

Autorização concedida ao Repositório da Universidade de Brasília (RIUnB) pelo autor, em 21 de julho de 2014, com as seguintes condições: disponível sob Licença Creative Commons 3.0, que permite copiar, distribuir, transmitir o trabalho e fazer uso comercial, desde que o autor e licenciante seja citado. Não é permitida a adaptação desta.

Authorization granted to the Repository of the University of Brasília (RIUnB) by the author, at July, 21, 2014, with the following conditions: available under Creative Commons License 3.0, that allows you to copy, distribute, transmit the work and to make commercial use, provided the author and the licensor is cited. It is not allowed to adaptation.

#### **REFERÊNCIA**

RODRIGUES, Marcelo E. C.; CAMARGO, Ivan M. de T.; OLIVEIRA, Marco A. G. de. Alimentação alternativa da iluminação pública para nivelamento de demanda. **Revista Eletroevolução**, Belo Horizonte, n. 5, dez. 1995.

# Alimentação Alternativa da Iluminação Pública para Nivelamento de Demanda

Marcelo E. C. Rodrigues, Ivan M. de T. Camargo  
Marco A. G. de Oliveira (Universidade de Brasília)

## RESUMO

A Companhia Energética de Brasília (CEB) enfrenta, atualmente, dificuldades para atender os picos de demanda verificados durante o horário de ponta. O presente trabalho se propõe a estudar, sob o ponto de vista técnico e econômico, uma solução baseada no fornecimento de energia a uma parcela da iluminação pública por meio de um conjunto de baterias. Estas baterias, por sua vez, seriam recarregadas diariamente pela própria rede da concessionária, fora do horário de ponta. Tanto os estudos técnicos quanto econômicos atestaram a viabilidade da solução proposta.

### Palavras-Chave:

Inversores; Baterias; Iluminação pública; Nivelamento de demanda; Conservação de energia.

## 1 - Introdução

A Companhia Energética de Brasília (CEB) é a responsável pelo suprimento em energia elétrica de todo o Distrito Federal, composto por Brasília e cidades satélites. Atualmente, o sistema CEB encontra-se próximo ao limite de sua capacidade de fornecimento. Esta situação delicada obriga a concessionária a gerenciar cargas significativas durante o horário de ponta, a fim de evitar o colapso do mesmo. Neste contexto, e considerando a escassez de recursos, a CEB procura soluções que permitam aliviar o seu sistema durante o horário de ponta e, conseqüentemente, postergar os investimentos necessários para ampliar o seu sistema de distribuição.

Em projeto conjunto, a CEB e o Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília decidiram analisar a viabilidade de se retirar do sistema uma parcela da iluminação pública durante o horário de ponta (1). Durante este intervalo, essa carga seria alimentada por uma fonte alternativa de energia, propiciando, assim, o alívio de carga desejado à rede da CEB. A so-

lução proposta foi a de construir um sistema que seja capaz de armazenar energia durante os períodos de baixa demanda e que possa restituí-la durante o horário de ponta. Na configuração selecionada, este sistema é composto por um retificador, um conjunto de baterias, um inversor e um transformador (figura 1).

Este estudo apresenta os resultados da análise, tanto sob o ponto de vista técnico, como sob o ponto de vista econômico, da solução proposta. Para sua realização, selecionou-se um ramal típico do sistema de iluminação pública da CEB. Este ramal, trifásico e equilibrado, tem uma carga de 30 kVA, composta exclusivamente por lâmpadas a vapor de mercúrio, com seus respectivos reatores de alto fator de potência. As simulações foram conduzidas em um modelo reduzido da configuração proposta, especialmente construído para este fim. A análise econômica foi feita comparando-se os custos marginais do sistema elétrico brasileiro com estimativas de custo dos componentes, obtidas através de contatos com os fabricantes.

## 2 - Componentes da Fonte Alternativa

A fonte alternativa de energia funciona como um pequeno reservatório de energia. Fora do período de ponta a fonte acumula energia fornecida pela concessionária. Durante um intervalo do período de ponta esta energia é restituída ao ramal de iluminação. A seguir, são discutidas as características principais de cada elemento.

### 2.1 - Retificador

Os fabricantes de baterias garantem que, para não reduzir a sua vida útil, elas devem ser carregadas à cor-

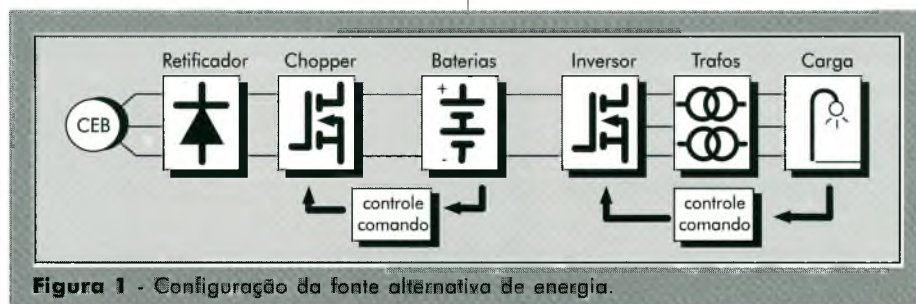


Figura 1 - Configuração da fonte alternativa de energia.

rente constante. Esta restrição impõe ao retificador um controle eficiente da sua corrente de saída. Uma solução evidente seria a utilização de um retificador trifásico controlado (i.e. a tiristores). Porém, a tensão retificada apresentaria um "ripple" muito elevado. Simulações digitais mostraram que seria necessário um grande indutor de alisamento para que a corrente de carga das baterias atendesse às especificações do fabricante. Outra solução seria utilizar um retificador trifásico não controlado (i.e. a diodos) em série com um "chopper" tipo "buck" à base de transistores MOSFET e trabalhando com frequências elevadas, da ordem de 20 kHz (figura 1). Além de otimizar os filtros na saída do retificador, esta configuração apresenta um desempenho bastante superior.

## 2.2 - Baterias

As baterias trabalham em dois regimes distintos. No primeiro, fora do horário de ponta, e que dura aproximadamente 10 horas, elas são carregadas pelo sistema CEB através do retificador descrito anteriormente. No segundo, durante uma parcela do horário de ponta, de cerca de trinta minutos, as baterias se descarregam, alimentando uma parte do sistema de iluminação.

Os principais tipos de acumuladores disponíveis no mercado são os chumbo-ácidos e os alcalinos. Em média, o preço das baterias alcalinas é da ordem do dobro do preço das baterias chumbo-ácidas. No entanto, para este regime específico de trabalho, ou seja, um ciclo completo de carga e descarga diário, as baterias alcalinas apresentam características de funcionamento, manutenção e durabilidade bem superiores às das baterias chumbo-ácidas. Considerando-se a potência (30 kVA) a ser fornecida durante o tempo especificado (30 min), as baterias foram dimensionadas para 300 V/140 Ah.

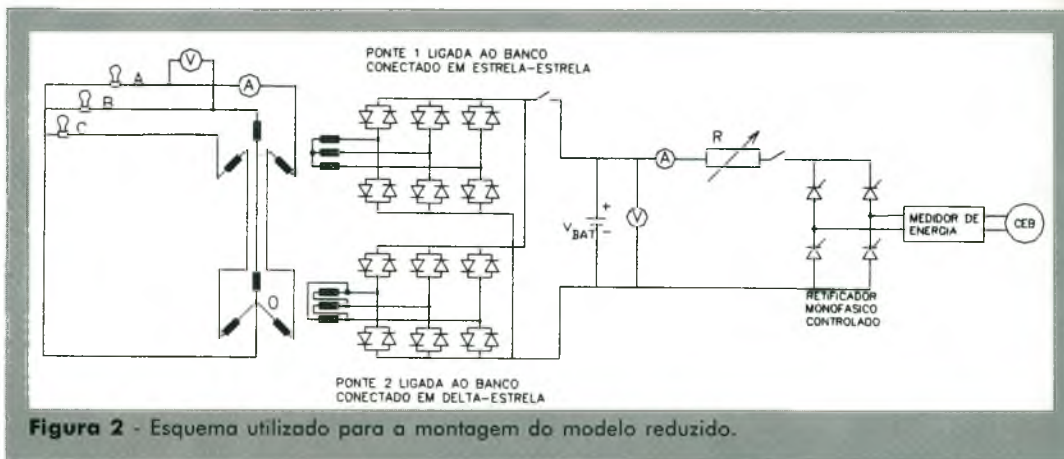


Figura 2 - Esquema utilizado para a montagem do modelo reduzido.

## 2.3 - Inversor

A energia acumulada nas baterias é restituída ao sistema através de um inversor em série com um banco de transformadores (figura 1). Um dos principais aspectos a se considerar no dimensionamento do inversor é o seu número de pulsos. Como se sabe, os inversores injetam na carga harmônicos de ordem  $np \pm 1$ , onde  $p$  é o número de pulsos (2).

Apesar de não se ter nenhuma informação quanto ao funcionamento da lâmpada ou quanto à redução da sua vida útil em função da distorção harmônica da fonte, optou-se por uma configuração de doze pulsos (em detrimento de uma configuração mais simples de seis pulsos). De fato, com um pequeno acréscimo no custo do equipamento, obtém-se uma melhora considerável na qualidade da tensão de suprimento.

O inversor de doze pulsos é constituído por dois inversores de seis pulsos cujas entradas são ligadas em paralelo à bateria. Cada inversor deve veicular uma potência de cerca de 15 kVA. Considerando-se as tensões e correntes envolvidas, bem como a sua frequência de funcionamento, os semicondutores IGBT (Insulated

Gate Bipolar Transistor) representam a melhor solução. Além disto, devido à sua ampla utilização, encontra-se no mercado módulos compactos integrando os IGBTs, os circuitos de amortecimento e toda a eletrônica necessária à polarização, adaptação e isolamento dos pulsos de comando. O sistema de comando, controle e proteção, baseado em um microcontrolador 8031 (8 bits, 11,05 MHz), é realizado em um cartão eletrônico independente.

## 2.4 - Transformador

A função do transformador é ajustar a tensão de saída do inversor à tensão da carga (220V) e, em conjunto com os inversores, eliminar os harmônicos de ordem  $6n \pm 1$ , para  $n$  ímpar. Para isso, as saídas dos inversores são ligadas a dois transformadores conectados em YY e  $\Delta Y$ , respectivamente (figura 2). No secundário (lado da carga), os transformadores são ligados em série. Desta forma as tensões produzidas pelos dois inversores são adicionadas, eliminando os harmônicos (3). Além disto, é importante que as tensões nos secundários dos transformadores estejam em fase. Isto é obtido atrasando de 30 graus o disparo da segunda ponte inversora, de forma a compensar o atraso intrínseco da conexão do transformador. A forma de onda teórica na carga, considerando inversores ideais, é apresentada na figura 3.

Como os secundários dos transformadores estão ligados em série, cada transformador deve ser dimensionado para metade da potência fornecida à carga, ou seja 15 kVA. Conside-

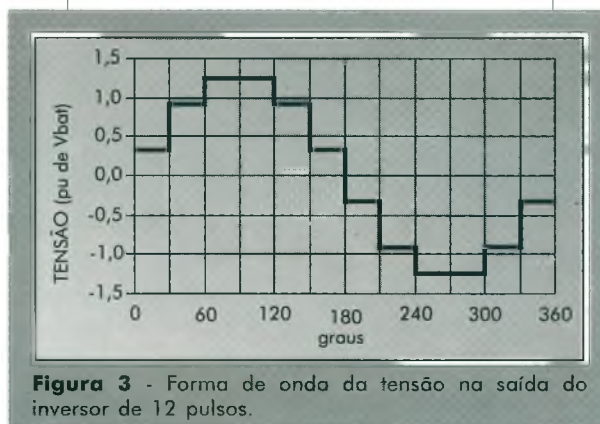


Figura 3 - Forma de onda da tensão na saída do inversor de 12 pulsos.

rando-se que a tensão para alimentação das lâmpadas é 220 V (fase-neutro), os transformadores devem ser dimensionados para 234 V/200 V (fase-fase). Nota-se que, como as tensões no primário e secundário são idênticas, o número de espiras do transformador conectado em  $\Delta Y$  deve ser  $\sqrt{3}$  vezes maior. Finalmente, é conveniente que as reatâncias de dispersão por fase de cada transformador sejam iguais de forma a manter o circuito equilibrado sem correntes de circulação entre eles.

### 2.5 - Lâmpada

As lâmpadas a vapor de mercúrio representam a carga específica da fonte de alimentação alternativa. Embora de uso corrente, é surpreendente a falta de estudos e referências bibliográficas sobre o seu desempenho. É desconhecido dos fabricantes consultados (e dos autores) o efeito das distorções harmônicas na vida útil destas lâmpadas. Por outro lado, sabe-se que um aumento na frequência de alimentação aumenta a quantidade de iluminação fornecida. Outra característica importante deste tipo de lâmpada é a necessidade do reator em série para limitar a corrente de partida. Estes reatores são responsáveis por 10 a 20% de perdas.

### 3 - Análise Técnica

Foi montado no laboratório um modelo reduzido do sistema para se analisar a viabilidade técnica do projeto (figura 2). O modelo reduzido tem as seguintes características: um retificador controlado monofásico 48 V, dois conjuntos de baterias chumbo-ácidas (um industrial de

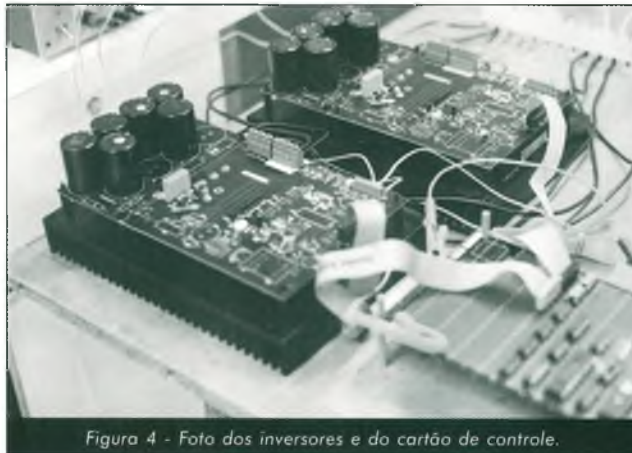


Figura 4 - Foto dos inversores e do cartão de controle.

22Ah, outro automotivo de 36 Ah, dimensionadas para uma descarga de 30 minutos); dois inversores trifásicos a MOSFET de 50V/ 50A; dois bancos de transformadores com relação de transformação 71/239 e 41/239, de 500 VA cada; e, um conjunto de três lâmpadas de 250 W com seus respectivos reatores. Uma foto de parte do modelo reduzido é mostrada na figura 4. Além disto, foi construído um cartão de controle digital para comando dos circuitos inversores. Este cartão permite a entrada de diferentes seqüências de disparo por meio de um microcomputador.

O modelo reduzido foi testado para uma única seqüência de disparos. Os resultados obtidos foram muito bons e mostram que o equipamento proposto é tecnicamente viável. A tensão nos terminais da bateria decai linearmente com o tempo. Comparando a bateria industrial com a bateria automotiva, observa-se um maior rendimento da primeira, como era de se esperar. A figura 5 mostra o perfil de tensão dos dois tipos de bateria em função do tempo.

A forma de onda da tensão na carga é mostrada na figura 6. Observa-se um forte componente de 11° harmônico sem que isto afete visivelmente o funciona-

mento das lâmpadas. A flexibilidade do cartão de controle permite que outras seqüências de disparo sejam testadas. Está em fase de teste uma seqüência PWM que elimine o 11° harmônico da tensão de saída.

### 4 - Análise Econômica

A estrutura de custos do equipamento em estudo foi montada tomando-se por base o fornecimento, durante trinta minutos, de energia para atendimento da carga de um circuito típico de iluminação pública da CEB. O equipamento proposto possui a mesma configuração usada no modelo reduzido, diferindo, apenas, no dimensionamento. A localização

da fonte alternativa de energia deve ser a própria subestação da CEB, junto ao barramento que alimenta o circuito de iluminação.

O levantamento de custos foi desenvolvido para uma vida útil de 30 anos. A tabela 1 resume os preços dos diversos componentes do equipamento em estudo. Estes valores foram levantados em maio/95, junto aos fabricantes. Para as baterias, cuja vida útil é de apenas 10 anos, foi considerado o valor presente da seqüência de 3 investimentos com uma taxa de 10% aa. O valor relativo dos componentes estão mostrados na figura 7.

Tabela 1 - Estrutura de custos aproximados da fonte de energia alternativa.

Elemento	Preço (R\$)
CONJUNTO DE BATERIAS	40.000,00
RETIFICADOR	4.500,00
INVERSOR	5.500,00
TRANSFORMADORES	1.500,00
OUTRAS DESPESAS	2.500,00
TOTAL PARA 30 kVA (R\$)	54.000,00
TOTAL POR kW (R\$/kW)	2.000,00

O preço do equipamento (2.000,00 R\$/kW) deve ser comparado com o custo marginal do sistema para o período de ponta. Este custo deve considerar a geração, a transmissão e a distribuição da energia, uma vez que a carga (iluminação pública) se encontra no final da cadeia de produção de energia elétrica.

Segundo publicação do DNAEE de dezembro de 1994 (4), o custo

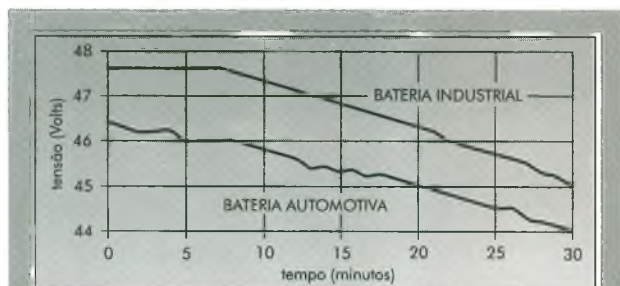


Figura 5 - Evolução da tensão nos terminais da bateria durante um ciclo de descarga.



Figura 6 - Tensão  $V_{AN}$  com a carga ligada.



Figura 7 - Repartição de custos da fonte alternativa de energia.

marginal médio de geração de energia pura para o horário de ponta seca é R\$ 35,30/MWh. O custo marginal de potência, considerando o fator de carga do sistema CEB igual a 0,625, é R\$ 3,23/MWh. Somando-se estes valores, obtém-se um valor de R\$ 38,53/MWh. O DNAEE não dispõe de dados atuais de custos marginais de transmissão e de distribuição; no entanto, para este estudo, supõe-se que o custo da geração equivale aproximadamente a 50% do custo total do sistema, cabendo os demais 50% à transmissão e à distribuição, chega-se ao custo final de R\$ 77,06/MWh ou R\$ 421,90/kW.ano. Calculando-se o valor presente deste investimento, que será postergado, considerando

É interessante observar que 75% do custo do equipamento proposto se refere às baterias. É conveniente, contudo, verificar até que ponto a fonte de energia é realmente mais econômica. Se o conjunto de baterias for dimensionado para atender a mesma carga durante um período de tempo maior, é necessário especificar-se uma bateria de maior capacidade, o que acarreta maiores custos. A tabela a seguir resume esta análise, até o limite de viabilidade econômica.

A alternativa mostra-se viável economicamente para um período de até uma hora e meia. Isto poderia parecer indesejável, já que o período de ponta no Brasil é definida para um período de 3 horas. No entanto, a curva de carga da CEB mostra que a ponta efetiva do seu sistema ocorre por um período inferior a uma hora.

## 5 - Conclusões

O modelo proposto de alimentação alternativa da iluminação pública se mostrou técnica e economicamente

viável. A análise econômica mostrou que, mesmo sendo um equipamento caro, ele é comparável ao custo marginal de geração. Como este custo é crescente e o custo das baterias tende a diminuir, a médio prazo esta solução pode e deve ser adotada. Toda a análise foi feita baseada em dados regionais; no entanto, nada impede que a mesma solução seja adotada por outras concessionárias do Brasil.

O modelo reduzido apresentou um excelente desempenho. A utilização de um cartão de comando e controle digital abre a possibilidade de uma infinidade de novas investigações nesta área. No momento testa-se a possibilidade de se eliminar o 11º harmônico da tensão de saída através de uma seqüência apropriada de disparos, analisa-se uma malha para controle do módulo da tensão da carga e, finalmente, a possibilidade da retirada dos reatores de partida.

## 6 - Agradecimentos

Este projeto foi patrocinado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF). Os autores agradecem, também, ao apoio da CEB.



## Bibliografia

- (1) RODRIGUES, M.E.C., "Alimentação alternativa da iluminação pública para nivelamento de demanda", Tese de Mestrado, Universidade de Brasília, 1995.
- (2) KIMBARK, E.W., "Direct Current Transmission", Wiley Interscience, vol. 1, New York, 1971.
- (3) OLIVEIRA, M.A.G., "Alimentation d'un réseau électrique isolée par une liaison à courant continu et un compensateur statique avancé", Tese de Doutorado, Université de Pierre et Marie Curie, Paris, 1994.
- (4) "Programa de revisão tarifária - Custos do Sistema", DNAEE, Brasília, 1994.

Tabela 2 - Viabilidade econômica do equipamento em função do tempo.

Período de descarga (min)	Capacidade da bateria (Ah)	Custo do equipamento (R\$/kW)	Viável
30	140	2.000,00	SIM
60	220	2.800,00	SIM
90	300	3.800,00	SIM
120	350	4.400,00	NÃO

um período de 30 anos com a mesma taxa de juros (10 % aa). Chega-se ao valor de R\$ 3.977,00/kW. Comparando-se o custo total do equipamento proposto, R\$ 2.000,00/kW com o custo marginal de geração, transmissão e distribuição (investimento a ser postergado), R\$ 3.977,00/kW, conclui-se que a fonte de energia alternativa ora apresentada é perfeitamente justificável economicamente.