

MICROONDAS

JM Pastor Vega y M Martínez Morillo

Las *radiofrecuencias* (RF) se definen, arbitrariamente, como las radiaciones electromagnéticas en la gama de frecuencias de 3 KHz a 300 MHz (tabla 17.1). Bajo el término de microondas se incluyen las radiaciones electromagnéticas incluidas en la banda de frecuencias que se extiende desde 300 MHz a los 3.000 GHz.

Las microondas se parecen, en muchos sentidos, a las ondas de radio, pero son más difíciles de generar, ya que se requieren dispositivos electrónicos especiales, como el magnetrón o clistrón. A diferencia de la onda corta, las microondas pueden focalizarse en forma de potentes radiaciones, sumamente direccionales. En su interacción con la materia, su energía puede ser reflejada, como ocurre cuando inciden sobre superficies metálicas, transmitida con poca pérdida de energía en medios transmisores, como el vidrio, o absorbida por la materia irradiada, lo que origina un aumento de temperatura en ésta.

En medicina física, las microondas se utilizan como método de calentamiento profundo (diatermia). La producción de calor se basa en el hecho de que las moléculas orgánicas y de agua vibran con gran energía (vibración forzada) al ser sometidas a microondas de determinada frecuencia. La fricción producida entre las moléculas en vibración genera rápidamente calor.

Las frecuencias y longitudes de onda de microondas, permitidas para aplicaciones médicas, son las siguientes:

915 MHz (32.7 cm)

433.92 MHz (69 cm)

2.450 MHz (12.25 cm)

En España, la mayoría de aparatos para terapia producen microondas de 2.450 MHz, aunque también existen equipos de 433.92 MHz.

PRODUCCIÓN

La radiación de microondas se genera en un dispositivo electrónico, denominado *magnetron*. Básicamente consiste en un cilindro metálico, en el que hay dispuestas de forma radial una serie de oquedades o cavidades resonadoras, que se comunican con una cavidad central mayor, en cuyo eje existe un filamento metálico. El cilindro se comporta como ánodo y el filamento central como cátodo. El filamento, conectado al polo negativo de una fuente de corriente continua, se pone incandescente y emite electrones por efecto termoiónico. El cilindro se conecta al polo positivo y atraerá a los electrones.

Todo este conjunto se encuentra dispuesto entre los polos de un potente electroimán; el cilindro queda comprendido entre sus polos N y S. Por acción de este potente campo magnético, los electrones, en lugar de ir en línea recta hacia el cilindro, al ser atraídos hacia las oquedades, realizan una trayectoria circular y, al penetrar en ellas, se movilizan en remolino. Dado que toda carga eléctrica crea a su alrededor un campo electromagnético,

todos los electrones en movimiento circular en las oquedades producen radiaciones electromagnéticas –en este caso microondas– de una frecuencia dependiente del tamaño de las oquedades. Mediante un cable coaxial, se transmite la energía a un director o radiador, constituido por una antena en el interior de un reflector.

Tabla 17.1 Bandas de radiofrecuencia

Frecuencia (MHz)	Banda	Descripción
0-0.00003	SELF	Baja frecuencia subextrema
0.0003-0.0003	ELF	Baja frecuencia extrema
0.0003-0.003	VF	Frecuencia de la voz
0.003-0.03	VLF	Frecuencia muy baja
0.03-0.3	LF	Baja frecuencia
0.3-3	MF	Frecuencia media
3-30	HF	Alta frecuencia
30-300	VHF	Frecuencia my alta
300-3.000	UHF	Frecuencia ultralta
3.000-30.000	SHF	Frecuencia superalta
30.000-300.000	EHF	Frecuencia extremadamente alta
300.000-3.000.000	SEHF	Alta frecuencia supraextrema

INTERACCIÓN

La atenuación de las microondas obedece a la ley exponencial de Lambert-Beer:

$$I=I_0.e^{-\alpha x}$$

Siendo:

I_0 : intensidad incidente

I: Intensidad de salida después de atravesar un tejido determinado

x: espesor de tejido atravesado

α : coeficiente de atenuación

La *intensidad* corresponde a la energía emitida por unidad de tiempo (potencia) y por unidad de superficie normal a la dirección de propagación, y se mide en vatios por centímetro cuadrado (W/cm^2). En este caso, la potencia se expresa por unidad de superficie corporal incluida en el campo de irradiación: *densidad superficial de potencia*.

El coeficiente de atenuación (α) es una característica de cada medio. Si dicho coeficiente es muy grande, el medio absorbe mucho y disminuirá la penetración. Por lo tanto, el coeficiente de atenuación y la profundidad de penetración están en razón inversa. Este coeficiente también depende de la longitud de onda y de la naturaleza de los tejidos.

La penetración resulta ser proporcional a la longitud de onda, ya que, con longitudes de onda más pequeñas, el coeficiente de atenuación aumenta. Si el medio es rico en agua (tejido muscular, p. ej.), es mayor la absorción a su nivel. Por lo tanto, influyen también la permitividad dieléctrica, permeabilidad magnética y conductividad eléctrica de los tejidos de acuerdo con la siguiente fórmula;

Siendo:

ω : frecuencia angular = $2\pi f$

μ : permeabilidad magnética

ϵ : permitividad dieléctrica

σ : conductividad eléctrica.

En definitiva, la penetración y la absorción de las microondas en los tejidos biológicos depende, fundamentalmente, de tres factores:

- Longitud de onda. A medida que la longitud de onda disminuye (aumenta la frecuencia), disminuye la penetración.
- Conductividad del absorbente. La energía de las microondas tiende a penetrar tejidos con baja conductividad y a ser absorbida en tejidos con elevada conductividad eléctrica.

Esencialmente, cuanto mayor es el contenido en agua del tejido, mayor es la absorción. Es lo que ocurre en los vasos sanguíneos, músculo, piel húmeda, órganos internos y ojos. En estos tejidos, las moléculas de agua poseen un carácter dipolar; bajo la acción de la energía de microondas, sufren rotaciones a la frecuencia de éstas (fig. 17.2, B). Asimismo, las partículas cargadas (iones) presentes en estos tejidos son sometidas a aceleraciones. Como resultado de las fuerzas de fricción producidas, tiene lugar el calentamiento de los tejidos (fig. 17.2, A).

En los tejidos con escaso contenido en agua, como la grasa subcutánea, se produce una distorsión molecular de las moléculas no polares, que producirá algo de calentamiento, pero nunca de la magnitud que en los casos anteriores (fig. 17.2, C).

- Espesor de grasa subcutánea. Cuanto mayor es, dicho espesor, la penetración se ve disminuida. Para frecuencias del orden de los 2.450 MHz, la relación entre el calentamiento del músculo y el de la grasa tiende hacia uno, pero incluso puede invertirse si la grasa tiene un espesor mayor de 2 cm (fig. 17.3).

La eficacia de un absorbente, para cualquier radiación de una longitud de onda determinada, se mide por la profundidad de penetración en el absorbente. Para un espesor de absorbente igual a $1/\alpha$, la densidad de potencia se reduce por absorción al 13,5% de su valor original. Ello significa que el 86,5% de la energía es absorbida en un espesor igual a $1/\alpha$. Este espesor es la profundidad de penetración (δ), y su valor exacto depende de la frecuencia de la radiación y de las propiedades eléctricas y magnéticas del absorbente.

La velocidad de generación de calor producido en cualquier absorbente es inversamente proporcional al cuadrado de la profundidad de penetración. Así, un tejido con escasa profundidad de penetración, como el muscular, se calentará más rápidamente que un tejido como la grasa, cuya penetración es relativamente mayor, debido a su escaso contenido en grasa. Para 2.450 MHz, las profundidades de penetración en músculo y grasa son 1.67 y 8.1 cm, respectivamente. La tasa de calentamiento en el músculo, para una densidad de potencia dada, es cercana a $(8.1/1.67)^2 = 23.5$ veces mayor que en la grasa.

La distribución de calor producido por la absorción de microondas varía según el tejido considerado. La piel normal seca y la grasa son fácilmente atravesadas por las microondas, mientras que en el músculo el calentamiento es mayor. Sin embargo, no toda la energía llega al músculo, ya que en las diferentes interfases se producen reflexiones, las cuales reducen la intensidad que llega hasta zonas más profundas. Por lo tanto, la pérdida lineal de energía se produce tanto por absorción como por las reflexiones que tienen lugar en las interfases tisulares.

El coeficiente de reflexión viene dado por la relación entre la intensidad incidente y la reflejada (tabla 17.2). El coeficiente de reflexión es elevado en la interfase aire-piel, lo que se traduce en que aproximadamente la mitad de la intensidad incidente se refleja en esta interfase, y sólo penetra un 44%.

Otra consecuencia de la reflexión en las interfases tisulares es que la grasa, inmediatamente interpuesta sobre el músculo, puede calentarse de manera más acusada a lo que sería de esperar. Incluso con espesores de grasa superiores a los 2 cm, el calentamiento puede resultar superior al del músculo.

Teóricamente las microondas son capaces de pasar a través del hueso sólido. No obstante, se produce una importante reflexión en la superficie ósea. Esta energía reflejada puede interferir con la incidente y generar ondas estacionarias, con lo que se produce un aumento de energía en unas zonas y una disminución en otras. No obstante, este hecho puede ser de utilidad clínica, ya que la energía reflejada puede ser absorbida en los tejidos periarticulares.

Con microondas, el rendimiento en profundidad es mayor con bajas frecuencias, lo que deriva del hecho de una menor variación de la energía absorbida por el tejido graso subcutáneo en función del espesor. Sin embargo, con frecuencias más bajas, además de inconvenientes de índole clínica, existe el problema de utilización de radiadores que resultan muy grandes y poco direccionales.

Tabla 17.2 Coeficientes de reflexión para microondas de 2.450 MHz

	Aire	Piel	Músculo	Grasa
Piel	0.56			
Músculo	0.59	0.000.1		
Grasa	0.23	0.18	0.21	
Hueso	0.27	0.14	0.17	0.04

APARATOS

En Europa, la mayoría de unidades de microondas para fisioterapia trabajan con la frecuencia de 2.450 MHz. Esquemáticamente, un equipo de microondas está compuesto por (fig. 17.4):

- Cuerpo central: fuente de energía, electrónica y magnetrón con refrigeración por aire forzado.
- Cable coaxial: para transmitir la energía a una antena.

- Brazo articulado: con doble sistema de giro, tanto en la base como en el cabezal, que sostiene el radiador o director.
- Radiadores o directores: con una superficie curva reflectante, en cuyo interior se encuentra la antena (fig. 17.5). Existen diferentes tipos de directores:
 - Circulares, que producen una distribución de energía tal que el calentamiento es menor en el área central, por lo que son útiles para aplicaciones sobre zonas corporales delimitadas, donde existen prominencias óseas, o en una articulación superficial; la prominencia se coloca en el centro del campo para evitar el sobrecalentamiento.
 - Rectangulares o alargados, cuyo patrón de distribución de energía hace que el calentamiento sea mayor en el centro del campo de radiación; son los más adecuados para el tratamiento de grandes áreas corporales, como las extremidades o la espalda.

El radiador en artesa es un director de campo alargado, en forma de cubeta, para adaptarse a los contornos corporales. Mediante este radiador pueden tratarse adecuadamente zonas como la rodilla y la región escapular.

Existen radiadores especiales de contacto, que se aplican directamente sobre la piel; se utilizan para tratar con bajas dosis zonas muy delimitadas. También hay radiadores para cavidades corporales.

La presencia y distribución del campo de radiación puede verificarse mediante detectores fluorescentes, algunos de los cuales también permiten la detección de la energía reflejada.

El panel de mandos de la unidad dispone de una serie de controles que, básicamente, regulan la potencia y el tipo de emisión, continua o pulsada, en los equipos que lo permitan. Completan el panel: un temporizador, un interruptor de encendido y apagado, y una serie de pilotos testigos de emisión.

La emisión de microondas, en lugar de ser continua, puede hacerse de forma interrumpida o pulsada. Según el modo de pulsación, esto es, la frecuencia y duración de los pulsos y, por tanto, la potencia media suministrada, la sensación de calor disminuye o incluso no se presenta. La emisión pulsada suele seleccionarse, cuando, por necesidades terapéuticas, únicamente puede seleccionarse una dosis baja.

Aún no existen evidencias claras de que el efecto «atérmico» de las microondas posea un significado clínico. Tampoco se ha establecido si una dosis baja de microondas de emisión continua produce los mismos efectos que la misma dosis suministrada en forma de emisión pulsada.

TÉCNICA GENERAL DE APLICACIÓN

Con los equipos actualmente comercializados, se requiere un espacio aéreo entre el aplicador y la piel (fig. 17.6). Esta distancia viene recomendada por el fabricante para cada director, y oscila entre 5 y 10 cm.

El director debe colocarse de forma que la máxima cantidad de radiación incida perpendicularmente en la piel de la zona (ley del coseno). Desviaciones superiores a los 30

° producen reflexiones y pérdidas significativas de energía. Superficies corporales curvadas, e implantes metálicos de igual forma, contribuyen a una convergencia (superficies cóncavas) o divergencia (superficies convexas) de la energía en los tejidos adyacentes (fig. 17.7). Sin embargo, una superficie cutánea curvada puede refractar la radiación y producir la convergencia del haz, lo que puede contribuir a aumentar el rendimiento del calentamiento de tejidos profundos.

Debemos recordar que la radiación adecuada también puede obtenerse no modificando la potencia sino ajustando la distancia (ley del cuadrado de la distancia). En este sentido, pequeñas variaciones en la posición del paciente se acompañan de pequeñas variaciones en la distancia director-superficie, lo que implica aumentos o disminuciones significativas de la densidad de la intensidad.

La potencia que indica el equipo representa la potencia de salida y no indica la energía que penetra en los tejidos, por lo que la dosimetría viene centrada, como en la onda corta, por la percepción térmica subjetiva del paciente. Nunca debe dosificarse esquemáticamente; siempre debe hacerse de forma individual. Para ello, son de utilidad los niveles de dosis sugeridos por Delpizzo y Joyner;

I. Baja: no hay sensación térmica.

II. Media: sensación térmica tenue, pero todavía aparente.

III. Alta: percepción de calor moderada, agradable y perfectamente tolerable.

Como norma general, se recomienda que la dosis no supere el nivel III. Para ello, la potencia debe ajustarse definitivamente transcurridos alrededor de 5 minutos, de forma que la sensación del paciente quede bien establecida. La aparición de molestias o dolor constituye un signo de alarma frente a un sobrecalentamiento. Evidentemente, dado que la dosimetría se basa en la sensación de calor experimentada, la sensibilidad térmica de la zona debe ser comprobada antes de comenzar la aplicación. También ha de tenerse en cuenta que la percepción térmica puede variar en el transcurso de la aplicación, y entre una aplicación y otra.

La duración del tratamiento varía con el estadio evolutivo de la afección. En procesos subagudos o poco evolucionados, suele ser de 5 a 15 minutos, con niveles I o II. Para afecciones crónicas, se recomiendan aplicaciones de 10 a 20 minutos, con un nivel III. Tiempos inferiores a 5 minutos resultan insuficientes, mientras que prolongar la aplicación más de 30 minutos no aporta ningún beneficio, dado el enfriamiento por convección producido por el flujo sanguíneo.

En la tabla 17.3 se resumen las normas y principios fundamentales que hay que tener en cuenta en la aplicación de microondas

- Localizar con precisión la zona que hay que tratar
- Evaluar la sensibilidad de la zona
- Retirar elementos metálicos y apósitos, vendajes o ropas húmedas
- Explicar al paciente la metódica y propósito del tratamiento
- Posicionar correctamente al paciente
- Colocar el radiador a la distancia adecuada, teniendo en cuenta la ley del coseno
- El paciente debe permanecer quieto durante la aplicación
- Aumentar la potencia lentamente, dando tiempo a que el paciente perciba el calentamiento
- Como máximo, debe percibirse un calor moderado y siempre tolerable
- Ajustar el tiempo y la potencia adecuada obtenida
- Mantener la vigilancia del paciente durante la aplicación
- A excepción del paciente, cualquier persona debe mantenerse alejada del aparato

INDICACIONES

Son las propias de la termoterapia:

- Analgesia.
- Relajación muscular (antiespasmódica).
- Aumento del flujo sanguíneo y del metabolismo local (trófica-antinflamatoria).
- Aumento de las propiedades viscoelásticas de músculos, tendones, ligamentos y fibras capsulares.

Mediante la aplicación de microondas, puede lograrse un calentamiento intenso de aquellas partes del cuerpo recubiertas por escaso espesor de grasa subcutánea (articulaciones de mano, muñeca, pie, tendón rotuliano, tendón de Aquiles, músculos superficiales, articulaciones costocondrales y sacroilíacas de individuos delgados).

Son efectivas, especialmente, en problemas musculares álgicos (miofibrositis, contracturas y espasmos musculares que acompañan a muchos procesos en conjunción con estiramientos, movilizaciones y masaje. También en tendinitis y tenosinovitis crónicas en tendones superficiales (rotuliano, Aquiles, flexores y extensores de los dedos de la mano y el pie).

Las articulaciones recubiertas por poco espesor de partes blandas (articulaciones de manos, pies, muñeca, radiocubital superior, esternoclavicular, acromioclavicular, costocondrales y sacroilíacas de individuos delgados) pueden ser calentadas adecuadamente. Sin embargo, las grandes articulaciones (cadera, hombros), con un elevado espesor de partes blandas, no se calientan tan intensamente. Si se quiere actuar sobre la extensibilidad del tejido colágeno, debe utilizarse una dosis cerca de la tolerancia y la zona debe ser sometida a movilización y esto manual o instrumental, inmediatamente de finalizada la aplicación, mientras la temperatura en los tejidos se encuentra elevada.

En estadios subagudos de artritis de articulaciones superficiales, dosis bajas pueden ser beneficiosas para la resolución del edema y de la inflamación.

PRECAUCIONES Y CONTRAINDICACIONES

El mayor riesgo, cuando se aplican microondas, es la aparición de quemaduras. Para ello ha de tenerse en cuenta que:

- Al irradiar, no debe girarse la antena hacia superficies metálicas.
- Hay que evitar la acumulación de gran cantidad de sudor, ya que puede provocar quemaduras superficiales.
- Aunque, en principio, no se precise desnudar la zona, resulta conveniente desnudarla para observar la piel o evitar la sudación excesiva. Hay que tener en cuenta, además, la existencia de tejidos fabricados con fibras metálicas.
- Deben retirarse los vendajes y ropas húmedas de la zona (los vendajes secos pueden ser irradiados). Se evitará la aplicación sobre heridas exudativas y edematosas o con contenido líquido elevado, como un derrame articular.
- Hay que retirar de la zona: joyas, relojes, pulseras y cualquier objeto metálico. No se utilizarán mesas ni sillas metálicas para el tratamiento: serán de madera, recubiertas de tela o plástico.
- Debe evitarse la aplicación en zonas cercanas a implantes o endoprótesis metálicas.

Las contraindicaciones del calentamiento con microondas son las propias de la termoterapia:

- Ausencia o disminución de la sensibilidad térmica.
- Zonas isquémicas, mal irrigadas.
- Testículos.
- Estados inflamatorios agudos e infecciosos (osteomielitis, artritis infecciosas...).
- Zonas con líquido en tensión (derrames articulares, bursitis, edemas, abscesos...).
- Tumores malignos.
- Abdomen y regiones cercanas, en embarazadas.
- Zonas con edema y sangrado reciente (traumatismos recientes) o con tendencia a éste (várices, hemofilia, abdomen durante la menstruación...).
- Placa fisaria en niños, antes de concluir la maduración esquelética.
- Irradiación sobre el cráneo.
- Portadores de marcapasos cardíacos. Cualquier persona que lleve un marcapasos cardíaco debe mantenerse alejada (a más de 4 metros) de la zona donde estén utilizándose unidades de onda corta o microondas.
- Ha de evitarse la exposición sobre los ojos, tanto directa como refleja. Dada la refracción producida por el haz, la radiación puede focalizarse y dañar el cristalino (cataratas). Por ello debe asegurarse que no hay exposición ocular. Cuando sea

necesario, irradiar zonas cercanas a los ojos, deben llevarse gafas protectoras y deben retirarse las lentes de contacto.

En todas estas situaciones, cuando el calentamiento es necesario y no hay contraindicaciones para ello, se utilizarán medios de termoterapia superficial.

Aparte del paciente, ninguna persona permanecerá en línea directa con el haz de radiación; deberá situarse a una distancia mínima de 2 metros del director, ya que la reflexión desde el paciente puede llegar al 50-75% y al 100% desde el metal del aparato.

Es importante mantener alejadas, al menos a 3 metros del aparato de microondas, las unidades transistorizadas, como electroestimuladores, relojes digitales, calculadoras, audífonos, etc., ya que pueden sufrir interferencias y resultar dañadas.

Actualmente, las radiaciones incluidas en esta zona del espectro electromagnético (campos de extrema-baja frecuencia, radiofrecuencia y microondas) han despertado gran interés, por si guardan alguna relación causal con el cáncer. Hasta la fecha, los datos disponibles son confusos, sesgados y de poca consistencia. Por lo que se sabe, la energía de los fotones de estas radiaciones no alcanza el nivel necesario para ionizar las moléculas del organismo y, por consiguiente, para producir mutaciones genéticas.