.* «Potential Ocular Damage from Microwave Exposure During Electrosurgery. Dosimetric Survey». *Journal of Occupational Medicine,* volumen 29, núm. 7, July 1987: 580-583.

# CAPITULO 4

## LASERES, RIESGOS Y MEDIDAS PREVENTIVAS

DRA. D.ª MARIA JOSE RUPEREZ CALVO

# EL LASER. RIESGOS Y MEDIDAS PREVENTIVAS

1. INTRODUCCION.
2. APLICACIONES Y USOS INDUSTRIALES.
3. RIESGOS DERIVADOS DE LA UTILIZACION DE LOS LASERES.
4. EFECTOS BIOLOGICOS DE LA RADIACION LASER.
5. CLASIFICACION DE LASERES.
6. LIMITES DE EXPOSICION OCUPACIONAL.
7. CONTROL DE RIESGOS.

# EL LASER, RIESGOS Y MEDIDAS PREVENTIVAS

## 1. INTRODUCCION

La palabra láser es un acrónimo de «Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation», o dicho en pocas palabras, se trata de una emisión de radiación estimulada y amplificada.

Está definido por la Comisión Electrotécnica Internacional en su Norma CEI-825-1984, como:

«Cualquier dispositivo que se pueda construir para producir o amplificar radiación electromagnética en el intervalo de longitudes de onda de 200 nm a 1 mm esencialmente por el fenómeno de emisión estimulada controlada».

La radiación así obtenida presenta tres propiedades fundamentales que la diferencian de la radiación obtenida de fuentes convencionales:

- **Monocromaticidad,** o capacidad de emitir en un intervalo de longitudes de onda muy estrecho.
- **Coherencia espacial y temporal.** El conjunto de radiaciones emitidas coinciden en frecuencia y fase, formando una sinusoide perfecta u onda estacionaria. La longitud de coherencia mide la distancia a la que se mantiene esta propiedad.
- **Direccionalidad,** que es la emisión de radiación en forma de haz, en una dirección bien determinada.

En resumen, las emisiones estimuladas (no espontáneas) producen una superposición de ondas, resultando una onda muy perfecta, muy estrecha y de larga duración.

## Fundamento del láser

Para comprender a nivel elemental cómo se obtiene un láser, es indispensable tratar muy brevemente los procesos de absorción, emisión y emisión estimulada.

Para que se produzca una emisión, es decir, para que un $e^-$ pierda un fotón $h\nu$ y caiga a un estado o nivel más bajo de energía $E_o$, previamente este $e^-$ ha debido captar una energía igual o mayor a través de un proceso de absorción.

En el proceso de emisión estimulada, lo que ocurre es que a partir de una emisión $h\nu_1$, se consigue otra emisión de un fotón de idénticas características $h\nu_1$ (de la misma frecuencia y energía), propagándose este proceso indefinidamente. Esto constituye la emisión láser.

Para que esto pueda producirse, es indispensable acumular gran cantidad de electrones en un nivel de alta energía, cuya tendencia natural será alcanzar el equilibrio emitiendo la energía que les sobra en forma de radiación. Esta condición recibe el nombre de «inversión de población».

Manteniendo esta excitación, mediante un aporte externo de energía sobre un medio material, éste podrá liberar radiación por emisión estimulada. Si la energía, o lo que es lo mismo la radiación, se refleja en fase sobre sí misma muchas veces, se amplificará y tendremos un láser.

## Componentes de un láser

Un láser consta básicamente de tres elementos:

- **El sistema de bombeo,** encargado de suministrar energía al material que va a producir la emisión estimulada. Puede hacerse de varias formas:
  a) Bombeo óptico, por ejemplo una lámpara de destello para el láser de rubí y el láser Nd-YAG, o tubos de emisión continua, como el arco de xenon para el láser Nd-YAG.
  b) Bombeo por descarga eléctrica, utilizado en los láseres de gas.
  c) Bombeo por radiofrecuencia.
  d) Bombeo térmico, por expansión dinámica de un gas.
  e) Bombeo por excitación química.
- **El medio activo,** en el cual se producirá la emisión estimulada de radiación. El medio activo puede ser un sólido por ejemplo el rubí: Se trata de un cristal de alúmina que contiene iones $Cr^{3+}$ en una proporción de 0,05 %. Otros medios activos sólidos son el neodimio-vidrio y el Nd-YAG (Granate de Ytrio y Aluminio dopado con Neodimio).
  Se puede utilizar también un líquido o un gas; los líquidos se utilizan a nivel de investigación, por ejemplo en los láseres de colorante.
  Los láseres de gas están muy desarrollados comercialmente, siendo los más

importantes el helio-neón, el anhídrido carbónico, el argón ionizado y el kripton ionizado.
Además de los citados existen láseres que utilizan otros medios activos, el láser de semiconductores y el láser de electrones libres.

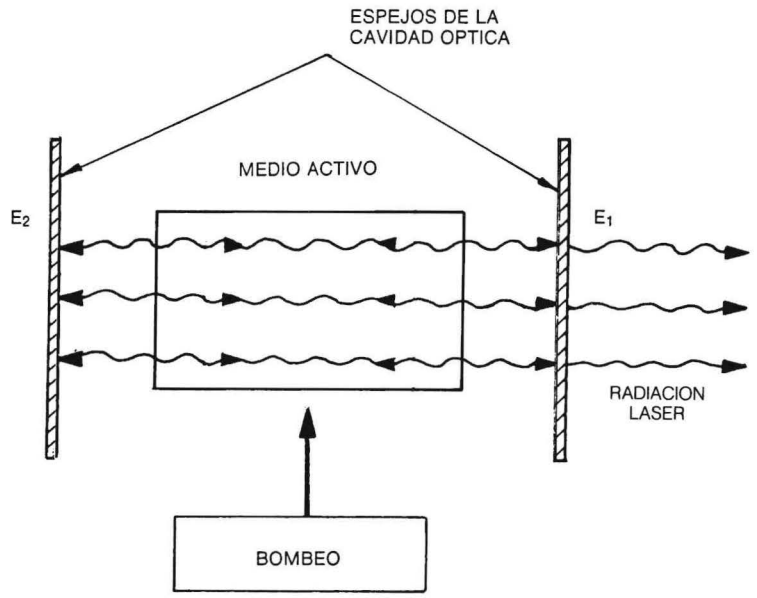


**Fig. 1.** *Esquema básico de 1 láser.*

- **La cavidad óptica** o cavidad resonante, que es el recinto donde se amplificará la radiación. Está limitada por dos espejos planos o esféricos colocados perpendicularmente al eje de emisión; uno de ellos refleja totalmente la radiación mientras que el otro al no ser totalmente reflectante, permite el paso de parte de la radiación, constituyendo el punto de salida del láser.
La cavidad puede ser cerrada o abierta dependiendo del tipo de láser. La cavidad abierta presenta la ventaja de poder modificar sus dimensiones y limitar así los modos de oscilación. La condición para que se produzca resonancia es que la longitud de la cavidad L, sea igual a un número entero n de semilongitudes de onda ($\lambda/2$).

$$L = \frac{n\lambda}{2}$$

Combinando de forma crítica estos tres componentes (sistema de bombeo,

medio activo, cavidad óptica) se han desarrollado gran diversidad de láseres de diferentes características que permiten su utilización en múltiples aplicaciones.

Los láseres más utilizados en la actualidad pueden agruparse en siete familias:

- Estado sólido (Nd-YAG y Nd-vidrio)
- Dióxido de carbono
- Iones ($Ar^+$, $Kr^+$)
- Diodos semiconductores
- He - Ne
- Colorante
- Excímero

Los cuatro primeros grupos, representan el 80 % del mercado mundial de los láseres.

## Factores que caracterizan un láser

- Longitud de onda o longitudes de onda de la emisión ($\lambda$). Oscila entre 200 nm y 1 mm que corresponden a las regiones UV, visible e IR del espectro electromagnético. Algunos láseres pueden emitir a dos o más $\lambda$ simultáneamente.
- Duración: Un láser puede emitir de dos formas:
  - Continua, con una duración superior a 0,25 segundos.
  - Pulsada, es decir emitiendo pulsos que se relajan hasta la emisión de un nuevo pulso; su duración puede variar desde los microsegundos a decenas de milisegundos, variando las frecuencias de repetición del pulso entre 10/s y 1/min. A veces se desea cambiar la duración natural de los pulsos láser, con objeto de acortar el pulso o para obtener mayor potencia pico, etc. Existen varias técnicas para provocar pulsos, destacando entre ellas: Q-Switch (conmutación rápida del factor Q) y Mode locking (bloqueo de modos), obteniéndose pulsos que varían entre los nanosegundos y los picosegundos. La frecuencia de repetición de los pulsos es muy variable, desde los MHz a pocos pulsos por hora.
- Potencia o energía del láser:
  - Los láseres continuos, se caracterizan por su potencia media de salida; puede variar de los microwatios a varios kilowatios.
  - Los láseres pulsados, se caracterizan por su energía total por pulso. Puede oscilar entre 0,1 julio y varios centenares de julios por pulso, para pulsos «relajados». En el caso de pulsos provocados, la energía puede variar entre los milijulios y las decenas de julios. Las potencias pico correspondientes son del orden de MW o GW.

## 2. APLICACIONES Y USOS INDUSTRIALES

Las propiedades inherentes a la radiación láser, tales como su elevada monocromaticidad y coherencia, alta luminancia espectral y direccionalidad, junto con el desarrollo de la microelectrónica y la informática han hecho de él un elemento interesante para múltiples aplicaciones, tanto en la industria como en la investigación. En el momento actual, el empleo de los láseres en aplicaciones industriales depende únicamente de su rentabilidad económica. Este objetivo prioritario cede el paso a las aplicaciones en Defensa y Medicina, donde se intentan conseguir unos objetivos no importa cuál sea el precio. En estos dos campos es donde se invierte mayor cantidad de dinero en investigación, y de ello se benefician las demás aplicaciones, ya que en ellas revierte la fuerte inversión económica realizada en los dos primeros.

En este capítulo trataremos brevemente las aplicaciones láser, remitiendo para una información más amplia a la bibliografía (1, 2, 3).

Existen dos grandes grupos de aplicaciones de los láseres: los que utilizan láseres para transmitir, procesar o detectar información y los que emplean radiación láser para interacciones con medios materiales. Entre ellas citaremos las siguientes:

### Comunicaciones ópticas

Comunicaciones con satélites (láseres de Nd-YAG o de $CO_2$), a distancias cortas (láseres de semiconductores), transporte de información codificada a través de guía de ondas (láseres de AsGa o de GaAlAs), televisión por cable, etc.

### Procesado y almacenamiento de información

«Scanners» láser para identificación de productos por lectura de códigos de barras (láser de He-Ne), discos compactos, memorias ópticas para ordenadores, impresoras electrónicas (láseres iónicos de Ar, de He-Cd o He-Ne), etc.

### Medidas Industriales

- Obtención de líneas y planos de referencia mediante el láser de alineamiento, de gran utilidad en construcción, agricultura, obras públicas, etc. Se suele usar el láser de He-Ne de baja potencia.
- Medida de distancias, por ejemplo seguimiento de satélites, estudios geodésicos, cartografía. Para la medida de distancias muy cortas se utilizan técnicas interferométricas (mecánica de precisión, granulometría, medida de perfiles, etc.)
- Velocimetría: utilizando la microholografía se puede controlar el flujo de los fluidos en tuberías, el flujo de sangre en arterias, etc.

- Control no destructivo: inspección de superficies, medida de deformaciones y defectos, medida de vibraciones, medidas de composición química, etc.

### Investigación Científica

La introducción del láser ha permitido realizar experimentos que hasta el momento no eran posibles. De este modo, se han estudiado fenómenos ópticos tales como la óptica no lineal, los dispositivos ópticos biestables (base de nuevos ordenadores ópticos), se ha ampliado el campo de acción de la espectroscopía, etc. Otro objetivo de gran interés para los científicos y al que se dedican altos presupuestos es la fusión termonuclear (4).

### Procesado de materiales

La capacidad del láser de concentrar una cantidad considerable de energía en una superficie muy pequeña (densidades de potencia de $10^4$ a $10^6$ W/cm$^2$) y su transformación en energía térmica en el interior del material receptor, permiten su utilización para realizar transformaciones de materiales en un tiempo corto. Presenta la ventaja de calentar únicamente la zona a tratar, que puede ser inferior a 1 mm; la densidad de potencia suministrada se controla limitando el tiempo de aplicación.

Otras ventajas del láser son la facilidad de reproducir sus condiciones de funcionamiento, su ligereza y su buena adaptación a la robotización que permiten su integración en los «talleres flexibles».

Las transformaciones más frecuentes por técnicas láser son:

- Soldadura continua y por puntos.
- Tratamiento de superficies (temple superficial, aleaciones superficiales).
- Corte de materiales metálicos y no metálicos.

### Medicina

El láser es especialmente valioso en Medicina ya que se aprovechan las excepcionales propiedades de esta radiación en su interacción con la materia viva: su efecto térmico, que permite cortar tejidos, coagularlos o destruir *in situ* pequeños tumores, unido al efecto fotoquímico, hace posible la absorción selectiva de radiación a determinadas longitudes de onda por ciertos tejidos.

Los láseres más empleados en medicina son el láser de $CO_2$, de alta, media y baja potencia, el de argón ionizado y el Nd-YAG, en sus versiones continua y pulsada, aunque se están introduciendo otros como el láser de colorante. Por medio de interfases específicas se consigue la transmisión del haz de la fuente láser al paciente: brazo articulado con espejos, piezas de mano y fibra óptica, a los que se acoplan los endoscopios, microscopios operatorios o el colposcopio, para adaptarlo a cada especialidad.

Las aplicaciones médicas más usadas son:

- Oftalmología, como fotocoagulador para tratamiento de la retina.
- Otorrinolaringología, acoplado a un laringoscopio para el tratamiento de laringe y resección de tumores benignos; se empieza a experimentar en operaciones de oído medio e interno.
- Dermatología, tratamiento de lesiones vasculares, destrucción de pequeños tumores, tratamiento de varices, tumores benignos de la piel, vegetaciones, venéreas.

Existen muchas aplicaciones en otras especialidades, tales como ginecología, gastroenterología, bronconeumología, odontología, cirugía y urología, que junto con las aplicaciones médicas no terapéuticas y las perspectivas para el futuro, están extensamente desarrolladas en la bibliografía recomendada.

**Aplicaciones militares**

Las aplicaciones más destacadas del láser en defensa son de varios tipos.

- Detección, incluyendo la telemetría, medida de velocidades (aviones, viento transversal, etc.) y teledetección (LIDAR, obstáculos, gases tóxicos).
- Señalización y localización de blancos por láser para lanzamiento de proyectiles.
- Simulación láser en sistemas de entrenamiento de tiro, simulación de combate, etc.
- Armas láser, cuyos objetivos pueden ser: neutralización o destrucción de sensores, perturbación de trayectorias o destrucción de elementos de estructura. Se emplean en y contra vehículos terrestres, aéreos, navales y satélites.

Aunque es indiscutible la implantación de los sistemas láser en la industria, su bajo rendimiento energético hace que no hayan sustituido aún a los procesos convencionales. Las investigaciones actuales en los programas I + D, buscan el desarrollo de nuevos tipos de láser a otras longitudes de onda, de pulsos más cortos y potencias más elevadas, que darán más versatilidad a sus propiedades y ampliarán su campo de aplicación.

## 3. RIESGOS DERIVADOS DE LA UTILIZACION DE LASERES

Los láseres no forman un grupo homogéneo de riesgo, sino que presentan riesgos muy diversos, que dependen de las características propias de cada sistema, por lo tanto no se puede hablar de riesgos del láser globalmente, es necesario determinar para cada tipo de láser los riesgos específicos que pueden producirse; por ejemplo, no son similares los riesgos de utilización de un láser He-Ne, que emite radiación visible a una potencia de 1 mW de forma continua, a los de un

láser Nd-YAG, que emite a 1.06 μm (IR próximo y por lo tanto invisible) pulsos ultracortos ($10^{-9}$ a $10^{-12}$ s) con potencias pico del orden de MW, o con los de un láser de Kr ionizado, que emite una línea en la zona visible del espectro y varias en la zona de IR próximo.

Para evaluar los riesgos potenciales derivados del uso de los láseres, hay que considerar tres aspectos diferentes:

## La capacidad de cada láser o sistema láser para producir daño biológico en los ojos o en la piel

La capacidad de producir daño, es la misma que la de la radiación UV, Visible e IR, sólo que dadas las peculiares características del láser, su efecto es particularmente intenso. Los mecanismos de acción son térmicos y fotoquímicos, y la contribución de cada uno de ellos a la producción de una lesión es función de:

- La longitud de onda, ya que el coeficiente de absorción de cada tejido varía notablemente de una región a otra del espectro.
- La vascularización tisular, que permitirá o no la dispersión del calor.
- La duración de la exposición que determinará la dosis de radiación recibida.
- La irradiancia en $W/cm^2$ o la exposición radiante en $J/cm^2$ al haz de salida, que nos dan la densidad de potencia que llega al trabajador.
- La dimensión de la imagen formada en la retina cuando la radiación es Visible e IR, es decir en el intervalo de 400 nm a 1.400 nm.

(En el punto 4 «Efectos biológicos de la radiación láser» se explica más extensamente la acción del láser sobre el organismo.)

## El ambiente en que se utiliza el láser

Es muy diferente trabajar con un láser en un recinto cerrado, por ejemplo, en un laboratorio de investigación, o en una línea de producción de una fábrica, que trabajar en un ambiente exterior, como es el caso del láser de alineamiento utilizado en construcción de túneles, tuberías, etc.

En un recinto cerrado, para láseres con potencias superiores a 5 mW (CW), si se quiere determinar la exposición de personal no protegido, será preciso determinar:

- El recorrido del haz.
- El alcance de las reflexiones especulares.
- La extensión de las reflexiones difusas peligrosas al focalizar el láser.
- La sí existencia de otros factores de riesgo.

**Riesgos adicionales:** Los factores de riesgo distintos al láser, que pueden encontrarse en un ambiente cerrado, dependen del tipo de láser utilizado, los materiales empleados y el proceso realizado. Podemos citar entre ellos:

- *Contaminación atmosférica,* producida por el material vaporizado por el láser, gases procedentes de sistemas láser con circulación de gas o de subproductos de reacciones (por ejemplo, $Br_2$, $Cl_2$, CNH, $F_2$), o gases o vapores procedentes de agentes criogénicos
- *Riesgos de radiaciones colaterales,* puede haber un riesgo potencial producido por la radiación UV, o por la radiación visible y de IR próximo, asociados a los sistemas de bombeo (por ejemplo lámparas de destello), cuya luminancia puede ser suficiente para producir un daño por exposición crónica.
- *Riesgos eléctricos.* La mayoría de los láseres que utilizan altas tensiones (1 KV) y los láseres de pulsos son especialmente peligrosos por la energía acumulada en las baterías de condensadores. El número de accidentes eléctricos es en general muy superior al de accidentes debidos a la radiación.
- *Agentes criogénicos.* Los líquidos criogénicos pueden causar quemaduras y su manipulación exige precauciones especiales.
- *Otros riesgos* tales como explosión de una batería de condensadores o de un sistema de bombeo óptico durante el funcionamiento de algunos sistemas láser de gran potencia. También pueden producirse partículas volantes durante las operaciones de corte, perforado y soldadura, y reacciones explosivas de los reactivos de un láser químico o de otros gases usados dentro del laboratorio.

En el caso de trabajos con láser en exteriores, cuando se alcanzan grandes distancias, habría que:

- Estimar las distancias de riesgo ocular nominal.
- Evaluar los riesgos potenciales de transmisión a través de ventanas y reflexiones especulares (por ejemplo: ventanas y espejos en vehículos y edificios), o a través de objetos brillantes en la naturaleza.
- Determinar si existen reflexiones difusas peligrosas.
- Evaluar la estabilidad de la plataforma láser.

El tercer y último aspecto a considerar es:

## Las personas que usan o pueden estar expuestas a radiación láser

Las personas que pueden estar en la cercanía de un láser tales como personal de servicios, estudiantes, etc., pueden motivar la adopción de medidas de control adicionales no específicas para la clase de láser empleado. Para ello hay que considerar, entre otros factores, la madurez del usuario, su nivel de entrenamien-

to, su conocimiento del riesgo, número de personas expuestas y situación de su puesto de trabajo respecto a la emisión láser, etc.

De estos tres aspectos, el primero (la capacidad del láser para producir daño) está convenientemente estandarizado en los esquemas de clasificación de los láseres, mientras que el segundo (ambiente) y tercero (personas) varían con la utilización de cada láser y no pueden tratarse de forma general. Aunque deben considerarse los tres para una evaluación del riesgo total, en muchos casos, es suficiente considerar el primero para aplicar medidas de control.

## 4. EFECTOS BIOLOGICOS DE LA RADIACION LASER

La capacidad de la radiación láser para producir daño en los sistemas biológicos, es la misma que la de la radiación UV, Visible e IR, pero su efecto es especialmente intenso, debido a las propiedades características del haz láser (coherencia, monocromaticidad, direccionalidad).

Los mecanismos de interacción de un haz láser con un tejido biológico pueden ser de cuatro tipos (térmico, fotoquímico, electromagnético y mecánico) (5) y la contribución de cada uno de ellos a la producción de una lesión está unida a ciertos parámetros físicos de la fuente de radiación, siendo los más importantes: la longitud de onda, la duración del pulso, la dimensión de la imagen, la irradiancia de la fuente y la exposición radiante al haz de salida.

**Efecto térmico.** La absorción de energía radiante provoca una vibración de las moléculas que se traduce en un aumento de su temperatura. Para volver a su estado inicial, las moléculas desprenden calor. La mayoría de los daños producidos por los láseres se deben al calentamiento de los tejidos; es suficiente un aumento de 10 °C a 25 °C para provocar una desnaturalización local de las proteínas y la muerte celular. Este efecto es predominante para tiempos de exposición superiores al μs.

**Efecto fotoquímico.** La energía es absorbida selectivamente por algunas moléculas que componen el tejido, y en vez de disiparse en forma de calor, se emplea en producir reacciones químicas, por ejemplo la formación de la vitamina D en el organismo humano, el mecanismo de la visión, etc. Este efecto es característico de las regiones ultravioleta y visible del espectro y se considera que produce lesiones a niveles bajos de exposición.

**Efecto electromagnético.** El campo electromagnético asociado a una radiación láser puede ser en algunos casos bastante elevado, del orden de $10^7$ a $10^{12}$ $V \cdot m^{-2}$.

Se puede suponer que disparos de láseres potentes pueden destruir la organización molecular y producir roturas de enlaces. En menor grado, parece que la radiación láser sea susceptible de modificar la conductividad y la constante dieléctrica de los tejidos, así como la polarización de las membranas celulares, que comporta una modificación de los cambios iónicos. Estos efectos son difíciles de

detectar, pues están frecuentemente enmascarados por los efectos térmicos o fotoquímicos.

**Efectos mecánicos.** Cuando se concentra sobre pequeñas superficies de materia el intenso flujo luminoso producido por algunos láseres pulsados, de pulsos muy cortos, se produce por un proceso multiplicador un gran número de átomos ionizados o plasma. La onda de choque que acompaña la formación del plasma es la productora de los efectos mecánicos constatados que pueden compararse con una microexplosión.

Estos efectos mecánicos sólo se observan para pulsos inferiores al microsegundo. Empleando un láser pulsado con trenes de pulsos de aproximadamente 1 ms, se elimina este problema.

Existe una amplia bibliografía (6) sobre los efectos biológicos y riesgos asociados al láser. Presentan especial interés los datos experimentales sobre exposiciones agudas del ojo y de la piel, obtenidos por medio de experimentación animal. Respecto al hombre hay poca documentación sobre exposiciones accidentales, pero el número creciente de incidentes sucedidos durante el uso terapéutico del láser podría aportar nuevos datos.

## Efectos adversos en el ojo

El órgano más efectado por la exposición a la radiación UV, Visible e IR es el ojo, variando los efectos adversos producidos por la radiación láser en las diferentes regiones del espectro:

**Ultravioleta** La exposición excesiva produce fotofobia, enrojecimiento, lacrimeo, síntomas originados por la fotoqueratitis. En las regiones UV-B y UV-C, la fotoqueratitis es el resultado de una exposición aguda excesiva, mientras que en la región UV-A, se producirán cataratas como resultado de una exposición crónica a altos niveles de radiación.

**Visible** En la región visible del espectro, la córnea, el cristalino, el humor vítreo y el ojo medio, prácticamente no absorben la luz ni la dispersan llegando la mayor parte a las células fotoreceptoras (conos y bastones); la energía absorbida se convierte en calor, de forma que si es suficientemente elevada se puede producir una quemadura en la retina. Si el daño en la retina tiene lugar en la mácula tendrá como consecuencia una disminución de la función visual, que puede llegar a ser irreversible.

**Infrarrojo** En la región IR-A empieza una zona de transición, por ello son afectadas tanto la retina como la córnea y las estructuras intermedias, como el cristalino.

En la región IR-B se producen daños en el cristalino y en la córnea. En la región IR-C, la absorción del humor acuoso del ojo es mayor, por lo que deja de ser transparente a la radiación y los daños se producen en la córnea.

### Efectos adversos en la piel

El daño sobre la piel es de menor importancia que sobre el ojo, sin embargo la piel de las personas que trabajan con láser puede estar expuesta frecuentemente a niveles peligrosos de radiación.

Exposiciones elevadas a radiación UV-A pueden producir eritema e hiperpigmentación; las exposiciones a UV-B y C, aumento de pigmentación, quemaduras, llegando en casos extremos a producir cáncer de piel.

En el intervalo entre 300 y 1.000 nm, (UV-A, Visible, e IR-A) casi toda la radiación que penetra en la piel se absorberá hasta una profundidad de 3,6 mm de tejido.

En resumen los principales efectos térmicos de la exposición a láser dependen de los siguientes factores:

1. Coeficientes de absorción y dispersión de los tejidos a la longitud de onda del láser.
2. La irradiancia o exposición radiante del haz láser sobre los tejidos.
3. La duración de la exposición.
4. La extensión del flujo vascular local.
5. El tamaño del área irradiada.

## 5. CLASIFICACION DE LOS LASERES

Los láseres no se pueden considerar como un solo grupo al cual aplicar unos límites de seguridad, por ello es más práctico agruparlos en una clasificación, según su grado de peligrosidad, y para ello se utiliza el primero de los aspectos tratados anteriormente. Existen normas internacionales, tales como la 825-CEI-1984 o la ANSI Z 136.1-1980 que establecen clasificaciones de los láseres en función de su riesgo intrínseco, para lo cual es preciso conocer los factores que caracterizan a un láser:

- Longitud de onda de emisión.
- Duración o tiempo de exposición.
- Potencia máxima emitida si el láser es continuo o energía total por pulso en el caso de láser pulsado.

Combinando estos tres factores, se puede acceder a las tablas clasificatorias correspondientes, que están basadas en el criterio de la exposición máxima per-

misible (EMP), definida como nivel de radiación láser al cual las personas pueden estar expuestas en condiciones normales sin sufrir efectos adversos.

El proceso de clasificación de un láser o sistema láser es competencia directa del fabricante, pero si el láser se modifica con cualquier accesorio debe ser clasificado de nuevo.

A continuación se expone resumida la clasificación de la norma 825-CEI-1984, que es muy similar a otras clasificaciones.

**Clase 1,** son inherentemente seguros (no se sobrepasa el nivel máximo de exposición permitida), o son seguros por su diseño (Tabla I norma CEI).

**Clase 2,** láseres de baja potencia que emiten radiación visible (400-700 nm), y operan en modo continuo o pulsado. La potencia o energía de salida de estos sistemas está restringida al límite de emisión accesible de la clase 1, para duraciones de la exposición de hasta 0,25 s. Para un láser continuo el límite es de 1 mW (Tabla II norma CEI).

**Clase 3A,** láseres de potencia de salida hasta 5 mW si es continuo o cinco veces el límite de la Clase 2, si es pulsado. Región espectral 400-700 nm. La irradiancia en cualquier punto del haz no será superior a 25 $W/m^2$. Es peligroso observar el haz láser Clase 3A, con ayudas ópticas; en la región 400-700 nm, el ojo desnudo está protegido por el reflejo palpebral (Tabla III norma CEI).

**Clase 3B,** láseres que emiten radiación visible e invisible a niveles que no excedan los de la Tabla IV de la norma CEI. La potencia para láseres continuos puede llegar hasta 0,5 W, y la energía para láseres pulsados, hasta 10 $J \cdot m^{-2}$.

La observación directa del haz es siempre peligrosa. La observación de haces láser no focalizados por reflexión difusa, no es peligrosa y bajo ciertas condiciones se pueden visualizar haces láser continuos sin peligro, mediante un reflector difuso. Estas condiciones son: distancia mínima de visión de 13 cm y tiempo de visión máxima de 10 s.

**Clase 4,** láseres de alta potencia con potencias de salida que sobrepasen los límites de la Tabla IV para la Clase 3B.

NOTA: Los láseres visibles e IR-A de la Clase 4, son capaces de producir reflexiones difusas peligrosas. Pueden causar daños en la piel y pueden constituir un riesgo de incendio. Su uso requiere extremadas precauciones.

La norma CEI da también unas instrucciones muy precisas al fabricante sobre los requisitos de fabricación que deben cumplir los láseres desde el punto de vista de seguridad, tales como especificaciones de diseño, etiquetado, información al usuario, y requisitos adicionales para productos láser específicos. Contiene además una guía del usuario con una serie de medidas preventivas a las que nos referiremos en el punto 7 de este capítulo, y fija una serie de procedimientos para el control de riesgos en casos concretos, como la utilización de láseres en talleres y laboratorios, en trabajos en exteriores y obras, en aplicaciones médicas, transmisión con fibra óptica, etc.

Por ejemplo, cada sistema láser construido para aplicaciones médicas debe reunir unas especificaciones adicionales:

a) Los láseres de la clase 3B o 4, deberán incorporar un sistema de medida del nivel de radiación láser destinada a la irradiación del cuerpo humano con un error de medida menor que $\pm 20\,\%$, en unidades del Sistema Internacional.
b) Proporcionar con cada láser médico, instrucciones que especifiquen un procedimiento y un método de calibrado del sistema de medida.
c) Suministrar un dispositivo indicando el objetivo o blanco para los sistemas láser de las Clases 3B y 4 (por ejemplo, un láser He-Ne).

Los sistemas láser que emplean transmisión por fibra óptica deben tener conexiones de cable (destinadas a la reparación), que necesiten la utilización de una herramienta para desconectarlas si se sobrepasa la EMP de la Clase 1, cuando se efectúa la desconexión, y si estas conexiones de cable forman parte de la cubierta protectora.

## 6. LIMITES DE EXPOSICION OCUPACIONAL

Los criterios de la ANSI para láseres pulsados están basados en condiciones de exposición agudas, fijando también EMP, mientras que los límites de la ACGIH (TLV's), fijan las exposiciones bajo condiciones a las cuales casi todos los trabajadores pueden estar expuestos sin efectos adversos durante la jornada laboral. Deben usarse como guía en el control de las exposiciones y no considerarse como estrechos límites entre niveles seguros y niveles peligrosos. Están basados en la mejor información de que se dispone procedente de estudios experimentales.

Los valores TLV's, se exponen en tres tablas:

**Tabla 1.** Exposición directa del ojo a un haz láser.

**Tabla 2.** Exposición a reflexión difusa de un haz láser o a una fuente láser extensa.

**Tabla 3.** Exposición de la piel a radiación láser.

Cuando la fuente láser es «puntual», los TLV's se expresan como exposición radiante en ($J/cm^2$) o irradiancia ($W/m^2$) dependiendo de que el láser sea pulsado o continuo.

En el caso de «fuentes extensas» se expresan en unidades de radiancia $W/(m^2 \cdot sr)$ si el láser es continuo y radiancia integrada $J/(m^2 \cdot sr)$ si el láser es pulsado.

Todos los TLV's están promediados para una abertura de 1mm excepto los TLV's de exposición del ojo en el intervalo espectral 400-1.400 nm, en el que se promedian para una abertura límite de 7mm, que coincide con el diámetro de la pupila; y en el intervalo entre 0,1-1 mm, la abertura límite es de 10 mm.

## Factores de corrección

- En el intervalo de longitudes de onda entre 700 y 1.049 nm, los TLV's son incrementados por un factor $C_A$, uniformemente extrapolado, que oscila entre 1 y 5.
- Entre 1.0410 nm y 1.400 nm, el valor de $C_A$ es constante y toma el valor de 5, debido a que la radiación es invisible, pero llega hasta la retina.
- Para tiempos de exposición superiores a 10 s, a longitudes de onda entre 550 y 700 nm, se debe aplicar un factor de 10, que en las tablas recibe la denominación $C_B$, utilizado para corregir la variación de sensibilidad de la retina con la longitud de onda.
- Los TLV's para exposición de la piel, a longitudes de onda entre 700 y 1.400 nm, están aumentados por el factor $C_A$, que oscila entre 1 y 5 y puede calcularse con ayuda de las gráficas que acompañen a los TLV's para radiación láser.

## Exposiciones pulsadas repetitivamente

Tanto los láseres continuos como los pulsados repetitivamente pueden producir condiciones de exposición repetitivamente pulsadas. El TLV para visión directa del haz que es aplicable para longitudes de onda entre 400 y 1.400 nm y una exposición a un pulso único de duración t, se modifica en este caso por un factor de corrección determinado por el número de pulsos en la exposición.

En primer lugar se calcula el número de pulsos (n) en una exposición determinada, es decir, la frecuencia de repetición del pulso (PRF en Hz) multiplicada por la duración de la exposición.

Normalmente, las exposiciones reales pueden variar desde 0.25 s para una fuente visible intensa, hasta 10 s para una fuente infrarroja. El TLV corregido de la ecuación para cada pulso es:

$$\text{TLV} = (n^{-1/4})(\text{TLV para un pulso único})$$

Esta aproximación se aplica sólo a condiciones de daño térmico, por ejemplo todas las exposiciones a longitudes de onda mayores de 700 nm, y para muchas exposiciones a longitudes de onda más cortas. Para longitudes de onda menores o igual a 700 nm, el TLV de la ecuación anterior, se aplica si la irradiancia promedio no sobrepasa el TLV para exposición continua. La irradiancia promedio (por ejemplo la exposición total acumulada para nt segundos no excederá la exposición radiante dada en la tabla de exposición directa al haz para tiempos de exposición de 10 segundos a $T_1$.

## Tabla 1

## VALORES LIMITE UMBRAL PARA EXPOSICIONES OCULARES DIRECTAS (VISION INTERHAZ) A UN HAZ LASER

| Región espectral | Longitud de onda | Tiempo de exposición (t) segundos | TLV |
|---|---|---|---|
| UVC | 200 nm a 280 nm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{-4}$ | 3 mJ · $cm^{-2}$ |
| UVB | 280 nm a 302 nm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{-4}$ | 3 mJ · $cm^{-2}$ |
| | 303 nm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{-4}$ | 4 mJ · $cm^{-2}$ |
| | 304 nm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{-4}$ | 6 mJ · $cm^{-2}$ |
| | 305 nm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{-4}$ | 10 mJ · $cm^{-2}$ |
| | 306 nm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{-4}$ | 16 mJ · $cm^{-2}$ |
| | 307 nm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{-4}$ | 25 mJ · $cm^{-2}$ |
| | 308 nm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{-4}$ | 40 mJ · $cm^{-2}$ |
| | 309 nm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{-4}$ | 63 mJ · $cm^{-2}$ |
| | 310 nm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{-4}$ | 100 mJ · $cm^{-2}$ |
| | 311 nm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{-4}$ | 160 mJ · $cm^{-2}$ |
| | 312 nm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{-4}$ | 250 mJ · $cm^{-2}$ |
| | 313 nm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{-4}$ | 400 mJ · $cm^{-2}$ |
| | 314 nm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{-4}$ | 630 mJ · $cm^{-2}$ |
| UVA | 315 nm a 400 nm | $10^{-9}$ a 10 | 56 $t^{1/4}$ J · $cm^{-2}$ |
| | 315 nm a 400 nm | 10 a $10^3$ | 1,0 J · $cm^{-2}$ |
| | 315 nm a 400 nm | $10^3$ a $3 \times 10^4$ | 1,0 mW · $cm^{-2}$ |
| Visible | 400 nm a 700 nm | $10^{-9}$ a $1,8 \times 10^{-5}$ | $5 \times 10^{-7}$ J · $cm^{-2}$ |
| | 400 nm a 700 nm | $1,8 \times 10^{-5}$ a 10 | 1,8 $(t/\sqrt[4]{t})$ mJ · $cm^{-2}$ |
| | 400 nm a 549 nm | 10 a $10^4$ | 10 mJ · $cm^{-2}$ |
| | 550 nm a 700 nm | 10 a $T_1$ | 1,8 $(t/\sqrt[4]{t})$ mJ · $cm^{-2}$ |
| | 550 nm a 700 nm | $T_1$ a $10^4$ | 10 $C_B$ mJ · $cm^{-2}$ |
| | 400 nm a 700 nm | $10^4$ a $3 \times 10^4$ | $C_B$ μ W · $cm^{-2}$ |
| IR-A | 700 nm a 1.049 nm | $10^{-9}$ a $1,8 \times 10^{-5}$ | 5 $C_A \times 10^{-7}$ J · $cm^{-2}$ |
| | 700 nm a 1.049 nm | $1,8 \times 10^{-5}$ a $10^3$ | 1,8 $C_A$ $(t/\sqrt[4]{t})$ mJ · $cm^{-2}$ |
| | 1.050 nm a 1.400 nm | $10^{-9}$ a $10^{-4}$ | $5 \times 10^{-6}$ J · $cm^{-2}$ |
| | 1.050 nm a 1.400 nm | $10^{-4}$ a $10^3$ | 9 $(t/\sqrt[4]{t})$ mJ · $cm^{-2}$ |
| | 700 nm a 1.400 nm | $10^3$ a $3 \times 10^4$ | 320 $C_A$ μW · $cm^{-2}$ |
| IR-B y C | 1,4 μm a $10^3$ μm | $10^{-9}$ a $10^{-7}$ | $10^{-2}$ J · $cm^2$ |
| | 1,4 μm a $10^3$ μm | $10^{-7}$ a 10 | 0,56 $\sqrt[4]{t}$ J · $cm^{-2}$ |
| | 1,4 μm a $10^3$ μm | 10 a $3 \times 10^4$ | 0,1 W · $cm^{-2}$ |

No sobrepasar $0,56 t^{1/4}$ J · $cm^{-2}$ para $t \leq 10$ s

$C_A$ = Ver fig. 5.1; $C_B$ = 1 para $\lambda$ = 400 a 549 nm; $C_B = 10^{[0,015\ (\lambda - 550)]}$ para $\lambda$ = 550 a 700 nm; $T_1$ = 10 s para $\lambda$ = 400 a 549 nm; $T_1 = 10 \times 10^{[0,02\ (\lambda - 550)]}$ para $\lambda$ = 550 a 700 nm.

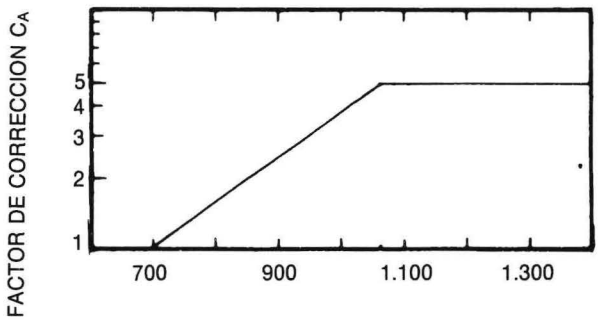


**Fig. 5.1.** *Factor de corrección del TLV, para* $\lambda$ = 700 – 1.400 nm *

(* Para $\lambda$ = 700 – 1.049 nm, $C_A = 10\,[0{,}002\,(\lambda - 700)]$; para $\lambda$ = 1.050 – 1.400, $C_A = 5$)

**Tabla 2**

**VALORES LIMITE UMBRAL PARA VISION DE REFLEXION DIFUSA DE UN HAZ LASER O UNA FUENTE LASER EXTENSA**

| Región espectral | Longitud de onda | Tiempo de exposición (t) segundos | TLV |
|---|---|---|---|
| UV | 200 nm a 400 nm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{4}$ | Como en la Tabla 1 |
| Visible | 400 nm a 700 nm | $10^{-9}$ a 10 | $10\sqrt[3]{t}$ J · cm$^{-2}$ · sr$^{-1}$ |
| | 400 nm a 549 nm | 10 a $10^{4}$ | 21 J · cm$^{-2}$ · sr$^{-1}$ |
| | 550 nm a 700 nm | $10^{4}$ a $T_1$ | $3{,}83\,(t/\sqrt[4]{t})$ J · cm$^{-2}$ · sr$^{-1}$ |
| | 550 nm a 700 nm | $T_1$ a $10^{4}$ | 21 $C_B$ J · cm$^{-2}$ · sr$^{-1}$ |
| | 400 nm a 700 nm | $10^{4}$ a $3 \times 10^{4}$ | $2{,}1\,C_B\,t \times 10^{-3}$ W · cm$^{-2}$ · sr$^{-1}$ |
| IR-A | 700 nm a 1.400 nm | $10^{-9}$ a 10 | $10\,C_A\sqrt[3]{t}$ J · cm$^{-2}$ · sr$^{-1}$ |
| | 700 nm a 1.400 nm | 10 a $10^{3}$ | $3{,}83\,C_A\,(t/\sqrt[4]{t})$ J · cm$^{-2}$ · sr$^{-1}$ |
| | 700 nm a 1.400 nm | $10^{3}$ a $3 \times 10^{4}$ | 0,64 $C_A$ W · cm$^{-2}$ · sr$^{-1}$ |
| IR-B y C | 1,4 µm a $10^{7}$ µm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{4}$ | Como en la Tabla 1 |

$C_A$, $C_B$ y $T_1$ son los mismos que en la nota de la Tabla 1.

## Tabla 3

## VALOR LIMITE UMBRAL PARA EXPOSICION DE LA PIEL A UN HAZ LASER

| Región espectral | Longitud de onda | Tiempo de exposición (t) segundos | TLV |
|---|---|---|---|
| UV | 200 nm a 400 nm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{4}$ | Como en la Tabla 1 |
| Visible e | 400 nm a 1.400 nm | $10^{-9}$ a $10^{-7}$ | $2\ C_A \times 10^{-2}$ J · cm$^{-2}$ |
| IR-A | 400 nm a 1.400 nm | $10^{-7}$ a 10 | $1{,}1\ C_A \sqrt[4]{t}$ J · cm$^{-2}$ |
| | 400 nm a 1.400 nm | 10 a $3 \times 10^{4}$ | $0{,}2\ C_A$ W · cm$^{-2}$ |
| IR-B y C | 1,4 µm a $10^{3}$ µm | $10^{-9}$ a $3 \times 10^{4}$ | Como en la Tabla 1 |

$C_A$ = 1,0 para $\lambda$ = 400 – 700 nm; ver la fig. 5.1 para $\lambda$ = 700 a 1.400 nm.
Para longitudes de onda mayores de 1.400 nm, y haces láser cuya sección transversal supera los 100 cm$^2$, el TLV en exposiciones cuya duración excede de 10 s es: TLV = (10.000/$A_S$) m W/cm$^2$, siendo $A_S$ la superficie de piel irradiada, cuyo valor oscila entre 100 y 1.000 cm$^2$.
Para $A_S$ > 1.000 cm$^2$, el TLV es 10 mW/cm$^2$.
Para $A_S$ < 100 cm$^2$, el TLV es 100 mW/cm$^2$.

## Tabla 4

## ANGULO LIMITE PARA UNA FUENTE EXTENSA

| Duración de la exposición (s) | Angulo (mrad) | Duración de la exposición (s) | Angulo (mrad) |
|---|---|---|---|
| $10^{-9}$ | 8,0 | $10^{-2}$ | 5,7 |
| $10^{-8}$ | 5,4 | $10^{-1}$ | 9,2 |
| $10^{-7}$ | 3,7 | 1,0 | 15 |
| $10^{-6}$ | 2,5 | 10 | 24 |
| $10^{-5}$ | 1,7 | $10^{2}$ | 24 |
| $10^{-4}$ | 2,2 | $10^{3}$ | 24 |
| $10^{-3}$ | 3,6 | $10^{4}$ | 24 |

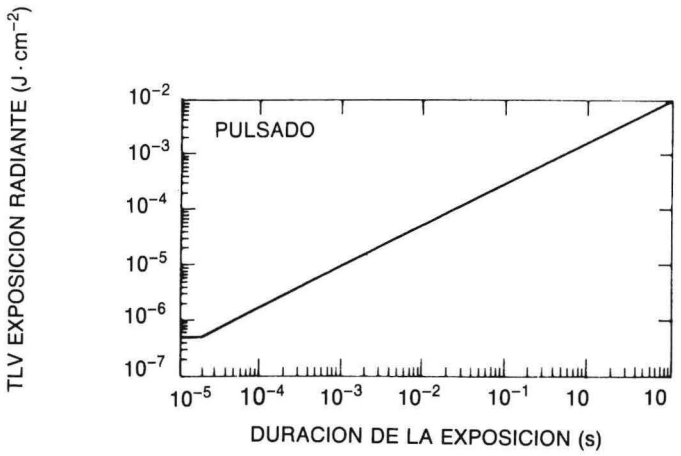


**Fig. 2a.** *TLV para visión directa de un haz láser pulsado (400-700 nm).*

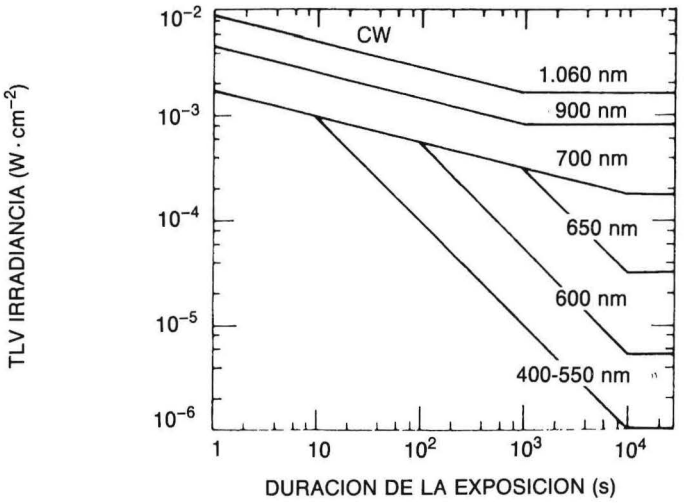


**Fig. 2b.** *TLV para visión directa de un haz láser continuo (400-1.400 nm).*

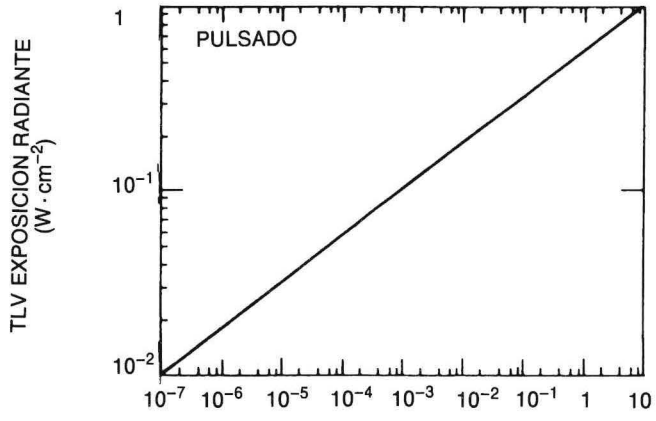


**Fig. 3a.** *TLV para exposición de piel y ojos a láser pulsado para radiación IR-lejano* ($\lambda > 1.4$ μm).

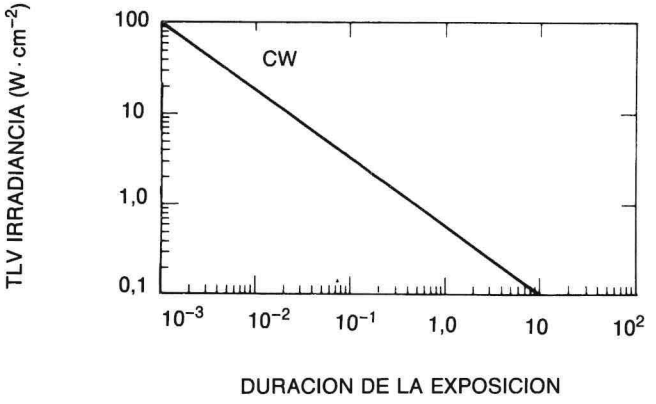


**Fig. 3b.** *TLV para exposición de piel y ojos a láser continuo para radiación IR-lejano* ($\lambda > 1.4$ μm).

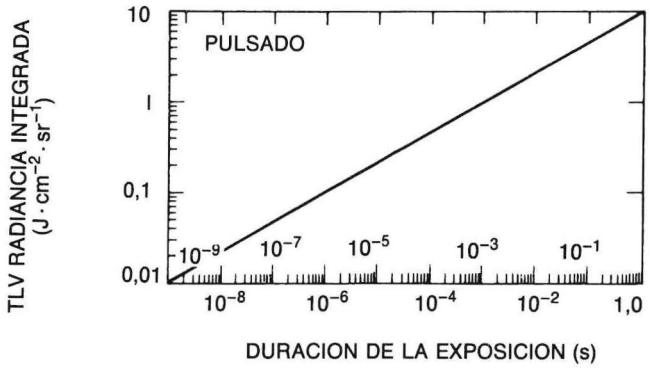


**Fig. 4a.** *TLV para fuentes extensas o reflexiones difusas de radiación láser (400-700 nm) pulsada.*

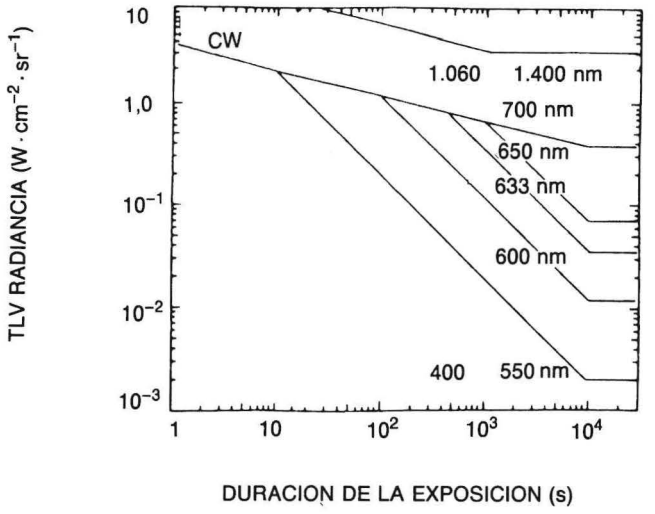


**Fig. 4b.** *TLV para fuentes extensas o reflexiones difusas de radiación láser (400-1.400 nm) continua.*

## 7. CONTROL DE RIESGOS

La evaluación y control de los riesgos de un láser dependerá fundamentalmente de la clasificación de su riesgo potencial, y en función de éste, se aplicarán los controles apropiados para cada clase. En muchos casos, la utilización del sistema de clasificación evitará al usuario la realización de medidas radiométricas.

Además de las medidas preventivas que se citan a continuación, la Norma 825-CEI-84, recomienda como medida de seguridad adicional para instalaciones láser, la designación de una persona responsable de seguridad láser, que pueda valorar adecuadamente las situaciones no previstas por la Norma.

Para reducir el riesgo al nivel máximo permitido, se puede actuar sobre:

### El propio sistema láser

La CEI-825 recomienda la aplicación de los siguientes dispositivos y medidas de seguridad para mantener los niveles de emisión de los láseres por debajo de las exposiciones máximas permisibles (EMP) establecidas por esta norma.

**Conector con enclavamiento a distancia**

La conexión a la fuente de energía dispondrá de un seccionador enclavado a distancia, bien en la puerta del recinto o en el resguardo protector del láser.

La persona encargada, puede anular momentáneamente el seccionador para permitir el acceso a otras personas autorizadas si es evidente que no hay riesgo óptico en el instante y lugar de entrada.

**Control de llave** (llave, tarjeta magnética, combinación cifrada, etc.)

Cuando no se está usando, todo aparato láser 3A, 3B o 4 deberá estar protegido contra el empleo no autorizado por la retirada de la llave control.

**Obturador del haz y/o atenuador**

Se usa uno u otro para prevenir la exposición involuntaria de las personas a láser de clase 3A, 3B o 4 y deberá estar instalado permanentemente para evitar la salida de radiación superior a los niveles máximos permitidos cuando el láser está en «stand-by».

**Señales de aviso**

Deben estar situadas en las entradas a las zonas o recintos protectores que contienen láseres Clase 3A, 3B o 4.

**Trayectoria del haz**

La trayectoria del haz emitido por láseres de Clases 3A, 3B o 4 debe acabar

al final de su recorrido sobre un material con reflexión difusa, de reflectividad y propiedades térmicas adecuadas o sobre materiales absorbentes.

Los láseres de camino óptico abierto, deberán situarse por encima o por debajo del nivel de los ojos cuando sea posible.

Los haces láser, deben estar encerrados (por ejemplo en un tubo) cuando sea posible.

**Reflexiones especulares**

Hay que prevenir la reflexión especular involuntaria de radiación de los láseres de clase 3B o 4. Los espejos, lentes y divisores de haz, deben tener una montura rígida, y sólo se moverán de forma controlada, mientras el láser está emitiendo.

Se deben tener en cuenta las reflexiones inesperadas que pueden dar las ventanas de Brewster en un plano vertical.

## El ambiente en que se utiliza el láser

Hay que distinguir entre láseres utilizados en recintos cerrados a los que se puede limitar el acceso, y láseres utilizados en ambientes exteriores, cuyo riesgo puede extenderse a distancia considerable, por ejemplo en obras públicas donde muy frecuentemente sólo es razonable aplicar medidas administrativas. Se exponen seguidamente las medidas preventivas aplicables a cada caso.

### Control de interiores

a) Iluminar bien los locales para reducir la abertura de pupila.
b) El acceso al local, o aberturas al exterior no deben estar en el eje del haz directo o desviado.
c) No deben existir obstáculos en el suelo.
d) Eliminar causas de reflexión y difusión accidentales.
e) Señalización de los accesos con señales normalizadas.
f) Cuando se utilizan láseres de clase 3 o 4, se eliminarán los materiales fácilmente inflamables por posible impacto del haz.

### Control de exteriores

La distancia a partir del láser, a la cual la irradiancia o la exposición radiante cae por debajo de la exposición máxima permisible (EMP), se llama **distancia nominal de riesgo ocular.** La zona interior donde la irradiancia o la exposición

radiante del haz sobrepasan la EMP, se llama **zona nominal de riesgo ocular;** debe estar definida con precisión y depende también de la naturaleza de los materiales que se encuentren en el camino óptico.

La distancia nominal de riesgo ocular (DNRO), depende de las características de emisión, de la EMP apropiada, del tipo de sistema óptico utilizado y del efecto de la atmósfera sobre la propagación del haz. Se puede calcular utilizando como punto de partida la fórmula de la irradiancia.

La irradiancia, a una distancia r de un láser viene dada por

$$E = \frac{4\,P_o\,e^{-\mu r}}{\pi\,(a + r\,\varphi)^2}\ W \cdot m^{-2} \qquad (1)$$

Siendo:

$P_o$ = Potencia total de salida de un haz láser continuo, o la potencia radiante media para un láser pulsado repetitivamente.
$\mu$ = Coeficiente de atenuación atmosférica ($m^{-1}$) a una $\lambda$ determinada.
r = Distancia del láser al observador o a un objetivo difuso (m).
a = Diámetro del haz láser emergente (m).
$\varphi$ = Divergencia del haz láser emergente (rad).

El término $e^{-\mu r}$ expresa las pérdidas debidas a la atenuación atmosférica y puede despreciarse en la mayor parte de los casos, simplificándose la ecuación.

$$E = \frac{4\,P_o}{\pi\,(a + r\,\varphi)^2} \qquad (2)$$

Cuando el haz no tiene un perfil Gaussiano, sino que es de estructura irregular o multimodo, deberá utilizarse la siguiente fórmula:

$$E = \frac{I\,e^{-\mu r}}{r^2}$$

Donde:
I = Intensidad radiante en $W \cdot sr^{-1}$.

La ecuación (2) tomaría la forma siguiente:

$$E = \frac{I}{r^2}$$

Si hacemos E = EMP y r = DNRO, y sustituimos en (2), tendremos:

$$DNRO = \frac{\sqrt{4\,P_o/\pi\,EMP} - a}{\varphi} = \sqrt{I/EMP}$$

## Las personas expuestas
## Protección personal

Se utilizarán gafas o guantes para reducir el riesgo pero como complemento a los controles técnicos y administrativos o para operaciones breves y concretas. Cuando estos controles eliminan cualquier riesgo de exposición potencial que sobrepase el máximo permisible, no serán necesarias las gafas.

Las gafas deben proteger completamente cada ojo, evitando una penetración lateral seguida de reflexión especular en el propio cristal.

Serán preferibles las gafas con filtros o lentes curvas ya que las lentes planas pueden enviar reflexiones especulares peligrosas a distancias significativas, con el consiguiente riesgo para personas alejadas del láser.

Para seleccionar adecuadamente unas gafas antiláser hay que considerar los siguientes factores:

- Longitud o longitudes de onda de salida.
- Densidad óptica requerida por el protector ocular que varía con la longitud de onda.
- La irradiancia o exposición radiante al láser.
- Trasmitancia visible del protector ocular.
- Umbral de daño del filtro láser.

Hay que hacer unas advertencias importantes:

- Las gafas de protección láser, están previstas para una longitud de onda y una densidad de energía máxima concretas. Su utilización para láseres de características diferentes podría ser muy peligrosa, por lo que se deberán tomar precauciones para evitar errores en la elección de las gafas, sobre todo en el caso de láseres de longitud de onda variable o sintonizable (por ejemplo láser de colorante).
- Las gafas antiláser tienen unos factores de absorción tan elevados que no permiten a los usuarios distinguir el haz láser, y pueden dar lugar a exposiciones más frecuentes a la radiación directa con el consiguiente riesgo de quemaduras y rápido deterioro de las gafas. Lo mismo sucede para láseres ultravioleta o infrarrojos que son por naturaleza invisibles.
- Todavía no existen gafas para visión directa del haz (por ejemplo para operaciones de alineamiento) que garanticen una protección total.

## Formación

El funcionamiento de un sistema láser de clase 3A, 3B o 4 puede representar un riesgo no sólo para el utilizador sino para otras personas en una distancia considerable. Por ello, solo las personas que han recibido la formación adecuada podrán encargarse del control de estos sistemas. La formación recibida debe incluir entre otros temas:

- La familiarización con los procedimientos de funcionamiento del sistema.
- El uso apropiado de los procedimientos de control de riesgo y señales de advertencia.
- La necesidad de protección personal.
- Procedimientos de comunicación de accidentes.
- Efectos biológicos del láser sobre los ojos y la piel.

Como resumen de lo expuesto a lo largo de este capítulo, podríamos destacar lo siguiente:

No es apropiado generalizar sobre los riesgos potenciales derivados del uso de los láseres, ya que éstos son función de los factores que caracterizan a cada láser.

La relación entre los posibles riesgos y los factores que caracterizan a un láser es tan estrecha que la variación de uno solo de estos factores puede bastar para que un láser cambie de clasificación.

En la actualidad no es fácil medir la irradiancia E o la exposición radiante H en un puesto de trabajo, para aplicar los TLV's o las EMP. Es más sencillo utilizar la clasificación por peligrosidad, y exigir que se mantengan las especificaciones del fabricante.

Esto debe complementarse con acciones tales como diseñar una correcta instalación del sistema láser que incluya la seguridad en el proyecto, y porporcionar la información adecuada a las personas encargadas del control de estos sistemas.

## *BIBLIOGRAFIA*


1. ORZA SEGADE, J. M.: «A los veinticinco años de la invención del láser». *Arbor,* 1985, 37-76.
2. MAILLET: «Le laser, principes et techniques d'application». Ed. Lavoisier, Technique et Documentation. 1986.
3. CDTI: «El láser y sus aplicaciones industriales». *Cuadernos CDTI,* núm. 16, 1983.

4. ORZA SEGADE, J. M.: «Láseres». Ed. CSIC, 1986, colección Nuevas Tendencias, vol. 1

5. COURT L. *et al.:* «Effects du faisceau laser sur la fonction visuelle». *Radioprotection* (supp núm. 1) 1984, 41-62.

6. SUESS M. J.: «Non ionizing radiation protection». WHO 1982. WHO Regional Publications, European Series núm. 10.

7. «American National Standard for the safe use of laser». ANSI Z136.1-1980

8. INTERNATIONAL ELETROTECHNICAL COMMISSION: «Radiation safety of laser products, equipment classification, requirements and user's guide». 825-IEC-1984.

9. ACGIH: «TLV's, Threshold limit values and biological exposure indices for 1987-1988».

# CAPITULO 5

## ULTRASONIDOS

D. MANUEL GOMEZ-CANO

# ULTRASONIDOS

1. INTRODUCCION.
2. FUNDAMENTOS FISICOS.
3. FUENTES DE GENERACION Y EXPOSICION PERSONAL.
4. RIESGOS PRODUCIDOS POR LOS ULTRASONIDOS.
5. SISTEMAS DE MEDIDAS.
6. LIMITES DE EXPOSICION.
7. MEDIDAS DE CONTROL.

## 1. INTRODUCCION

Hasta hace relativamente poco tiempo, los riesgos para la salud producidos por la exposición a ultrasonidos han sido ignorados por la mayoría de los países, debido a dos causas fundamentales: una, las pocas posibilidades de aplicaciones industriales que tenían; y otra, debido a que los normalmente utilizados eran de baja potencia.

Sin embargo, a partir de los años sesenta se ha ido incrementando en gran medida su uso y producción, habiéndose en consecuencia tomado conciencia sobre los riesgos que para la salud puede suponer la exposición de las personas a niveles inadecuados de ultrasonidos.

Aunque los riesgos que comporta una exposición son conocidos, se han realizado y se siguen realizando numerosos estudios e investigaciones sin que hasta la fecha se haya establecido una respuesta exacta de cuáles son los límites de exposición a este agente, así como cuáles son en la práctica los daños producidos.

## 2. FUNDAMENTOS FISICOS

Los ultrasonidos se refieren a un fenómeno de vibración mecánica producido en un rango de frecuencia mayor al límite superior de percepción auditiva del oído humano.

Como se sabe, el oído humano es capaz de interpretar a través de su órgano de audición, sonidos o vibraciones mecánicas comprendidas en el rango de frecuencia entre 20 y 20.000 Hz. Los sonidos emitidos en un rango superior de frecuencia al citado y que no son perceptibles por el oído humano se conocen como ultrasonidos.

Aunque en muchas circunstancias se considera como 20 KHz el límite inferior de generación de ultrasonidos, en la práctica no se suele utilizar este límite, debido principalmente a dos causas, una es que el límite superior de audición del oído humano varía considerablemente de un individuo a otro, y otra es que muchas veces se designan y estudian como ultrasonidos, sonidos muy agudos, pero producidos en el rango de audición humana.

Igualmente es difícil el establecer los límites superiores de generación de ultrasonidos, aunque en la práctica se viene considerando como $10^6$ Hz en un medio gaseoso como el aire y $10^9$ Hz en medios líquidos como el agua.

En la figura 1 se indica cuál es, en función de la frecuencia, la sensibilidad del oído humano expresada en dB a diferentes tipos de sonido, tanto audibles como infrasonidos y ultrasonidos.

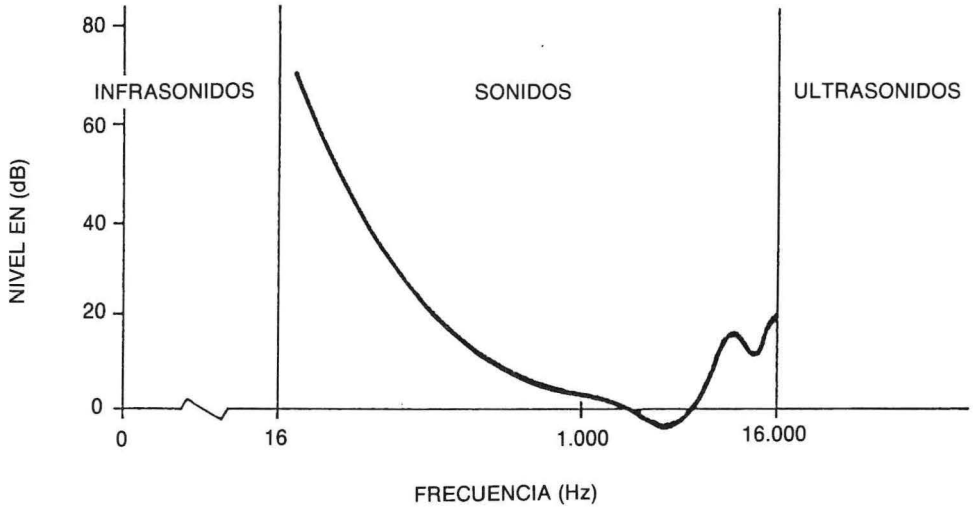


**Fig. 1.** *Curva de sensibilidad del oído humano a diferentes tipos de sonidos y posición de infrasonidos y ultrasonidos.*

En contraste con la radiaciones electromagnéticas, para que se puedan propagar los ultrasonidos se precisa la existencia de un medio material de propagación, –sólido, líquido o gaseoso–, pero no se pueden propagar en el vacío.

Los ultrasonidos, como movimiento ondulatorio que son, tienen básicamente las mismas propiedades físicas que las ondas sonoras; ahora bien, hay que considerar que como consecuencia de tener una mayor frecuencia y por tanto una menor longitud de onda que la de éstas, las leyes de la difracción se cumplen en menor medida, así como tienen la particularidad de ser fácilmente reflejadas por superficies planas.

Igualmente tienen la particularidad de ser absorbidos por el aire muy rápidamente y, por tanto, no ser transmitidos a través de éste a muy largas distancias.

Habrá que hacer la observación de que aunque los ultrasonidos no pueden ser perceptibles a traves del oído humano, a veces llevan aparejadas una serie de subarmónicos de frecuencias comprendidas dentro del rango de audición y por tanto ser percibidas por el oído. Todo ello ha hecho que en numerosas ocasiones el estudio de los ultrasonidos se realice a partir de los 10 KHz, considerándose entonces como ultrasonidos los sonidos muy agudos y ultrasonidos en su más estricto sentido físico.

La velocidad de propagación de los ultrasonidos en el aire a temperatura ambiente es igual a la de los sonidos, y se acepta ser 343 m/sg, mientras que en un medio líquido como es el agua se transmiten más rápidamente y su velocidad es aproximadamente 1.500 m/sg.

## 3. FUENTES DE GENERACION Y EXPOSICION PERSONAL

Los ultrasonidos como tales, pueden ser generados de forma natural y particularmente son utilizados por numerosas especies animales para comunicarse, guiarse, etc., como son los típicos casos de los perros y murciélagos. Al igual existe en el mundo laboral cierto tipo de instalaciones que, siendo concebidas para otros fines, emiten sonidos con ciertas componentes ultrasonoras, tal como sucede por ejemplo en algunos ciclones utilizados en la deposición de polvo.

Con independencia de las fuentes de generación natural, el hombre, como consecuencia del desarrollo industrial, ha concebido una serie de sistemas que producen ultrasonidos, que cada día van teniendo un mayor campo de aplicación. La generación se produce en un rango de frecuencia que va desde 10 KHz a más de 10 MHz y con unas intensidades comprendidas entre $10^{-3}$ y $10^{5}$ W/cm$^2$.

Para hacernos una idea de la aplicación de los ultrasonidos, podemos poner a título de ejemplo, y según un artículo publicado en *Cahiers y Notes Documentaires,* núm. 23, 2.º Trimestre de 1986, *Emisiones sonoras y ultrasonoras producidas por soldadura por ultrasonidos,* por G. Andre y A. Damongeot, del INRS, se puede decir que aproximadamente existen en Francia unas 60.000 personas expuestas a ultrasonidos procedentes de las máquinas de soldadura por ultrasonidos, no disponiéndose en la actualidad de datos en España que pudieran aproximarnos a la exposición real.

Al considerar las aplicaciones de los ultrasonidos, se puede decir que básicamente se las puede clasificar en:

- **Baja Frecuencia** (van desde 10 KHz a 100 KHz aproximadamente) entre las que se encuentran la mayoría de las máquinas industriales (soldadura, limpieza, etc.).
- **Media Frecuencia** (abarcan desde 100 KHz a 1 MHz) entre estos se encuen-

tran los utilizados en algunas aplicaciones terapéuticas como hipertermia.

- **Alta Frecuencia** (1 MHz a 10 MHz y superiores) entre los que se encuentran los aparatos de uso médico (ecografía, velocimetría, etc.) y aparatos de control no destructivo (detección de fallos en estructuras, fugas etc.).

Las aplicaciones industriales se centran principalmente en los ultrasonidos de baja frecuencia (y de modo de onda continua), siendo a su vez los procesos en los que se utilizan más los siguientes:

- **Limpieza de piezas.** Su fundamento estriba en la generación de vibraciones ultrasónicas a través de un transductor que se coloca en una cuba que contiene un líquido (generalmente disolvente). La limpieza de las piezas se obtiene por efecto de cavitación (implosión de microburbujas sobre la superficie de contacto).
- **Soldadura de piezas de plástico.** Su fundamento estriba en que las piezas a soldar se presionan fuertemente unas contra otras con la ayuda de un sonotrodo que genera vibraciones ultrasonoras intensas, que aporta la energía ultrasónica. Se produce entonces un calentamiento local de las piezas, permitiendo la soldadura.
- **Aceleración de procesos físico-químicos.** Ciertas operaciones mecánicas como pulido, decapado, etc., se pueden realizar fácilmente por la utilización de ultrasonidos.

En la Tabla I se indican resumidamente y a título orientativo algunas aplicaciones típicas de ultrasonidos, así como su frecuencia de generación y su rango de intensidad.

**Tabla 1**

**APLICACIONES INDUSTRIALES DE ULTRASONIDOS DE ALTA POTENCIA EN FUNCIÓN DE SU RANGO DE FRECUENCIAS E INTENSIDAD USADAS**

| Aplicación | Frecuencia (KHZ) | Rango intensidad en $W/cm^2$ |
|---|---|---|
| Señales submarinas de baja frecuencia | 16-20 | – |
| Reacciones en aerosoles y agitación | 16-20 | – |
| Aparatos de control ultrasonoro, apertura de puerta | 25 | – |
| Limpieza y desengrase | 20-50 | $<6$ |
| Soldadura | | 3-32 |
| Soldadura de plásticos | $\simeq 20$ | $<1.000$ |
| Soldadura de metales | 10-60 | $\simeq 10.000$ |
| Mecanización | $\simeq 20$ | Variable |
| Extracción | $\simeq 10$ | $\simeq 500$ |
| Atomización | 20-300 | Variable |
| Medidas de espesores trabajos biológicos experimentales | 300-750 | – |

## 4. RIESGOS PRODUCIDOS POR LOS ULTRASONIDOS

Con carácter previo al estudio de cuáles son los riesgos que puede provocar la exposición a ultrasonidos, así como los efectos producidos sobre el organismo humano, se considera de gran interés el conocer las formas de trasmisión de los ultrasonidos a través de éste.

De acuerdo con sus aplicaciones industriales se puede considerar que se trasmiten de dos formas diferentes:

- **Por contacto** (esencialmente manos) que se origina durante la utilización de cubas de limpieza o desengrase de piezas, cuando las manos permanecen en contacto con los líquidos o durante el manejo de herramientas o piezas que emiten ultrasonidos.
- **Por vía aérea,** caso que se considera el más frecuente y que se origina cuando las cubas de desengrase no han sido cerradas durante la operación, radiación procedente de la máquina de soldar, etc. Como ampliación de esta vía hay que considerar que en la actualidad no está establecido que el conducto auditivo sea el único canal de entrada de los ultrasonidos en el organismo.

Visto esto se puede pasar a estudiar cuáles son los efectos que se producen en el organismo como consecuencia de la exposición para cada una de las formas de trasmisión.

## Efectos sobre el organismo humano por exposición por contacto a los ultrasonidos

Con carácter general se puede decir que los ultrasonidos pueden manifestar la siguiente sintomatología:

- Dolores de cabeza, vértigos, irritabilidad y aumento de la fatiga.
- Alteraciones funcionales del sistema nervioso.
- Modificaciones de reflejos como puede ser inhibición de reflejos cutáneos y corneales, aumento de los reflejos tendiníticos.
- Turbulaciones vasomotoras periféricas (decoloración y edema de las extremidades de los dedos, decoloración de las uñas, desecación de la piel, cianosis de los dedos y de los puños, alteración de los capilares.

Asimismo se puede considerar que cuando hay una exposición por contacto con los ultrasonidos el daño puede sobrevenir por dos caminos distintos:

Primero por un calentamiento o daño mecánico en la superficie de la piel o de la interfase entre el tejido y el hueso y que podría estar seguida de una necrosis o degeneración de la superficie del huesos como consecuencia de la exposición persistente al líquido acoplado a los ultrasonidos.

Segundo por la existencia de campos ultrasónicos en un líquido que bajo ciertas condiciones puede producir un posible efecto de cavitación en los tejidos. Este fenómeno implica la formación de burbujas de gas que van creciendo hasta alcanzar un tamaño resonante cuando están oscilando con una amplitud creciente hasta que finalmente implotan. Este proceso puede ocurrir en tejidos y en sangre originando un daño mecánico para los constituyentes de la células. No obstante existen en la actualidad serias deficiencias en el conocimiento y bajo qué condiciones puede ocurrir la cavitación.

## Efectos sobre el organismo humano por exposición por vía aérea a los ultrasonidos

Numerosos estudios han demostrado que la exposición por vía aérea a los ultrasonidos puede producir efectos biológicos que se pueden manifestar en el desarrollo de las células, efectos hematológicos y vasculares, efectos genéticos y sobre el sistema nervioso central.

Además pueden producir efectos sobre el aparato auditivo del tipo de despla-

zamiento de la audición, como consecuencia de los sonidos audibles que acompañan a los ultrasonidos.

Otros efectos pueden ser del tipo de cefaleas, vértigos, fatigas anormales e incluso vómitos. Todo esto está actualmente en revisión y pueden ser debidos tanto a razones fisiológicas como psicológicas.

En la figura número 2 se indican resumidos cuáles son los efectos fisiológicos producidos por la exposición a ultrasonidos por vía aérea en función de los niveles de intensidad.

## 5. SISTEMAS DE MEDIDA

Dado que los ultrasonidos son, como ya se ha dicho anteriormente, vibraciones mecánicas, generadas en un rango de frecuencia superior a 20.000 Hz, su forma de medida es básicamente semejante a la de los sonidos audibles.

Ahora bien, a la hora de abordar el problema de medición de los niveles de ultrasonidos a los que pueden estar expuestos los trabajadores, habría que diferenciar claramente si se transmiten a través de un medio gaseoso (aire) o a través de un medio líquido.

### Medición de niveles de ultrasonidos transmitidos por vía aérea

Antes de entrar en la descripción de equipos hay que indicar que, generalmente, los ultrasonidos transmitidos por vía aérea son cuantificados en términos de nivel de presión sonora (SPL) expresados en decibelios (dB) tal que:

$$SPL\ (dB) = 20\ \lg \frac{P}{P_o}$$

donde P es la raíz media cuadrática de la presión acústica y Po es la presión de referencia y que se considera como el menor nivel que un oído humano estadísticamente medio puede percibir a una frecuencia de 1.000 Hz y que es igual a 20 μPa.

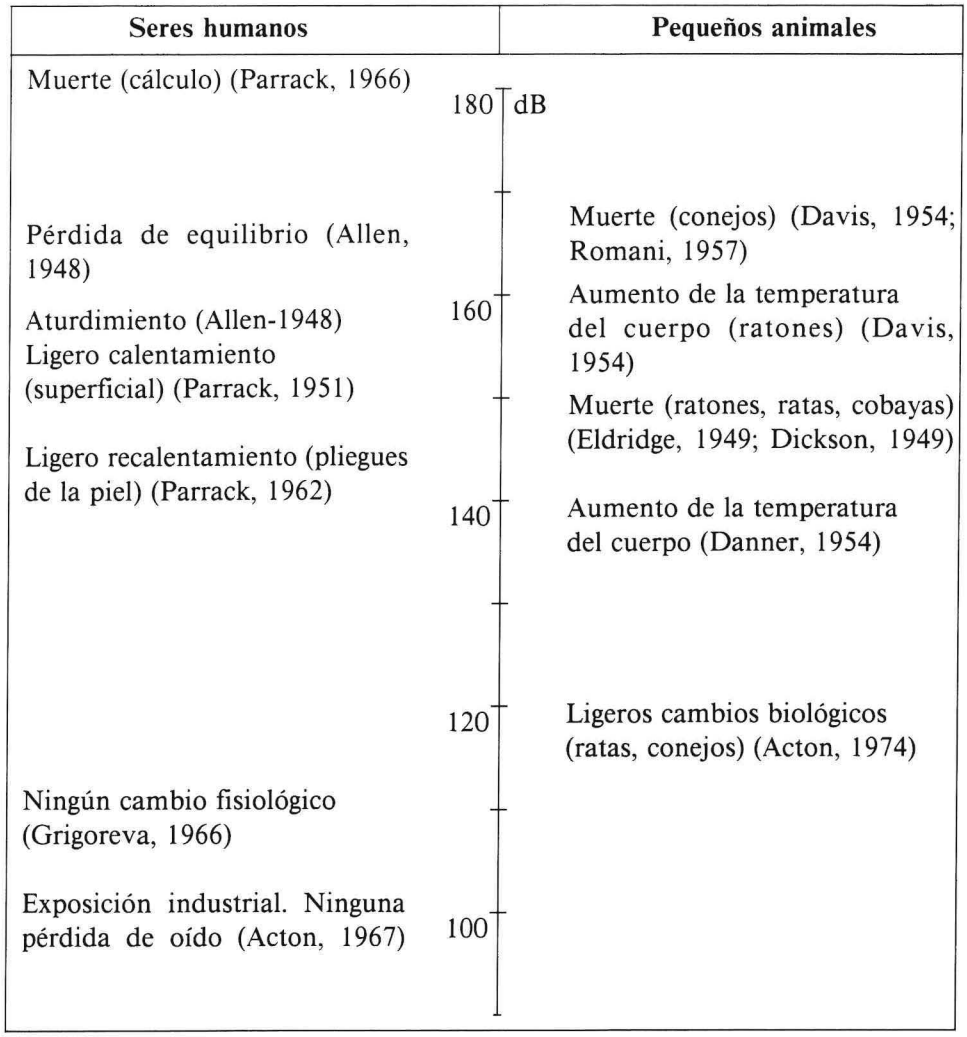


**Fig. 2.** *Efectos fisiológicos producidos por los ultrasonidos transmitidos por vía aérea.*

Los equipos utilizados son generalmente sonómetros o medidores de ultrasonidos, que sean capaces de medir con fiabilidad los niveles sonoros a las frecuencias de generación de los ultrasonidos.

Hay que hacer resaltar la necesidad que se tiene de realizar las mediciones de niveles de ultrasonidos en tercios de banda de octava, así como que el micrófono captador utilizado tenga una respuesta plana en el rango de frecuencia a estudiar.

Los sonidos audibles y fundamentalmente los agudos y muy agudos, en base a la similitud de efectos que producen sobre el hombre, también deben ser cuantificados con un medidor de nivel sonoro con un filtro de bajo paso y respuesta en la escala de ponderación A para recoger los sonidos de 20 KHz y menores.

### Medición de ultrasonidos transmitidos a través de líquidos (contacto)

A la hora de valorar los ultrasonidos transmitidos por contacto a través de líquido, se ha considerado que, dado que la intensidad y potencia acústica son los datos más característicos que se han de considerar en una exposición de este tipo, sean estos los parámetros que deben ser estudiados.

Como consecuencia de esto, se han desarrollado dos tipos de equipos que miden estos parámetros; así, existen unos que miden la potencia total desarrollada por el equipo emisor, en tanto que existen otros que miden cantidades puntuales de intensidades sobre pequeñas áreas comparadas con las dimensiones de los campos de ultrasonidos.

En la práctica hay que considerar que, aunque el método de medición de la potencia total es un método en teoría fácil de realizar, entraña grandes dificultades a la hora de la medición de los puestos de trabajo, por lo que es poco usado en la actualidad.

El otro método, basado en la medida de cantidades puntuales de intensidad, es en la práctica el más utilizado y se realiza usando hidrófonos piezoeléctricos en miniatura unidos a los equipos de muestreo, aunque hay que señalar que presentan algún tipo de problemas, como son que a veces no son equipos comerciales, así como que pueden presentar un resonancia en la frecuencias relevantes, distorsionando los impulsos ultrasónicos.

## 6. LIMITES DE EXPOSICION

No existen en la actualidad unos criterios uniformes para la evaluación de los riesgos producidos por los ultrasonidos trasmitidos tanto por vía aérea como a través de un medio líquido, no obstante vamos a relacionar a continuación aquellos criterios que en el día de hoy nos parecen los más apropiados para valorar las exposiciones a ultrasonidos.

### Límites de exposición a ultrasonidos trasmitidos por contacto

Cuando se trata de valorar la exposición de ultrasonidos por trasmisión a través de un medio líquido, la primera aproximación a un estándar fue propues-

to por Nyborg en 1978 y posteriormente recomendado por Benwell y Rapacholi en 1980.

Dicho estándar, relaciona para diferentes tiempos de exposición los distintos niveles de intensidad acústica máximos recomendables a que puede estar sometida una persona. Estos valores quedan expresados en la figura número 3 y ante la ausencia de otros criterios puede considerarse como una aproximación al problema de exposición por contacto.

Analizando más profundamente este estándar, se puede decir que es utilizado para prevenir los efectos biológicos que pueden considerarse como peligrosos. Se consideran 100 $mW/cm^2$ como el valor límite umbral por debajo del cual no se aprecian efectos biológicos. Asimismo considera que se deben evitar exposiciones a intensidades mayores a 10 W/cm.

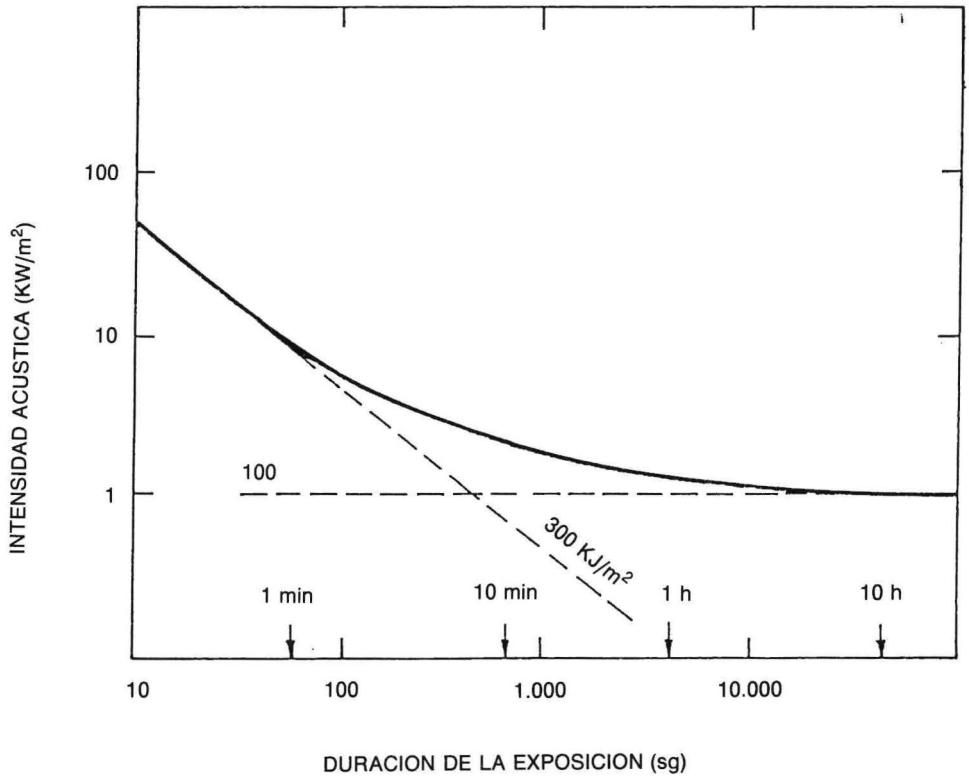


**Fig. 3.** *Límites de exposición por contacto propuesto por Nyborg en 1978.*

## Límites de exposición a ultrasonidos transmitidos por vía aérea

Referente a los ultrasonidos trasmitidos por vía aérea, existen en diferentes países recomendaciones o reglamentaciones que pudieran tener ciertas similitudes, así como a nivel internacional existe una recomendación provisional.

Haciendo una breve síntesis histórica sobre los estándars de exposición a ultrasonidos transmitidos por vía aérea, se puede decir que en la década de los años sesenta se propusieron tres estándars de exposición dependientes de la frecuencia de generación.

Así, el soviético Grigor en 1966, experimentó con sonidos audibles y ultrasonidos transmitidos por vía aérea, y también unos niveles para sonidos audibles considerados en tercios de banda de octava, concluyendo que los riesgos producidos por ultrasonidos son considerados menos peligrosos que los producidos por sonidos audibles. Consideró igualmente un valor de 120 dB como límite aceptable de presión acústica para todo el dominio de los ultrasonidos.

En el año 1968, Acton propuso como nivel aceptable 110 dB en los centros de los tercios de banda de octava de 20, 25 y 31,5 KHz, con el objeto de prevenir tanto los efectos subjetivos como objetivos, y de 75 dB en los 10, 12,5 y 16 KHz, con el fin de prevenir igualmente tanto los efectos subjetivos como objetivos.

En el año 1969, un subgrupo de ANSI (Standard Working Group 53-W40) dirigido por Parrack realizó una serie de recomendaciones basadas en los efectos biológicos a las frecuencias audibles y en el rango ultrasónico, proponiendo un criterio para prevenir los efectos auditivos y subjetivos para individuos expuestos ocho horas diarias durante cinco, y cinco días y medio a la semana.

Todos estos criterios quedan resumidos claramente en la figura número 4.

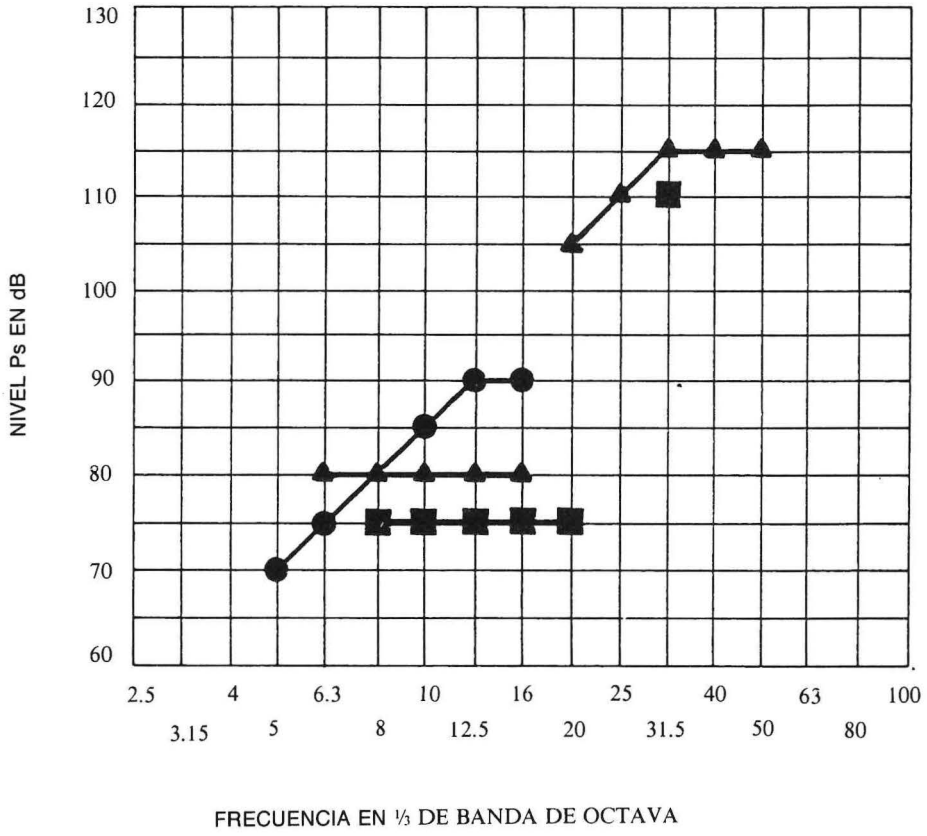


**Fig. 4.** *Criterio para exposición a ultrasonidos propuesto por Acton (1968).*

Posteriormente, en el año 1980, Benwell y Rapacholi propusieron un nuevo estándar cuyos valores máximos permisibles de exposición están indicados en la figura número 5, y por último la ACGIH ha propuesto unos valores TLV's para ultrasonidos transmitidos por vía aérea que quedan reflejados en la figura número 6. Estos últimos standards proponen una serie de valores para prevenir los efectos subjetivos producidos por encima de 20 KHz y otros para prevenir los efectos auditivos producidos por debajo de 20 KHz.

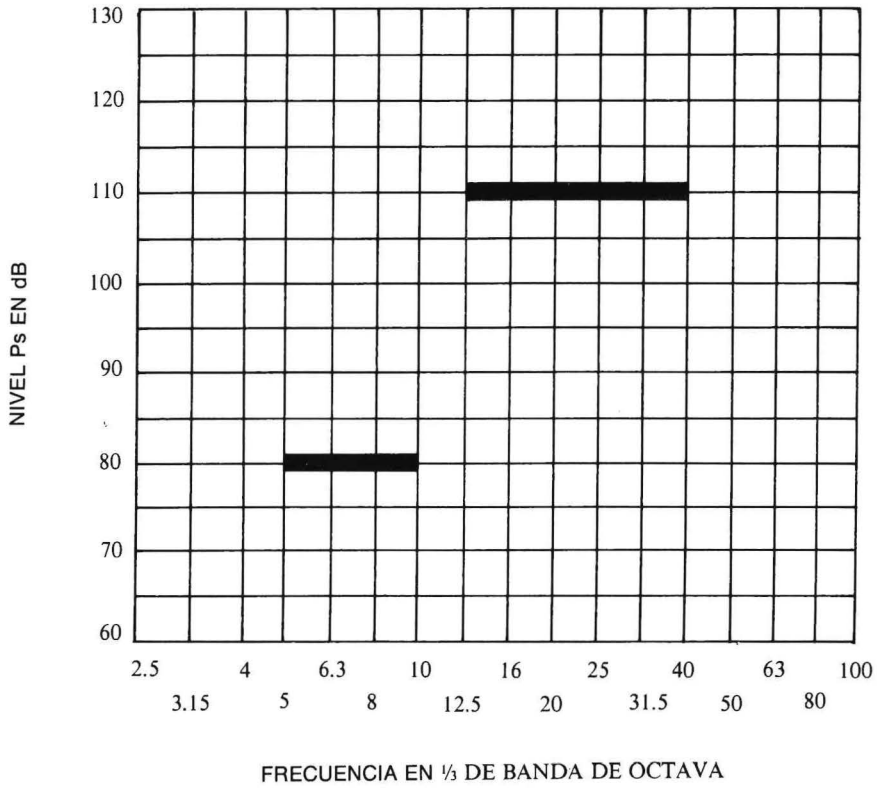


**Fig. 5.** *Niveles máximos de exposición a ultrasonidos propuesto por Benwell y Repacholi.*

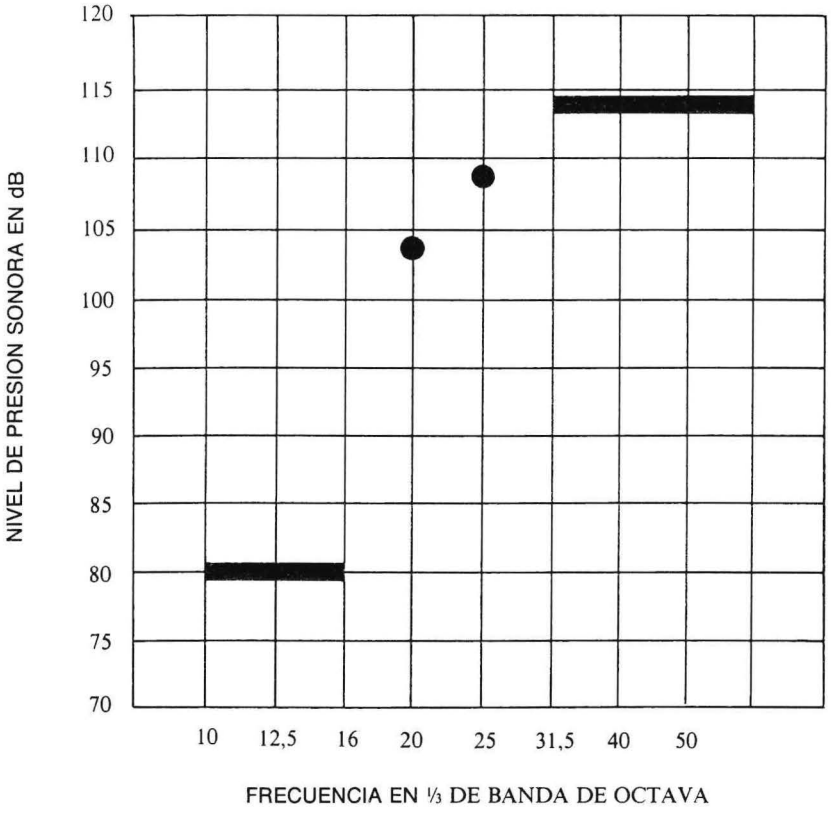


**Fig. 6.** *TLV establecido por la A.C.G.I.H. para exposición a ultrasonidos.*

Si comparamos todas las recomendaciones y reglamentaciones en los diferentes países, vemos que presentan ciertas semejanzas, por lo que se ha considerado el tomar como criterio orientativo para la exposición a ultrasonidos el criterio provisional de exposición situación 1985 y representado en la figura número 7.

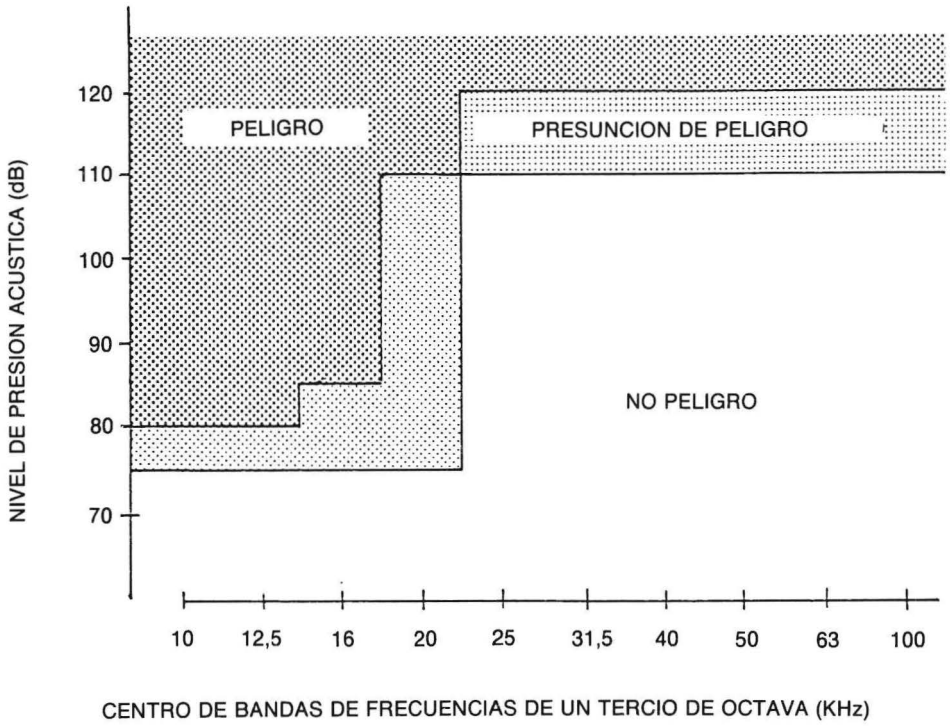


**Fig. 7.** *Límites máximos recomendados para exposición a ultrasonidos aéreos de baja frecuencia. Criterio provisional. Situación 1985.*

Del examen de este criterio podemos concluir que existen tres zonas claramente diferenciadas.

- Una zona situada por encima de los límites más elevados propuestos y en la cual es prácticamente seguro que existe peligro de sobreexposición.
- Una zona situada por debajo de todos los límites más bajos propuestos y en la que se puede decir que es prácticamente seguro que no hay peligro de sobreexposición.
- Una zona intermedia a las dos señaladas anteriormente y en la que se puede considerar, en ausencia de otra información, que hay un presunción de sobreexposición.

En lo referente a exposiciones diarias de duración inferior a ocho horas, se considera la proposición de la IRPA representada en la figura número 8 y basada en el principio de la isoenergía (misma energía acústica percibida en el transcurso de la jornada), en la que para exposiciones de ocho horas diarias coinciden los niveles recomendados con los establecidos por el criterio provisional expuesto anteriormente, y para tiempos menores se incrementan estos niveles en unos valores función del tiempo de exposición, con la particularidad que para exposiciones de muy corta duración se incrementa un máximo de 9 dB.

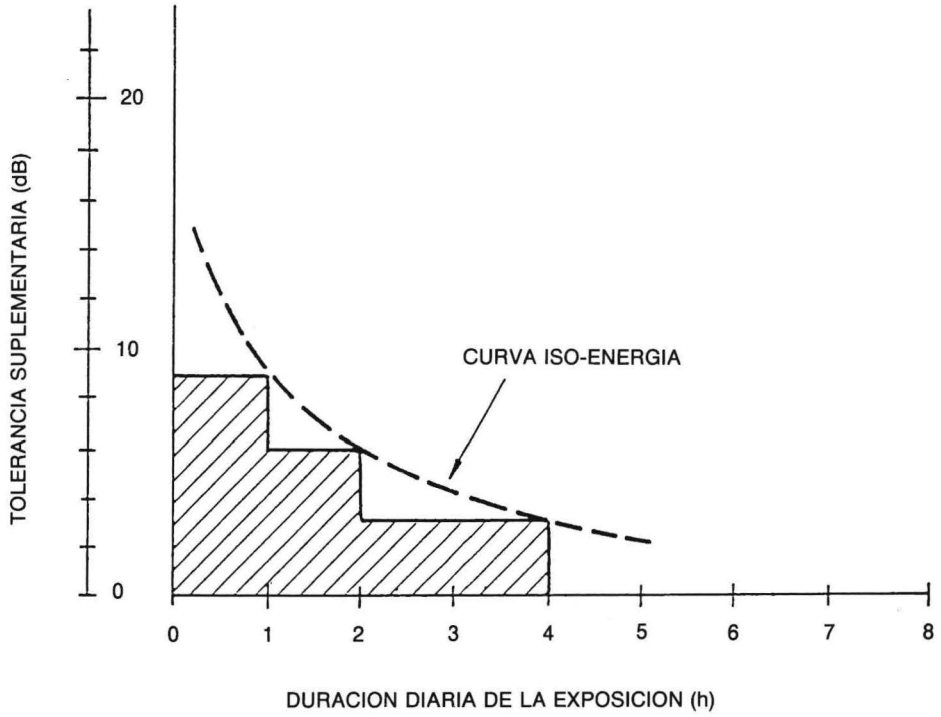


**Fig. 8.** *Tolerancias suplementarias aceptables para exposiciones no continuas a ultrasonidos áreas de baja frecuencia (situación 1985).*

## 7. MEDIDAS DE CONTROL

Cuando se tiene que trabajar con máquinas productoras de ultrasonidos de alta potencia, se puede producir un cambio físico temporal o permanente, por lo que se hace necesario el adoptar una serie de medidas preventivas.

Al igual que en todo tipo de actuación preventiva, se puede realizar mediante actuación sobre el:

- Foco productor
- Medio de propagación
- Receptor

de tal forma que el orden de actuación debe ser siempre éste.

Los sistemas de actuación son semejantes a los del ruido; no obstante, hay que hacer algunas salvedades de tipo particular. Tanto a la hora de estudiar los ultrasonidos trasmitidos por vía aérea como a través de líquidos se deberá actuar según la misma filosofía preventiva, pero dadas las diferencias que pueden producir en sus aspectos físicos como en efectos sobre el organismo, merece la pena que sean tratados independientemente.

### Ultrasonidos transmitidos a través de líquidos

Tanto si se trata de ultrasonidos de alta o baja potencia, se debe actuar de forma que:

- La selección del equipo sea de la adecuada potencia para la función a desempeñar, evitando la instalación de equipos que emitieran un nivel de potencia inadecuado, con el consiguiente riesgo para los operarios que los utilizan.
- Se deberá estudiar la posibilidad de automatizar los procesos, de forma que eviten el contacto directo de los operarios con el líquido todo el tiempo que sea posible.
- Los equipos deberán ser utilizados por personal perfectamente cualificado y que tenga conocimiento de los riesgos y posibles efectos para su salud.
- Se deberá colocar una señalización conveniente en aquellas áreas donde existan equipos emisores de ultrasonidos o utilización de sistemas apropiados de seguridad.
- Se deberá colocar en cubas de desengrase por ultrasonidos carteles indicando las precauciones necesarias para no introducir las manos o partes del cuerpo en el tanque mientras esté operando.
- Se deberá desconectar los generadores de ultrasonidos cuando no estén operando.
- Si no es posible la desconexión, se deberá tapar los tanques a fin de evitar el contacto y propagación de los ultrasonidos.

Cuando se usen ultrasonidos de baja potencia en pruebas no destructivas que no induzcan cambios permanentes o temporales en el sistema, se deberán tomar las siguientes medidas preventivas.

- Evitar el contacto directo.
- Los equipos deben ser operados por personal cualificado.
- Una señalización adecuada debe ser colocada cerca de los equipos para indicar la presencia del equipo y la precauciones a tomar por los trabajadores.

### Ultrasonidos trasmitidos por vía aérea

Cuando se trata de prevenir los riesgos por ultrasonidos trasmitidos por vía aérea se deberán tomar las siguientes medidas precautorias, además de las lógicas y semejantes a las de reducción de niveles sonoros:

- Efectuar guías o normas de trabajo.
- Utilizar encerramientos parciales o totales, pantallas y absorbedores para reducir los ultrasonidos.
- Utilizar protección personal para el aparato auditivo.

## *BIBLIOGRAFIA*


- ACTOR, W. I. «Exposure to industrial ultrasound: hazards, appraisal and control», *Journal of Occupational Médicine* (1983), 33, 107-113
- DAMONGEOT, A. y ANDRE, G. «Limites d'exposition aux sons aigus (8 a 16 KHz) et aux ultrasons de basse frecuence (16 a 100 KHz)», *Cahiers de Notes Documentaires* núm. 120, 3.er trim. 1985.
- ANDRE, G. y DAMONGEOT, A. «Emissions sonores et ultrasonores lors du sodage par ultrasons. Risques et moyens de prevention», *Cahiers de Notes Documentaires* núm. 123, 2.º trim. 1986.
- «Rewiew of concepts, quantities, units and terminology for non ionizing radiation protection. A report of the International non ionizing Radiation Committee of de IRPA», *Health Physics,* vol. 49, núm. 6, December 1985.
- WIERNICKI, C. y J. KAROLY, W. «Ultrasound: Biological effects and Industrial Hygiene Concerns», *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.,* 46(9), 1985.
- «Interim Guidelines on limits of human exposure to airborne ultrasound. International Non-ionizing Radiation Committee of the IRPA», *Health Physics,* vol. 46, núm. 4, abril 1984.

- «Radiation protection. Non-ionizing radiation dosimetry». Commission of the European Communities. Report EU 9110 EN. 1984.
- HILL, C. R. y HAAR, G. «Non-ionizing radiation protection, Chapter 6, Ultrasound», WHO. Regional Publications, European series núm. 10. 1982.

# CAPITULO 6

## PROTECCION OCULAR CONTRA RADIACIONES NO IONIZANTES

D. EMILIO GALLARDO AGUILAR

# PROTECCION OCULAR CONTRA RADIACIONES NO IONIZANTES

1. OCULARES FILTRANTES.
2. ELECCION DEL ADECUADO GRADO DE PROTECCION.
3. EQUIPOS DE PROTECCION EN SOLDADURA.

# PROTECCION OCULAR CONTRA RADIACIONES NO IONIZANTES

## 1. OCULARES FILTRANTES

Para evitar que las radiaciones lleguen hasta el ojo en dosis capaces de causar reacciones perjudiciales, debe interponerse un elemento que, impidiendo el paso de las mismas, permita ver a su través el trabajo que esté en ejecución. Si este elemento forma parte de un equipo de protección individual (EPI) es conocido como ocular filtrante.

Las protecciones colectivas, o a la de maquinaria contra radiaciones, se encuentran normalmente en forma de planchas y láminas de caucho o plástico flexible, opacas, como las que vemos en las máquinas fotocopiadoras. Las operaciones de soldadura se aislan mediante biombos o cortinas, bien totalmente opacas o semitransparentes, capaces de reducir el paso de las radiaciones nocivas a niveles aceptables.

De la radiación total incidente sobre un ocular filtrante, una parte será devuelta hacia atrás (reflejada), otra será detenida en el material del ocular (absorbida) y otra pasará a través del mismo (trasmitida).

Dependiendo de la proporción en que se den estos mecanismos de actuación para reducir la llegada de radiaciones, hay distintos tipos de oculares filtrantes.

Los oculares más usados en soldadura están fabricados en vidrio coloreado en masa y actúan por absorción de las radiaciones, por lo que suelen calentarse y convertirse a su vez en emisores de radiación a bajas temperaturas.

Los que emplean la reflexión como mecanismo para limitar la energía radiante, suelen tener recubierta con una delgada película de un material de gran poder

reflectante (por ejemplo oro, plata, etc.), la superficie en que incide la radiación, siendo el material base de plástico coloreado, con lo cual son más livianos.

Independientemente de que actúen por absorción o por reflexión, los oculares no dejan pasar en igual proporción a las diferentes radiaciones monocromáticas que existen en el espectro radiante considerado. Es decir, poseen trasmisiones espectrales, distintas cuyo conjunto nos da la curva de trasmisión espectral.

Es la trasmisión media en la banda visible la que, como criterio internacionalmente aceptado, determina el valor de N, llamado grado de protección. Las comisiones encargadas de normalizar los oculares filtrantes han fijado una serie de valores concretos de N, admitiendo para cada uno de ellos un rango de tolerancias en la trasmisión media al visible.

Existe un acuerdo casi unánime para estos valores normalizados en diferentes países. En España, el Ministerio de Trabajo, en la Norma Técnica Reglamentaria MT-18 «Oculares filtrantes para pantallas para soldadores», presenta la siguiente clasificación:

| Grado de protección N | Transmisión media al visible en % | |
|---|---|---|
| | Máxima | Mínima |
| 1,2 | 89 | 74,4 |
| 1,4 | 74,4 | 58,1 |
| 1,7 | 58,1 | 43,2 |
| 2 | 43,2 | 29,1 |
| 2,5 | 29,1 | 17,8 |
| 3 | 17,8 | 8,5 |
| 4 | 8,5 | 3,2 |
| 5 | 3,2 | 1,2 |
| 6 | 1,2 | 0,45 |
| 7 | 0,45 | 0,17 |
| 8 | 0,17 | 0,06 |
| 9 | 0,06 | 0,023 |
| 10 | 0,023 | 0,0085 |
| 11 | 0,0085 | 0,0032 |
| 12 | 0,0032 | 0,0012 |
| 13 | 0,0012 | 0,00045 |
| 14 | 0,00045 | 0,00017 |
| 15 | 0,00017 | 0,00006 |
| 16 | 0,00006 | 0,000023 |

Esta tabla concuerda prácticamente en su totalidad con los criterios establecidos por la International Standard Organization (ISO) y las normas de la Comisión Europea de Normalización (CEN), pues tan solo varía para N = 1,2, en que el valor máximo de la trasmisión media al visible es del 89 %, en lugar del 100 %. Este valor se ha tomado así en la norma MT para diferenciar los oculares de protección filtrantes de los incoloros, ya que éstos, según el artículo 146 de la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo, deben trasmitir como mínimo el 89 % de la luz visible.

La clasificación de los oculares filtrantes, según el grado de protección N, es válida cualquiera que sea el espectro radiante contra el que queremos protegernos. Insistimos en que es sólo indicador del nivel de luz con que contará el operario para ver el trabajo que esté efectuando. El valor N no suministra información alguna sobre la proporción en que son detenidas las radiaciones UV e IR que normalmente acompañan a esta luz visible, y cuyas dosis energéticas son características de cada puesto de trabajo. Es decir, esta clasificación de los filtros es válida no sólo para las radiaciones de soldadura sino para las de otras operaciones industriales. Por tanto, no es suficiante conocer este valor numérico N para saber contra qué tipo de espectro radiante puede ser utilizado un determinado ocular filtrante.

Atendiendo a la similitud de las proporciones en que aparecen las radiaciones UV e IR en sus curvas de radiación espectral, las emisiones originadas en procesos industriales y fuentes naturales se agrupan en las siguientes categorías:

- Radiación Solar.
- Radiación de Soldadura.
- Radiación IR.
- Radiación UV.
- Radiación Láser.

Tanto la radiación solar como la de soldadura contienen en su espectro las bandas UV, Visible e IR, en dosis importantes aunque con distintas intensidades energéticas. Los puestos de trabajo con emisión de IR (hornos, laminaciones, fundición, etc.), tienen un espectro rico en IR y Visible, pero muy poco importante en UV. Por el contrario, en aquellos radiadores específicos de UV (lámparas germicidas, bactericidas, fotocopiadoras, etc.) no se dan en proporción significativa las radiaciones IR.

Los láseres tienen una emisión prácticamente monocromática pero con enorme energía, por lo que representan un caso aparte.

Así pues, si en los procesos de cada grupo anterior se emiten UV e IR en proporciones y dosis energéticas diferentes, también deberán poseer distintas características de trasmisión a estas bandas los filtros utilizados como protección en cada caso.

Por ejemplo, será inútil protegerse en un puesto de soldadura, con un filtro

de grado de protección N adecuado pero cuyas características de trasmisión lo catalogan como «contra radiación UV». Con su uso sólo habrá garantía de que el operario tiene la debida protección contra las UV existentes y las dosis excesivas de luz visible. Pero como dichos oculares no tienen por qué detener las IR, ya que no están concebidos para ello, y en la soldadura hay emisión notable de radiaciones IR, las dejarán pasar, alcanzando los distintos medios oculares en los que serán absorbidas y producirán lesiones más o menos inmediatas o enfermedad a largo plazo.

Es sólo la detención de la parte visible del espectro la que el usuario puede conocer a la vista de un ocular filtrante. Le queda como incógnita si las radiaciones UV e IR invisibles para el ojo son suficientemente eliminadas, pues no posee medios naturales para averiguarlo. Son precisos para ello un instrumental y unos métodos de ensayo que sólo pueden realizarse en un laboratorio y por personal técnicamente preparado para ello.

## 2. ELECCION DEL ADECUADO GRADO DE PROTECCION

A modo de recomendación, y de acuerdo con los estudios y proyectos realizados por organismos internacionales, el Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo ha preparado para su divulgación la tabla adjunta.

Con ella es posible elegir, de acuerdo con las características del puesto de trabajo, el valor N del ocular filtrante conveniente en la mayoría de los casos de soldadura.

Recalcamos el carácter orientativo de esta tabla, pues además de las variables en ella indicadas, hay otras que influirán en la decisión final tales como:

- La iluminación ambiental existente y presencia o no de superficies reflectantes.
- La posición del operario y distancia al punto de soldadura durante el trabajo.
- Las características de visión del soldador, pues es sabido que no todas las personas tienen la misma sensibilidad a un determinado nivel de iluminación.

Hay que deshacer la creencia, por parte de algunos soldadores, de que cuanto mayor es el grado N escogido, mejor protegidos estarán. Esto no es cierto, pues con ello lo único que se consigue es ver con más dificultad la operación que se realiza, ya que la detención adecuada de las radiaciones nocivas está asegurada para cada grado N y no es necesaria una mayor protección.

Por el contrario, si el N escogido es bajo, dejará pasar demasiada luz, provocando deslumbramiento durante el trabajo, con las subsiguientes molestias, fatiga visual, dolor de cabeza, etc.

**INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD E HIGIENE EN EL TRABAJO**

# CENTRO NACIONAL DE MEDIOS DE PROTECCION

OCULARES CONTRA RADIACIONES DE SOLDADURA.
GRADO DE PROTECCION RECOMENDADO (N)

## SOLDEO Y ACANALADO CON ARCO ELECTRICO

| I Amp. | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ELECTRODOS ENVUELTOS | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| M I G metales pesados | | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| M I G aleacion ligeras | | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| T I G todos los metales | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | |
| M A G | | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| LABRADO CON ARCO/AIRE | | | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |

AYUDANTE DE SOLDADOR Y PERSONAS EN LAS PROXIMIDADES DE LA SOLDADURA N= 12 a 4

## CORTE TERMICO AL PLASMA

| I Amp. | ≤ 150 | 150 - 250 | 250-400 |
|---|---|---|---|
| N | 11 | 12 | 13 |

## SOLDADURA AL MICROPLASMA

| I Amp. | 05-1 | 1-2,5 | 2,5-5 | 5 - 9 | 9 - 15 | 15-30 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| N | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |

## SOLDEO A LA LLAMA

| | l/h .. ACETILENO | | | |
|---|---|---|---|---|
| | ≤ 70 | 70 a 200 | 200 a 800 | > 800 |
| metales pesados | 4 | 5 | 6 | 7 |
| con Flux | 4 a | 5 a | 6 a | 7 a |

## OXICORTE MANUAL

| l/h de $O_2$ ⟷ Ø en mm. | | N |
|---|---|---|
| 900 a 2000 | 10/10 | 5 |
| 2000 a 4000 | 15/10 | 6 |
| 4000 a 8000 | 20/10 | 7 |

Es aconsejable que sea el mismo operario quien, después de comparar el ocular N recomendado con los de valor anterior y posterior, decida cuál es con el que mejor trabaja. Una elección con desviación en más de una unidad del valor recomendado puede ser debido a anomalías visuales del trabajador o a un mal hábito adquirido.

Recalcando que los oculares de protección filtrantes deben ser específicos contra las radiaciones IR o UV respectivamente, a continuación presentamos las tablas orientadoras para su correcta elección.

**RADIACION IR**
**(Hornos, laminaciones...)**

| Temperatura aproximada del emisor (C) | N recomendado |
|---|---|
| 1.050 | 1,2 |
| 1.070 | 1,4 |
| 1.090 | 1,7 |
| 1.110 | 2 |
| 1.140 | 2,5 |
| 1.210 | 3 |
| 1.290 | 4 |
| 1.390 | 5 |
| 1.500 | 6 |
| 1.650 | 7 |
| 1.800 | 8 |
| 2.000 | 9 |
| 2.150 | 10 |

RADIACION UV

| Puesto de trabajo | N recomendado |
|---|---|
| Trabajo de reproducción fotográfica. Emisión de radiación UV no siendo factor importante el deslumbramiento | 1,2<br>1,4<br>1,7 |
| Fuerte emisión de radiación visible y UV. | 2 |
| Terapéutica por rayos UV | 2,5 |
| Lámpara de vapor de mercurio de alta presión | 3 |
| Emisión de radiación UV acompañada de poca radiación visible | 4 |
| Fuerte emisión de radiación UV y visible. Lámparas de vapor de mercurio de muy alta presión | 5 |

## 3. EQUIPOS DE PROTECCION EN SOLDADURA

Es obvio que aunque el ocular filtrante sea el elemento primordial, por sí solo no constituye el equipo de protección completo.

Para la soldadura eléctrica se utiliza la pantalla de soldadores, regulada por la Norma MT-3. Esta consiste esencialmente en un armazón rígido, opaco a todas las radiaciones, en el que, a la altura de los ojos, existe un marco que sirve de soporte a los oculares de protección. Este conjunto posee un sistema para su sujección durante el tiempo de uso.

Las variantes de este equipo se basan principalmente en el sistema de sujección (que puede ser manual, a la cabeza mediante arnés, acoplado a un casco de seguridad, etc.) y en el marco portaoculares. Este puede ser fijo en el armazón o con posibilidad de deslizar o abatir la parte que contiene al filtro, dejando, entre el puesto de trabajo y los ojos, un ocular incoloro como protección contra las partículas desprendidas (en el picado de la escoria, por ejemplo). También el diseño y el material en que se fabrican son factores que hacen considerar a un equipo diferente de otro.

Los equipos de protección personal han de poseer cualidades que son difíciles de valorar por el usuario, ya sea operario o técnico de seguridad. El Ministerio de Trabajo ha sentado, con la Orden Ministerial de 17 de mayo de 1974, las bases legales para que los fabricantes e importadores de estos productos estén obligados a suministrarlos avalados por una marca de homologación, que garantiza sus prestaciones o calidad conforme a los requisitos y ensayos especificados

en las correspondientes Normas Técnicas Reglamentarias del Ministerio de Trabajo.

Es el Instituto Nacional de Higiene y Seguridad del Trabajo, a través del Centro Nacional de Medios de Protección, el órgano encargado de asesorar en materia de controles de verificación y elaboración de las normas técnicas que tienen bajo su campo de aplicación a los equipos de protección personal.

Dada la diversidad de equipos existentes y la imposibilidad material de normalizarlos y verificarlos todos en breve plazo, se comenzó la etapa normalizadora atendiendo aquellos riesgos causantes de la mayoría de accidentes oculares: la soldadura y la proyección de partículas volantes.

Así se han elaborado las normas:

- MT-3 «Pantallas para soldadores».
- MT-18 «Oculares filtrantes para pantallas para soldadores».
- MT-19 «Cubrefiltros y antecristales para pantallas de soldadores».

Con ellas se cubre la protección ocular del soldador frente a las radiaciones y partículas proyectadas durante su trabajo.

La Norma MT-3 fue publicada en septiembre de 1975, y en su contenido se fijan como características principales las siguientes:

- Peso inferior a 600 g.
- Inexistencia de huecos por los que haya paso directo de la luz.
- Acabado mate por su cara interior.
- Inexistencia de paso de corriente en caso de contacto eléctrico fortuito.
- Zona de visión de dimensiones superiores a 45 × 90 mm.
- Indeformabilidad, incombustibilidad, resistencia a la penetración de objetos candentes y opacidad a las UV e IR de los materiales del armazón o cuerpo de pantalla.
- Buen acabado general.

Tambien se incluye la descripción de los ensayos que se efectúan para comprobar estas características.

Si bien en soldadura eléctrica el equipo más adecuado es la pantalla (porque también afectan a la piel de la cara las radiaciones emitidas), para protección en soldadura a la llama puede ser suficiente el uso de gafas provistas de oculares filtrantes.

Para las gafas contra radiaciones no se han elaborado aún las normas MT que las contemplan. Por ello no puede encontrarse ninguna homologada para tal fin. Vamos a referirnos a las diferentes versiones que se encuentran de este equipo.

Una de ellas son las gafas conocidas como «de cazoleta», debido al diseño característico del armazón en que van colocados los vidrios de protección. Aíslan cada ojo por separado, teniendo o no ventilación para evitar en lo posible el empañamiento. El sistema de sujeción suele ser por medio de banda elástica.

Otro modelo es el de gafas de montura integral, conocidas también como «panorámicas». En ellas el ocular es, por lo general, único y la montura está fabricada en material opaco, de rigidez variable. Hay variantes en las que se tiene la posibilidad de abatir una parte del sistema porta-ocular, la que contiene al filtrante, dejando uno incoloro como protección contra impactos.

Por último, aunque la imaginación de los fabricantes ha suministrado multitud de otros diseños, nos referimos a las gafas de montura universal, de diseño similar a las llamadas «de calle». La protección contra las radiaciones de posible incidencia lateral se asegura mediante elementos adicionales fabricados en materiales opacos a ellas. También en este tipo de gafas se ha previsto como variante la posibilidad de abatir los oculares filtrantes, siendo entonces de montura doble.

A continuación se indica la distribución, por sus características más diferenciadoras, de los equipos y elementos de repuesto, homologados hasta hace un año para la protección ocular durante los trabajos de soldadura.

**PANTALLAS PARA SOLDADOR HOMOLOGADAS**

| Tipo de sujección | Tipo de mirilla | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Fija | Abatible | Deslizante | Doble |
| De mano | 24 | 4 | 4 | 1 |
| De cabeza | 48 | 21 | 1 | 2 |
| A casco | 10 | 7 | 0 | 1 |

**CUBREFILTROS Y ANTECRISTALES HOMOLOGADOS**

| | |
|---|---|
| Plástico | 16 |
| Vidrio | 1 |

## OCULARES FILTRANTES PARA SOLDADURA HOMOLOGADOS

| N | |
|---|---|
| 1,2 | 0 |
| 1,4 | 0 |
| 1,7 | 1 |
| 2 | 4 |
| 2,5 | 0 |
| 3 | 4 |
| 4 | 3 |
| 5 | 6 |
| 6 | 4 |
| 7 | 5 |

| N | |
|---|---|
| 8 | 6 |
| 9 | 6 |
| 10 | 8 |
| 11 | 9 |
| 12 | 12 |
| 13 | 6 |
| 14 | 8 |
| 15 | 1 |
| 16 | 0 |

## *BIBLIOGRAFIA*


- Norma MT 3 : «Pantallas para soldadores»
- Norma MT 18: «Oculares filtrantes para pantallas para soldadores».
- Norma MT 19: «Cubrefiltros y antecristales para pantallas de soldadores».
- Norma AFNOR S 77-105 «Utilisation et spécifications de transmission des filtres pour l'ultra-violet».
- Norma AFNOR S 77-106 «Utilisation et spécifications de transmission des filtres pour l'infrarouge».

MINISTERIO DE TRABAJO Y SEGURIDAD SOCIAL

**INSTITUTO NACIONAL DE SEGURIDAD
E HIGIENE EN EL TRABAJO**