

Lección 10: Eficiencia en la conversión de energía

Resumen

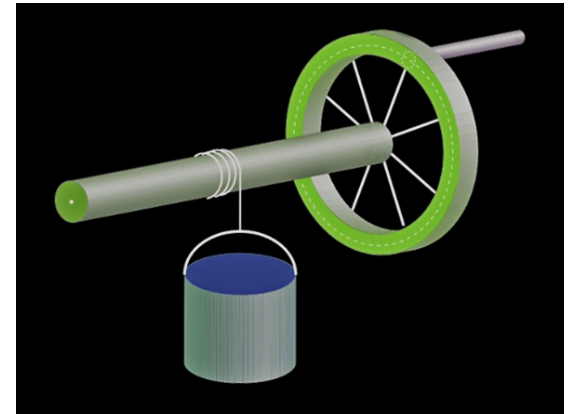
Una conversión de energía funciona de manera eficiente cuando la resistencia interna de una fuente coincide con la resistencia externa de la carga que consume energía. Esta condición se denomina adaptación de impedancia. En el campo de la electrotécnica, el transformador es un típico convertidor de impedancia. Tal adaptación de impedancia es una parte esencial no solo en acústica, mecánica y óptica, sino también en sistemas biológicos.

Tabla de contenidos

- Folio 2-3: Transformadores (1-2)
- Folio 4-6: El transformador en la fusión nuclear (1-3)
- Folio 7: Tokamak y Stellarator
- Folio 8: Estrellas: fuentes de energía con fusión nuclear
- Folio 9: Impedancia
- Folio 10-11: Impedancia de circuitos eléctricos (1-2)
- Folio 12: Impedancia acústica
- Folio 13: Impedancia mecánica
- Folio 14-16: Impedancia óptica (1-3)
- Folio 17: Impedancia biológica

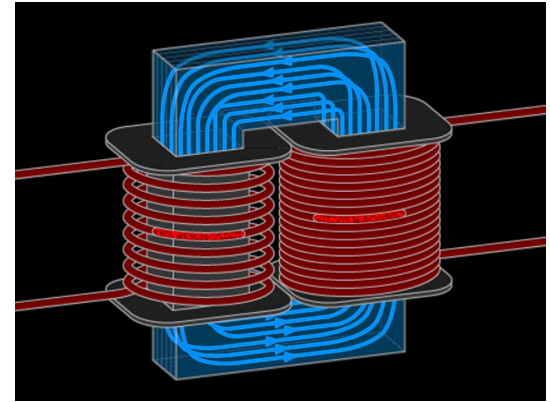
Transformadores (1)

El término transformador no se limita a la electricidad. Esto se refiere en general a las palancas de todo tipo (gato, plano inclinado, pinza de tornillo). Una fuerza (torque) aplicada a la manivela se transforma hacia arriba por la relación de palanca R/r , la velocidad (angular) de un peso se transforma hacia abajo por r/R (R = radio grande, r = radio pequeño). No sólo se transforman voltajes y corrientes eléctricas para determinadas aplicaciones, sino también fuerzas, velocidades, presiones y campos físicos. De este modo, las magnitudes físicas aumentan o disminuyen, en particular para mejorar la transferencia de energía de una fuente a una carga. Este aspecto se refiere a la resistencia o impedancia interna y se conoce como adaptación de la impedancia.



Transformadores (2)

Los transformadores eléctricos, de corriente alterna utilizan la ley de la inducción. El voltaje inducido en la bobina secundaria de un transformador es proporcional al cambio temporal del flujo magnético causado por una corriente alterna en la bobina primaria. Según la ley de conservación de la energía, la máxima energía que se puede extraer es la que se introduce. Así, el voltaje U y la magnitud de la corriente eléctrica I se pueden convertir según el número de vueltas n de las bobinas.



$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{I_2}{I_1} \quad ; \quad P = \frac{U^2}{Z} \quad ; \quad \frac{n_1}{n_2} = \frac{U_1}{U_2} = \sqrt{\frac{Z_1}{Z_2}}$$

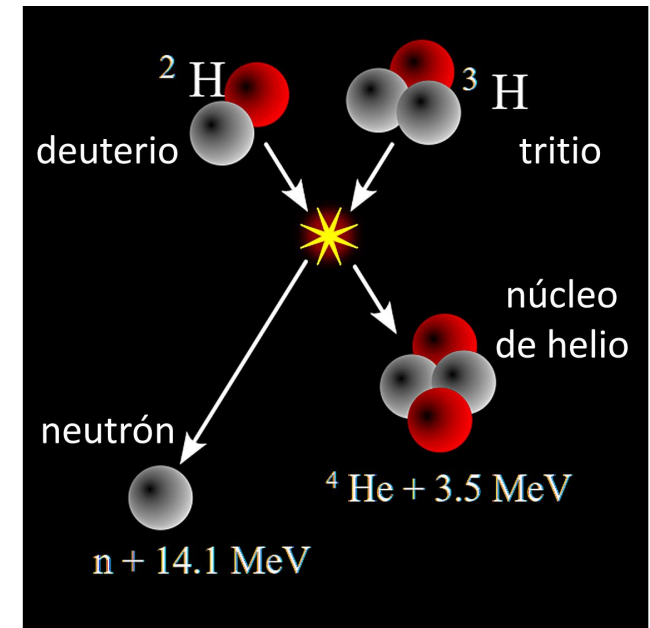
Como la potencia P de un transformador es proporcional al cuadrado del voltaje, las impedancias Z entre los lados primario y secundario se transforman cuadráticamente.

En la mecánica, la fuerza y la velocidad se corresponden al voltaje y a la corriente eléctrica.

El transformador en la fusión nuclear (1)

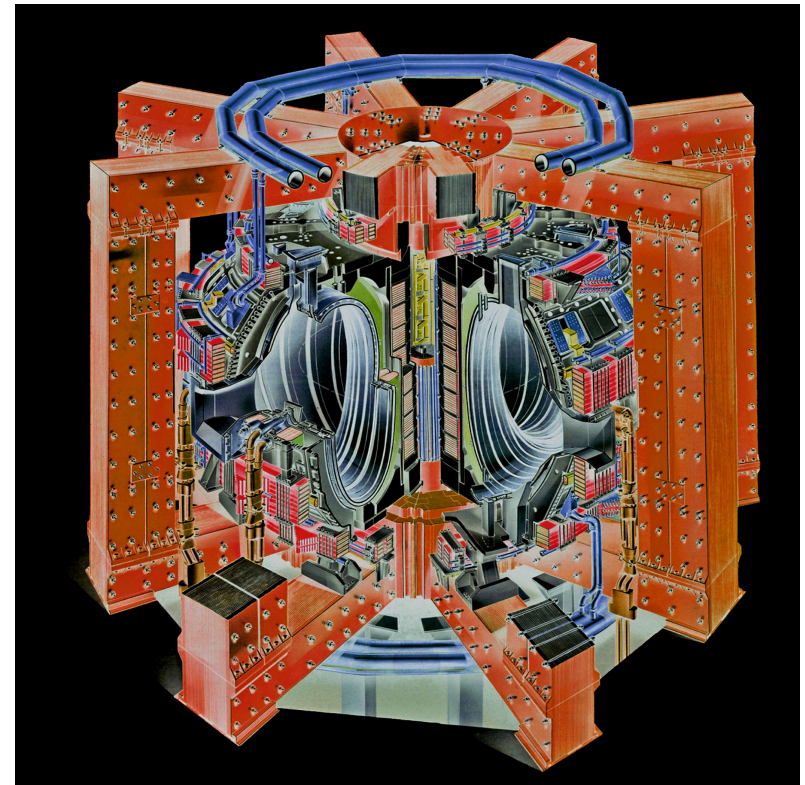
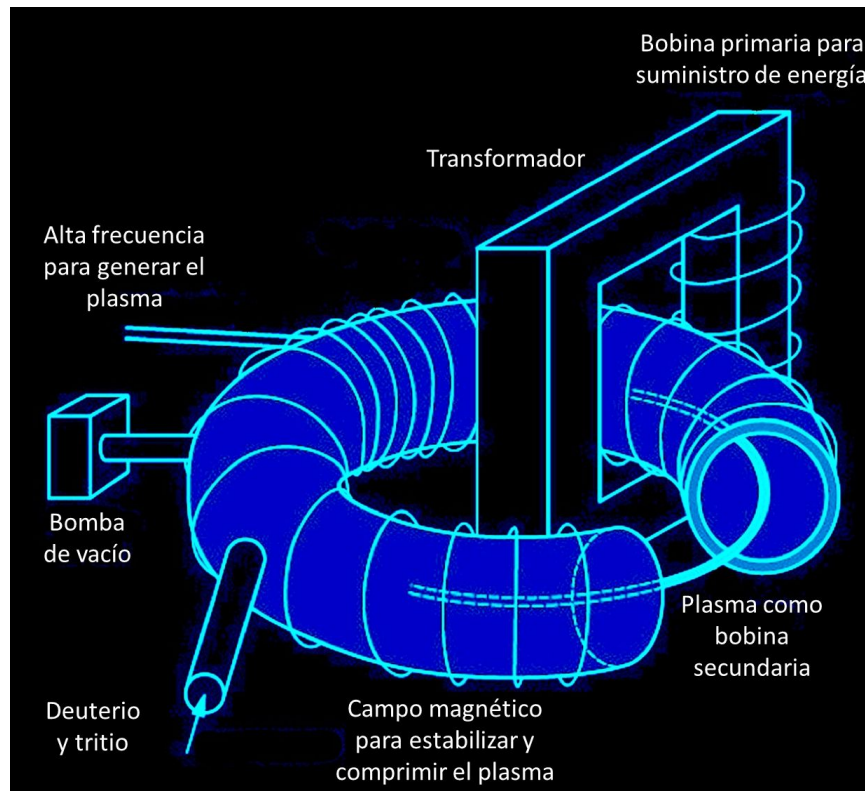
Otro tipo de aplicación para un transformador es la idea de generar energía eléctrica mediante fusión nuclear. La fusión de elementos más ligeros, como el deuterio y el tritio, en un núcleo de helio libera la energía de enlace. La energía cinética de los reaccionantes calienta el recipiente de reacción. Ésta se disipa a través de intercambiadores de calor y se utiliza para generar energía eléctrica, como en cualquier central de energía térmica.

El principio de funcionamiento se basa en un transformador. En el centro de un toroide se sitúa una bobina primaria. La cavidad toroidal se evacua y se llena de hidrógeno a baja presión. Un generador externo de alta frecuencia enciende una descarga de gas, creando un plasma eléctricamente conductor. El plasma así presente constituye la bobina secundaria eléctricamente conductora.



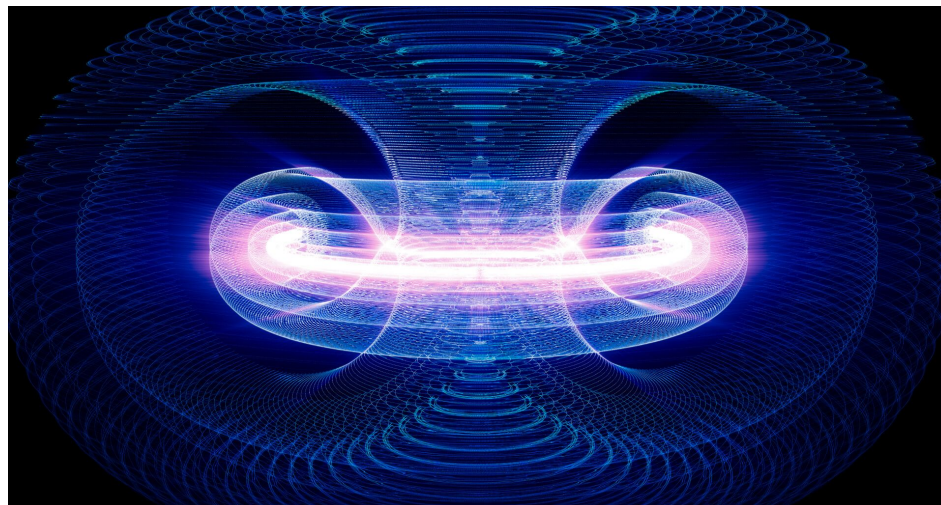
El transformador en la fusión nuclear (2)

En el esquema, la bobina primaria está dibujada sobre el núcleo de hierro exterior para mayor claridad. Al lado hay un diseño anterior para pruebas.



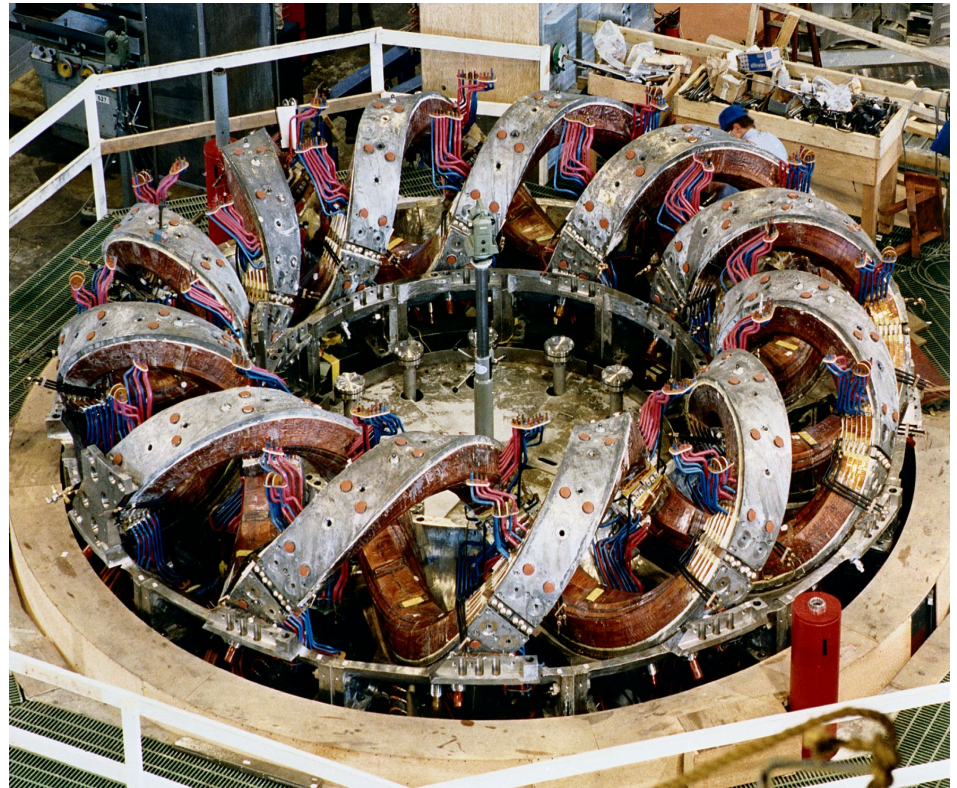
El transformador en la fusión nuclear (3)

Como en cualquier descarga gaseosa, el anillo de plasma también tiene una característica de corriente-voltaje negativa. Esto implica que la intensidad de la corriente aumenta continuamente mientras que el voltaje disminuye, lo que reduce cada vez más la resistencia interna. El plasma ya no puede absorber más energía. Por esta razón, la corriente primaria debe desconectarse después de un breve tiempo de funcionamiento; el confinamiento del plasma se pierde durante la interrupción, la fusión nuclear se detiene y entonces tiene que arrancar de nuevo. Por tanto, un proceso de este tipo no funciona de forma continua, sino pulsada.



Tokamak y Stellarator

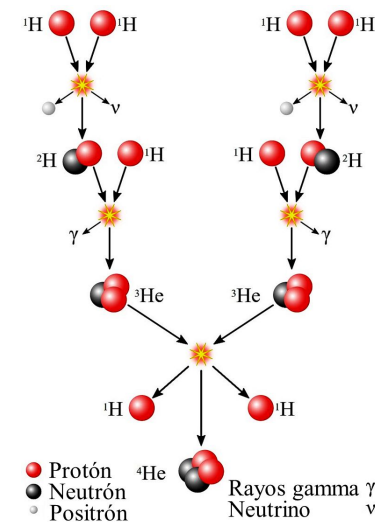
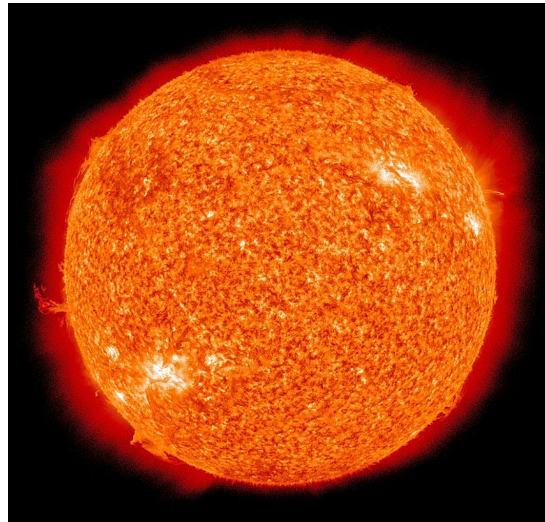
Un reactor de fusión que funciona según este principio también se denomina Tokamak (palabra artificial rusa). Una forma de evitar la corriente anular es diseñar una torsión helicoidal del campo magnético. En este caso, las propias bobinas del campo magnético se torsionan (en forma de la Banda de Moebius) de tal manera que la parte poloidal (efectiva en la sección transversal del anillo) del campo también es generada por las bobinas en lugar de por una corriente inducida en el plasma como en el Tokamak. Este principio de proceso se llama Stellarator (palabra artificial derivada de estrella).



Estrellas: fuentes de energía con fusión nuclear

De este modo, un Stellarator no necesita una corriente que circula en el plasma, que se genera en el Tokamak a la manera de un transformador, y, por lo tanto, en contraste con el funcionamiento pulsado, es directamente adecuado para el funcionamiento continuo.

Sin embargo, sólo las próximas décadas mostrarán si será posible hacer un uso técnico de la fusión controlada tal y como está teniendo lugar en las estrellas donde el proceso protón-protón suministra el 98% de la energía de las estrellas similares al Sol.



Impedancia

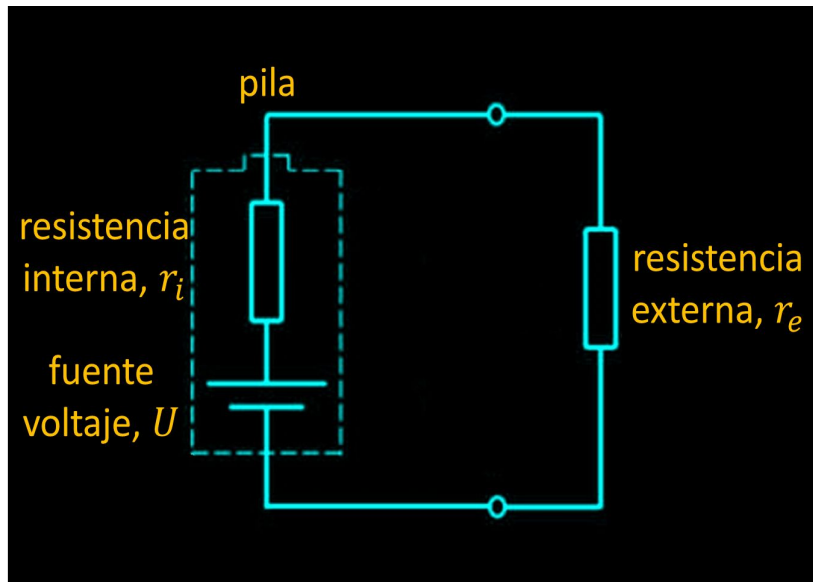
La resistencia se define como la relación entre el voltaje y la corriente eléctrica, que en el caso de un voltaje alterno se denomina impedancia. La impedancia existe en los sistemas eléctricos, ópticos, mecánicos, acústicos y térmicos.

Ejemplos típicos son:

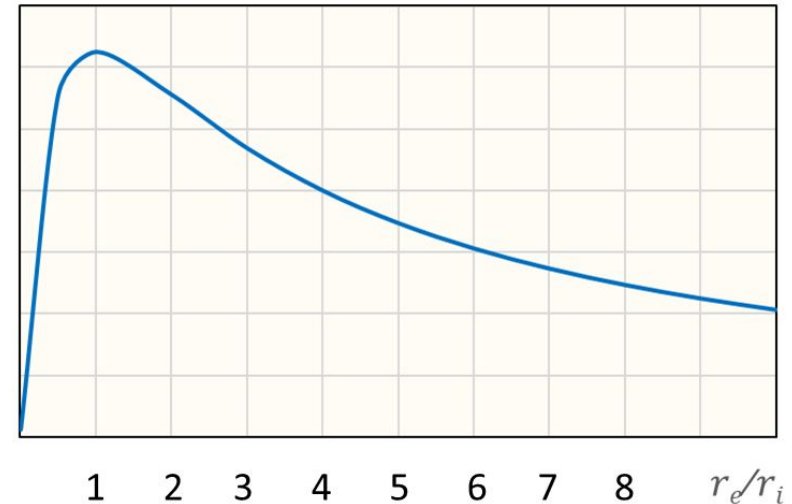
1. Una célula solar para cargar una batería o hacer funcionar una máquina,
2. el accionamiento de la hélice de un barco a la corriente del agua, cuyo retroceso empuja el barco según la ley de conservación del momento,
3. la cuerda vibrante de una guitarra al aire circundante,
4. la radiación de una antena transmisora al espacio.

¿Qué significa la adaptación de la fuente a la carga? Esto puede derivarse de un circuito eléctrico y extenderse de la misma manera para cualquier área.

Impedancia de circuitos eléctricos (1)



Potencia [W]



$$\text{Potencia: } P = U \cdot I = I^2 \cdot r_e = \left(\frac{U}{r_i + r_e} \right)^2 \cdot r_e$$

La solución numérica en lugar de la gráfica para la transferencia de potencia máxima se obtiene por diferenciación $\frac{dP}{dr_e}$ y puesta a cero.

Impedancia de circuitos eléctricos (2)

Regla del producto:

$$\frac{dP}{dr_e} = \left(\frac{U}{r_i + r_e} \right)^2 - 2 \cdot r_e \frac{U^2}{(r_i + r_e)^3} = 0$$

$$0 = \frac{U^2 \cdot (r_i + r_e) - 2 \cdot U^2 \cdot r_e}{(r_i + r_e)^3}$$

$$\rightarrow r_i = r_e$$

La máxima transferencia de potencia sólo puede realizarse si la resistencia interna es igual a la externa o, en general, si las impedancias de la fuente y la carga son lo más parecidas posible. Una adaptación de la impedancia se consigue en los circuitos eléctricos con voltaje alterno mediante la aplicación de transformadores con bobinas adecuadas.

Impedancia acústica

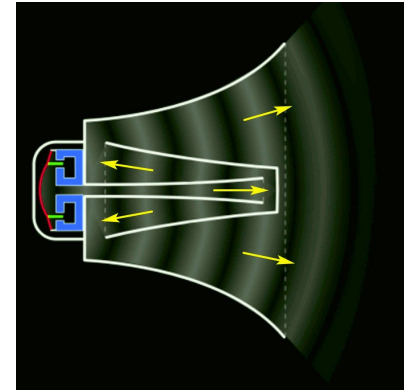
En los instrumentos musicales, la transmisión de las vibraciones producidas al aire es especialmente importante. Una cuerda vibrante con su pequeña sección transversal corta el aire, por así decirlo, sin moverlo mucho. Para mejorar la transmisión de la potencia, el instrumento correspondiente está equipado con un transformador acústico. Para ello se utiliza un cuerpo resonante o simplemente una superficie con dimensiones de la longitud de onda. Con esta adaptación de la impedancia, la transmisión de energía se hace mucho más eficiente.

El transformador acústico de los instrumentos de latón tiene una forma de embudo. Sin un embudo, la discontinuidad con el aire circundante es tan grande que la mayor parte de la energía sonora se refleja internamente.



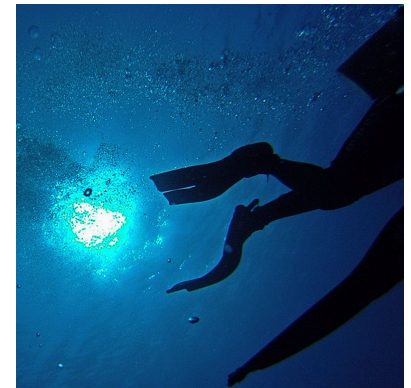
Impedancia mecánica

Un embudo cuya sección transversal aumenta por un factor constante en distancias iguales es particularmente eficaz para mitigar la discontinuidad. Por razones prácticas, la longitud del embudo se dobla, es decir, se acorta, y se utiliza una forma hiperbólica.



Otro ejemplo de adaptación de la impedancia en la naturaleza es el sistema auditivo. Un mecanismo de palanca sirve para transformar el sonido del ambiente sobre la membrana de la cóclea en el oído interno.

La forma de moverse en el agua también es bien conocida. La transferencia de energía en la natación es mucho más eficiente con las aletas en los pies.



Impedancia óptica (1)

Cuando una onda se encuentra con otro medio al propagarse, la velocidad de la onda cambia y se genera una reflexión. La intensidad reflejada (amplitud o intensidad) depende del tamaño de la discontinuidad, es decir, del salto de impedancia. En la óptica, la luz se refleja parcialmente al pasar del aire al vidrio. Eliminar la reflexión es importante cuando sólo se dispone de una cantidad limitada de energía. La atenuación de este salto de impedancia se consigue con una capa no reflectante. Las capas finas con una longitud de recorrido óptico de $\lambda/4$ cumplen la función del convertidor de impedancia. En microondas y la óptica, esto también se conoce como un transformador de cuarto de onda. Se trata de un medio con una longitud de $\lambda/4$ y una impedancia que es la del promedio geométrico de las dos impedancias que hay que igualar. En el caso de la luz, esto está representado por el índice de refracción. La capa no reflectante hace que las reflexiones parciales en ambas interfaces se anulen por interferencia. Así, se consigue una transparencia del 100% para una determinada longitud de onda.

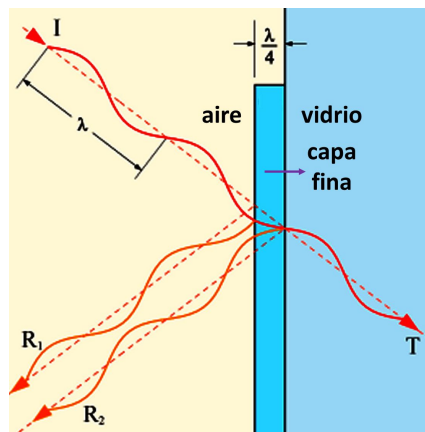
Impedancia óptica (2)

Para una interferencia destructiva completa, las amplitudes o intensidades deben ser iguales y en oposición de fase ($\lambda/2$). Lo siguiente se aplica a los 3 índices de refracción:

$$n_{\text{aire}} < n_{\text{anti-reflejante}} < n_{\text{vidrio}}$$

Condición del índice de refracción del revestimiento para la interferencia destructiva:

$$n_{\text{anti-reflejante}} = \sqrt{n_{\text{aire}} \cdot n_{\text{vidrio}}}$$



Impedancia óptica (3)

Cuando la luz incide en un medio ópticamente más denso, se produce un cambio de fase adicional de $180^\circ (= \lambda/2)$. Como el salto de fase se produce en ambas interfaces, el efecto se compensa mutuamente.

El resultado puede confirmarse calculando las intensidades reflejadas. Cuando la luz incide perpendicularmente sobre una superficie, la intensidad reflejada (=coeficiente de reflectancia) es:

$$R = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$

El índice de refracción ideal de la capa fina se calcula con

$$n_{aire} = 1 \quad ; \quad n_{vidrio} = 1.5 \quad \rightarrow \quad n_{capa\ no\ reflectante} = 1.22$$

Aproximadamente, $MgCl_2$ o criolita, Na_3AlF_6 , con $n \approx 1.3$ es adecuado como material.

Impedancia biológica

La impedancia tiene importancia en la adaptación de líneas de alta frecuencia, pero también en la propagación de ondas en el espacio libre. Por ejemplo, si la impedancia de entrada de un dispositivo no coincide con la impedancia de la línea, se producen reflexiones que reducen la transmisión de energía eléctrica.

El análisis de impedancia bioeléctrica se aplica para estimar la composición del cuerpo, en particular la grasa y la masa muscular. La mayor parte del agua corporal se almacena en los músculos. Cuando una pequeña corriente eléctrica fluye a través del cuerpo y se mide el voltaje, se puede calcular la impedancia del cuerpo. Por lo tanto, si una persona es más musculosa tiene más agua en el cuerpo, lo que corresponde a una menor impedancia.

La transmisión de energía sólo es eficaz si la impedancia de la carga se ajusta a la impedancia interna de la fuente. Este principio de correspondencia es generalmente válido tanto en la naturaleza como en todos los sectores de la tecnología.