

Iluminación en zonas aisladas de la red eléctrica

Gautam S. Dutt y Mario Brugnoli

Grupo de Energía y Ambiente (GEA), Depto. de Electrotecnia
Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires
Paseo Colón 850, (1063) Buenos Aires
Tel.: (01) 342-2765/4872, int. 361; fax: (01) 331-0129
email: postmaster@gea.uba.ar

Resumen

Hoy en día, alrededor de 2 mil millones de personas en el mundo carecen de luz eléctrica, utilizando para alumbrarse lámparas de queroseno u otros combustibles. Estas producen bajos niveles lumínicos y además tienen un rendimiento mucho menor que la lámpara eléctrica menos eficiente. La electrificación para la iluminación y otros usos puede mejorar la calidad de vida y al mismo tiempo reducir el consumo de combustibles no renovables. Se presenta una comparación de los costos de la generación eléctrica descentralizada como alternativas a la extensión de la red. Para viviendas aisladas de la redes de la electrificación rural, también existen posibilidades para extender la iluminación eléctrica. Una es la biodigestión de las aguas cloacales y la generación eléctrica utilizando el biogas. Otra es a través de lámparas fluorescentes operadas por baterías recargables, en donde éstas se recargan con celdas fotovoltaicas o pequeños equipos eólicos.

1. Lámparas a combustible vs. lámparas eléctricas

Uno de los principales beneficios iniciales de la electrificación ha sido la provisión de la luz eléctrica. Tradicionalmente, la electrificación se ha basado en la extensión de la red, y en países de baja densidad de población cubre sólo una pequeña parte del territorio en zonas próximas a las ciudades. En la República Argentina, por ejemplo, según los datos del Censo de la Población de 1980, el 14% de la población nacional no estaba conectada a la red y, debido a su ubicación, alrededor del 5% siempre quedaría fuera del alcance de la red. [Yanes et al., 1989] Si consideramos el porcentaje de superficie no abastecida la cifra es mucho mayor. La población sin alimentación eléctrica es mucho mayor en los países pobres. Hoy en día, alrededor de 2 mil millones de personas en el mundo carecen de luz eléctrica [Efforsat y Farcot, 1994], utilizando, para alumbrarse lámparas de queroseno u otros combustibles. El cuadro 1 compara las características técnicas de distintas fuentes no eléctricas de luz con algunas lámparas eléctricas. El flujo luminoso va desde 12 lúmenes (lm) para una vela hasta 400 lm para una lámpara de queroseno a camisa, mientras una lámpara incandescente de 60 W emite 730 lm. El rendimiento lumínico (o eficacia) va desde 0,1 lúmen por watt (lm/W) para una lámpara de queroseno a mecha hasta 56 lm/W para una lámpara fluorescente compacta de 16 W; la eficacia de esta última es casi 600 veces mayor.

Cuadro 1. Comparación técnica de algunas fuentes de luz.

| Fuente lumínica (1) | Flujo luminoso (lúmenes) | Color (2) | Eficacia (lm/W) | Consumo específico (kg/klm-h) | Consumo de combustible kg/h |
|---|--------------------------------|--------------|--------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Vela | 12 | excelente | 0,2 (3) | 0,5 (4) | 0,006 |
| Queroseno, con mecha | 40 | excelente | 0,8 | 0,8 | 0,032 |
| Queroseno, con camisa "sol de noche" | 400 | pobre | 0,8 | 0,1 | 0,040 |
| 60 W, incan-descente | 730 | excelente | 12 | 0,021 (5) | 0,016 |
| 16 W, fluorescente | 900 | bueno | 56 | 0,005 | 0,004 |

Notas:

1. Fuente: van der Plas, R., 1988; original incluye otras fuentes lumínicas no eléctricas -- lámpara de carburo, de butano y de nafta a camisa;
2. El índice de rendimiento de color (IRC) es difícil de medir para las fuentes no eléctricas, según van der Plas; por ello, se indica aquí el color en una escala cualitativa.
3. Se ha calculado la potencia de las lámparas no eléctricas tomando el poder calorífico superior del combustible.
4. Se expresa el consumo específico del combustible en términos de kg de combustible necesario para cada 1000 lumen-horas de luz (kg/klm-h).
5. Para fuentes eléctricas se supone una eficiencia de conversión del 30% del queroseno a la energía eléctrica; se expresa el consumo específico y consumo de combustible en términos de la cantidad equivalente de querosén.

Del cuadro 1 observamos que las lámparas en base a combustibles generalmente producen bajos niveles lumínicos y además tienen una eficacia mucho menor que la menos eficiente de las lámparas eléctricas. Para obtener una iluminación equivalente a una lámpara incandescente de 60 W se necesitarían 18 lámparas de queroseno con mecha (6 60 velas). Los esfuerzos para mejorar la eficacia de lámparas no eléctricas no han tenido éxito hasta ahora [Rajvanshi, 1987; Sinha y Kandpal, 1991].

Según un estudio en la isla de Java (Indonesia), hogares que utilizaban queroseno para iluminar consumían *diez veces más energía y recibían seis veces menos iluminación* que aquellos que utilizaban electricidad. [Fitzgerald, Barnes y McGranahan, 1991] Notéase que esto implica una mejora de 60 veces en la eficacia al pasar de queroseno a electricidad.

El Cuadro 1, también expresa el rendimiento de las lámparas en términos de un consumo específico de combustible. Para las lámparas a combustible, sólo implica un cambio de escala respecto a la eficacia (lm/W). Para las lámparas eléctricas, también incluye un factor termodinámico: toma en cuenta las pérdidas energéticas al convertir un combustible (por ej. petróleo) en energía eléctrica. Aún considerando estas pérdidas, la lámpara incandescente es casi 40 veces y la fluorescente 160 veces más eficiente que la lámpara de queroseno a mecha.

La última columna compara la tasa de consumo de combustible (en kg/hora), también incluyendo -- para las lámparas eléctricas -- las pérdidas en la generación eléctrica. En este caso las diferencias entre las lámparas eléctricas y las de combustibles no son tan

notables: una lámpara de queroseno a mecha consume el doble de la incandescente y ocho veces más que la fluorescente. (La diferencia se redujo en la medida que una lámpara de queroseno a mecha produce mucho menos luz que una típica lámpara eléctrica.) El consumo actual mundial de queroseno (u otro combustible) para la iluminación es 7,2 millones de toneladas equivalentes de petróleo por año, según una estimación [Dutt y Mills, 1994] y el uso de lámparas fluorescentes compactas tiene el potencial de reducir este consumo en un factor de ocho mientras que a la vez aumenta el nivel lumínico 22 veces.

Otra comparación necesaria entre distintas fuentes de luz es la económica. Los índices normalmente utilizados para evaluar la rentabilidad de medidas para el uso eficiente de la energía, incluyendo las de iluminación eléctrica [ver Dutt, Brugnioni y Tanides, 1994], no son aplicables aquí por las diferencias importantes que existen entre los niveles lumínicos de las distintas alternativas. Un índice aplicable es el costo de la luz [ver, por ej., van der Plas, 1988]. Este índice considera el costo de la lámpara con el artefacto, la vida útil de los mismos, el precio de la energía, la producción de luz (lm), la tasa de descuento y se expresa en términos de, por ejemplo, dólares por millones de lúmen-horas. Una comparación económica de varias alternativas se presenta en el Cuadro 2. Las lámparas eléctricas son mucho más económicas (menor costo de luz) que las de combustible. Entre las lámparas eléctricas, las fluorescentes son más económicas que las incandescentes. Así que una fluorescente compacta de 11 W emite aproximadamente los mismos lúmenes que la incandescente de 60 W, pero con un costo de luz 40% inferior.

| Tipo de lámpara | Costo de luz US\$/ millones lumen-horas |
|----------------------------|--|
| Vela | 1071 |
| Queroseno, mecha | 349 |
| Queroseno, camisa | 53 |
| 60 W incandescente, común | 9,7 |
| 9 W fluorescente compacta | 7,6 |
| 11 W fluorescente compacta | 5,7 |

Suposiciones:

1. Tasa de descuento: 10% anual; precio de la electricidad: US\$ 0,10/kWh; precio del queroseno: US\$ 0,30/litro.
2. Para el costo del artefacto, vida útil y otras suposiciones, ver la referencia.

El análisis realizado hasta ahora nos conduce a las siguientes observaciones: proveer un nivel de luz aceptable requiere el uso de lámparas eléctricas, las cuales son mucho más eficientes y económicas, sobre todo cuando se trata de lámparas fluorescentes. La provisión de la luz eléctrica en zonas rurales no electrificadas se puede lograr mediante una extensión de la red eléctrica o por la generación descentralizada de la energía eléctrica. Estas posibilidades se verán a continuación.

2. La electrificación rural

La electrificación rural se ha realizado en gran medida con la extensión de la red o por generadores diesel operados en forma intermitente. La extensión de la red ha sido una alternativa cara, sobre todo en zonas con baja densidad de población y/o baja demanda de la energía eléctrica. Según datos de la Cooperativa de Servicios Públicos de Gral. Acha (La Pampa) Ltda. [CSPGA, 1993], el costo de una línea trifásica de 13,2 kV con conductores $3 \times 8 \text{ mm}^2$ acero-cobre, poste de hormigón, es de 6738 \$/km. Con conductores de 16 mm^2 , con capacidad mucho mayor, el costo es de 7131 \$/km., sólo un poco mayor que en el caso anterior. [Blanco, Schaller y Skerk, 1994] Estos datos convertidos en inversión por kW para tres extensiones de la red (5, 10 y 15 km) se ilustran en la Fig. 1 que demuestra las grandes economías de escala.

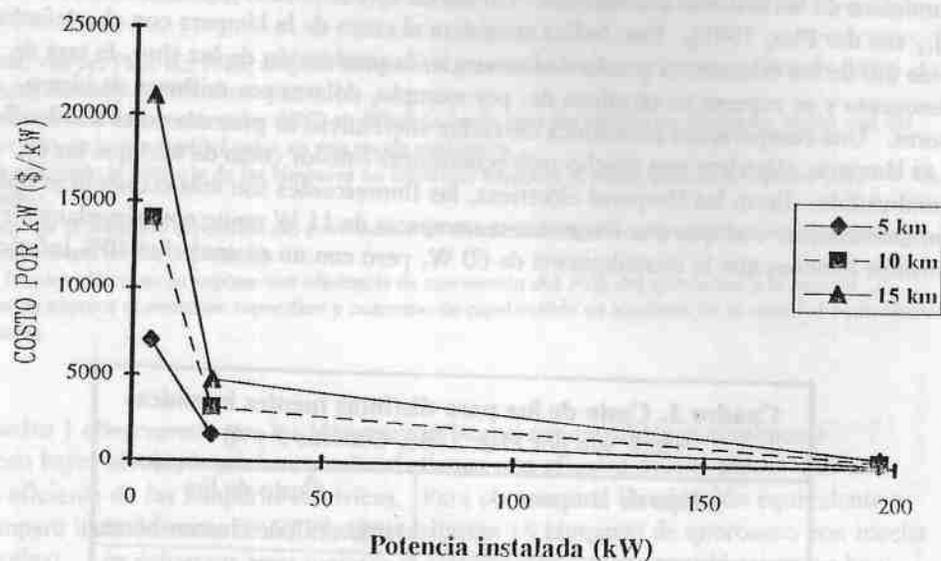


Figura 1. Variación del costo de la extensión de la red en función de la potencia instalada.

Generadores diesel se caracterizan por su relativamente bajos requerimientos de inversión y menor economía de escala: US\$ 1.000/kW para un grupo electrogeno en el rango de 10 a 15 kW. Pero, por otro lado, tienen altos costos variables que dependen del precio del combustible y de los costos de operación y mantenimiento, principalmente mano de obra.

Otra opción es la generación eléctrica por medio de fuentes renovables. Entre estas alternativas, la eólica se ha destacado en los años recientes por su rentabilidad en relación a otras. Los costos de los molinos demuestran importantes economías de escala (ver cuadro 3) por lo cual se ven favorecidos los molinos con potencia unitaria de 250 kW o mayor. Debido a que el costo de la extensión de una red aumenta con la distancia, una comparación entre la Fig. 1 y el Cuadro 3 demuestra que bajo ciertas condiciones, la alternativa eólica requiere de menores inversiones. Las inversiones para la alternativa eólica son siempre mayores que las necesarias para la generación diesel, pero no tiene consumo de combustible. Una evaluación económica tiene que tomar en cuenta el

recurso eólico, además de diferencias en inversión y costos de operación y mantenimiento. Un estudio comparativo para la localidad de Las Heras, Pcia. de Santa Cruz, con un consumo de 90 MWh/año concluyó que la alternativa eólica (respaldada por un grupo diesel) es más económica que el uso exclusivo de grupos diesel. [Arakaki y Nadjarian, 1994]

Cuadro 3. Costo instalado de la energía eólica
(Fuente: Ayeridis y Vassilakus, 1992, más estimación para los costos de instalación)

| Potencia (kW) | US\$/kW(instalado) |
|---------------|--------------------|
| 0,08 | 21.000 |
| 0,15 | 30.333 |
| 1 | 9.100 |
| 10 | 4.900 |
| 75 | 1.400 |
| 100 | 1.820 |
| 250 | 1.250 |

La economía relativa del uso de biogas y de gas pobre (derivado de la gasificación termoquímica de la biomasa) en motores de combustión interna, y de los grupos diesel, depende principalmente de los costos del diesel y la disponibilidad y costos de la biomasa. Aunque se desconocen estudios de factibilidad para la Argentina, las estimaciones de otros países nos muestran que el biogas sería una alternativa económica cuando se trata de una planta de tratamiento de efluentes de aguas residuales (municipales o agroindustriales) mediante la digestión anaeróbica. [Lettinga y van Haandel, 1993]. La gasificación de residuos de madera también puede ser una opción económica para la electrificación rural [Kaupp y Goss, 1984; Reddy et al., 1990; Mukunda, Dasappa y Shrinivasa, 1993] donde estos residuos estén disponibles (por ej. en Misiones, Chaco, y en las islas del Paraná).

La generación eléctrica mediante microturbinas hidráulicas también puede ser una opción económica cuando este recurso está disponible. Aparte del excelente trabajo de Barney y su equipo de la Universidad Nacional de Misiones, se puede señalar una nueva alternativa -- una microturbina flotante -- aplicable a ríos de llanura. [Ponta, Luna Pont y Martinez, 1994]

En los últimos años, los avances en el diseño y la fabricación de celdas solares fotovoltaicas han bajado los costos y mejorado el rendimiento de las mismas. Notablemente, para esta tecnología, los costos son prácticamente independientes de la escala de la instalación. En la actualidad el costo de un sistema fotovoltaico (incluyendo ondulador y baterías) para suministrar la energía eléctrica en corriente alterna es de alrededor de los \$10.000 por kW potencia instalada del consumo. Esta opción es rentable para demandas menores a unos 5 a 10 kW. [Blanco, Schaller y Skerk, 1994]

3. Iluminación eléctrica en viviendas dispersas

En esta sección señalaremos algunas alternativas para la iluminación eléctrica en viviendas aisladas, fuera del alcance de la distribución eléctrica rural. Una se basa en la biodigestión de las aguas cloacales de la vivienda, y la otra en el uso de lámparas fluorescentes de corriente continua.

La digestión anaeróbica de las aguas cloacales de una casa de seis personas (sin animales domésticos) produce alrededor de $0,2 \text{ m}^3$ de biogas por día. Convertido a energía eléctrica con un rendimiento tan sólo del 20% generaría 250 Wh por día, suficiente para cinco lámparas fluorescentes (compactas) de 13 W cada una operadas por casi cuatro horas diariamente. Para la cocción, la misma familia con biogas requeriría de las aguas residuales de 30 personas (o el estiércol de cuatro cerdos, o dos o tres vacas). [Dutt, 1992] Aún cuando los recursos de biomasa son mínimos, se podría utilizar el biogas para la provisión de niveles adecuados de iluminación eléctrica. Se puede justificar mucho mayores inversiones para el digestor y generador eléctrico para la iluminación que para el caso del uso de biogas para la cocción. Esto se debe a que la iluminación eléctrica reemplazará 18 veces más queroseno que la cocción con biogas; cocinar con biogas y con queroseno tiene aproximadamente el mismo rendimiento. [Dutt y Ravindranath, 1993]

Otra alternativa para la iluminación rural es el uso de lámparas fluorescentes operadas por baterías recargables. El artefacto básico incluye un pequeño tubo fluorescente operado en corriente continua con baterías Ni-Cd o de plomo ácido. En el transcurso de este año, una variedad de artefactos ha llegado al mercado argentino. La mayoría de éstos tiene como propósito reemplazar las linternas comunes (con pilas descartables) o funcionar como lámparas de emergencia, para ser recargadas por la red. Su precio varía desde \$10 hasta \$60. En algunos casos -- en equipos de baja potencia --, incluyen su propio panel solar integrado. Otros pueden ser conectados a un panel solar externo. Sumando el costo del panel solar, se eleva el precio del artefacto muy por encima de una lámpara a queroseno, y queda fuera del alcance de casas rurales de bajo ingreso. Sin embargo, estos artefactos pueden ser prácticos en casos donde la luz eléctrica tiene alto valor, por ejemplo en escuelas rurales.

Existen también maneras innovadoras para la difusión de lámparas recargables con energía solar. En un programa francés de ayuda a regiones pobres de Africa (Lampes Francophonie), se recargan las lámparas en una estación central de recarga en la aldea, y se alquilan por el tiempo de duración de la carga. [Efforsat y Farcot, 1994] Los clientes devuelven sus lámparas para ser recargadas, en una manera análoga a rellenar el depósito de queroseno. Los usuarios frecuentes (familias de cierto nivel económico) tienden a comprar las lámparas, mientras que los aldeanos más humildes las alquilan para fiestas religiosas y otros eventos especiales cuando desean mayores niveles luminosos. En Senegal, uno de los países donde este programa está en marcha, la operación de las lámparas solares cuesta más por día que las de queroseno y es comparable al costo de una lámpara de gas a camisa ("sol de noche"). Sin embargo el costo de luz de la lámpara solar es mucho menor, debido al mayor nivel luminoso.

4. Conclusiones

La provisión de la iluminación eléctrica eficiente puede ser un importante elemento del desarrollo de poblaciones aisladas de la red eléctrica. Para aquellos actualmente sin acceso a la electricidad, la provisión de la luz eficiente permite reducir los costos, disminuir el consumo de combustibles fósiles, y mejorar substancialmente los niveles lumínicos. En determinados casos, las alternativas para la electrificación rural en base a energías renovables son más económicas que la extensión de la red o la generación descentralizada en base a diesel. La combinación con artefactos eficientes en el uso de la energía eléctrica se puede lograr importantes ahorros económicos.

Referencias

- Arakaki, R. y Nadjarian, A., 1994, "Estudio económico comparativo: generador eólico vs. generador diesel", Monografía de Energías No Convencionales, Depto. de Electrotecnia, Fac. de Ingeniería, Univ. de Buenos Aires.
- Ayeridis, G. y Vassilakus, N., 1992, "Small-sized wind turbines in autonomous applications", en *The Potential for Small and Medium-sized Wind Energy Application in Mediterranean Countries*, Reunión organizada por la Comisión de la Comunidad Europea, DG XVII en Rhodos, Grecia, junio, p. 301.
- Blanco, A., Schaller, A. y Skerk, C., 1994, "Comparación económica de alternativas para suministro eléctrico", Monografía de Energías No Convencionales, Depto. de Electrotecnia, Fac. de Ingeniería, Univ. de Buenos Aires.
- CSPGA, 1993, Pliego de extensión de la red de distribución local, Cooperativa de Servicios Públicos de Gral. Acha Ltda., La Pampa.
- Dutt, G.S., 1992, "Comparing alternative biogas technologies", presentado en el Workshop on Materials Science and Physics of Non-Conventional Energy Sources, Buenos Aires, Argentina, sept.-oct.
- Dutt, G.S., Brugnoli, M. y Tanides, C.G., 1994, "El uso eficiente de la energía eléctrica en la iluminación", presentado en la 17ª Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energía Solar (ASADES), Rosario, oct.
- Dutt, G.S. y Mills, E., 1994, "Illumination and sustainable development, Part II: Implementing lighting efficiency programs", *Energy for Sustainable Development*, Vol. 1, No. 2, p. 17-27, julio.
- Dutt, G.S. y Ravindranath, N.H., 1993, "Alternative bioenergy strategies for cooking", en *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, (Johansson, T.B., Kelly, H., Reddy, A.K.N. y Williams, R.H., compiladores, United Nations Solar Energy Group on Environment and Development), Island Press, Washington, DC, p. 653-697.
- Efforsat, J. y Farcot, A., 1994, "Les lampes portables solaires", *Systemes Solaires*, No. 100, March-April, p. 15-21.

- Fitzgerald, K.B., Barnes, D., y McGranahan, G., 1991, "Interfuel substitution and changes in the way households use energy: estimating changes in cooking and lighting behaviour in urban Java", *Pacific and Asian Journal of Energy* vol. 1 (new series), pp. 21-49. Anteriormente presentado en el 12th International Conf. of the International Association for Energy Economics, New Delhi, ene. 1990.
- Kaupp, A. y Goss, J.R., 1984, *Small Scale Gas Producer Engine Systems*, GTZ, Eschborn, Alemania.
- Lettinga, G. y van Haandel, A.C., 1993, "Anaerobic digestion for energy production and environmental protection", en *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, (Johansson, T.B., Kelly, H., Reddy, A.K.N. y Williams, R.H., compiladores, United Nations Solar Energy Group on Environment and Development), Island Press, Washington, DC, p. 817-839.
- Mukunda, H.S., Dasappa, S. y Shrinivasa, U., 1993, "Open-top wood gasifiers", in *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, (T.B. Johansson, H. Kelly, A.K.N. Reddy y R.H. Williams, compiladores), Island Press, Washington, DC, p. 699-728.
- Ponta, F., Luna Pont, C. y Martinez, S., 1994, "Hidroturbina autorregulada de eje vertical", ASADES '94, Rosario, oct.
- Quiñones, H., 1994, "Los márgenes de distribución de las empresas de energía eléctrica en Argentina", *Novedades Económicas*, abril, p. 7-13.
- Rajabapaiah, P., Jayakumar, S. y Reddy, A.K.N., 1993, "Biogas electricity--the Pura village case study", en *Renewable Energy: Sources for Fuels and Electricity*, (T.B. Johansson, H. Kelly, A.K.N. Reddy y R.H. Williams, Eds.), Island Press, Washington, DC, pp. 787-815.
- Rajvanshi, A.K., 1987, "Design and development of improved lantern for rural areas", Informe preparado para el Advisory Board on Energy (India), New Delhi.
- Reddy A.K.N., Sumithra, G.D., Balachandra, P. y D'Sa, A., 1990, "Comparative costs of electricity conservation, centralised and decentralised electricity generation", *Economic and Political Weekly* (India), 2 de junio, pp. 1201-1216.
- Sinha, C.S. y Kandpal, T.C., 1991, "Optimal mix of technologies for rural India: the lighting sector", *International Journal of Energy Research*, vol. 15, pp. 653-665.
- van der Plas, R., 1988, "Domestic lighting", Working Paper WPS 68, Industry and Energy Department, Banco Mundial, Washington, DC.
- Yanes, L., A. Combetto, G. Pelicano, L. Reboratti, et al., 1989, "La distribución de las fuentes de energías no convencionales", Informe del Instituto de Geografía (Facultad de Filosofía y Letras, Universidad de Buenos Aires) y de la Secretaria de Energía de la Nación.