

# Sistema de iluminação baseado em lâmpada LED inteligente



Franklin Batista Andrade<sup>[1]</sup>, Larissa Pereira de Queiroz<sup>[2]</sup>, Lamarks Tiburtino Campos Cavalcanti<sup>[3]</sup>, Francisco Fechine Borges<sup>[4]</sup>, Alexandre Fonseca D'Andrea<sup>[5]</sup>,

[1]frk.franklin@gmail.com; [2]larissa\_pqueiroz@hotmail.com; [3]lamarkseletrica20111@gmail.com; [4]francisco.fechine@gmail.com; [5]alexandrea@gmail.com. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – Câmpus João Pessoa.

## RESUMO

Este artigo aborda o estudo e desenvolvimento do protótipo de uma lâmpada inteligente, baseada na plataforma Arduino e capaz de combinar a iluminação artificial com a natural. O controle de brilho de uma lâmpada construída com LEDs (*Light Emitting Diodes*, ou Diodos Emissores de Luz) foi realizado por uma saída com PWM (*Pulse Width Modulation*, ou Modulação por Largura de Pulso) do microcontrolador ATMEGA328 da placa Arduino Uno R3, enquanto para a determinação da intensidade da iluminação natural, um sensor LDR (*Light Dependent Resistor*, ou Resistor Dependente de Luz) foi linearizado e caracterizado para fornecer, por meio de uma equação de ajuste de curva, os valores de iluminância. A lâmpada, quando totalmente desenvolvida, poderá ser utilizada em ambientes como as salas de aula do IFPB, para redução do consumo de energia elétrica, mantendo uma intensidade luminosa ótima durante o dia.

**Palavras-chave:** Lâmpada inteligente. Iluminação natural. Economia de energia elétrica. Linearização.

## ABSTRACT

*This paper describes the study and development of the prototype of an intelligent lamp, based on the Arduino platform and able to combine artificial with natural lighting. The brightness control of a lamp built with LEDs (Light Emitting Diodes) was controlled by a PWM output (Pulse Width Modulation,) of ATMEGA328 microcontroller pin of an Arduino Uno R3 board, while that, for determining the intensity of natural light, an LDR sensor (Light Dependent Resistor) was linearized and characterized to found the curve fitting equation and the luminance values. The lamp, when fully developed, can be used in environments such as the IFPB classrooms, to reduce power consumption while maintaining optimal light intensity during the day.*

**Keywords:** *Intelligent lamp. Natural lighting. Energy saving. Linearization.*

## 1 Introdução

Nos dias de hoje, o correto dimensionamento dos sistemas de iluminação e o uso adequado de seus equipamentos torna-se cada vez mais importante, uma vez que o segmento de iluminação, em geral, corresponde a aproximadamente 17% do consumo total de energia elétrica do país, sendo somente a iluminação pública responsável por cerca de 4% desse consumo total. A iluminação representa um dos maiores potenciais de conservação de energia e é o setor que pode oferecer as respostas mais rápidas às necessidades de redução de consumo com os menores investimentos e mais rápidos retornos (COSTA, 2006).

Atualmente, existe uma grande preocupação com a obtenção de mais luz, fazendo com que os dispositivos de iluminação necessitem consumir cada vez menos energia (COSTA, 2006). O mercado brasileiro de iluminação está em constante mudança, uma vez que os preços da energia elétrica seguem o contexto mundial. Por isso, a economia de energia deve ser constantemente repensada. Economizar energia tornou-se uma das maneiras mais importantes de preservar o meio ambiente.

É conhecido o fato de que as lâmpadas fluorescentes gastam menos energia do que as incandescentes para emitir a mesma quantidade de luz (ABILUMI, 2007). No entanto, as lâmpadas a LED (*Light Emitting Diode*, em inglês, ou Diodo Emissor de Luz) consomem proporcionalmente ainda menos que as fluorescentes. O LED é um diodo semiconductor emissor de luz (ZHELUDEV, 2007) que, ao ser percorrido por uma corrente elétrica, é excitado e emite luz, com baixas perdas por calor.

Visando a uma maior economia com a inserção das lâmpadas a LED, estão surgindo novas possibilidades que permitirão um melhor aproveitamento da iluminação natural. A proposta das lâmpadas a LED inteligentes é combinar a iluminação natural com a artificial, proporcionando um fluxo luminoso constante. Dessa forma, ao invés de usar toda a potência da lâmpada, a iluminação artificial seria inversamente proporcional à natural, reduzindo o desperdício energético e financeiro, além de contribuir para o uso sustentável dos recursos disponíveis.

As lâmpadas a LED inteligentes empregam uma técnica chamada PWM (*Pulse Width Modulation*, em inglês, ou Modulação por Largura de Pulso) na alimentação dos LEDs. Essa técnica consiste em gerar um

sinal contínuo pulsante que faz os LEDs piscarem em uma frequência tão alta que se torna imperceptível ao olho humano. Logo, em certas frações de segundo, a lâmpada estará desligada, poupando energia.

## 2 Materiais e Métodos

A intensidade de iluminação, ou iluminância, é uma grandeza cuja unidade de medida mais comum é o *lux*. Para medir a iluminância em uma dada região, são usados aparelhos denominados luxímetros. Essa grandeza serviu como base de referência durante o desenvolvimento deste trabalho, e para as medições, foi utilizado um luxímetro modelo MLM 1011, da marca Minipa (Minipa do Brasil Ltda., Joinville, Santa Catarina, Brasil).

Além do luxímetro, a plataforma Arduino também foi essencial para aquisição e tratamento dos dados, bem como para controle da saída PWM.

A interface de desenvolvimento do Arduino foi substituída pelo software MATLAB® (Mathworks, Natick, MA, EUA), o que trouxe maior praticidade ao integrar uma ampla variedade de bibliotecas à plataforma Arduino. Em especial, a biblioteca de aquisição de imagens possibilitou controle sobre uma câmera, permitindo fotografar as medições de intensidade luminosa e de tensão nos sensores (Figura 1).

**Figura 1** – Caixa escura, câmera, multímetro e luxímetro.



Os dados obtidos foram tabelados e inseridos no software CurveExpert® (Hyams Development), gerando curvas de regressão e respectivas equações, capazes de descrever matematicamente o comportamento característico das amostras.

O sensor ligado ao Arduino foi um LDR de 5 mm de diâmetro, ligado em série com um resistor de 10kΩ, formando um divisor de tensão, alimentado por +5,0 VDC. Entretanto, essa configuração mostrou-se desvantajosa, por gerar uma curva exponencial dos

valores de tensão *versus* intensidade luminosa, quando o ideal seria que o sensor produzisse um sinal de tensão linearmente relacionado com a grandeza física a ser medida.

Assim, foi necessário um condicionamento de sinal para linearizar o comportamento do sensor. Esse procedimento consistiu em realizar uma série de medições, cada uma utilizando um valor diferente de resistência. Observou-se que, quanto menor a resistência, maior era a linearização, porém, em consequência disso, menor era a tensão sobre o LDR. Por essa razão, a tensão de referência de + 5 VDC foi reduzida para +1,1 VDC, utilizando-se a tensão de referência interna do microcontrolador ATMEGA328.

Para assegurar um valor predefinido de iluminância, optou-se por realizar os ensaios em um ambiente controlado (Figura 2). Para isso, o luxímetro e uma fonte de luz foram introduzidos em uma caixa de madeira, posteriormente fechada e coberta por um tecido (Figura 3).

**Figura 2** – Caixa escura aberta.



**Figura 3** – Caixa escura coberta por um tecido preto.



O sensor LDR (*Light Dependent Resistor*, em inglês, ou Resistor Dependente de Luz) foi preso ao luxímetro que, por sua vez, foi fixado à caixa por uma

chapa de aço parafusada (Figura 4). Entre a chapa e o luxímetro, foi colado um molde de isopor para evitar o deslizamento do aparelho.

**Figura 4** – Fixação do luxímetro.



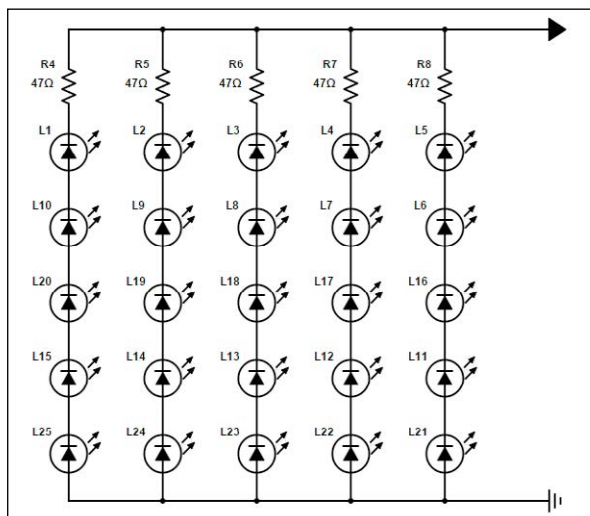
Para o ensaio, uma fonte de iluminação composta por um conjunto de 25 LEDs de alto brilho e 5 resistores de  $47\Omega$  foi montada em uma placa de circuito impresso, formando uma lâmpada. Os LEDs ficaram dispostos em uma configuração série-paralelo na forma  $5 \times 5$  (Figura 5). As fileiras ficaram em paralelo com a fonte de tensão de 16,6 V, exigindo a presença de um resistor em cada uma delas. Esses valores foram definidos para que fosse atingido um brilho máximo, mantendo a intensidade da corrente dentro das especificações dos LEDs, ou seja, cerca de 25 mA.

**Figura 5** – Fixação da placa de LEDs.



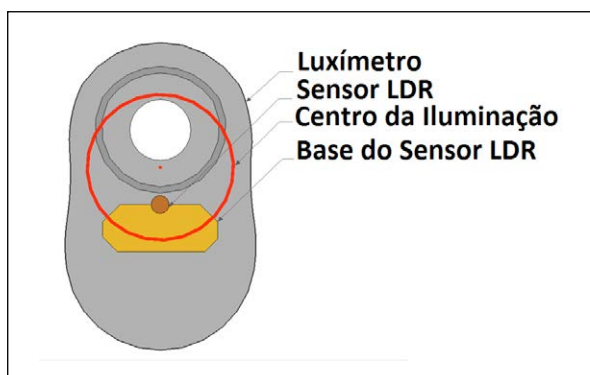
Para posicionar o luxímetro, considerou-se que a intensidade luminosa é máxima no centro da fonte de iluminação, decaindo gradativamente à medida que se distancia do centro. Portanto, é importante garantir que o centro da iluminação esteja perpendicular ao sensor do luxímetro.

**Figura 6** – Esquema elétrico da placa de LEDs.



Porém, para que a incidência de luz fosse proporcional tanto ao luxímetro quanto ao sensor LDR, seguiu-se o posicionamento ilustrado pela Figura 7.

**Figura 7** – Região central da iluminação.



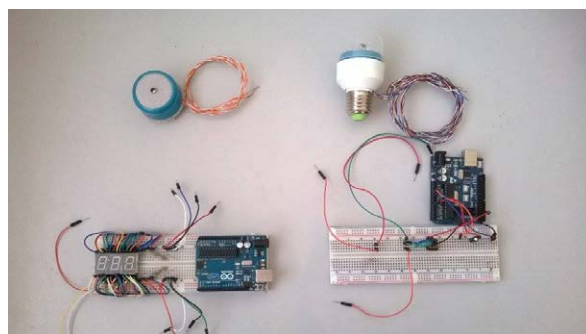
Concluída essa fase, foi dado início à segunda etapa do projeto: a combinação da iluminação artificial produzida pelo protótipo com uma iluminação externa, que idealmente seria a luz do sol. Entretanto, pela complexidade em variar de forma homogênea a iluminação natural, foi elaborado outro ensaio, que consistiu em variar o brilho de uma fonte de iluminação, coletar os dados de intensidade luminosa gerada por ela e, finalmente, calcular o valor da saída PWM para a lâmpada LED, de modo a manter a iluminação constante no ambiente, ou seja, manter constante a soma das intensidades luminosas natural e artificial.

Para evitar que a iluminação do ambiente ou da própria lâmpada afetasse as leituras, foi idealizado um dispositivo à parte, que pudesse ser fixado no vi-

dro de uma janela e se comunicasse com a lâmpada por um emissor infravermelho.

Os sistemas de controle e de potência dos protótipos ainda não haviam sido instalados no seu interior quando os testes foram feitos; mesmo assim, os testes de transmissão e recepção dos dados foram realizados com sucesso (Figura 8).

**Figura 8** – Protótipos da lâmpada e do sensor/transmissor.



Na Figura 9 é apresentado o primeiro protótipo da lâmpada a LED inteligente, enquanto a Figura 10 dá destaque ao LED de alta potência (10 W) e ao receptor infravermelho utilizado, modelo TOP 1838b.

**Figura 9** – Lâmpada a LED.



**Figura 10** – Detalhe do receptor infravermelho e do LED de alta potência.



Na Figura 11 é apresentado o protótipo do módulo externo à lâmpada, cuja finalidade é captar a iluminância externa – por meio de um sensor LDR fixado na face voltada para a fonte de luz natural – e enviar as informações pelo transmissor infravermelho localizado no lado oposto.

**Figura 11** – Protótipo do sensor/transmissor (frente).



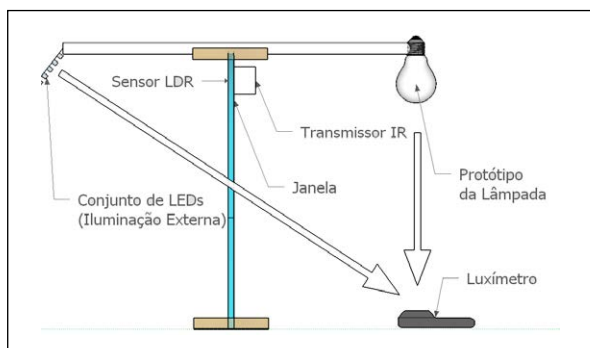
Na Figura 12 está apresentada a face do módulo que seria adesivada a uma janela – destaque para o sensor LDR entre as espumas.

**Figura 12** – Protótipo do sensor/transmissor (vista traseira).



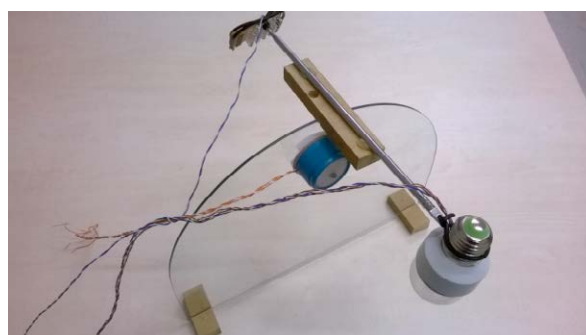
Para testar os protótipos, um segundo ensaio foi elaborado, dessa vez contando com duas lâmpadas, ambas direcionadas para o luxímetro, como apresentado nas Figuras 13 e 14.

**Figura 13** – Esquema geral do segundo ensaio.



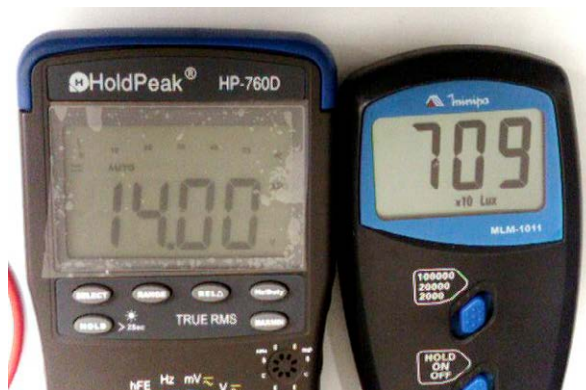
A primeira lâmpada, à esquerda, representa a iluminação externa (luz natural “do Sol”). Seu brilho foi variado entre os valores mínimo (0%) e máximo (100%) da saída PWM do Arduino. O sensor adesivado na janela teve como objetivo capturar a intensidade luminosa dessa primeira lâmpada e enviar a leitura, pelo transmissor IR, para o controlador da segunda lâmpada, que, ao receber a informação, definiu o valor necessário de iluminância artificial para manter constante o fluxo luminoso no alvo, representado pelo luxímetro.

**Figura 14** – Aparato para o segundo ensaio.



Para o segundo ensaio, o aparato da Figura 14 foi mantido no interior de uma caixa, em uma sala com as luzes apagadas. A foto da Figura 15 foi obtida pela câmera comandada pelo MATLAB®. Um LED branco serviu para iluminar os *displays* dos aparelhos.

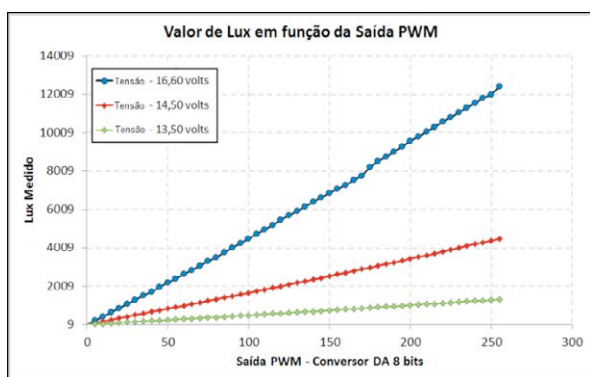
**Figura 15** – Foto da medição de 700 lux e 12,80 VDC de tensão sobre os LEDs do protótipo.



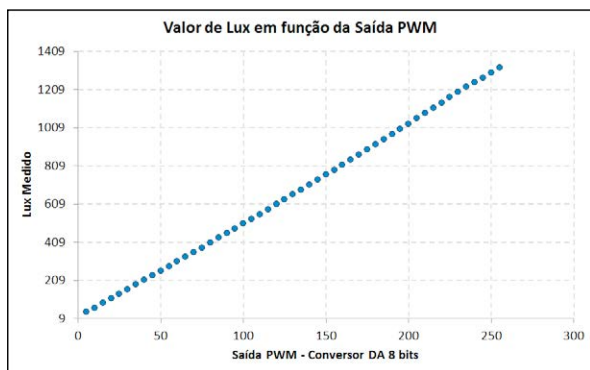
### 3 Resultados e discussão

Durante as medições, observou-se que a resposta de iluminância da lâmpada foi proporcional à variação da saída PWM, como apresentado nas Figuras 16 e 17.

**Figura 16** – Valor de intensidade luminosa em função da saída PWM, para 13,50 VDC, 14,50 VDC e 16,60 VDC.



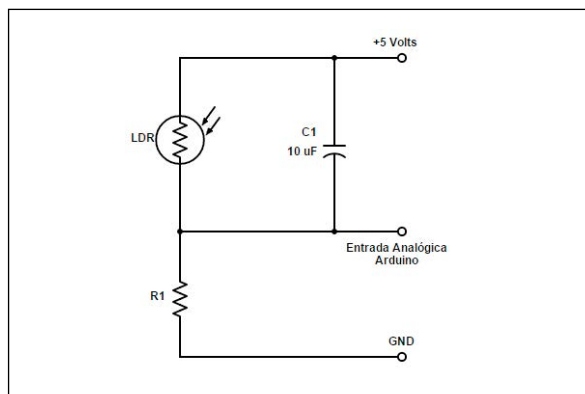
**Figura 17** – Valor de Lux em função da Saída PWM para 13,50 VDC.



Como a faixa de interesse era de 0 a 1500 lux, optou-se por aplicar a tensão de 13,50 VDC, pois o valor máximo de iluminância estaria abaixo de 2.000 lux, enquanto para 16,60V a intensidade máxima de iluminância atingiria uma marca superior aos 12.000 lux.

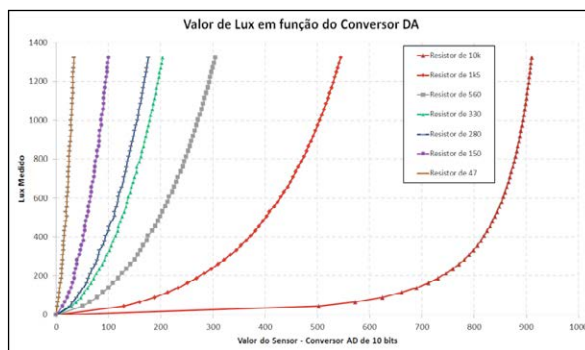
Definida a tensão máxima, diversas medições foram tomadas, variando em cada uma a saída PWM de 0 a 255, em intervalos de cinco unidades, totalizando 52 medições, compostas, cada uma, pela média de 50 leituras.

**Figura 18** – Esquema elétrico para leitura do sensor LDR pela entrada analógica do Arduino.



Para a linearização do LDR, foram utilizados três esquemas, colocando-se resistores em série com o LDR, como apresentado nas Figuras 19, 20 e 21. Com um resistor de 10K, a primeira curva expressa um comportamento essencialmente exponencial. A cada redução no valor de resistência, o sinal produzido tende a uma linearização maior. Com o resistor de 47R, tem-se praticamente uma reta, entretanto, pela presença de muito ruído, optou-se por valores maiores de resistência.

**Figura 19** – Linearização: Resistores de 47R a 10K.



**Figura 20** – Linearização: Resistores de 47R a 330R.

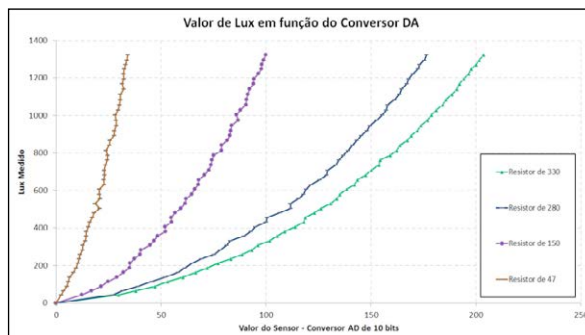
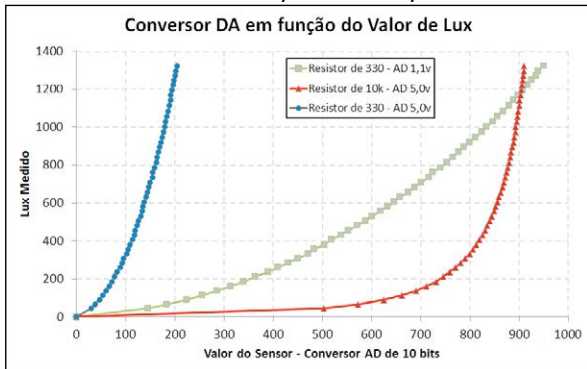


Figura 21 – Linearização: Resistor 10K e 330R

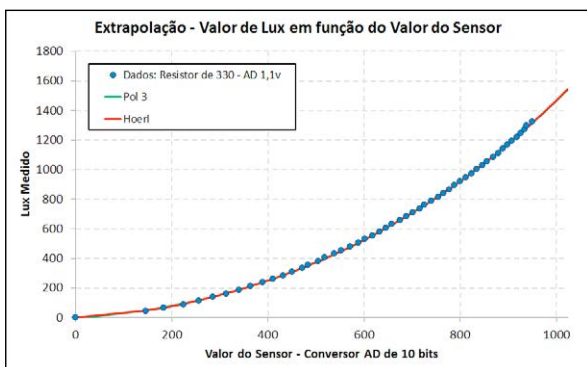
Tensão de referência 1,1 VDC e 5,0 VDC.



Dessa forma, foi escolhido o resistor de 330R, por três razões: a) por linearizar o sinal exponencial para uma curva polinomial do 3º grau; b) por apresentar pouco ruído em relação a resistores de resistência inferior; e c) por permitir utilizar toda a faixa do conversor A/D do microcontrolador, uma vez que o valor máximo lido (cerca de 200), dividido pela valor máximo do conversor A/D de 10 bits (1023), multiplicado pela tensão de referência (5,00 VDC), resulta em aproximadamente +0,997 VDC, muito próximo da tensão de referência interna do Arduino, que é de 1,1 VDC, permitindo explorar melhor a resolução do conversor.

Em seguida, foram obtidas equações matemáticas que melhor representam os dados experimentais. Por métodos numéricos, os dados foram equacionados pelas técnicas de extrapolação, utilizando um polinômio de 3º grau (Pol 3), pelo método de Hoerl e pela técnica de interpolação, utilizando o método de Splines (Figura 22).

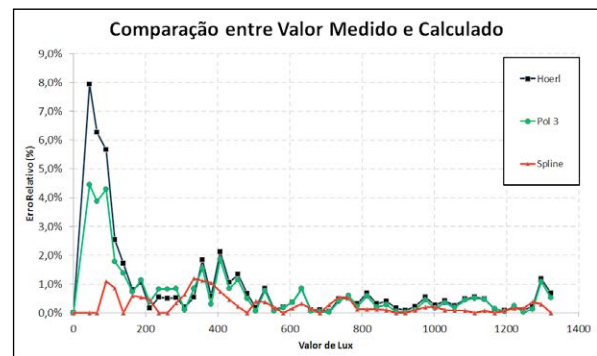
Figura 22 – Extrapolação: Polinômio de 3º grau e Equação de Hoerl.



A equação encontrada, baseada no modelo de Hoerl (eq. 1), fornece os valores de iluminância (lux), a variável S representando o valor lido pelo sensor e as constantes:  $a = 2,481 \cdot 10^{-02}$ ;  $b = 1,001$ ;  $c = 1,495$ , deduzidas pelo programa *Curve Expert®* utilizado.

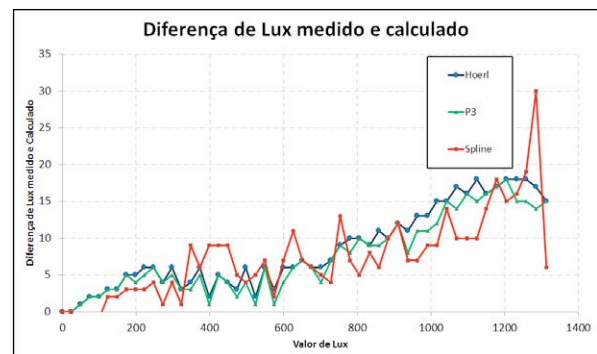
As duas extrapolações apresentaram algum desvio entre os valores medidos e calculados praticamente nos mesmos pontos. Em média, o polinômio de 3º grau apresentou um erro relativo de 0,93%, contra 0,73% para equação de Hoerl (eq. 1), enquanto o Spline teve apenas 0,29% de erro relativo (Figura 23).

Figura 23 – Erros relativos (diferenças entre valores medidos e calculados).



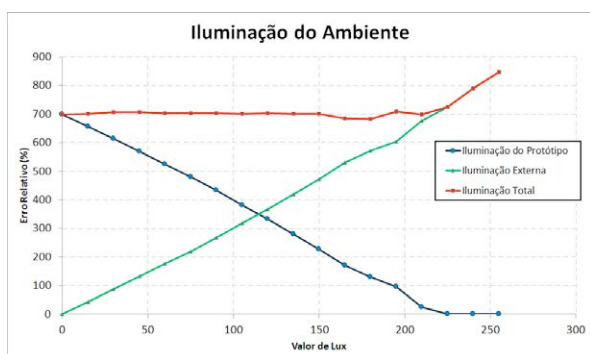
Apesar do elevado percentual de erro para os valores mais baixos de lux, como apresentado na Figura 23, na Figura 24 é demonstrado que até valores de cerca de 1.200 lux, não há diferenças significativas entre os valores medidos e os calculados com base nos modelos, o que possibilita a utilização de qualquer um dos métodos.

Figura 24 – Diferença entre o valor medido e o valor calculado, dado em lux.



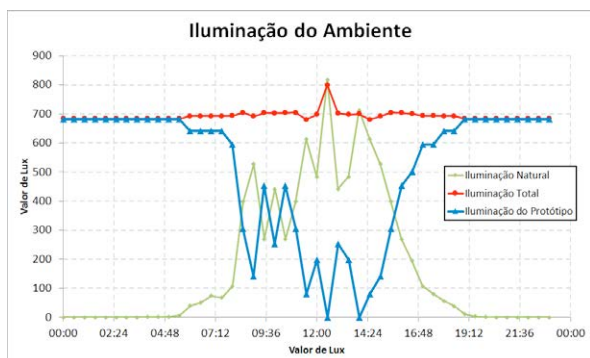
Com base nos resultados obtidos no ensaio, que combina iluminação externa (natural) com iluminação obtida pelo protótipo da lâmpada (artificial), foi possível realizar a compensação da intensidade luminosa no alvo, de modo a se manter constante o valor de iluminância, em aproximadamente 700 lux (Figura 25).

**Figura 25** – Iluminação total obtida a partir das iluminações natural e artificial.



Como último experimento, a medição da luz solar ao longo do dia revelou que, como esperado, a economia de energia elétrica seria maior quanto mais próximo do meio-dia (Figura 26).

**Figura 26** – Intensidades luminosas ao longo do dia.



Os ensaios foram realizados considerando que o sensor LDR não recebe nenhuma iluminação da lâmpada, apenas a iluminação externa.

Outro aspecto a ser considerado é como estimar a distribuição da iluminação natural pelo ambiente, pois os ensaios consideraram medições pontuais.

Respeitadas as condições do experimento, uma análise preliminar dos dados revelou que, entre 7h e 17h, a lâmpada inteligente poderia proporcionar uma redução de aproximadamente 65% dos gastos de

energia elétrica do ambiente simulado, garantindo-se uma iluminância constante de cerca de 700 lux.

Considerando-se um período de 24 horas, haveria uma economia de 30% no consumo de energia elétrica, comparando-se ao uso de uma lâmpada LED convencional, sem esse sistema inteligente para controle da potência luminosa.

## 4 Conclusão

Diante dos resultados apresentados, pode-se concluir que a técnica de PWM aplicada para o controle de uma lâmpada inteligente a LED é uma alternativa promissora. Nos ensaios, o fluxo luminoso foi mantido aproximadamente constante, permitindo uma redução do consumo de energia de um ambiente com iluminação natural e artificial, esta última baseada no conceito proposto.

## REFERÊNCIAS

ABILUMI. **Eficiência Energética**. 2007. Disponível em: <<http://www.eletronbras.com/pci/services/DocumentManagement/FileDownload.EZTsvc.asp?DocumentID=%7BBBC21BF53-A229-46B9-83E5-7E3AAAF0120%7D&ServiceInstUID=%7B5E202C83-F05D-4280-9004-3D59B20BEA4F%7D>>. Acesso em: 1 dez. 2014.

COSTA, Gilberto. **Iluminação Econômica**: cálculo e avaliação. 4. ed. Porto Alegre: Edipucrs, 2006.

ZHELUEV, Nikolay. The life and times of the LED – a 100-year history. **Nature Photonics**, v. 1, abr. 2007. Disponível em: <[http://holly.orc.soton.ac.uk/fileadmin/downloads/100\\_years\\_of\\_optoelectronics\\_\\_2\\_.pdf](http://holly.orc.soton.ac.uk/fileadmin/downloads/100_years_of_optoelectronics__2_.pdf)>. Acesso em: 23 abr. 2015.