

# Teletransmisión de energía óptica no guiada

Jorge de Dios Domínguez\*

## Resumen

Desde el comienzo de la Revolución Industrial la transmisión de la energía eléctrica entre dos puntos ha estado dominada por las líneas de alta tensión, que están compuestas principalmente por gruesos cables de cobre por los que circula el fluido eléctrico. Con la aparición de la fibra óptica y el desarrollo de emisores y detectores de potencia luminosa, el camino para la transmisión de ésta por medios guiados y por medios no guiados como la vía atmosférica ha quedado preparado. A través de la presente investigación pretendemos mostrar las ventajas y los alcances de estas nuevas propuestas para la conducción y la transmisión del potencial eléctrico.

## Abstract

Since the beginning of the Industrial Revolution, the transmission of electrical energy between two points has been dominated by the use of high tension lines. Electrical currents have circulated through these lines, composed mainly of thick copper cables. Presently, with the appearance of fiber optics and the development of transmitters and receivers of electrical power, the modes of transmitting this energy via guided mediums and by unguided mediums -such as the atmosphere- have been created. We intend to show in this study the advantages and capabilities of these new elements for the conduction and transmission of electrical power.

## Introducción

La transmisión de energía eléctrica entre dos puntos ha sido un tema de gran importancia a partir de que surgió la necesidad de transportarla en grandes cantidades desde el sitio de su producción hasta los puntos de su consumo.

El problema se reduce a abastecer de energía eléctrica una gran zona sin tener grandes pérdidas en las secciones de transporte para obtener un alto rendimiento. El desarrollo de los conductores metálicos, que presentan una baja resistencia al paso de la corriente, permite la distribución de energía eléctrica a amplias zonas en todo el mundo, pero aún así existen importantes pérdidas por la propia estructura de los conductores (pérdidas térmicas) y por la alta sensibilidad que presentan ante las radiaciones electromagnéticas.

La creciente evolución del rendimiento en los convertidores electroópticos, fotodiodos y células solares dista de ser cercana a la unidad, pero se prevé una considerable mejora año tras año. Las fuentes ópticas de gran potencia, los diodos láser, son capaces de producir hasta 5 mw de potencia por centímetro cuadrado, lo que no deja de ser una

cantidad de potencia elevadísima y susceptible de poder ser transportada y aprovechada como energía eléctrica. El tercer elemento es el medio de transmisión. La luz se puede transportar hoy en día mediante dos canales: la atmósfera y la fibra óptica. Las ventajas de todo esto respecto a los medios de transmisión convencionales son: velocidad en el transporte, inmunidad frente a radiaciones electromagnéticas de las que estamos completamente rodeados, seguridad, fiabilidad y menor peso de las instalaciones con el menor costo de transporte y mano de obra que ello conlleva.

En este artículo pretendemos dar una perspectiva actual sobre el estado del arte de los distintos componentes que integran un sistema de teletransmisión de energía óptica utilizando como medio de transmisión la atmósfera, dejando para otra ocasión la teletransmisión guiada, lo que implicaría utilizar como medio de transmisión la fibra óptica.

## 2. Componentes del sistema

Los componentes de un sistema de transmisión de energía óptica no guiada son el emisor óptico, LED o láser, el receptor conversor electroóptico, fotodiodo o célula solar y el medio de transmisión que en este caso por tratarse de transmisión no guiada es la atmósfera.

---

\* Profesor-investigador de tiempo completo de la UTM.

Tanto si se trata de transmisión guiada como de no guiada, los emisores y receptores pueden ser los mismos, lo que cambia en cada caso es el medio de transmisión por lo que empezaremos por caracterizar la atmósfera para pasar después a los diferentes tipos de emisores y receptores posibles.

### 3. Pérdidas: atenuación atmosférica

Las pérdidas en cualquier sistema de transmisión suelen venir provocadas por el medio de transmisión que es el elemento atenuador que incide negativamente en el sistema, pudiendo considerarse al emisor y al receptor como elementos positivos para la transmisión, ya que no introducen pérdidas significativas.

En el caso de los sistemas de transmisión no guiados las pérdidas son provocadas principalmente por la atmósfera en forma de fenómenos de "absorción" y "dispersión". La absorción se debe a que una parte de la potencia transmitida se pierde como consecuencia de la captación por el vapor de agua y el dióxido de carbono presentes en la atmósfera, mientras que la dispersión se debe a las partículas de polvo y gotas de agua que actúan como obstáculos del haz a lo largo del trayecto de propagación. A estos dos fenómenos se une otro de no menos importancia: la "refracción".

La absorción depende del contenido en vapor de agua y dióxido de carbono del aire a lo largo del trayecto de transmisión. Este contenido depende a su vez de la humedad y de la altitud. La siguiente figura representa una medida ya clásica de la absorción atmosférica (o de la transmitancia) a nivel del mar realizada por Gebbie en 1951.<sup>1</sup>

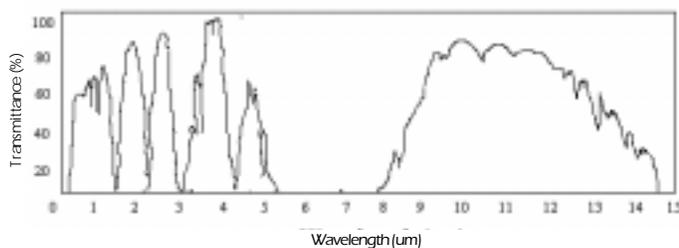


FIGURA 1

<sup>1</sup> *Optical Communications Systems*. Prentice-Hall Inc. John Goward. 1984

Se puede observar la existencia de intervalos de longitud de onda en los cuales la transmitancia es muy elevada y pueden ser considerados ventanas de transmisión atmosférica, o sea, longitudes de onda elegibles para realizar una transmisión de energía óptica con la atmósfera como medio de transmisión.

Los intervalos más interesantes son:

0.2 -1.2  $\mu\text{m}$ ; 1.5 -1.8  $\mu\text{m}$ ; 2 -2.5  $\mu\text{m}$ ; 3 -4  $\mu\text{m}$ ; 8 -14  $\mu\text{m}$ .

La dispersión atmosférica muestra una mayor variabilidad que la absorción. En este caso hay que distinguir dos fenómenos atmosféricos semejantes, pero que actúan de distinta manera produciendo efectos de dispersión claramente diferenciados: niebla y neblina.

Cuando se soportan condiciones de neblina, la principal causa de dispersión es la presencia de partículas de polvo predominantemente de dimensiones en las submicras y por lo tanto pequeñas en comparación con la longitud de onda. La consecuencia es un predominio de las pérdidas de Rayleigh, reduciéndose rápidamente el nivel de atenuación para altas longitudes de onda.

Bajo condiciones de niebla, la dispersión es provocada principalmente por gotas de agua, las cuales tienen un diámetro entre 1 micra y 100 micras. La atenuación en este caso vuelve a ser variable con la longitud de onda, pero la dispersión comienza a ser confundida con la absorción de vapor de agua que en presencia de niebla es muy alta y como consecuencia de ello se puede llegar a elevados niveles de atenuación que tanto para comunicaciones ópticas como para el caso que nos ocupa son claramente perjudiciales.

Es importante señalar también que las gotas de agua procedentes de la lluvia con dimensiones cercanas a las decenas de milímetros pueden dar lugar a ambos fenómenos a la vez, es decir, al de absorción y al de dispersión.

Con respecto a la refracción, la causa principal que da lugar a su aparición es la variación de temperatura atmosférica a

lo largo del trayecto de transmisión. El efecto que produce en el sistema es un aumento o disminución de la divergencia del haz y por lo tanto una variación continua de los niveles de energía recibidos en el receptor.

Para ilustrar el tema de la presente investigación se exponen a continuación cuatro gráficas extraídas del programa PCTRAN. Este programa diseñado por la NASA es capaz de calcular la Transmisividad de la atmósfera en un enlace óptico no guiado para distintas distancias emisor-receptor y para diferentes condiciones atmosféricas.

En todas las gráficas se ha supuesto una altitud media de 600 metros y un modelo atmosférico U.S.79 muy semejante a las condiciones atmosféricas de la República Mexicana.

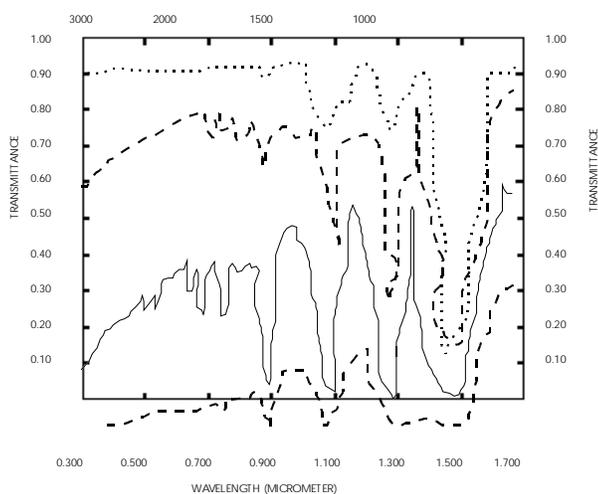


FIGURA 2

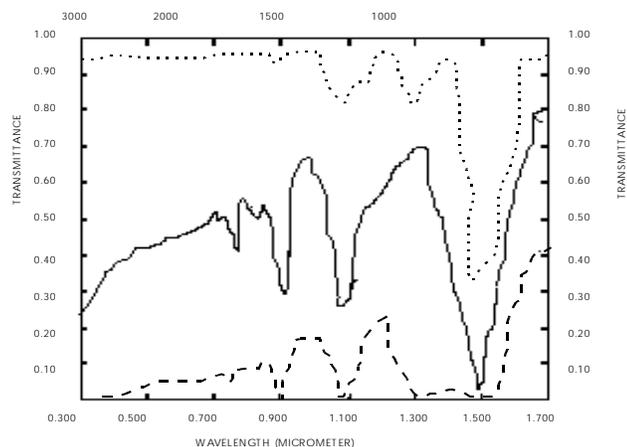


FIGURA 3

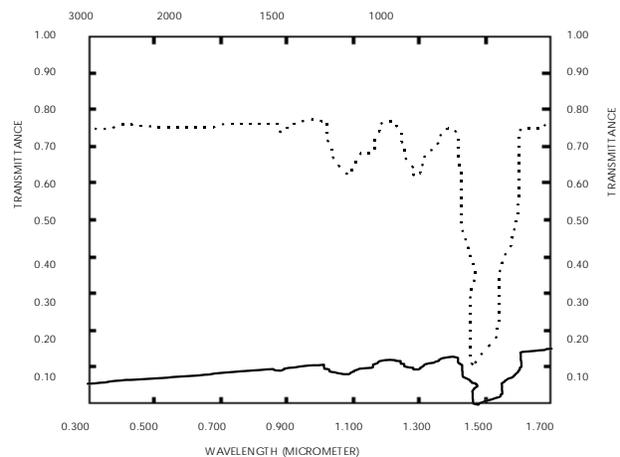


FIGURA 4

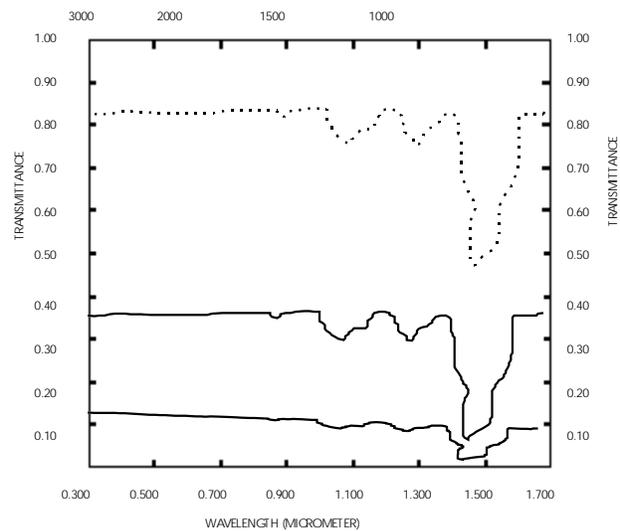


FIGURA 5

Las gráficas anteriores nos muestran varios puntos interesantes. En primer lugar que las ventanas atmosféricas de la gráfica de Gebbie coinciden prácticamente con las zonas de máxima transmisividad en las gráficas extraídas del PCTRAN, tanto para ambientes rurales como urbanos. Las ventanas están entre 300 nm y 1300 nm y de 1500 nm a 1700 nm. En segundo lugar, cuando se aumenta la distancia del enlace, las longitudes de onda del espectro visible (300-700 nm) sufren una mayor atenuación que las longitudes de onda del infrarrojo tanto para ambientes rurales como urbanos, además se confirma que las condiciones climáticas adversas (lluvia, niebla, gotas en suspensión, etc) provocan una disminución en la trans-

mitancia para cualquiera de las ventanas de propagación, presentando todas las gráficas un pico considerable de atenuación en 1350 nm y picos moderados a 750, 900 y 1100 nm.

Otro dato que proporcionan las gráficas aparece en las figuras 3 y 4. Se observa que con mayores distancias de enlace la transmitividad es menor. Ahora bien, la pendiente de la curva es cada vez mayor mientras alejamos emisor y receptor para longitudes de onda entre 300 y 700 nm., mientras que para longitudes mayores de 1450 nm la curva no se ve afectada más que en una reducción lógica de la transmitividad, pero con la misma proporcionalidad para todas las longitudes de onda del intervalo. Todo esto es propio tanto para ambientes rurales como urbanos, lo cual nos indica la necesidad de dimensionar las transmisiones para longitudes de onda por encima de 1450 nm en la atmósfera.

Por otro lado, para distancias menores de 100 metros, esta pendiente en las longitudes de onda pequeñas no sufre distorsión alguna como se puede observar en la figura 6.

Otro dato de interés es que no es aconsejable la utilización de las longitudes de onda comprendidas entre 1350 y 1450 nm para realizar transmisiones, ya que en todos los casos para distancias mayores de 10 metros la transmitividad está por debajo del 50 %.

#### 4. Emisores y receptores

Las fuentes capaces de generar energía óptica disponibles en el mercado son Láser, LED y focos convencionales. Para el caso que nos ocupa, a saber, la transmisión de energía óptica por la atmósfera y su posterior conversión a eléctrica, el Láser que es capaz de generar potencias en el orden de los megavatios sería un elemento imprescindible, pero depende de la aplicación. La utilización del Láser en aplicaciones móviles donde emisor, receptor o ambos estén en movimiento, presenta una desventaja importante y es que para el total aprovechamiento de la energía, el Láser debe pre-

sentar un perfecto alineamiento con el receptor debido a la concentración de su energía en un haz muy estrecho, prácticamente puntual, por lo que la utilización del Láser se restringe únicamente a aplicaciones fijas, es decir, cuando emisor y receptor puedan presentar una perfecta alineación.

En el caso del LED y el foco convencional, los ángulos de divergencia que presentan permiten abarcar zonas más amplias, por lo que se aconseja su utilización para aplicaciones móviles. Además, el precio de un Láser en el mercado continúa siendo mucho mayor que el del foco y el del LED. Esta es una razón para no contar con el Láser en un sistema móvil de teletransmisión de energía.

Limitando un poco más las opciones existentes, el LED (diodo electroluminiscente) no es capaz de generar potencias ópticas elevadas. Su utilización en comunicaciones ópticas para transmisión de datos le permite al LED irradiar potencias de unos 100 mw que a distancias superiores de 10 metros quedan reducidas a unos pocos microvatios, por lo que no se aconseja su utilización para transmitir energía por medios no guiados.

Estas limitantes nos dejan la opción de utilizar focos convencionales para transmisión de energía por la atmósfera debido a dos factores importantes: la capacidad de generar potencias relativamente altas y la divergencia considerable que presentan. Ello los hace utilizables en aplicaciones móviles.

En un sistema de transmisión óptica, la elección de la longitud de onda de trabajo es un parámetro fundamental que condiciona muchas de las características eléctricas y ópticas del sistema. Por un lado, nos sitúa en una zona del espectro óptico con una transmitancia determinada y, por otro lado, se encuentra asociada a la energía de la banda prohibida de un determinado material semiconductor, que sería capaz de detectar dicha energía.

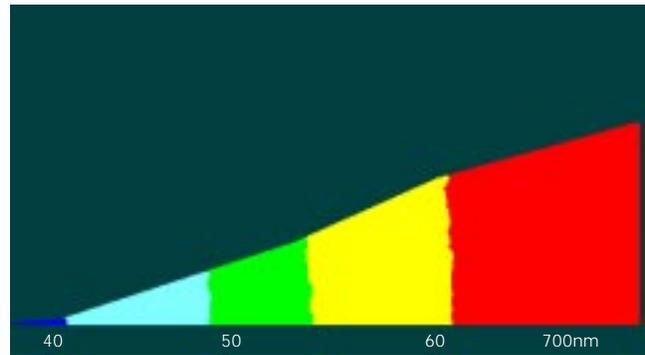
Para la detección de energía las comunicaciones ópticas (de moda desde la década de los 80 's) han producido fotodiodos tan sensibles a la luz que son capaces de detectar

pequeños pulsos de luz y reproducirlos en forma de pulsos eléctricos. El desarrollo de estos fotodiodos ha venido marcado por la utilización de la fibra óptica como medio de transmisión en comunicaciones ópticas y las características ópticas de las fibras existentes han fijado las longitudes de onda de trabajo<sup>2</sup> en el infrarrojo cercano, lo que quiere decir que los fotodiodos existentes son capaces de convertir en electricidad la energía óptica a longitudes de onda superiores a los 700 nm.

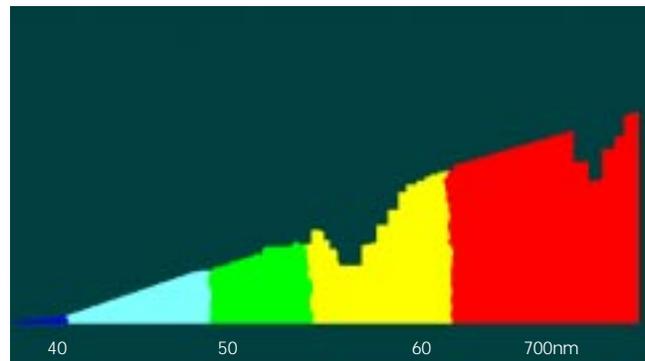
En primera instancia podría parecer imprescindible la utilización del fotodiodo como receptor en el sistema de teletransmisión de energía óptica; sin embargo, éste presenta una desventaja grande cuando se trata de recibir energía y no datos. Los fotodiodos están diseñados para comunicaciones ópticas; los datos en una comunicación de este tipo vienen definidos por pulsos de luz de muy baja potencia, y así como el umbral de detección de un fotodiodo es muy bajo, éste entra en saturación muy rápido cuando le llega una gran cantidad de potencia por lo que su utilización también queda descartada.

Dicho lo anterior, nos queda únicamente la opción de utilizar células solares como receptoras en una transmisión de este tipo. Las células solares no son tan exigentes con la longitud de onda como los fotodiodos y prácticamente la totalidad de las células existentes son capaces de convertir en electricidad toda la radiación óptica que reciben entre 300 nm y 1200 nm., además no presentan síntomas de saturación cuando inciden sobre ellas potencias elevadas. Estos factores convierten a las células solares en receptores ideales para sistemas de transmisión de energía óptica.

Por otro lado, la capacidad que presenta la célula solar para recibir radiación luminica entre 300 nm y 1200 nm la hace compatible con focos incandescentes y halógenos de hasta 100 vatios que son capaces de emitir grandes porcentajes de potencia en esas longitudes de onda tal como lo demuestran las gráficas del catálogo de fabricante que se presentan a continuación.



LUZ INCANDESCENTE



CONCENTRA R95 NATURA

FIGURA 6

## Conclusiones

Podemos ahora plantear con datos más precisos lo referente a un sistema completo de teletransmisión energética no guiada.

Considerando a la atmósfera como medio de transmisión, hemos comentado (en el apartado 2) los mecanismos de pérdidas debido a aquélla y establecimos intervalos de alta transmitancia claramente diferenciados en el espectro atmosférico, de los cuales el intervalo 200 - 1200 nm parece el adecuado debido a su compatibilidad con las longitudes de onda manejadas en emisores y receptores.

El emisor elegido es el foco convencional, ya sea incandescente o halógeno. Medidas experimentales con focos halógenos de automóvil han dado resultados sorprendentes en los que el 80 % de la energía óptica que el foco genera se presenta en el infrarrojo. La siguiente gráfica corrobora lo

<sup>2</sup> *Fibras Ópticas, Tecnología, Aplicaciones y Proyectos*, Grupo Editorial Jackson, M. Morini. 1990.

anterior al mostrar que casi el total de la energía se genera por encima de 700 nm.

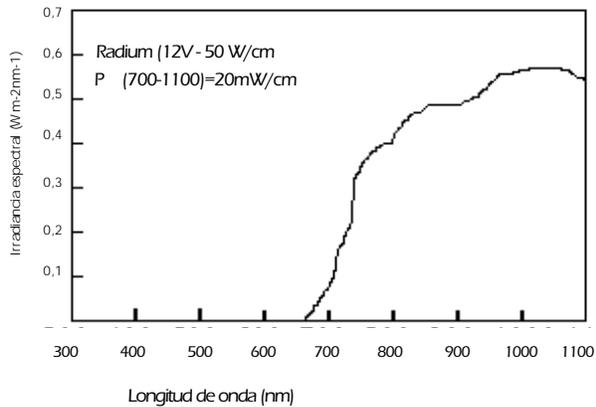


FIGURA 7

El receptor elegido es la célula solar y, entre la amplia gama de células existentes, la célula de Silicio es barata y presenta una alta eficiencia, además trabaja en las longitudes de onda comprendidas entre 300 y 1100 nm.

Como conclusión general presentamos a continuación una gráfica que engloba todas las posibilidades existentes para conjugar los tres componentes esenciales en un sistema de teletransmisión de energía óptica no guiada. El objetivo de esta gráfica es servir de guía para cualquier sistema

de este tipo que se quiera realizar. El funcionamiento de la gráfica es práctico, ya que eligiendo la longitud de onda de trabajo, los tres componentes restantes del sistema quedan definidos automáticamente.

Emisores y Detectores

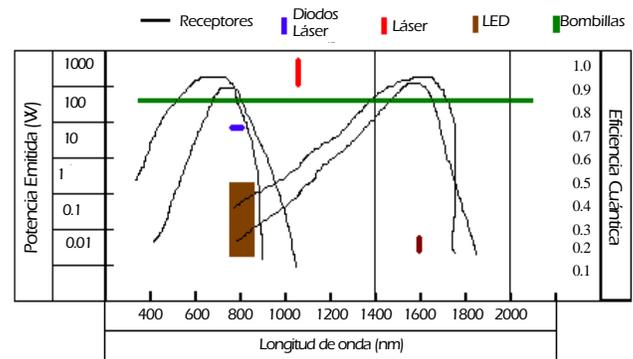


FIGURA 8

Por último, cabe mencionar que este artículo pretende ser un punto de partida en el campo de las aplicaciones de la transmisión de energía luminosa no guiada y concretamente en el campo de la telealimentación, que es una aplicación de gran importancia para el futuro si la mejora en la eficiencia cuántica de los materiales semiconductores y la producción de fuentes luminosas de gran potencia se hace realidad 

### Bibliografía

*Optical Communications Systems*. Prentice-Hall Inc. John Gowa. 1984  
*Fibras Ópticas, Tecnología, Aplicaciones y Proyectos*, Grupo Editorial Jackson, M. Morini. 1990.

*Photovoltaic Receivers for laser beamed Power in Space*, Geoffrey A. Landis, 22nd IEEE. Photovoltaic Specialist Conference, Las Vegas 1991.  
*Satellite Eclipse Power by Laser Illumination*, Geoffrey A. Landis, Acta Astronautica, Vol 25, No.4, pp 229-233, 1991.