

## INFORMACIÓN TECNOLÓGICA



Todo o conteúdo deste periódico, exceto onde está identificado, está licenciado sob uma Licença Creative Commons.

All the contents of this journal, except where otherwise noted, is licensed under a [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

### REFERÊNCIA

RODRIGUES, M. E. C.; CAMARGO, I. M. T.; OLIVEIRA, M. A. G. de. Sistema de acumulacion de energia para alimentacion de la iluminacion publica durante las horas de punta. Separata de: **Información Tecnológica**, La Serena, v. 9, n. 3, p. 309-314, 1998.

ISSN 0716-8756



# INFORMACION TECNOLOGICA

REVISTA INTERNACIONAL

---

## SEPARATA



*El Faro: Símbolo de la belleza turística de La Serena - Chile*

---

# SISTEMA DE ACUMULACION DE ENERGIA PARA ALIMENTACION DE LA ILUMINACION PUBLICA DURANTE LAS HORAS DE PUNTA

**M.E.C. RODRIGUES, I.M.T. CAMARGO y M.A.G. De OLIVEIRA**  
Univ. de Brasilia, Depto. de Ing. Eléctrica, 70910-900 Brasilia, DF - Brasil

---

## RESUMEN

En este artículo se presenta un análisis técnico y económico de una alternativa de solución para el problema causado en la distribución de energía eléctrica al sistema público de alumbrado durante las horas de máxima demanda. La alternativa propuesta considera el uso de un conjunto rectificador-batería-inversor, el cual es automáticamente recargado durante el período de baja demanda. Se realizaron simulaciones por computador para estudiar la factibilidad de implementación del sistema propuesto. Estimaciones de costo indican que el costo de operación del sistema por 30 minutos de operación es del orden de US\$ 2000/kW, mientras que la inversión necesaria para este sistema es del orden de US\$ 4000/kW. Esto demuestra que la solución propuesta es técnica y económicamente factible.

## ENERGY STORAGE SYSTEM TO SUPPLY THE PUBLIC ILLUMINATING SYSTEM DURING THE PEAK DEMAND PERIOD

### ABSTRACT

This article shows a technical and economic analysis of a solution for the problem produced in the distribution of electrical energy to the public illuminating system during the peak demand period. The proposed alternative considers the use of a rectifier-battery-inverter set, which is automatically recharged during the period of low demand. Computer simulations were carried out to study the feasibility of the proposed system. Cost estimations indicate that the cost of operating the system for 30 minutes is of the order of US\$ 2000/kW, while the necessary investment for this system is of the order of US\$ 4000/kW. This shows that the proposed solution is both technical and economically feasible.

*Keywords: electric energy, energy supply, energy storage, energy distribution*

## INTRODUCCIÓN

La Compañía Energética de Brasilia (CEB) es la responsable por el suministro de energía eléctrica de todo el Distrito Federal, compuesto por Brasilia y ciudades satélites. Actualmente, el sistema CEB se encuentra próximo al límite de su capacidad de abastecimiento. Esta situación delicada obliga a la concesionaria a gerenciar cargas significativas durante las horas de punta, con el fin de evitar el colapso del mismo. En este contexto, y considerando la escasez de recursos, la CEB busca soluciones que permitan aliviar su sistema durante las horas de punta y, en consecuencia, posponer las inversiones necesarias para ampliar su sistema de distribución.

En un proyecto común, la CEB y el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Brasilia decidieron analizar la viabilidad de retirar del sistema una porción de la iluminación pública durante las horas de punta (Rodrigues, 1995). Durante este intervalo, esta carga sería alimentada por una fuente alternativa de energía, consiguiendo así el alivio de la carga deseado para la red de la CEB.

La solución propuesta fue la de construir un sistema que sea capaz de almacenar energía durante los períodos de baja demanda y que pueda restituirla durante las horas de punta. En la configuración seleccionada, este sistema está compuesto por un rectificador, un conjunto de baterías, un inversor y un transformador (figura 1).

Este estudio presenta los resultados del análisis tanto desde el punto de vista técnico, como desde el punto de vista económico, de la solución propuesta. Para su realización, se seleccionó una extensión típica del sistema de iluminación pública de la CEB. Esta extensión, trifásica y equilibrada, tiene una carga de 30 kVA, compuesta exclusivamente por lámparas a vapor de mercurio, con sus respectivos reactores de alto factor de potencia. Las simulaciones se condujeron en un modelo reducido de la configuración propuesta, especialmente construido para ese fin. El análisis económico se hizo comparando los costos marginales del sistema eléctrico brasileño con estimativas de costos de los componentes obtenidas a través de contacto con los fabricantes.

## LA FUENTE ALTERNATIVA

La fuente alternativa de energía funciona como una pequeña reserva de energía. Fuera del período de punta, la fuente acumula energía suministrada por la concesionaria. Durante un intervalo del período de punta esta energía se restituye a la extensión de iluminación. A seguir, se discuten las características principales de cada elemento.

### El rectificador

Los fabricantes de baterías garantizan que, para no reducir su vida útil, éstas deben cargarse con corriente continua. Esta restricción impone al rectificador un control eficiente de su corriente de salida. Una solución evidente sería la utilización de un rectificador trifásico controlado (o sea, con tiristores). Sin embargo, la tensión rectificada presentaría un "ripple" muy elevado. Simulaciones digitales mostraron que sería necesario un gran inductor de alisamiento para que la corriente de carga de las baterías cumpliera con las especificaciones del fabricante. Otra solución sería utilizar un rectificador trifásico no controlado (o sea, con diodos) en serie con un "chopper" tipo "buck" a base de transistores MOSFET y trabajando con frecuencias elevadas, de orden de 20 kHz (figura 1). Además de optimizar los filtros de salida del rectificador, esta configuración presenta un desempeño bastante superior.

### Las baterías

Las baterías trabajan en dos regímenes distintos. En el primero, las baterías son cargadas por el sistema CEB por medio del rectificador durante aproximadamente 10 horas fuera del horario de punta. En el segundo, durante un período de las horas de punta, de cerca de treinta minutos, las baterías se descargan, alimentando una parte del sistema de iluminación. Los principales tipos de acumuladores disponibles son los de plomo-ácidos y los alcalinos. El precio de baterías alcalinas está en la orden del doble del precio de las baterías plomo-ácidas. No obstante, para este régimen específico de trabajo, o sea, un ciclo completo de carga y descarga diario, las baterías alcalinas presentan características de durabilidad, funcionamiento y mantención bien superiores a las de las

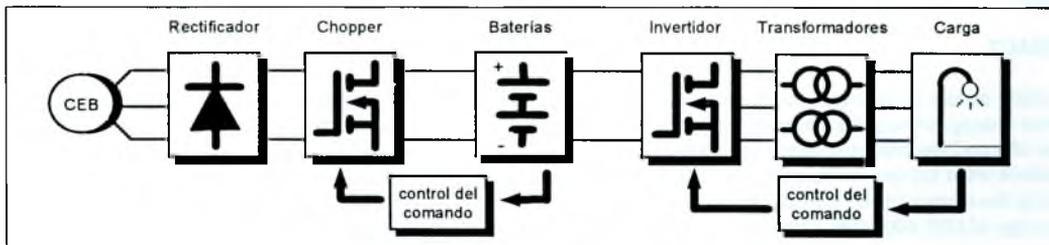


Fig 1 : Configuración de la fuente alternativa de energía.

baterías plomo-ácidas. Considerándose la potencia (30kVA) a ser suministrada durante el tiempo especificado (30 min.), las baterías se dimensionaron para 300 V/140 Ah.

### El inversidor

La energía acumulada en las baterías se restituye al sistema a través de un inversidor en serie con un banco de transformadores (figura 1). Uno de los principales aspectos a considerar en el dimensionamiento del inversidor es su número de pulsos. Como se sabe, los inversidores inyectan en la carga armónicos de orden  $n\pm 1$ , donde  $p$  es el número de pulsos (Kimbar, 1971).

A pesar de no tenerse ninguna información en cuanto al funcionamiento de la lámpara, o en cuanto a la reducción de su vida útil en función de la distorsión armónica de la fuente, se optó por una configuración de doce pulsos (en desmedro de una configuración más simple de seis pulsos). De hecho, con un pequeño aumento en el costo del equipo, se obtiene una mejora considerable de la tensión de suministro.

El inversidor de doce pulsos está constituido por dos inversidores de seis pulsos cuyas entradas están conectadas en paralelo a la batería. Cada inversidor debe transmitir una potencia de cerca de 15 kVA. Considerándose las tensiones y corrientes involucradas, así como su frecuencia de funcionamiento, los semiconductores IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) representan la mejor solución.

Además, debido a su amplia utilización, se encuentran en el mercado módulos compactos integrando los IGBTs, los circuitos de amortiguación y toda la electrónica necesaria para la polarización, adaptación y aislamiento de los pulsos de comando. El sistema de comando-control y protección, basado en una microcomputadora 8031 (8 bits, 11,05 Mhz), se realiza con una tarjeta electrónica independiente.

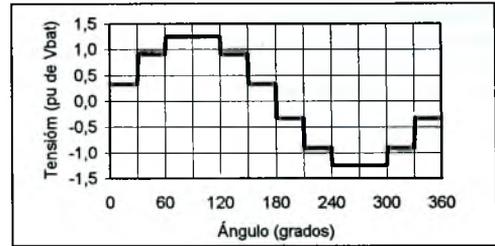


Figura 3 : Forma de onda de tensión en la salida del inversidor de 12 pulsos.

### El transformador

La función del transformador es ajustar la tensión de salida del inversidor a la tensión de carga (220 V) y, junto con los inversidores, eliminar los armónicos de orden  $6n\pm 1$ , para  $n$  impar. Para eso, las salidas de los inversidores se conectan a dos transformadores conectados respectivamente en YY y  $\Delta Y$ , (figura 2). En el secundario (lado de la carga), los transformadores se conectan en serie. De esta forma las tensiones producidas por los dos inversidores se suman, eliminando los armónicos (De Oliveira, 1994). Además de esto, es importante que las tensiones en los secundarios de los transformadores estén en fase. Esto se obtiene atrasando 30 grados el disparo del segundo puente inversidor, de forma que compense el atraso intrínseco de la conexión del transformador. La forma de onda teórica en la carga, considerando inversidores ideales, se presenta en la figura 3.

Como los secundarios de los transformadores están conectados en serie, cada transformador debe ser dimensionado para mitad de la potencia suministrada a la carga, o sea, 15 kVA. Considerando que la tensión para alimentación de las lámparas es de 220V (fase-neutro), los transformadores deben ser dimensionados para 234V-200V (fase-fase). Nótese que, como las tensiones en el primario y secundario son idénticas, el número de espiras del transformador conectado en  $\Delta Y$  debe ser  $\sqrt{3}$  veces mayor.

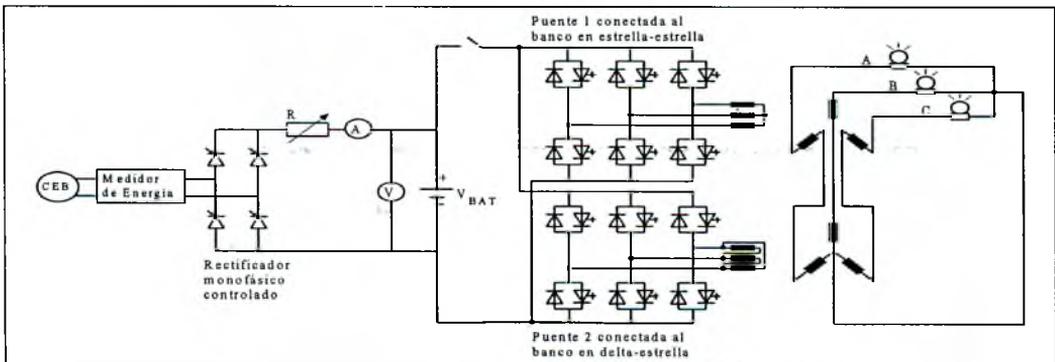


Fig 2 : Esquema utilizado para el montaje del modelo reducido.

Finalmente, es conveniente que las reactancias de dispersión por fase de cada transformador sean iguales, de forma que mantengan el circuito equilibrado sin corrientes de circulación entre ellos.

#### Las lámparas

Las lámparas a vapor de mercurio representan la carga específica de la fuente de alimentación alternativa. Aunque de uso corriente, es sorprendente la falta de estudios y referencias bibliográficas sobre su desempeño. Es desconocido por los fabricantes consultados (y por los autores) el efecto de las distorsiones armónicas en la vida útil de estas lámparas. Por otro lado, se sabe que un aumento en la frecuencia de alimentación aumenta la cantidad de iluminación suministrada. Otra característica importante de este tipo de lámpara es la necesidad del reactor en serie para limitar la corriente de partida. Estos reactores son responsables por el 10 a 20% de las pérdidas.

#### ANÁLISIS TÉCNICO

Se montó en el laboratorio un modelo reducido del sistema para analizar la viabilidad técnica del proyecto (figura 2). El modelo reducido tiene las siguientes características: un rectificador controlado monofásico 48 V, dos conjuntos de baterías de plomo-ácidas (uno industrial de 22 Ah, otro automotriz de 36 Ah), dimensionadas para una descarga de 30 minutos; dos inversores trifásicos MOSFET de 50V/50A; dos bancos de transformadores con relación de transformación 71/239 y 41/239, de 500 VA cada; y un conjunto de tres lámparas de 250 W con sus respectivos reactores. Una foto de parte del modelo reducido se muestra en la figura 4.

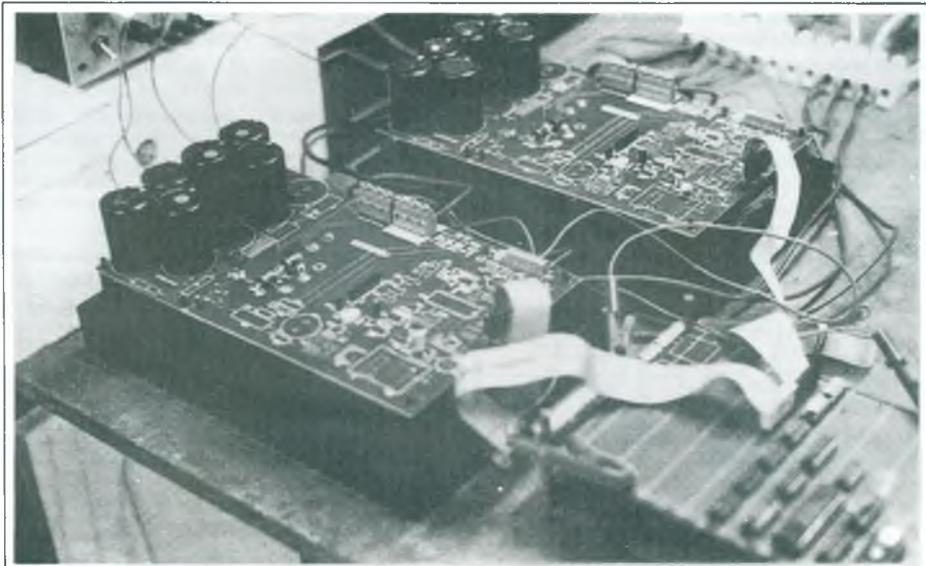


Fig 4 : Foto de los inversores y de la tarjeta de control.

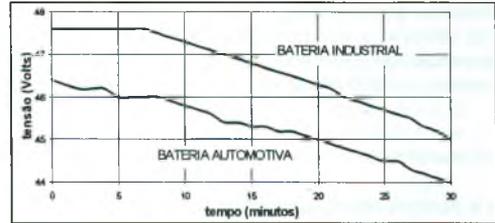


Fig 5 : Evolución de la tensión en los terminales de batería durante un ciclo de descarga

Además de esto, se construyó una tarjeta de control digital para comando de los circuitos inversores. Esta tarjeta permite la entrada de diferentes secuencias de disparo por medio de una microcomputadora.

El modelo reducido fue probado para una secuencia de disparos. Los resultados obtenidos fueron muy buenos y mostraron que los equipos propuestos son técnicamente viables. La tensión en los terminales de la batería decae linealmente con el tiempo. Comparando la batería industrial con la automotriz, se observa un mayor rendimiento de la primera, como era de esperar. La figura 5 muestra el perfil de tensión de los dos tipos de baterías en función del tiempo.

La forma de onda de tensión en la carga se muestra en la figura 6. Se observa un fuerte componente de 11° armónico sin que esto afecte visiblemente el funcionamiento de las lámparas. La flexibilidad de la tarjeta de control permite que se prueben otras secuencias de disparo. Esta en fase de pruebas una secuencia PWM que elimine el 11° armónico de la tensión de salida.

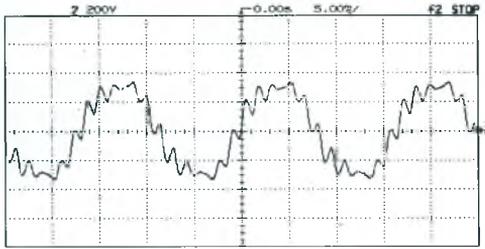


Fig 6 : Tensión  $V_{AN}$  con la carga conectada.

### ANÁLISIS ECONÓMICO

La estructura de costos del equipo en estudio fue montada tomando por base el suministro, durante treinta minutos, de energía para atendimento de la carga de un circuito típico de iluminación pública de la CEB.

Los equipos propuestos poseen la misma configuración usada en el modelo reducido, diferenciándose en el dimensionamiento. La localización de la fuente alternativa de energía debe ser la propia subestación de la CEB, junto a la barra que alimenta el circuito de iluminación.

El sondeo de costos fue desarrollado para una vida útil de 30 años. La tabla 1 resume los precios de los diversos componentes del equipo en estudio. Estos valores fueron obtenidos en mayo de 1995, de los fabricantes. Para las baterías, cuya vida útil es apenas de 10 años, se consideró el valor presente de la secuencia de 3 inversiones con una tasa de 10% de interés al año. El valor relativo de los componentes se muestra en la figura 7.

El precio del equipo (US\$ 2.000,00/kW) debe ser comparado con el costo marginal del sistema para el período de punta. Este costo debe considerar la generación, la transmisión y la distribución de energía, ya que la carga (iluminación pública) se encuentra en el final de la cadena de producción de energía eléctrica.

Tabla 1 : Estructura de costos aproximados de la fuente de energía alternativa

ELEMENTO	[US\$]
CONJUNTO DE BATERÍAS	40.000,00
RECTIFICADOR	4.500,00
INVERTIDOR	5.500,00
TRANSFORMADORES	1.500,00
OTROS GASTOS	2.500,00
TOTAL PARA 30kVA (US\$)	54.000,00
TOTAL POR KW (US\$/kW)	2.000,00

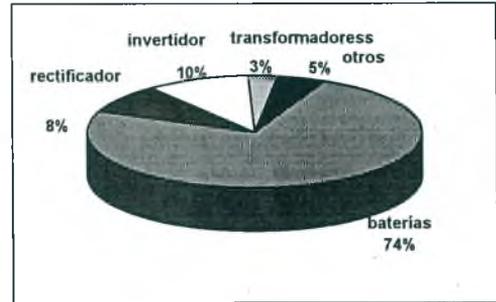


Fig 7 : Distribución de costos de la fuente alternativa de energía.

Según publicación del Departamento Nacional de Agua y Energía Eléctrica (DNAEE, 1994), el costo marginal medio de generación de energía pura para la hora de punta seca es de US\$35,30/MWh. El costo marginal de potencia, considerando el factor de carga del sistema CEB igual a 0,625, es de US\$3,23/MWh. El DNAEE no dispone de datos actuales de costos marginales de transmisión y de distribución, sin embargo, para este estudio, se supone que el costo de la generación equivale aproximadamente a 50% del costo total del sistema, cabiendo los otros 50% a la transmisión y a la distribución, llegándose al costo final de US\$77/MWh o US\$421,90/kW.año.

Calculándose el valor presente de esta inversión, que se pospondrá, considerando un período de 30 años con la misma tasa de interés (10% al año), se llega al valor de US\$3.977/kW. Comparándose el costo total del equipo propuesto, US\$2.000/kW con el costo marginal de generación, transmisión y distribución (inversión a posponer), US\$3.977/kW, se concluye que la fuente de energía alternativa ahora presentada es perfectamente justificable económicamente.

Es interesante observar que 75% del costo del equipo propuesto se refiere a las baterías. Es conveniente, no obstante, verificar hasta que punto la fuente de energía es realmente más económica. Si el conjunto de baterías se dimensiona para atender la misma carga durante un período de tiempo mayor, será necesario especificar una batería de mayor capacidad, lo que acarrea mayores costos. La tabla a seguir resume este análisis, hasta el límite de viabilidad económica.

La alternativa se muestra viable económicamente para un período de hasta una hora y media. Esto podría parecer indeseable, ya que el período de punta en Brasil se define para un período de 3 horas. Sin embargo, la curva de carga de la CEB muestra que la punta efectiva de su sistema ocurre durante un período inferior a una hora.

Tabla 2 : Viabilidad económica del equipo en función del tiempo.

PERÍODO DE DESCARGA [min]	CAPACIDAD DE LA BATERÍA [Ah]	COSTO DEL EQUIPO [US\$/kW]	VIABLE
30	140	2.000,00	Sí
60	220	2.800,00	Sí
90	300	3.800,00	Sí
120	350	4.400,00	No

La alternativa se muestra viable económicamente para un período de hasta una hora y media. Esto podría parecer indeseable, ya que el período de punta en Brasil se define para un período de 3 horas. Sin embargo, la curva de carga de la CEB muestra que la punta efectiva de su sistema ocurre durante un período inferior a una hora.

#### CONCLUSIONES

El modelo propuesto de alimentación alternativa de iluminación pública se mostró técnica y económicamente viable. El análisis económico mostró que, aún siendo un equipo caro, éste es comparable al costo marginal de generación. Como este costo es creciente y el costo de las baterías tiende a disminuir, a medio plazo esta solución puede y debe ser adoptada. Todo el análisis se hizo basado en datos regionales, sin embargo, nada impide que la misma solución sea adoptada por otras concesionarias de Brasil.

El modelo reducido presentó un excelente desempeño. La utilización de una tarjeta de comando

y control digital abre la posibilidad de una infinidad de nuevas investigaciones en esta área.

En este momento, se investiga la posibilidad de eliminar el 11° armónico de la tensión de salida, a través de una secuencia apropiada de disparos, se analiza una función para control del módulo de la tensión de carga y, finalmente, la posibilidad de la retirada de los reactores de salida.

#### AGRADECIMIENTOS

Este proyecto fue patrocinado por la Fundación de Amparo a la Pesquisa del Distrito Federal (FAP-DF). Los autores agradecen también el apoyo de la Compañía Energética de Brasilia (CEB).

#### REFERENCIAS

De Oliveira, M.A.G., Alimentation d'un réseau électrique isolée par une liaison à courant continu et un compensateur statique avancé. Tesis de Doctorado, Université Pierre et Marie Curie, Paris-FRANCIA (1994).

DNAEE, Departamento Nacional de Aguas y Energía Eléctrica, Programa de revisão tarifária - Custos do Sistema, Brasília-BRASIL (1994).

Kimbark, E.W., Direct Current Transmission, Vol. 1. Wiley Interscience, New York-USA (1971).

Rodrigues, M.E.C., Alimentação alternativa da iluminação pública para nivelamento de demanda. Tesis de Mestrado, Universidad de Brasilia, Brasilia, BRASIL (1995).

## **INFORMACION TECNOLOGICA**

Revista Internacional Arbitrada  
Indexada en Indices Internacionales

Edita:

Centro de Información Tecnológica (CIT)

Larraín Alcalde 1120 - Casilla 593

Teléfono: 56-51-213855 Fax: 56-51-210496

La Serena - Chile