

## Capítulo XII

# Redução do consumo de energia na iluminação pública com lâmpadas a vapor de sódio

*Por Antônio Torres Junior e Marcílio Feitosa\**

A crise de energia elétrica que afetou o Brasil, em toda sua extensão territorial, em 2001, obrigou a população, as empresas privadas e as estatais a economizar energia elétrica, deixando, após a solução do problema, uma conscientização da necessidade de utilização de sistemas de iluminação mais econômicos.

No caso da iluminação pública no Brasil, conforme a Eletrobras/Procel, ainda existem sistemas antigos de iluminação com lâmpadas de média e baixa eficiência e com grande participação no total de pontos de luz da iluminação pública em nosso país. Do total de 15 milhões de pontos de luz da iluminação pública cadastrados no Brasil, 31,84% utilizam lâmpadas a vapor de mercúrio (eficiência entre 46 e 55 lumens/watt), 2,22% utilizam lâmpadas de luz mista (eficiência entre 19 e 21 lumens/watt) e 1,42% utilizam lâmpadas incandescentes (eficiência entre 15,5 e 17,6 lumens/watt). Também de acordo com a Eletrobras, atualmente, as lâmpadas mais eficientes em uso no Brasil são as lâmpadas a vapor de sódio de alta pressão (eficiência entre 94 e 150 lumens/watt). Elas participam com 63% do total dos pontos de luz da iluminação pública.

O Plano Nacional de Eficiência Energética (publicado pelo Ministério de Minas e Energia) na sua versão de outubro de 2011 apresenta, entre as linhas de ações, a substituição dos demais tipos de lâmpadas ainda em uso na iluminação pública (lâmpadas vapor

de mercúrio, luz mista e incandescente) por lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão e a promoção de estudos de viabilidade de criação de uma indústria nacional de Leds de alta potência. Pode-se então assegurar que as lâmpadas a vapor de sódio serão utilizadas por um bom tempo no nosso sistema público de iluminação. Essa escolha também apresenta uma manutenção mais segura e mais barata em função do seu tempo de vida – de aproximadamente sete anos em sistemas a vapor de sódio em alta pressão, de quase quatro anos em sistemas a vapor de mercúrio, de dois anos em sistemas de luz mista e de aproximadamente três meses em sistemas baseados em lâmpadas incandescentes (valores baseados no tempo de funcionamento diário da iluminação pública, de 12 horas).

Considerando que o sistema atual de iluminação pública no Brasil é projetado com base no pico do tráfego de automóveis e pedestres na norma ABNT NBR 5101-7, estão sendo propostas duas soluções para aumentar a eficiência energética desse sistema baseadas na dimerização inteligente das lâmpadas a vapor de sódio. Com essa dimerização, pretende-se reduzir o fluxo luminoso da lâmpada e, conseqüentemente, proporcionar uma redução significativa no consumo de energia elétrica. Essa redução será função do tráfego medido na via ao longo do período noturno e da iluminação ambiente, respeitando-se a norma ABNT NBR 5101.

### **Soluções propostas para a redução do consumo**

Nos tópicos a seguir são apresentadas duas possíveis soluções que possibilitam a redução do consumo de energia nos sistemas de iluminação pública. Essas soluções envolvem exclusivamente lâmpadas a vapor de sódio de alta pressão e a motivação em focar nessas lâmpadas baseou-se no fato de que 62,93% de todo o sistema de iluminação pública no Brasil é composto por tais lâmpadas, conforme levantamento da Eletrobras/Procel.

#### **Diminuição do fluxo luminoso da lâmpada por meio da dimerização automática em horário fixo**

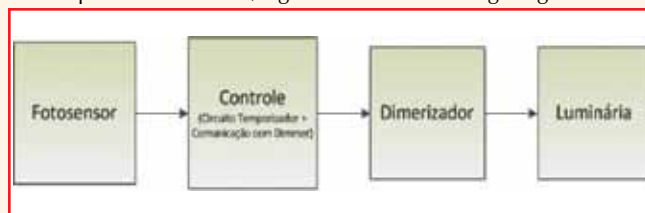
Nessa solução, o fluxo luminoso da lâmpada a vapor de sódio é reduzido em 40%, o que implica, de acordo com a folha de dados fornecida pelo fabricante, redução de até 32,7% do consumo de energia elétrica da lâmpada (o limite de 40% de redução é devido ao máximo percentual de dimerização conseguido para lâmpadas a vapor de sódio sem provocar o seu apagamento). Essa redução ocorre de uma vez, seis horas após o início do funcionamento da lâmpada, que é determinado por um foto sensor como nos sistemas tradicionais. O desligamento também é automático e baseado na luminosidade ambiente. Assim, em um sistema aplicado na região nordeste, por exemplo, tem-se o ligamento automático da lâmpada por volta das 17h30, a dimerização após seis horas (por volta das 23h30) e o desligamento perto das 5h30, em um típico dia de

verão. O controle da luminosidade é realizado por meio de um sistema tal qual o da Figura 1.

Os relés fotoelétricos utilizados na iluminação pública não foram aproveitados nesse projeto, pois eles fornecem saída binária (liga/desliga) e o circuito proposto necessita de uma tensão proporcional ao iluminamento, como será visto na solução B. Optou-se por utilizar LDRs (resistores dependentes da luminosidade) em ambas as soluções, o que reduz o custo e melhora a performance, já que os relés são uma das principais causas de falha no sistema convencional.

A informação referente à luminosidade ambiente, proveniente do foto sensor, aciona o circuito temporizador no momento que a lâmpada acende e, decorridas seis horas, o circuito envia, por meio do barramento Dali, o comando para dimerizar a lâmpada reduzindo sua luminosidade em 40%. Por fim, temos o reator dimerizador e uma luminária montada com a lâmpada a vapor de sódio.

O protocolo Dali (Digital Addressable Lighting Interface)



**Figura 1 – Diagrama em blocos do sistema proposto na solução A.**

determina um padrão de comunicação bidirecional entre o sistema de controle e os dispositivos dimerizáveis, utilizando apenas um par de fios. Assim, além de se enviar comandos sobre o nível de iluminação, o sistema também poderia obter informações das luminárias, permitindo sua monitoração remota.

Uma mesma unidade de controle poderia atuar em diversas lâmpadas em uma via e com uma monitoração única do fluxo de veículos ao invés da monitoração distribuída. No nosso sistema, optou-se por unidades independentes por poste, o que facilita a manutenção corretiva e preventiva dos componentes do sistema. Em grandes avenidas, onde os postes apresentam pétalas de iluminação com duas ou mais luminárias, a iluminação de todas as luminárias da pétala é controlada por um único sistema.

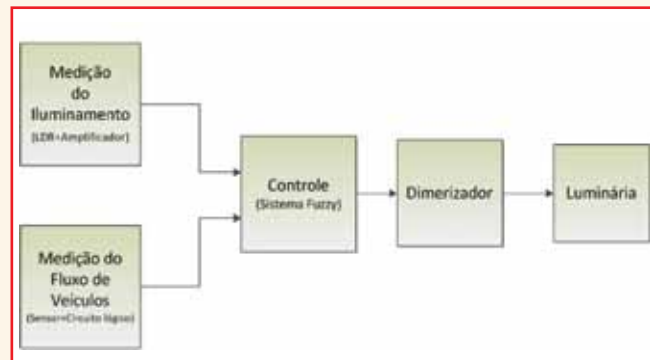
### **Diminuição do fluxo luminoso da lâmpada por meio de dimerização automática controlada pelo fluxo de veículos**

Essa solução incorpora a análise do fluxo de veículos por hora que percorre a via. A medição do tráfego é realizada durante intervalos de seis minutos por sensores ultrassônicos com saída PWM (Modulação por Largura de Pulso). O tempo de seis minutos foi estabelecido, pois, neste trabalho, foi adotado o "Método para contagem volumétrica abreviada", indicado em uma Nota Técnica da Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo. Além disso, coincide com o tempo máximo de estabilização da lâmpada a vapor de sódio usada nesse projeto, conforme catálogo do fabricante. Estas lâmpadas foram escolhidas para a construção dos protótipos desse trabalho em função de parceria estabelecida com a fabricante, que forneceu as citadas lâmpadas, e por apresentarem vantagens em relação às lâmpadas convencionais, como menor tempo de estabilização (seis minutos contra 12 das demais), maior tempo de vida média (32 mil horas contra 24 mil horas das convencionais) e maior fluxo luminoso (17.000 lumens contra os 15.000 para lâmpadas de 150 W).

Nessa solução, a partir das 17h30 (considerando a mesma situação utilizada na solução A), a iluminação proporcionada pela lâmpada a vapor de sódio aumentará gradativamente, compensando a queda da luminosidade ambiente medida pelo foto sensor. Até o escurecimento total do dia, a intensidade luminosa a ser fornecida pela lâmpada será uma função de dois fatores: a luminosidade ambiente e o fluxo de veículos por hora na via. Essas variáveis atuam em um sistema de controle baseado em lógica fuzzy, que irá determinar o fluxo luminoso da lâmpada (atualizada em intervalos de seis minutos).

Após o escurecimento total do dia, a luminosidade das lâmpadas dependerá do horário e do fluxo de veículos por hora, atendendo às exigências da norma ABNT NBR 5101. Adicionalmente, mantendo-se a analogia ao exemplo da solução A, a partir das 23h30 a dimerização pode ser total, ou seja, de até 40% do fluxo luminoso, permanecendo com essa redução até as 5h30 da manhã do dia.

A Figura 2 esquematiza essa solução, composta por um circuito sensor da iluminação ambiente, um sensor para o fluxo de veículos, ambos fornecendo informações para o controlador fuzzy que, por sua vez, enviará via barramento DALI o comando ao reator dimerizador ligado à luminária montada com a lâmpada vapor de sódio em alta pressão.



**Figura 2 – Diagrama em blocos do sistema proposto na solução B.**

É importante enfatizar que esse tipo de solução só se tornou possível a partir de agosto de 2010 quando, de acordo com o fabricante, os reatores dimerizáveis para lâmpadas a vapor de sódio de alta pressão começaram a ser comercializados no Brasil. Inicialmente com controle analógico por meio de níveis de tensão de 0-10 V como entrada e, em seguida, com controle digital via protocolo Dali. Os reatores com controle analógico tiveram sua produção descontinuada mundialmente pela fabricante.

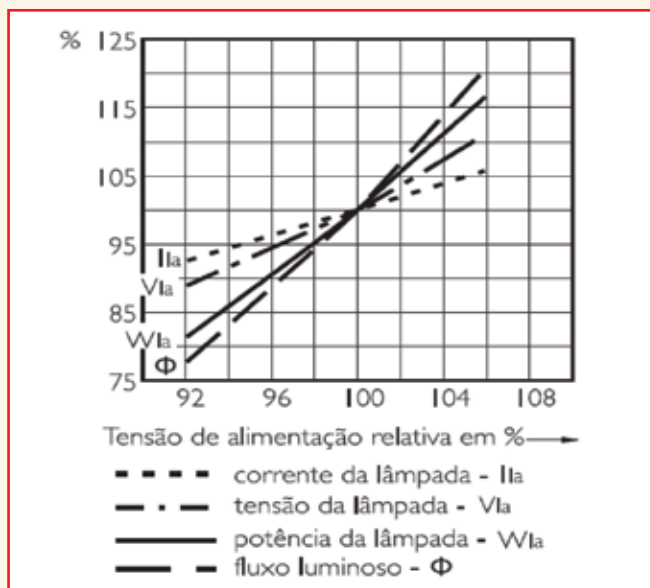
Para melhor esclarecer a relação entre o fluxo luminoso (com dimerização máxima de 40%) e a potência elétrica (com redução máxima de 32,7%), nas lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão, devemos visualizar o gráfico da Figura 3. Pode-se ver o efeito da variação da tensão da rede, nas características elétricas e fotométricas das lâmpadas. As características incluídas nesse gráfico são a corrente da lâmpada (I<sub>la</sub>), sua tensão (V<sub>la</sub>), potência (W<sub>la</sub>) e o fluxo luminoso (Φ). A maior influência da variação da tensão da rede ocorre exatamente no fluxo luminoso da lâmpada em relação às demais características envolvidas.

Pode-se verificar que, para uma tensão aplicada de 92% da tensão nominal, as lâmpadas a vapor de sódio de alta pressão e alto desempenho apresentam uma queda na potência consumida para, aproximadamente, 82% do valor nominal da potência e o fluxo luminoso é reduzido a, aproximadamente, 78% do seu valor nominal. Dessa forma, podemos entender que a queda do fluxo luminoso (22%) é maior que a queda da potência (18%). Visto que as variações são lineares, podemos aplicar uma regra de três simples e obter que, para uma redução de 40% no fluxo luminoso, teremos uma redução equivalente de 32,7% na potência consumida pela lâmpada.

### **O sistema de controle**

Como já citado anteriormente, um circuito de controle é responsável pelo envio do comando correto ao reator dimerizador.

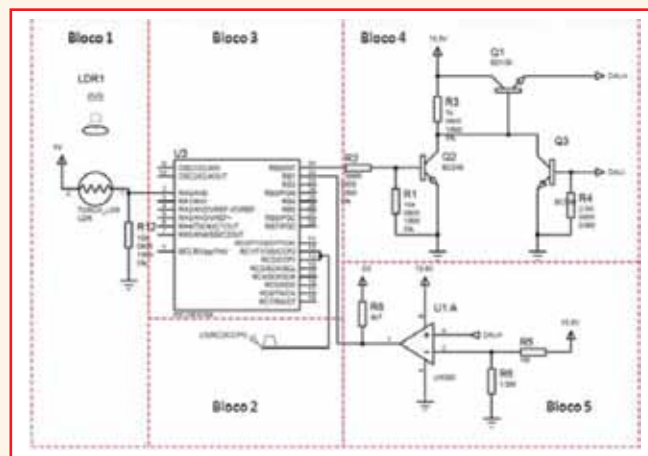
A principal diferença entre as duas soluções propostas é que na solução B temos uma lógica fuzzy determinando o melhor ponto de operação da lâmpada em função das variáveis de entrada do sistema. O circuito de controle é baseado em um microcontrolador da família PIC, o PIC 16F690, e pode ser visualizado na Figura 4. Nesse esquema, alguns elementos foram omitidos para não sobrecarregar a figura.



**Figura 3 – Efeitos da variação da tensão da rede, nas características elétricas e fotométricas das lâmpadas a vapor de sódio de alta pressão.**

Os blocos 1 e 2 constituintes do circuito são, respectivamente, a tensão analógica proporcional à luminosidade ambiente e um sinal PWM (Modulação por Largura de Pulso) proveniente do sensor ultrassônico utilizado para medir o fluxo de veículos por hora e que consegue detectar objetos a uma distância de até 10 metros. Essas duas entradas são analisadas pelo controlador fuzzy implementado no microcontrolador (bloco 3), de acordo com as funções de pertinência para essas duas variáveis. A saída da lógica fuzzy é um número entre 1 e 254 relacionado com a luminosidade a ser fornecida pela lâmpada. Esse número (na forma binária) juntamente com outros bits de endereçamento, forma um pacote de dados a ser enviado pelo microcontrolador, de forma serial, ao reator, de acordo com a norma IEC 60929. A taxa de transmissão deve ser de 1200 bits/s e o barramento Dali trabalha com níveis de tensão que podem variar de 11,5 VDC a 20,5 VDC para nível alto, e -4,5 VDC a +4,5 VDC para o nível baixo, com um limite de corrente de, no máximo, 250 mA para todos os dispositivos ligados ao barramento. Neste trabalho, optou-se por utilizar como nível alto 12VDC e como nível baixo 0 VDC.

O bloco 4 da Figura 4 traz o circuito responsável pela adequação dos níveis de tensão, bem como por limitar o valor de corrente. Por fim, como o barramento é bidirecional, é necessário um circuito para adequar os dados provenientes dos reatores (com informações sobre o estado das lâmpadas) para serem processados pelo microcontrolador (bloco 5).

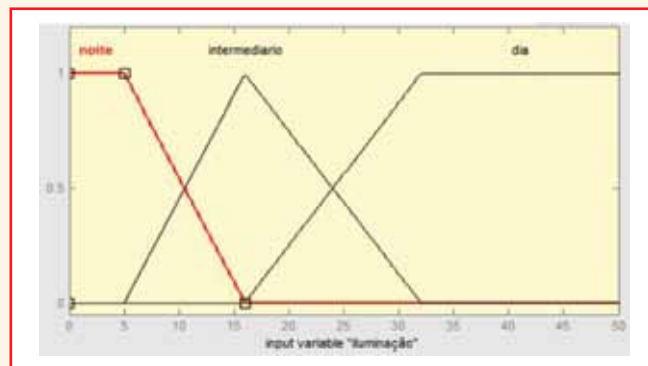


**Figura 4 – Diagrama esquemático do circuito de controle microcontrolado, dividido em blocos.**

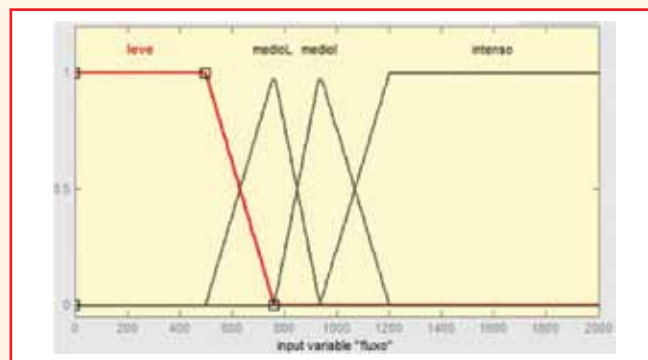
O reator utilizado nesse trabalho é para uso específico nas lâmpadas a vapor de sódio de alta pressão. Ele controla o fluxo luminoso da lâmpada pela variação da frequência do sinal aplicado a ela (o que consequentemente faz variar a corrente que percorre a lâmpada).

O sistema fuzzy foi modelado, utilizando o programa Matlab®, antes de ser implementado na solução B. As funções de pertinência estabelecidas para as variáveis linguísticas das entradas e da saída são apresentadas nas Figuras 5 a 7.

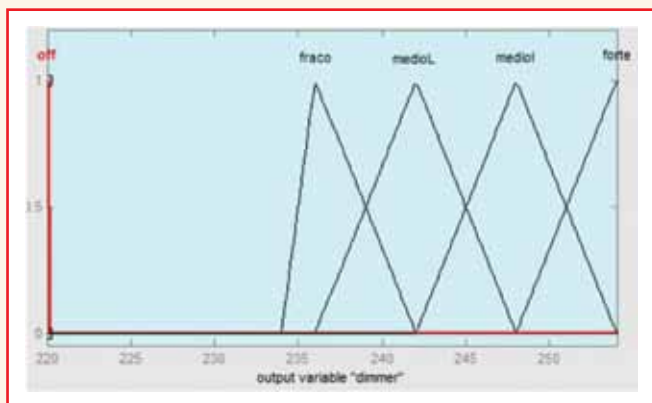
Para a iluminação ambiente (Figura 5), foram definidas as seguintes variáveis linguísticas para o processo de fuzzificação: a) Noite (iluminação natural variando de 0 a 5 lux); b) Dia (iluminação natural acima de 32 lux); e c) Intermediário, representando no gráfico o anoitecer (entre 16 e 5 lux) e o amanhecer (entre 16 e 32 lux).



**Figura 5 – Funções de pertinência para a variável de entrada Iluminação.**



**Figura 6 – Funções de pertinência para a variável de entrada "Fluxo de veículos".**



**Figura 7 – Funções de pertinência para a variável de saída “dimerização”.**

Para o fluxo de veículos (Figura 6), foram definidas as seguintes classificações no processo de fuzzificação: a) Tráfego leve, correspondendo ao fluxo de 0 a 500 veículos por hora (apesar da norma ABNT NBR 5101 tabelar o tráfego leve entre 150 e 500 veículos por hora, adotou-se nesse trabalho como tráfego leve de 0 a 500 veículos por hora); b) Tráfego médio leve (em torno de 780 veículos por hora); c) Tráfego médio intenso (em torno de 950 veículos por hora); e d) Tráfego intenso (acima de 1.200 veículos por hora).

Apesar de a norma ABNT NBR 5101 apresentar apenas a classificação de tráfego médio para uma variação de 501 a 1200 veículos por hora, a subdivisão em tráfego médio leve e tráfego médio intenso torna mais precisa a atuação do algoritmo Fuzzy.

De acordo com a norma IEC 60929, o controle da luminosidade de uma lâmpada pelo protocolo Dali permite 254 níveis distintos de intensidade entre a lâmpada praticamente apagada (para o qual se deve enviar o byte 1 no pacote de dados transmitido ao reator) e a lâmpada totalmente acesa (para o qual se deve enviar o byte 254 no pacote de dados transmitido ao reator). Observando que a lâmpada a vapor de sódio de alta pressão tem um limite de dimerização de 40% do fluxo luminoso, a saída do controlador fuzzy deve fornecer apenas bytes situados entre 235 (59,53% do fluxo luminoso) e 254 (100% do fluxo luminoso), valores esses indicados na curva que relaciona o byte de controle a ser transmitido pelo barramento e a intensidade luminosa desejada. Essa curva, indicada na Figura 8, está determinada na norma IEC 60929. Determinou-se, para uma maior precisão no controle, que a saída teria quatro conjuntos, ou termos linguísticos, que representam as proposições fuzzy para as variáveis. Esses termos, a serem utilizados no processo de defuzzificação e relacionados à intensidade luminosa da lâmpada, foram: a) Fraca (byte de controle igual a 235); Média leve (byte de controle igual a 242); Média intensa (byte de controle igual a 248) e Forte (byte de controle igual a 254). As funções de pertinência estão na Figura 7.

### **Aplicação das soluções em vias urbanas**

As duas soluções desenvolvidas nesse trabalho serão aplicadas em vias urbanas, do tipo C1 (vias principais), C2 (vias normais) ou C3 (vias secundárias), conforme classificação estabelecida pela norma ABNT NBR 5101. É sugerida a aplicação de uma ou outra solução nos casos a seguir enumerados.

A solução A deve ser aplicada, de preferência, em vias secundárias do tipo C3, em função do seu menor custo em relação à solução B e em função do maior número de vias secundárias, em comparação com o número existente de vias normais e principais. Tabelas presentes na norma ABNT NBR 5101 determinam a iluminância média mínima para esse tipo de via como sendo de 5 lux para tráfego médio de veículos e pedestres e de 2 lux para tráfego leve de veículos e pedestres. Ou seja, a norma permite uma redução de até 60% no iluminamento, com a redução do tráfego de médio para leve.

Assim, a redução prevista pela solução A (de 40%) está dentro dos limites estabelecidos pela norma. Essa solução pode também ser aplicada a vias normais, tipo C2. Para essas vias, a norma permite uma redução de 50% no iluminamento se o tráfego cair de médio de veículos e intenso de pedestres para leve de veículos e médio de pedestres. Se o tráfego de pedestres cair ainda mais, a redução poderia ser de até 80%. Em ambos os casos, a dimerização de 40% atende à norma.

A solução B deve ser aplicada somente em vias principais, do tipo C1, devido ao seu maior custo em relação à solução A, e em função da maior potência instalada nesse tipo de via, em que se pode fazer um maior investimento que será compensado com uma maior economia de energia. Para essas vias, a norma permite uma redução de 50% no iluminamento se o tráfego cair de intenso de veículos e pedestres para médio de veículos e pedestres, como pode ser visto na Tabela 1.

Existem casos, porém, que a redução máxima permitida é menor que os 40% previstos no nosso projeto. Um exemplo seria se, após as 23h30 (horário em que nosso sistema poderia passar a aplicar a dimerização máxima), o fluxo de veículos e pedestres, antes intenso para as duas variáveis, caísse para médio de pedestres, mas mantendo o de veículos. Em uma situação como essa, a norma autoriza a redução de 16 para 12 lux, ou seja, uma redução de apenas 25%. Nestes casos, a redução após esse horário será menor para atender à norma, e é o controlador fuzzy o responsável por permitir esse ajuste.

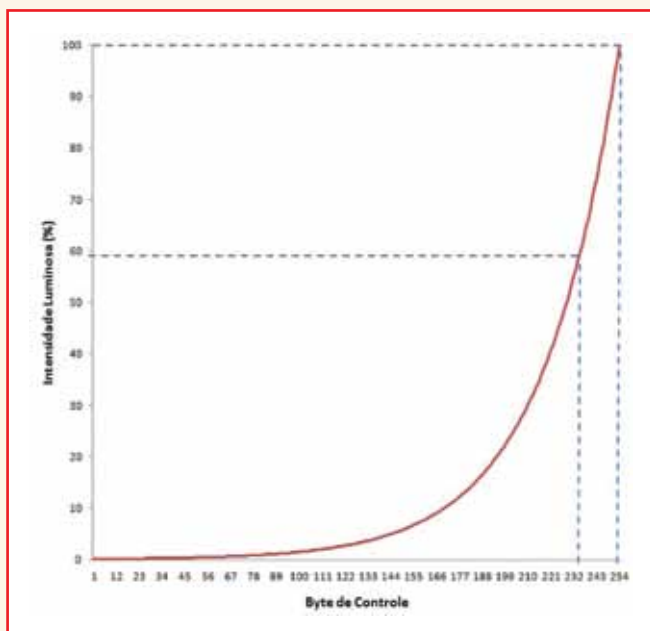


Figura 8 – Curva do protocolo DALI associando o byte de controle a ser enviado pelo barramento à intensidade luminosa desejada.

TABELA 1 – ILUMINÂNCIA MÉDIA MÍNIMA ( $E_{M,MIN}$ ) PARA AS VIAS PRINCIPAIS TIPO C1

ILUMINÂNCIA MÉDIA MÍNIMA ( $E_{M,MIN}$ ) PARA VIAS PRINCIPAIS TIPO C1 [7]				
Classificação do Tráfego	Veículos			
	L	M	I	
	$(E_{M,MIN})$ (lux)	$(E_{M,MIN})$ (lux)	$(E_{M,MIN})$ (lux)	
Pedestres	L	2	2	10
	M	5	8	12
	I	10	12	16

L=Fluxo Leve, M=Fluxo Médio, I=Fluxo Intenso

### Análise econômica das soluções apresentadas

Levando em consideração que o gasto com iluminação pública representa 3% de toda energia elétrica consumida no país, temos um consumo de aproximadamente 9.700 GWh/ano, ou seja, 9,7 bilhões de KWh/ano, para um funcionamento de 12 horas por dia de acordo com a média nacional. A solução A apresenta menor potencial de redução do consumo de energia elétrica em relação à solução B. A redução prevista é de 1.586 GWh/ano, correspondente aos 32,7% da redução desse consumo durante as 6 horas com dimerização fixa do fluxo luminoso.

Para a solução B, a economia prevista é maior e deve ficar em torno de 2.379 GWh/ano, o que correspondente a uma estimativa de 49,1% de redução no consumo (das 12 horas de funcionamento tem-se uma redução média de 16,4% no período das 17h30 às 23h30, em que a dimerização é parcial, e redução de 32,7% das 23h30 às 5h30 do dia seguinte).

Os potenciais de economia de energia acima citados, para as duas soluções, só serão possíveis caso 100% dos pontos de luz da iluminação pública tenham aderido ao sistema proposto. Considerando a situação atualizada do sistema de iluminação pública no Brasil, conforme levantamento realizado em 2008, pela Eletrobras/Procel, a economia prevista no consumo de energia elétrica ao se adotar a solução A, seria de 998 GWh/ano, pois o sistema brasileiro já utiliza, em cerca de 62,93% dos pontos de luz da iluminação pública, lâmpadas a vapor de sódio. A opção pela solução B traria uma redução prevista de, aproximadamente, 1.497 GWh/ano.

### Conclusões

As soluções descritas nesse trabalho objetivam aumentar a eficiência energética do sistema de iluminação pública vigente no nosso país, tentando reaproveitar ao máximo os dispositivos em uso. Ambas baseiam-se na utilização de lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão e, no momento, apresentam grandes vantagens em relação a possíveis soluções com Leds de potência, a saber: a) O custo de uma luminária montada com Leds corresponde, em média, a seis vezes o custo da luminária equivalente em vapor de sódio, b) O sistema brasileiro de iluminação pública conta, atualmente, com 62,93% de lâmpadas a vapor de sódio contra 0,03% (ou menos) de pontos com Leds de potência.

A solução A foi testada nos laboratórios da empresa EcoEnergia Gestão Energética e em campo, em uma luminária localizada no campus da Escola Politécnica de Pernambuco. Seu funcionamento ocorreu como esperado. Seu funcionamento, no controle da dimerização da lâmpada

de 150W dessa luminária, vem sendo acompanhado online através de imagens das câmeras de segurança presentes na escola, além das medições do nível de iluminação com o auxílio de um luxímetro. A solução B, por incorporar a medição do tráfego de veículos, está em fase de implantação em luminária situada em um poste em via próxima à universidade.

### **Referências bibliográficas**

- FILHO, A. M. B. *Leds para iluminação pública. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, 2009.*
- LUSTOSA, L. F. S. *Iluminação pública no Brasil: aspectos energéticos e institucionais. Dissertação de Mestrado em Planejamento Energético da Universidade do Rio de Janeiro, 2006.*
- ELETROBRAS-PROCEL. *Iluminação pública no Brasil, 2008.* Disponível em: <<http://www.eletrobras.gov.br/elb/procel/main.asp>>. Acesso em: 12 dez. 2011.
- PHILIPS. *Catálogos de produtos de iluminação, 2009.* Disponível em: <<http://www.catalogosiluminacao.philips.com.br/catalogo/>>. Acesso em: 12 dez. 2011.
- TEIXEIRA, W. *O que é Dali? LUME Arquitetura, Ed. 21, p. 62-65, set. 2006.*
- SZASZ, P. A.; PEREIRA, A. L. S. *Método para contagem volumétrica abreviada. Nota Técnica da Companhia de Engenharia de Tráfego de São Paulo, NT 066/81, jan. 1981.*
- Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. *Iluminação Pública – Procedimento. NBR 5101, Rio de Janeiro, 1992.*
- KLEIN, P. A. T. *Aplicação da lógica Fuzzy em software e hardware. Ed. Ulbra, 2003.*
- DALI International Standard: IEC 60929, 2003.

---

\*ANTONIO GONÇALVES TORRES JUNIOR é engenheiro eletricista, com experiência de 32 anos como luminotécnico (e outras funções) da Philips. Atualmente, é professor adjunto da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (UPE), no Departamento de Engenharia Elétrica, e cursa o Mestrado do Programa de Pós Graduação em Tecnologia da Energia (PPTE) da Escola Politécnica.

MARCÍLIO FEITOSA é engenheiro eletricista e eletrônico, mestre em biofísica e Doutor na Escola Eletrônica. Atua como professor adjunto na Escola Politécnica de Pernambuco e na Unibratrec. É professor do programa de pós-graduação em tecnologia da energia e do programa de pós-graduação em engenharia de sistemas, ambos da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco.

>>>> **FIM** <<<<

Obtenha este e outros capítulos do fascículo sobre “Sistemas de iluminação”, em formato PDF, no site [www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br). Dúvidas e outros comentários podem ser encaminhados para [redacao@atitudeeditorial.com.br](mailto:redacao@atitudeeditorial.com.br)