

USO DE LEDS EM SEMÁFOROS DE TRÂNSITO: UM ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA

Anderson L. de Lima, André Gonçalves Jedy, Fernando A. L. Corrêa e Ewaldo L. de Mattos Mehl
Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Paraná
Curitiba – Paraná - Brasil

Resumo – Este estudo teve como objetivo demonstrar a viabilidade técnica e econômica da aplicação de uma das mais modernas técnicas de iluminação, o LED (*light emitting diode*) ou diodo emissor de luz – como alternativa de substituição das lâmpadas incandescentes de baixa-eficiência utilizadas em semáforos de trânsito de veículos e de pedestres. Para isso foram realizados testes e ensaios com alguns módulos a LEDs destinados a semáforos e, utilizando como base a cidade de Curitiba/PR, foi feito um estudo econômico com a hipótese de que todos os semáforos da cidade atualmente providos de lâmpadas incandescentes passassem a usar a nova tecnologia. Os resultados demonstraram grandes benefícios e a efetividade dessa tecnologia para a Eficiência Energética, com total viabilidade econômica.

I. INTRODUÇÃO

O aumento crescente do consumo de energia, proporcionado pelo desenvolvimento humano, os avanços da ciência e a utilização de novas tecnologias, é um fato notório. Esse quadro indica uma perspectiva de desequilíbrio entre a oferta e demanda energética cada vez mais preocupante.

Neste cenário o uso racional da energia elétrica e a adoção de ações de redução das perdas e de racionalização técnico-econômica que promovam uma maior Eficiência Energética são cada vez mais necessárias. Com o intuito de colaborar para a promoção de novas alternativas para o uso eficiente da energia, foi realizado um estudo sobre a viabilidade técnica e econômica da substituição de lâmpadas incandescentes de baixa eficiência, utilizadas nas sinalizações semaforicas de trânsito de veículos e de pedestres, por conjuntos de alta eficiência luminosa, desenvolvidos com uma das mais avançadas técnicas de iluminação disponíveis, o LED. Para isso tomou-se como base os dados disponíveis da cidade de Curitiba, juntamente com ensaios em laboratório e pesquisa de campo.

Este projeto constitui em mais um subsídio no âmbito dos Projetos de Eficiência Energética e na implantação em larga escala em nosso país de solução tida como a próxima grande evolução em sistemas de iluminação, conforme demonstrado na Figura 1, que apresenta um resumo histórico sobre a evolução e tendências tecnológicas das lâmpadas utilizadas em iluminação [1].

Ainda que essenciais do ponto de vista da circulação e segurança para o trânsito, as cidades utilizam, em quase a totalidade dos semáforos, lâmpadas incandescentes de baixa eficiência, que apresentam pouca resistência a choques e vibrações e vida útil reduzida. Uma vez que os semáforos funcionam durante todo o dia, as autoridades municipais devem constantemente fazer a manutenção da sinalização através da troca de lâmpadas. Apesar deste esforço, a existência de lâmpadas inoperantes em semáforos importantes é constantemente verificada pelos motoristas e pedestres e traz freqüentemente transtornos ao trânsito, além de ser causa de acidentes.

No Brasil a maioria dos semáforos utiliza lâmpadas conhecidas como IFR (Incandescente de Filamento Reforçado), com potência nominal de 100 W. Este tipo de lâmpada promete uma vida mais longa do que as lâmpadas incandescentes comuns de 100 W de uso doméstico. No entanto, como há poucos fornecedores deste tipo de lâmpada e o seu custo de aquisição é significativamente maior do que as lâmpadas domésticas, muitas prefeituras municipais encontram dificuldades para a aquisição de lâmpadas IFR e acabam usando lâmpadas incandescentes de 100 W comuns nos semáforos. Algumas estimativas demonstram o consumo energético resultante do uso de lâmpadas incandescentes IFR na sinalização semaforica, como exposto na Tabela I [2].

TABELA I
Consumo energético de lâmpadas incandescentes de filamento reforçado (lâmpada IFR), geralmente usadas em semáforos de trânsito no Brasil

| Tipo de Lâmpada | Potência (W) | Consumo Anual (kWh) | Cor | Tempo de Acendimento (%) | Consumo Anual (kWh) |
|------------------|--------------|---------------------|----------|--------------------------|---------------------|
| IFR ¹ | 100 | 876 | Vermelha | 55 | 481,8 |
| | | | Amarela | 3 | 26,28 |
| | | | Verde | 42 | 367,92 |
| Total: | | | | 100 | 876 |

A. Experiências Internacionais

Em diversos países a baixa eficiência energética decorrente do uso de lâmpadas incandescentes em pontos de sinalização semafórica vem sendo substituída pela solução permitida pela tecnologia dos diodos emissores de luz. Todas as experiências efetuadas em campo ou em laboratório demonstraram que a utilização da tecnologia LED, como alternativa às lâmpadas incandescentes nos semáforos, induz grandes economias de energia, alta confiabilidade, maiores condições de segurança no trânsito, menores custos de manutenção e maior visibilidade em condições adversas [7].

Desde 1992, alguns estados dos Estados Unidos da América têm remodelado seus parques de semáforos, substituindo as lâmpadas incandescentes por LEDs e obtendo alto índice de aprovação com a iniciativa. Cidades como San Diego e Filadélfia estão entre as primeiras a instalar, em larga escala, este tipo de semáforos. Desde 1997, a cidade de San Diego converteu mais de 32.000 lâmpadas incandescentes para LEDs. Todos os módulos vermelhos e mais de 90% dos módulos verdes foram convertidos para LED, poupando mais de US\$ 800.000 anualmente em custos de energia. Esta ação representou uma economia de cerca de 15 milhões de kWh, sendo o investimento pago em dois anos [3]. Na cidade de Filadélfia, foram feitas sondagens junto aos condutores de veículos sobre a tecnologia a LED, comparando-a com a tradicional. Com base na resposta dos utilizadores, concluiu-se que os semáforos equipados com LED mostram luz mais brilhante que os semáforos com lâmpadas incandescentes, não havendo a registrar qualquer diferença significativa na cor [4]. Na Espanha, a cidade de Santander, uma das primeiras cidades a implantar este sistema, aceitou o programa estatal de substituição de semáforos e solicitou a substituição de 3.623 unidades, o que permitiu que todos os semáforos da cidade fossem mudados para tal tecnologia. Santander já dispunha de 844 unidades de tecnologia LED instaladas nos semáforos da cidade [5].

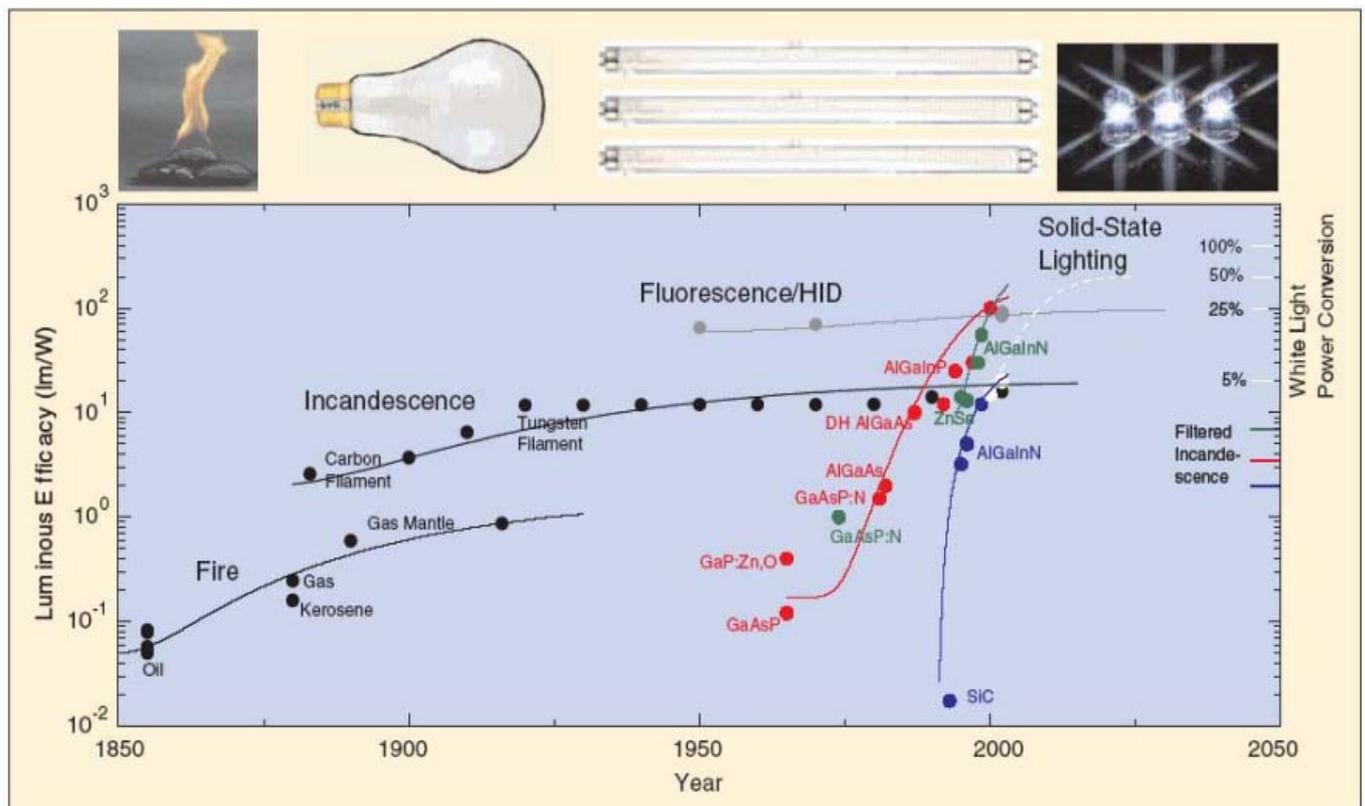


Fig. 1. Evolução da tecnologia dos dispositivos utilizados em iluminação [1]

B. Experiências Nacionais

Nos últimos anos foram realizadas em nosso país diversas iniciativas isoladamente por prefeituras e empresas de prestação de serviços de sinalização e controle de tráfego, prevendo a substituição das usuais lâmpadas incandescentes dos pontos de sinalização semafórica por módulos eletrônicos formados por conjuntos de LEDs. A potência elétrica destes módulos varia entre 10W e 25W. Pode-se encontrar nas cidades de Curitiba-PR, São Paulo-SP, Guarulhos-SP, Florianópolis-SC, Campinas-SP, entre outras tantas, alguns pontos semafóricos com tecnologia LED implantados nas ruas.

Via de regra, entretanto, em nenhum local essa iniciativa evoluiu de forma significativa para tornar-se economicamente rentável e importante do ponto de vista do uso eficiente dos recursos energéticos e de economia dos recursos relacionados aos custos de manutenção/substituição, vocação natural dessa tecnologia [7], o que motivou o presente estudo.

II.TECNOLOGIA LED

A.Diodos Emissores de Luz

O LED é um componente eletrônico baseado em materiais semicondutores que, quando energizado, emite luz visível. A emissão de luz se dá por efeito quântico e é monocromática; ou seja, dependendo do material utilizado, o LED gera apenas uma cor. A Figura 2 apresenta os valores correspondentes de comprimentos de onda emitido, em função de cada cor de LED[6].

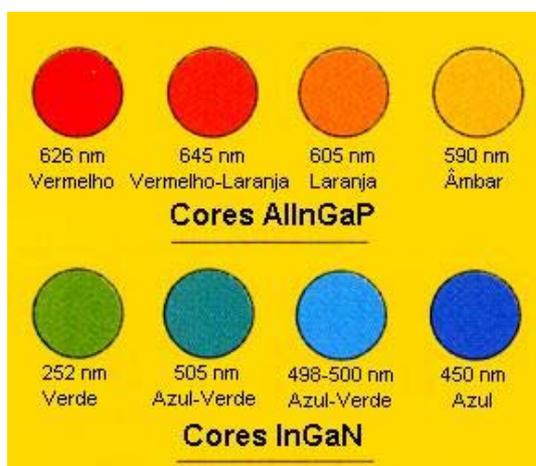


Fig. 2. Comprimentos de onda e tecnologia empregada em diodos emissores de luz (LED) [6]

Os materiais semicondutores dos LEDs utilizados para semáforos são geralmente do compostos Al In Ga P (Alumínio Índio Gálio Fósforo) para as cores vermelho e amarelo e a composição In Ga N (Índio Gálio Nitrogênio) para a cor verde. Normalmente são usados LEDs com encapsulamento em polímero incolor e dotados de proteção contra a incidência de radiação ultravioleta (UV-A). Os LEDs apresentam diversos benefícios, como a longa durabilidade, alta eficiência luminosa, variedade de cores e dimensões reduzidas, além de baixo consumo de energia e pouca dissipação de calor [17].

B.Módulos Focais LED

Para semáforos a alternativa geralmente adotada é um módulo focal formado por placas de circuito impresso nas quais são fixados os LEDs, juntamente com uma fonte de alimentação, proteções mecânicas e elétricas, terminais de conexão, lente e suporte de policarbonato. Os LEDs são soldados às placas de circuito impresso e em cada conjunto o número de LEDs pode variar de menos de uma dezena a mais de trezentos. A Figura 3 apresenta uma comparação entre uma lâmpada incandescente convencional de filamento reforçado (IFR) e um módulo focal de LEDs adotado no presente projeto.



Fig. 3. Comparação de uma lâmpada IFR convencional (100W) e o módulo focal de LED (10W) adotado no projeto.

Conforme dados do fornecedor e verificações em laboratório, a potência de cada um desses módulos varia entre 7 W a 15 W e o fator de potência é maior que 0,92, quando submetido às condições nominais de tensão e temperatura. O tempo de vida deste tipo de módulo é da ordem de 12 anos (um LED tem vida útil estimada em 100.000 horas), o que permite grande confiança no equipamento [8]. Segundo diversos fabricantes, com base em experiências em campo, a probabilidade de um LED falhar durante o seu tempo de vida normal é de 0,3%, comprovando deste modo a sua elevada taxa de confiabilidade [4]. Outra característica que aumenta a confiabilidade nesta tecnologia é a temperatura ambiente de funcionamento, que pode ir de -40°C até 75°C e índices de umidade relativa de 70%, permitindo assim sua instalação em locais adversos e diversos [9], como ocorre nos semáforos.

O fato do módulo focal de LEDs ser formado por vários elementos o torna mais seguro para o controle de tráfego de veículos, pois se um LED apagar a sinalização continua sendo feita pelos demais LEDs do conjunto. Segundo o fabricante

Meng [8], a distribuição interna dos LEDs em diversos circuitos independentes permite a operação normal do semáforo nas condições de falha de cerca de 20% dos LEDs dos módulos. O projeto de norma da ABNT em elaboração prevê que qualquer anomalia em um diodo LED não deve resultar em apagamento superior a 10% da luminosidade total de cada módulo [16]. Nos semáforos convencionais quando a lâmpada incandescente se funde ou sofre avaria, o resultado é a ausência completa da mensagem.

Em termos de qualidade da informação transmitida aos utilizadores em condições adversas, a tecnologia LED tem vantagens sobre a convencional. Numa situação de Sol “baixo” no final de tarde ou cedo pela manhã, de acordo com testes realizados pelo CALTRANS (Departamento de Transportes do Estado da Califórnia) [10], seja em campo ou em laboratório, o índice de reflexão da luz do Sol, quando se encontra atrás do observador, é 50% mais baixo nos semáforos a LED do que na tecnologia convencional. Esta diferença permite, na prática, a eliminação da falsa impressão de uma lâmpada indevida estar ligada (efeito fantasma) que a maioria dos motoristas já deve ter observado em alguns semáforos, evitando desta maneira a hesitação do condutor do veículo e, provavelmente, muitos acidentes [7].

Outra possibilidade que a utilização da tecnologia a LEDs permite é a alimentação dos sistemas semaforicos através de baterias, quando houver problemas no fornecimento de energia elétrica pela rede de distribuição, uma vez que o consumo desses equipamentos é bastante reduzido em relação aos sistemas convencionais. Esta característica pode representar uma vantagem de alta importância para os administradores municipais, que enfrentam muitas vezes situações de trânsito caótico quando alguns semáforos param de funcionar pela queda de energia elétrica numa região da cidade.

III.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo do presente projeto é propor a substituição de lâmpadas incandescentes utilizadas nos sistemas semaforicos veiculares e de pedestres, com potência de 100 W, por módulos focais desenvolvidos com a tecnologia LED, com potência inferior a 15 W e vida útil dez vezes superior à das lâmpadas incandescentes convencionais.

É essencial que sejam assegurados os quesitos exigidos nesses sistemas, de modo a obter-se maior eficiência energética, melhoria das condições dos serviços nos sistemas de semáforos, bem como ter redução na demanda no horário de ponta do sistema elétrico. Com isso pretende-se que haja diminuição no consumo mensal de energia elétrica e nas elevadas despesas com manutenção dos sistemas de semáforos convencionais atualmente utilizados.

IV.DESCRICÃO E DETALHAMENTO

Foi escolhida para análise e pesquisa a cidade de Curitiba/PR, capital que conta atualmente com 1.797.408 habitantes [11], taxa de motorização de 0,57 veículos/habitante [12] e 953 cruzamentos semaforizados. Obteve-se junto ao órgão da Prefeitura Municipal de Curitiba que trata do assunto a informação que existem na cidade aproximadamente 27.000 lâmpadas instaladas no sistema de sinalização de trânsito [13]. Os semáforos para veículos são em sua maioria do tipo “T”, composto de três módulos chamados de “porta-focos” de formato redondo empilhados no sentido vertical, sendo o inferior com lente colorida verde, o intermediário com lente amarela e o superior com lente vermelha. Existem ainda instalados e em funcionamento alguns semáforos para veículos do tipo “T”, onde há dois porta-focos com lentes vermelhas na parte superior; o CTA (Controle de Tráfego em Área) de Curitiba pretende eliminar os semáforos tipo “T” e uniformizar o tipo “I” em toda a cidade. Para a sinalização de pedestres, os semáforos têm dois porta-focos de formato retangular com lentes verde e vermelha. As lâmpadas utilizadas em Curitiba são do tipo IFR de 100 W, com bulbo incolor, sendo portanto a cor do semáforo determinada pela lente colorida instalada no porta-focos.

Para o estudo de viabilidade econômica e compatibilidade do sistema na substituição de tecnologia, foi consultado o Projeto de Norma Brasileira 16:300.03-001, que é fundamentado nas normas norte americanas do ITE (*Institute of Transportation Engineers*) de 2005, denominada *Vehicle Traffic Control Signal Heads - Light Emitting Diode Circular Signal Supplement* e também a norma européia EN 12368:2006, denominada *Traffic Control Equipment - Signal Heads*. Além disso, o estudo baseou-se também em alguns ensaios realizados nas instalações do LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, que tem o seu Laboratório de Luminotécnica equipado para medições e conta com credenciamento do INMETRO para ensaios de lâmpadas e equipamento de iluminação.

A.Sistema semaforico atual de Curitiba

A pesquisa realizada em maio de 2008 junto ao CTA (Controle de Tráfego em Área) da URBS (Companhia de Urbanização de Curitiba S/A) forneceu dados precisos da quantidade de semáforos na cidade. A partir daí foi possível fazer o cálculo estimativo dos valores relativos ao consumo de energia, medido em MWh/ano, e a demanda de energia elétrica no horário de ponta, medida em kW, conforme a Tabela II.

TABELA II
Consumo de energia no sistema atual de semáforos Curitiba

| Sistema de sinalização veicular | | | | |
|-------------------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|---------------|
| Tipo de lâmpada e filtro | Incandescente VERMELHA | Incandescente AMARELA | Incandescente VERDE | Total |
| Tempo de funcionamento (horas/dia) | 13,20 | 0,72 | 10,08 | 24 |
| Quantidade | 6920 | 6659 | 6659 | 20238 |
| Potência (W) | 100 | 100 | 100 | |
| Potência instalada (kW) | 380,60 | 19,98 | 279,68 | 680,3 |
| Energia consumida (MWh/ano) | 3334,06 | 174,99 | 2449,98 | 5959,03 |
| Sistema de sinalização de pedestres | | | | |
| Tipo de lâmpada | Incandescente VERMELHA | | Incandescente VERDE | Total |
| Tempo de funcionamento (horas/dia) | 20,40 | | 3,60 | 24 |
| Quantidade | 3193 | | 3193 | 6386 |
| Potência (W) | 100 | | 100 | |
| Potência instalada (kW) | 271,41 | | 47,89 | 319,3 |
| Energia consumida (MWh/ano) | 2377,51 | | 419,56 | 2797,07 |
| Total | | | | |
| Potência instalada (kW) | | | | 999,6 |
| Energia consumida (MWh/ano) | | | | 8756,1 |

Como já exposto anteriormente, as características do sistema atual de semáforos são determinantes para os elevados custos de manutenção e consumo energético, além de constituírem um fator de risco importante à boa administração das cidades e à vida dos cidadãos.

B.Ensaio

No Laboratório de Luminotécnica do LACTEC (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento), foram escolhidas, para ensaios, duas tecnologias de semáforos:

- Módulo focal com lâmpada incandescente: composto de uma lâmpada IFR, refletor e lentes nas cores vermelho, amarelo e verde, com 20 cm de diâmetro, conforme a Figura 4.a;

- Módulo focal a LED: composto de LEDs de alto brilho, fonte de alimentação, lente de Fresnel e filtros coloridos, nas cores vermelho, amarelo e verde, com mesmo diâmetro do módulo focal incandescente, da série 433 fabricada pela empresa *Dialight Corporation*, conforme a Figura 4.b.



Fig. 4.a Módulo focal convencional para semáforos, com Lâmpada Incandescente.

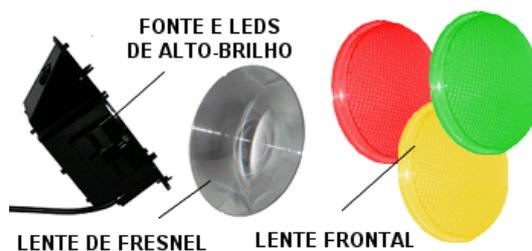


Fig. 4.b Módulo focal a LED para semáforos, Modelo Série 433 Dialight.

Para as medições realizadas, foram utilizados os seguintes equipamentos do LACTEC:

- Analisador de Potência Xitron Technologies 2503AH,
- Fotômetro LMT U 1000,
- Esfera Integradora de Ulbrich,
- Luxímetro Konica Minolta.

Foram medidas as seguintes grandezas elétricas: fator de potência, corrente e tensão elétrica, potência ativa. Foram também plotadas as coordenadas de cromaticidade, para determinar a cor de cada módulo. Para as grandezas elétricas as medidas foram realizadas em regime permanente, conforme Tabela III.

TABELA III
Resultados dos Ensaios

| Ensaios Cor Tipo | Tensão (V rms) | Corrente (mA) | Potência Ativa (W) | F.P. | Coordenadas de Cromaticidade | |
|---------------------|-------------------|------------------|--------------------------|------|---------------------------------|--------|
| | | | | | X | Y |
| LED Verde | 119,91 | 64,7 | 7,607 | 0,98 | 0,0840 | 0,5523 |
| LED Amarelo | 119,9 | 85,97 | 10,152 | 0,98 | 0,5859 | 0,4125 |
| LED Vermelho | 119,92 | 56,38 | 6,596 | 0,97 | 0,7060 | 0,2938 |
| IFR Verde | 220,04 | 429,9 | 94,6 | 1,00 | 0,1366 | 0,5573 |
| IFR Amarelo | 220,11 | 428,3 | 94,26 | 1,00 | 0,6009 | 0,3950 |
| IFR Vermelho | 220,11 | 426,6 | 93,91 | 1,00 | 0,6970 | 0,3024 |

A plotagem das coordenadas de cores foi feita de acordo com a norma americana ITE:2005, que toma como base o diagrama de cromaticidade desenvolvido em 1931 pela CIE (*Commission Internationale d'Eclairage*), que ainda é usado como uma referência padrão para a definição de cores, conforme Figura 5.

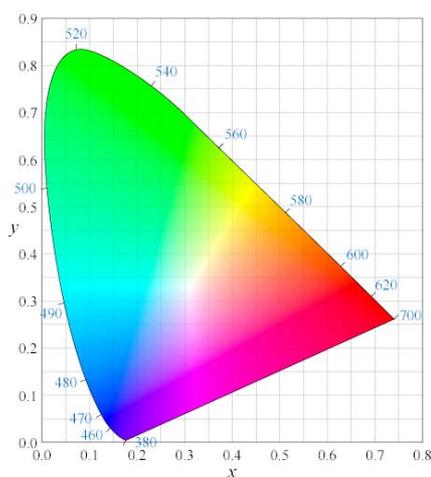


Fig. 5 Diagrama de cromaticidade adotado pela CIE - *Commission Internationale d'Eclairage*.

Os membros do ITE definiram três regiões planas no diagrama de cromaticidade que definem, respectivamente, as cores vermelha, amarela e verde. Ou seja, segundo as normas norte-americanas as coordenadas de cromaticidade dos módulos

deverão ficar no interior das regiões definidas para estas cores, conforme as Figuras 6, 7 e 8. Nestas figuras foi usada a aproximação denominada *método das quatro retas* ou *método dos quatro pontos*, que é uma forma prática tanto de especificar as coordenadas de cromaticidade, por parte dos consumidores de semáforos de LEDs, quanto de plotar, por parte dos fabricantes ou distribuidores de semáforos de LEDs, os dados de coordenadas de cromaticidade medidos pelos laboratórios de fotometria [14].

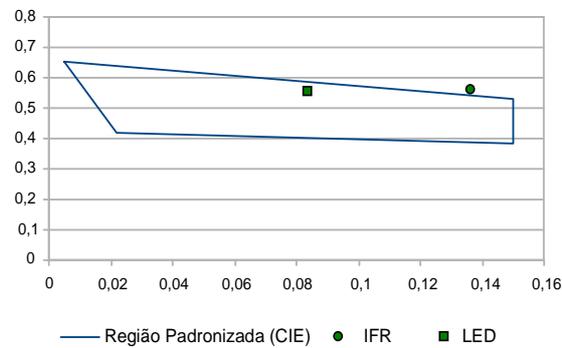


Fig. 6 Região de Cores permitida para luzes verdes de semáforos, de acordo com o ITE, e resultados obtidos nos ensaios.

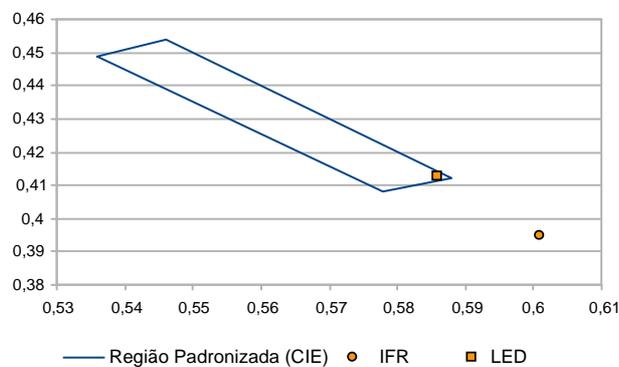


Fig. 7 Região de Cores permitida para luzes amarelas de semáforos, de acordo com o ITE, e resultados obtidos nos ensaios.

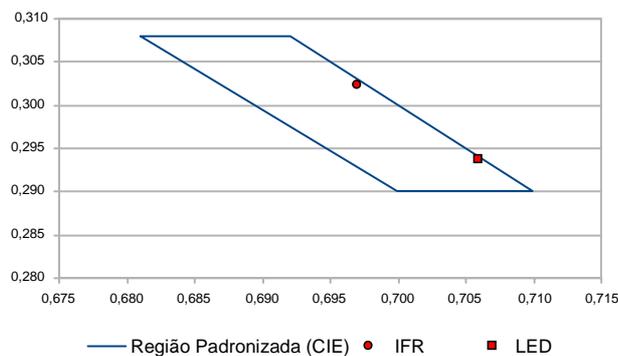


Fig. 8 Região de Cores permitida para luzes vermelhas de semáforos, de acordo com o ITE, e resultados obtidos nos ensaios.

Observa-se pelas Figuras 6, 7 e 8 que os módulos LED atenderam à norma, estando as coordenadas de cromaticidade das luzes vermelha, amarela e verde dentro das respectivas áreas permitidas. Surpreendentemente, os ensaios realizados com os módulos dotados de lâmpadas incandescentes mostraram que as lentes das cores amarela e verde, utilizadas nos ensaios, não atenderam o especificado na norma norte-americana. Ressalta-se que este tipo de lente colorida é utilizado amplamente nos semáforos no Brasil. É comum, no entanto, que os motoristas brasileiros que tem a experiência de dirigir automóveis nos EUA observem que a luz “verde” dos semáforos naquele país lá são quase “azuis” enquanto que as luzes “amarelas” são praticamente “alaranjadas”. Estas cores são também adotadas na Europa e, segundo algumas autoridades de trânsito, evitam que os motoristas façam confusão entre o “verde” e o “amarelo” dos semáforos.

C.Sistema semafórico proposto

O projeto consiste em simular a substituição (*retrofit*) de 19.965 (dezenove mil novecentos e sessenta e cinco) unidades de lâmpadas e também de 261 porta-focos do tipo “T”, cuja utilização está sendo abolida em Curitiba, por porta-focos do tipo “I”, de acordo com a intenção do CTA da URBS, conforme detalhamento a seguir:

6.659 lâmpadas incandescentes com filtro verde, instaladas em pontos de sinalização semafórica veicular, com potência de 100 W, a serem substituídas por módulos focais a LED verde, com potência de 7,6 W. (Figura 9);

6.659 lâmpadas incandescentes com filtro vermelho, instaladas em pontos de sinalização semafórica veicular, com potência de 100 W, substituídas por módulos focais a LED vermelho, com potência de 6,6 W. (Figura 9);

261 Porta-focos tipo “T”, com 4 módulos focais, substituídos por 261 Porta-focos tipo “I”, com 3 módulos focais a LED.

3193 lâmpadas incandescentes com filtro vermelho, instaladas em pontos de sinalização semafórica de pedestre, com potência de 100 W, substituídas por módulos focais a LED vermelho com máscara, com potência de 6,6 W;

3193 lâmpadas incandescentes com filtro verde, instaladas em pontos de sinalização semafórica de pedestre, com potência de 100 W, substituídas por módulos focais a LED verde com máscara, com potência de 7,6 W;



Fig. 9. Módulos focais LED

O tipo de módulo focal a LED adotado no projeto exige pequenas alterações estruturais nos porta-focos para a sua instalação. Esse procedimento não pode ser realizado de forma segura pela equipe no semáforo instalado nas ruas. Será necessária portanto a retirada do grupo semafórico e a instalação dos novos módulos a LED, em bancada.

A tabela IV descreve o cálculo estimativo dos valores de consumo de energia (MWh/ano) e demanda no horário de ponta (kW) após o *retrofit*. A partir desses dados é possível obter-se a quantidade de energia economizada e a redução de demanda no horário de ponta, que são os principais indicadores quantitativos para projetos de eficiência energética [15].

Os cálculos, tanto para o sistema atual quanto para o sistema proposto, conforme Tabelas II e IV respectivamente, desconsideram o modo amarelo-piscante. De acordo com os dados levantados junto do CTA de Curitiba, 197 cruzamentos são colocados nesse modo entre o horário de 0h e 6h da manhã. No modo amarelo-piscante apenas a luz amarela do semáforo acende intermitentemente a uma frequência de 1Hz, com ciclo de trabalho de 50%.

TABELA IV
Consumo de energia no sistema proposto, com o uso de LEDs nos semáforos de Curitiba.

| Sistema de sinalização veicular | | | | |
|-------------------------------------|---------------------------|-----------------------|------------------------|---------------|
| Tipo de lâmpada | Módulo Focal LED VERMELHA | Incandescente AMARELA | Módulo Focal LED VERDE | Total |
| Tempo de funcionamento (horas/dia) | 13,20 | 0,72 | 10,08 | 24 |
| Quantidade | 6659 | 6659 | 6659 | 20238 |
| Potência (W) | 6,60 | 100 | 7,61 | |
| Potência instalada (kW) | 24,17 | 19,98 | 21,28 | 65,36 |
| Energia consumida (MWh/ano) | 211,75 | 174,99 | 186,44 | 573,18 |
| Sistema de sinalização de pedestres | | | | |
| Tipo de lâmpada | Módulo Focal LED VERMELHA | | Módulo Focal LED VERDE | Total |
| Tempo de funcionamento (horas/dia) | 20,40 | | 3,60 | 24 |
| Quantidade | 3193 | | 3193 | 6386 |
| Potência (W) | 6,60 | | 7,61 | |
| Potência instalada (kW) | 17,91 | | 3,64 | 21,55 |
| Energia consumida (MWh/ano) | 156,92 | | 31,93 | 188,85 |
| Total | | | | |
| Potência instalada (kW) | | | | 86,91 |
| Energia consumida (Mwh/ano) | | | | 762,03 |

D. Viabilidade Econômica

O consumo de energia elétrica de cada modelo de equipamento foi determinado através de medições em laboratório. Os valores medidos foram então multiplicados pela quantidade de cada modelo instalado na cidade. O custo da conta de energia é determinado através da multiplicação do montante de energia gasto no período considerado (um ano) pela tarifa de fornecimento da COPEL (Companhia Paranaense de Energia), na modalidade TUSD+TE (Tarifas de Uso dos Sistemas de Distribuição + Tarifa de Energia Elétrica), Subgrupo B3 (Demais Classes de Consumidores) acrescida dos devidos impostos e encargos. A proposta final de substituição (*retrofit*), analisada neste trabalho, envolve as melhores alternativas para o sistema de Sinalização Semafórica. A viabilidade econômica proposta foi definida através do cálculo e análise dos seguintes índices: Taxa Interna de Retorno (TIR); Valor Presente (VP); *Payback* Corrigido; Relação Custo-Benefício (RCB).

V. RESULTADOS OBTIDOS

Com a implementação da nova tecnologia nos sistemas semafóricos haverá uma redução do consumo de energia superior a 90%, demonstrando a efetividade da alternativa LED como contributiva à eficiência energética. Utilizando como critério a relação entre potência da lâmpada instalada e tempo de uso, obter-se-á uma Redução da Demanda no Horário de Ponta de 912,69 kW e da Energia Elétrica consumida em 7994,07 MWh/ano, como demonstrado na Tabela V.

TABELA V
Comparação entre o sistema atual de semáforos com lâmpadas IFR e o proposto, com LEDs.

| Sistema Atual | |
|---|---------|
| Potência Instalada (kW): | 999,60 |
| Energia Consumida (MWh/ano): | 8756,10 |
| Sistema Proposto | |
| Potência Instalada (kW): | 86,91 |
| Energia Consumida (MWh/ano): | 762,03 |
| Resultado (Sistema atual - Sistema Proposto) | |
| Potência Instalada (kW): | 912,69 |
| Energia Consumida (MWh/ano): | 7994,07 |

Além da redução de demanda e da energia elétrica consumida, a adoção da tecnologia LED resulta em grande economia de recursos com os serviços de manutenção, necessários para a substituição regular das lâmpadas queimadas. A redução do consumo de energia deve resultar em economia de recursos públicos da ordem de R\$ 200.000,00 por mês.

Para o estudo da viabilidade econômica do projeto foi adotado o critério estabelecido pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) para projetos integrantes do Programa de Eficiência Energética. A RCB (Relação Custo Benefício), segundo a ANEEL, deve ser inferior a 0,80 para que o projeto se torne viável.

Considerando o custo anualizado total do projeto, a energia economizada, a redução de demanda na ponta, juntamente com o custo evitado de consumo de energia e de demanda, apurou-se o valor de 0,428 para o RCB. Este resultado mostra um tempo de 2,85 anos para retorno, sendo o investimento da ordem de 8 milhões de reais. Os dados obtidos demonstram portanto de modo inequívoco a viabilidade econômica do projeto, mediante os critérios estabelecidos pelo órgão regulador do setor elétrico brasileiro, permitindo a sua realização pelos órgãos responsáveis do controle de tráfego de municípios brasileiros e pelas diversas concessionárias do país em seus programas de eficiência energética. Além disso, conhecendo-se o RCB de cada modelo de sinal, sugere-se que a ordem de substituição seja conforme a ordem dos itens da Tabela VI. Nos sistemas semaforicos, as lâmpadas vermelhas são as que ficam mais tempo acesas, portanto são as mais viáveis para serem substituídas por LEDs. Em seguida vem as luzes verdes. As luzes amarelas ficam acesas durante pouco tempo, apenas na troca do fluxo de veículos; assim, algumas cidades que adotaram LEDs nos semáforos continuaram a usar lâmpadas incandescentes na posição correspondente à luz amarela, substituindo apenas as luzes verde e vermelha por LEDs.

Ressalta-se que os cálculos de viabilidade econômica foram feitos de acordo com o ponto-de-vista do cliente, considerando portanto o valor da tarifa da energia elétrica acrescida dos devidos impostos.

TABELA VI
Resultado dos cálculos de viabilidade econômica

| Modelo | Número de módulos | Redução de Energia | Vida útil [anos] | CT [R\$] | CT _{acum} [R\$] | RCB _{acum} | RCB _{signal} | RETORNO _{acumulado} [anos] | B _{acum} [R\$] |
|------------|-------------------|--------------------|------------------|--------------|--------------------------|---------------------|-----------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| T Vermelho | 261 | 96,70% | 10,4 | 118.755,00 | 118.755,00 | 0,207 | 0,265 | 1,33 | 89.472,95 |
| T Verde | 261 | 92,39% | 13,6 | 103.095,00 | 221.850,00 | 0,265 | 0,265 | 1,82 | 122.112,70 |
| I Vermelho | 3064 | 93,40% | 10,4 | 1.394.120,00 | 1.615.970,00 | 0,398 | 0,429 | 2,57 | 629.372,44 |
| I Verde | 3064 | 92,39% | 13,6 | 1.210.280,00 | 2.826.250,00 | 0,409 | 0,429 | 2,79 | 1.012.545,61 |
| R Vermelho | 3334 | 93,40% | 10,4 | 1.516.970,00 | 4.343.220,00 | 0,416 | 0,429 | 2,78 | 1.564.505,14 |
| R Verde | 3334 | 92,39% | 13,6 | 1.316.930,00 | 5.660.150,00 | 0,419 | 0,429 | 2,86 | 1.981.443,57 |
| P Vermelho | 3193 | 93,40% | 6,7 | 1.452.815,00 | 7.112.965,00 | 0,402 | 0,449 | 2,54 | 2.798.396,04 |
| P Verde | 3193 | 92,39% | 38,1 | 1.261.235,00 | 8.374.200,00 | 0,428 | 0,449 | 2,85 | 2.941.005,14 |
| T Amarelo | 261 | 89,85% | 190,3 | 110.925,00 | 8.485.125,00 | 0,432 | 5,247 | 2,88 | 2.943.272,45 |
| I Amarelo | 3064 | 89,85% | 190,3 | 1.302.200,00 | 9.787.325,00 | 0,475 | 5,247 | 3,30 | 2.969.889,52 |
| R Amarelo | 3334 | 89,85% | 190,3 | 1.416.950,00 | 11.204.275,00 | 0,521 | 5,247 | 3,74 | 2.998.852,08 |

Onde,

T: Semáforo do modelo T;

I: Semáforo do modelo I;

R: Semáforo do modelo Repetidor;

P: Semáforo do modelo para Pedestres;

CT: Custo total (equipamento + mão de obra);

RCB_{acum}: Relação Custo Benefício acumulado;

RCB_{signal}: Relação Custo Benefício por sinal;

B_{acum}: Benefício Acumulado.

Ainda que nos cálculos tenham sido desconsiderados gastos com manutenção do sistema atual e do sistema proposto, foi feito um comparativo dessas despesas, a título de complementação das informações desse trabalho, que está descrito na Tabela VII. Estima-se que esses serviços, no sistema proposto, sejam reduzidos para menos de 3.500 substituições de módulos a LEDs queimados ou avariados por ano, contra 14.000 substituições de lâmpadas incandescentes que são realizadas anualmente no sistema atual.

TABELA VII
Comparação de gastos com manutenção em semáforos realizados na cidade de Curitiba em comparação com a estimativa de gastos com o sistema baseado em LEDs.

| | Sistema Proposto a LEDs | Sistema Atual com lâmpadas IFR |
|--|-------------------------|--------------------------------|
| Manutenção programada por ano | 1 | 1 |
| Custo da manutenção programada | R\$ 45,00 | 45,00 |
| Custo de uma troca de lâmpada emergencial | R\$ 60,00 | 60,00 |
| Frequência de trocas de lâmpada emergenciais por ano | - 50% de ~7000 | 50% de ~27.000 |
| Gasto com manutenção | R\$ 250.000,00 | 850.000,00 |
| Diferença de Gasto Anual com Manutenção | R\$ 600.000,00 | |

VI.CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos, conclui-se pela viabilidade da adoção da tecnologia LED, como substituto de elevada eficiência energética das lâmpadas incandescentes, normalmente empregadas em sistemas de sinalização semafórica.

As medições efetuadas em laboratório juntamente à bibliografia consultada demonstraram que o consumo da energia utilizada pelos semáforos com tecnologia LED chega a ser inferior a 10% do consumo de semáforos com tecnologia atual, composto de lâmpadas incandescentes.

Assim, os LEDs representam uma das alternativas mais promissoras para o futuro da iluminação, já existindo inclusive

estudos e experiências para sua aplicação também em iluminação pública e decorativa, devido a suas dimensões reduzidas, alta confiabilidade, baixas perdas e grande vida útil (100.000 horas).

As dificuldades enfrentadas para a realização dos estudos foram:

- A inexistência de uma Norma Nacional para regulamentação do produto, o que exigiu pesquisas em normas internacionais, provenientes de países que já adotaram tal solução em maior escala;
- A existência de poucos fabricantes ou mesmo distribuidores de módulos de semáforos baseados em LEDs no Brasil, o que restringiu bastante a possibilidade de comparação entre diversos modelos. Este fato contribuiu também fortemente para que o custo do investimento nessa tecnologia seja ainda bastante elevado.

Contudo, os benefícios da adoção de LEDs em semáforos ainda são muitos:

- Obtém-se economia de energia e a redução de demanda do horário de ponta;
- As Prefeituras que adotarem esta tecnologia terão uma grande redução de gastos com manutenção;
- Há a possibilidade de, após o investimento se pagar, transferir os recursos gerados pela economia de energia elétrica para outros setores do município, muitas vezes carentes de investimentos.

Tais benefícios demonstram a viabilidade técnica-econômica da implantação dessa alternativa em grande escala. O trabalho realizado tem como objetivo servir como referencial para projetos de eficiência energética, em especial para os Programas de Eficiência Energética das Concessionárias de Energia Elétrica, que podem contribuir enormemente para realizar o grande potencial de implantação da solução em todo o país. Ao mesmo tempo, pretendemos também a difusão da tecnologia dos LEDs na iluminação em geral, criando uma demanda para seu desenvolvimento por empresas e institutos de pesquisa nacionais, colocando o Brasil em consonância com a evolução mundial do setor.

Os autores deixam registrado que o presente trabalho foi realizado de forma independente e não houve, entre eles, as empresas fabricantes de equipamentos e a Prefeitura de Curitiba, nenhum tipo de relação comercial. Os resultados do estudo estão sendo disponibilizados para as autoridades municipais de todo o Brasil e caberá a eles decidir ou não pela sua implantação nas suas respectivas cidades. No entanto os autores observaram com satisfação que, em uma nova avenida em fase final de construção na cidade de Curitiba, estão sendo instalados semáforos a LEDs em todos os cruzamentos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Engenheiro Rafael Martins, do Laboratório de Luminotécnica do LACTEC, pela importante colaboração nos ensaios. Não podem deixar de mencionar também a valiosa colaboração do Sr. Emerson Barros, do CTA da URBS de Curitiba, que disponibilizou os dados referentes aos semáforos instalados na cidade. Também agradecem às empresas **4D Soluções Energéticas** e **DATAPROM**, juntamente com o Departamento Municipal de Transito da cidade de São José dos Pinhais (PR) por importantes informações sobre o sistema semaforico e por disponibilizarem os módulos e conjuntos focais utilizados nos ensaios.

O presente trabalho foi fruto do Projeto de Conclusão do Curso de Engenharia Elétrica da UFPR dos acadêmicos (e atualmente Engenheiros Eletricistas) **Anderson Luis de Lima** e **André Gonçalves Jedy**.

REFERÊNCIAS

- [1] TOMIOKA, J; MAMMANA, A; SOUZA, G.P.; MULLER, S.L.; ROBERT, R.; **Novos Materiais de Estado Sólido para Iluminação**. XVIII SNPTEE – Curitiba-PR, Outubro/2005.
- [2] DIALIGHT TRAFFIC SIGNALS, **Traffic Savings Calculator**. Disponível em: <<http://www.dialight.com/Products/TrafficSignals.cfm>> Acesso em maio de 2008.
- [3] THE CITY OF SAN DIEGO - **Street Division**, Disponível em: <<http://www.sandiego.gov/street-div/trflight.shtml>> Acesso em junho de 2008.
- [4] RAMOS, M.C.; RAMOS, M. C.; **Semáforos a Led: Uma Tecnologia Viável?** ; XVIII SNPTEE – Curitiba-PR, Outubro/2005.
- [5] PROCEL INFO – **Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética**, Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/pci/main.asp>> Acesso em maio de 2008.
- [6] MING, SUN HSIEN. **Semáforos de LEDs**. Disponível em: <<http://www.sinaldetransito.com.br>>. Acesso em dezembro de 2007.
- [7] SILVESTRE, WAGNER PEREIRA; NOGUEIRA, RODRIGO SCHONEBORN; CATELLI, SILVIA M. M.; **Eficiência Energética em Sistemas de Sinalização Semafórica com uso de Tecnologia LED – Projeto Implantado no Município de Guarulhos/SP**; Bandeirante Energia S.A. – São Paulo-SP, Julho/2007.

- [8] MENG Eng. Com. e Ind.; **Especificação técnica de lâmpadas**; Brasil; Fevereiro/2004.
- [9] CONAE - Comisión Nacional para El Uso Eficiente de la Energía, Programa para incremento de la Eficiencia Energética, Disponível em: <<http://www.conae.gob.mx>>. Acesso em junho de 2008.
- [10] CALTRANS - Departamento de Transportes do Estado da Califórnia. Disponível em: <<http://www.dot.ca.gov>>. Acesso em: Abril/2008.
- [11] IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; **Estimativas / Contagem da População 2007**; Brasil; 14 de novembro de 2007.
- [12] SIDRA - Sistema IBGE de Recuperação Automática; **Tabela 793 - População residente, em 1º de abril de 2007**, Novembro/2007.
- [13] URBS - **Urbanização de Curitiba S.A** , Disponível em: <<http://www.urbs.curitiba.pr.gov.br>>. Acesso em abril de 2008.
- [14] KIYANITZA, IVAN; **Cromaticidade de Semáforos de LEDs**, Outubro/2007.
- [15] ANEEL; **Manual pra Elaboração do PEE**, Fevereiro/2008.
- [16] ABNT – **Projeto de Norma 16:300.03-001 – Sinalização Semafórica – Lâmpadas a LED**; Dezembro de 2004.
- [17] HADDAD, J; YAMACHITA, R.A.; **Os Avanços Tecnológicos em Sistemas de Iluminação e o Correspondente Impacto na Eficiência Energética das Instalações**; XVIII SNPTEE – Curitiba-PR, Outubro/2005.

DADOS BIOGRÁFICOS

Anderson Luis de Lima, nascido em 18/10/1983 em São José dos Pinhais (Paraná), enquanto era estudante do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná fez estágio na PUC-PR na área de manutenção eletrônica (2004 – 2006) e trabalhou na empresa Teikon Tecnologia Industrial S/A (2007-2008), na área de Processos de Fabricação. Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná em 2008.

André Gonçalves Jedyn, nascido em 11/04/1982 em Curitiba (Paraná), fez curso Técnico em Eletrônica (CEFET-PR, 2001) e enquanto era estudante do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná fez estagiário na COPEL (2007-2008), na área de Operação do Sistema Elétrico de Potência. Graduou-se em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Paraná em 2008.

Fernando Augusto Lopes Corrêa, nascido em 18/09/1962 em Curitiba (Paraná) é Engenheiro Eletricista (UFPR), com curso de aperfeiçoamento no *Lightining Institute* da GE nos EUA. Desde 1984 atua como Engenheiro junto à UFPR, estando vinculado atualmente ao Laboratório de Qualidade e Eficiência da Energia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica, onde desenvolve projetos de efficientização. Integrou a equipe da UFPR que foi vencedora do Premio GE de Iluminação de 2005 (Premio GENIUZ).

Ewaldo Luiz de Mattos Mehl, nascido em 29/02/1956 em Curitiba (Paraná), é Engenheiro Eletricista (UFPR), Mestre em Engenharia (COPPE-UFRJ) e Doutor em Engenharia (UFSC). Desde 1982 atua como professor do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná em Curitiba, onde também desenvolve pesquisas sobre o uso eficiente da energia elétrica. Integrou a equipe da UFPR que foi vencedora do Premio GE de Iluminação de 2005 (Premio GENIUZ).