

## EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA DA UNICAMP EM TERMOS DA SENSIBILIDADE ESPECTRAL DO OLHO HUMANO

GUILHERME SARAIVA SOARES\*, THIAGO BASSINELLO BURGHI, RODNEY DEGILIO DE CONTI & JOÃO EDUARDO OLIVEIRA MURTA

Faculdade de Engenharia Mecânica

E-mail do autor correspondente: [soares.g@gmail.com](mailto:soares.g@gmail.com)

**RESUMO:** O presente trabalho teve por objetivo efetuar um estudo sobre o atual sistema de iluminação pública da Unicamp, levando-se em conta não apenas a eficiência energética das lâmpadas utilizadas mas também a eficiência em termos da comparação entre o espectro dos comprimentos de onda emitidos por cada tipo de lâmpada e a sensibilidade espectral do olho humano. A partir desse estudo, propõem-se soluções de substituição de lâmpadas que permitam uma redução da potência elétrica consumida, mantendo-se, no entanto, um mesmo nível de percepção visual.

**PALAVRAS-CHAVE:** Iluminação pública, temperatura de cor, sensibilidade espectral

### ENERGETIC EFFICIENCY OF PUBLIC LIGHTING AT UNICAMP IN TERMS OF THE SPECTRAL SENSITIVITY OF THE HUMAN EYE

**ABSTRACT:** The objective of this paper was to perform a study about the current public lighting system at Unicamp, taking into account not only the energetic efficiency of the lamps that are used but also their efficiency in terms of a comparison between the spectrum of the wavelengths emitted by each type of lamp and the spectral sensitivity spectrum of the eye. From this study, solutions were proposed aiming to replace lamps in order to reduce the electric power consumption, while keeping the same level of visual perception.

**KEYWORDS:** Public lighting, color temperature, spectral sensitivity

### INTRODUÇÃO

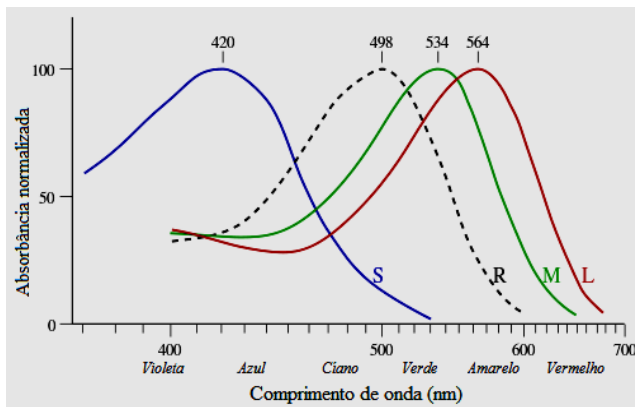
A iluminação pública do campus da Unicamp representa um consumo de cerca de 300.000 kWh de energia elétrica por mês, segundo dados da Divisão de Sistemas da Prefeitura da Unicamp. A busca de inovações e tecnologias que permitam um uso mais eficiente dessa energia é interessante tanto de um ponto de vista ambiental quanto de um ponto de vista econômico. Para se analisar a eficiência de uma lâmpada, utiliza-se normalmente como critério a razão entre o fluxo luminoso (medido em

lumens) e a potência consumida (medida em watts). No entanto, esse critério, embora simples e eficaz de um ponto de vista físico, não leva em conta a variação da sensibilidade do olho humano em relação ao comprimento de onda da luz utilizada.

A retina humana é composta de dois tipos de células fotorreceptoras: os bastonetes e os cones. Os bastonetes são células mais sensíveis, responsáveis pela visão noturna, e não possuem a capacidade de detectar cores. Segundo BOWMAKER & DARTNALL (1980), seu pico

de sensibilidade situa-se no comprimento de onda de 498 nm. Os cones são células menos sensíveis do que os bastonetes, e são responsáveis pela detecção de cor. Estão divididos em três grupos, com picos de sensibilidade, segundo BOWMAKER & DARTNALL (1980), em 420, 534 e 564 nm, de forma a abranger todo o espectro da luz visível (de 390 a 700 nm).

A Figura 1 mostra as curvas de sensibilidade espectral para os diferentes tipos de fotorreceptores:



**Figura 1.** Sensibilidade espectral dos fotorreceptores do olho humano em função do comprimento de onda. A curva tracejada corresponde aos bastonetes, enquanto as demais correspondem aos três tipos de cones.

Considerando-se o fator sensorial humano apresentado, nota-se que a maximização da eficiência energética de uma lâmpada deve levar em conta não somente a razão entre o fluxo luminoso e a potência, mas envolve igualmente a escolha de uma lâmpada cujo espectro de emissão coincida o máximo possível com as curvas de sensibilidade das células fotorreceptoras, como propõe OSTER (2009), o

que permite o uso de menos potência para um mesmo nível de percepção luminosa.

O objetivo deste trabalho foi a verificação da iluminação pública existente atualmente no campus da Unicamp e a análise de como o conceito de sensibilidade espectral do olho humano pode ser aplicado em vista de se reduzir o consumo energético.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Uma análise inicial do consumo de energia elétrica com a iluminação pública da Unicamp envolveu a necessidade de se conhecer os tipos de lâmpadas utilizados, bem como as respectivas potências e o número de lâmpadas utilizadas para cada tipo. Esses dados foram obtidos junto à Divisão de Sistemas da Prefeitura da Unicamp. Os tipos de iluminação analisados foram: iluminação pública de rua, iluminação de fachada, iluminação de estacionamento e iluminações diversas. A Tabela 1 mostra um resumo dos dados obtidos (TIPO= Tipo de lâmpada; vapor do metal; P= potência; N= número de lâmpadas; D= Demanda).

Descobriu-se nessa pesquisa que a Unicamp já possui um projeto de aumento da eficiência energética da iluminação pública, que, no entanto, ainda não foi implantado. Esse projeto envolve basicamente a substituição de parte das lâmpadas utilizadas por modelos do mesmo tipo que consumam menos potência, mas não leva em conta o fator de sensibilidade espectral do olho humano. A Tabela 2 mostra as características desse projeto.

**Tabela 1.** Características da iluminação pública atual do campus da Unicamp.

LOCAL	TIPO	P [W]	N	D [kW]
Avenidas	Sódio	250	438	109,5
Ruas	Sódio	250	514	128,5
Fachadas de prédios	Mercúrio	400	412	164,8
	Sódio	250	825	206,25
	Sódio	150	137	20,55
Estacionamentos	Sódio	250	347	86,75
Diversas	Sódio	250	451	112,75
<b>TOTAL</b>			<b>3124</b>	<b>829,1</b>

**Tabela 2.** Projeto de eficiência energética da Divisão de Sistemas da Prefeitura da Unicamp.

LOCAL	TIPO	P [W]	N	D [kW]
Avenidas	Sódio	250	438	109,5
Ruas	Sódio	150	514	77,1
Fachadas de prédios	Sódio	250	371	92,75
	Sódio	150	783	117,45
	Sódio	70	220	15,4
Estacionamentos	Sódio	150	347	52,05
Diversas	Sódio	250	135	33,75
	Sódio	150	316	47,40
<b>TOTAL</b>			<b>3124</b>	<b>545,4</b>

A Divisão de Sistemas informou que embora as lâmpadas de vapor de metal e fluorescentes não constem nos dados fornecidos por ela, estas também estão presentes no campus. Em particular, as lâmpadas de vapor de metal estão presentes nas áreas externas dos Ciclos Básicos I e II e fazem parte de uma estrutura de iluminação indireta, em que a luz é projetada num anteparo branco de metal (como mostra a

Figura 2) e é refletida para baixo. As lâmpadas fluorescentes, por sua vez, estão presentes em grande quantidade na entrada do Restaurante Universitário.



**Figura 2.** Lâmpada de vapor de metal, usada nas áreas externas dos Ciclos Básicos I e II.

Uma vez obtidas as informações sobre o consumo energético das lâmpadas utilizadas atualmente, uma segunda etapa consistiu na medição do espectro de emissão dessas lâmpadas. Para isso, utilizou-se o conceito de *temperatura de cor correlacionada*, apresentado por BORBÉLY *et al.* (2001), que consiste na temperatura de um radiador de Planck (um corpo negro ideal) cuja cor percebida mais se aproxima da cor da luz que se quer medir, dadas as mesmas condições de brilho e de observação. É portanto uma escala de medida de cor, cuja unidade é o Kelvin. O interesse da utilização dessa escala é o de que os instrumentos para sua medição são simples e baratos, podendo até

mesmo ser encontrados em forma de aplicativos para tablets e smartphones.

Utilizando-se um medidor de temperatura de cor, efetuou-se a medida para alguns tipos de lâmpadas diferentes utilizados no campus. Para se efetuar uma medida, é necessário que a luz a ser analisada incida sobre um anteparo branco. Por tratar-se de um ambiente universitário, escolheu-se como anteparo uma folha A4 branca, que pode representar, por exemplo, material didático, cuja leitura demanda boa percepção visual. Uma vez obtida a medição da cor na escala de temperatura de cor, procurou-se determinar o comprimento de onda predominante correspondente a cada cor. De acordo com INCROPERA & DEWITT (2003), existe uma relação simples entre a temperatura de cor e o comprimento de onda do pico de emissão, dada por:  $\lambda_{max} T = b$ , onde  $\lambda_{max}$  é o comprimento de onda do pico de emissão,  $T$  é a temperatura de cor e  $b$  é uma constante igual a  $2,8977685 \times 10^{-3} \text{ m}\cdot\text{K}$ .

### RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das 5 medições de temperatura de cor (em Kelvin) para os 4 tipos de lâmpadas (Vapor de Na- Sódio; Mg- Mercúrio, M-Metal e Fl- Fluorescente ) são apresentados na Tabela 3.

É importante ressaltar que os valores calculados são os valores de pico, ou seja, representam apenas o comprimento de onda onde o espectro de emissão possui a maior intensidade. As curvas dos espectros, no entanto,

são contínuas e possuem formato aproximadamente parabólico, abrangendo uma larga banda. Assim, embora o pico de emissão da lâmpada de vapor de sódio, por exemplo, esteja fora da faixa do visível, seu espectro abrange as regiões do vermelho e do amarelo no espectro visível.

**Tabela 3.** Valores de temperatura de cor, Temperatura média ( $T_m$ , em Kelvin) e  $\lambda_{max}$  calculado (nm) para 4 diferentes lâmpadas utilizadas no campus da Unicamp.

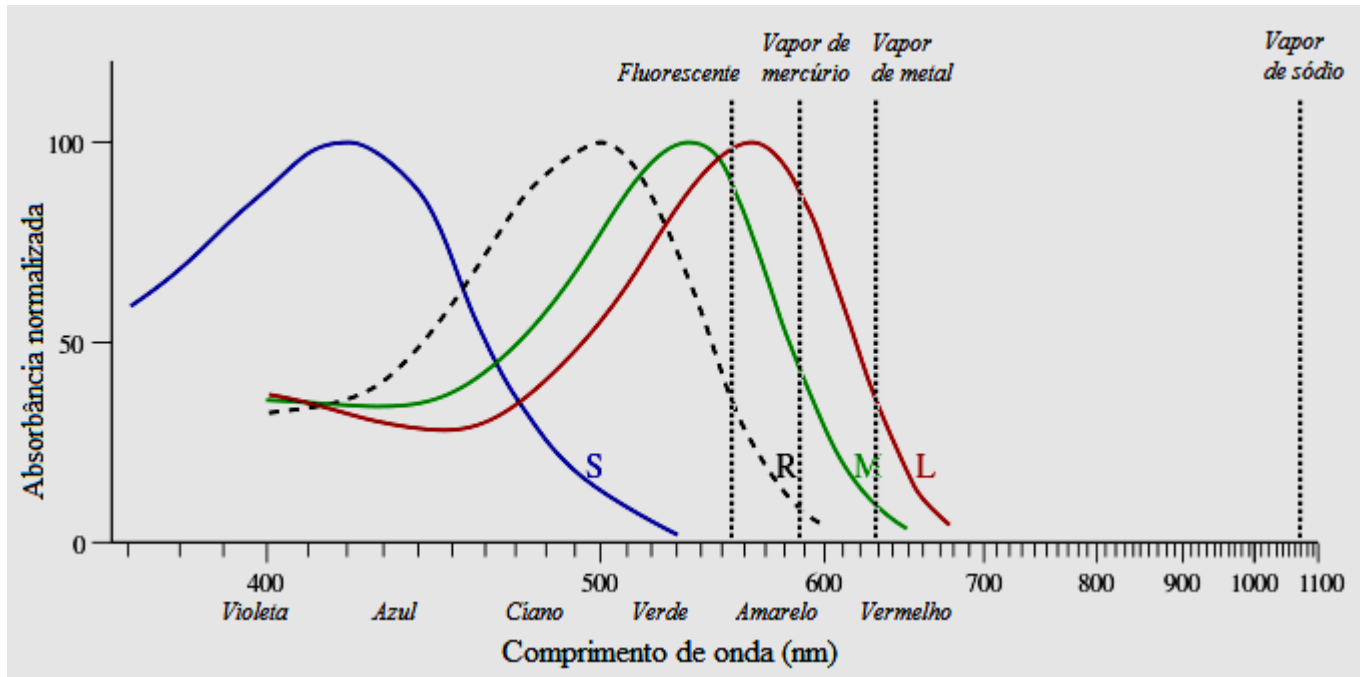
	TIPO			
	Na	Mg	M	Fl
1	2480	4980	4560	5250
2	3100	4930	4750	5220
3	2720	5010	4550	5210
4	2630	4890	4690	5200
5	2600	4840	4490	5290
$T_m$	<b>2706</b>	<b>4930</b>	<b>4608</b>	<b>5234</b>
$\lambda_{max}$	<b>1070 nm</b>	<b>587 nm</b>	<b>628 nm</b>	<b>553 nm</b>

Como se pode observar, as lâmpadas fluorescentes foram as que apresentaram valores mais elevados para a temperatura de cor, o que significa que elas possuem uma luz mais branca que as demais, e mais próxima da iluminação natural do sol. A lâmpada de sódio, por sua vez, apresentou um valor mais baixo, o que significa que sua luz alaranjada está mais distante da iluminação natural. Era de se esperar, entretanto, que as lâmpadas de vapor de metal possuíssem um valor de temperatura de cor mais alto que o encontrado. Por serem lâmpadas utilizadas na iluminação de estádios esportivos, onde a reprodução das cores é importante, seu valor de temperatura de cor deveria estar próximo ou

mesmo ser superior ao das lâmpadas fluorescentes. No entanto, como já foi dito, essas lâmpadas são usadas como iluminação indireta, o que faz com que a temperatura de cor da luz

refletida tenha um valor mais baixo do que o esperado.

A Figura 3 mostra o pico do espectro de emissão luminosa para cada uma das lâmpadas medidas.



**Figura 3.** Pico de emissão luminosa para os diferentes tipos de lâmpadas medidas, e sua comparação com as curvas de sensibilidade dos fotorreceptores do olho humano.

A discussão principal que se pode fazer em torno desses dados dá-se no âmbito da maior ou menor necessidade de eficiência perceptiva em cada área analisada da Unicamp. Em especial, volta-se a atenção para a Praça do Ciclo Básico. Existem cerca de 40 lâmpadas de vapor de metal na Praça do Ciclo Básico (iluminação indireta por anteparos metálicos refletores). Nessa mesma praça, utilizadas em conjunto com as lâmpadas de vapor de metal, podem ser encontradas cerca de 60 lâmpadas de vapor de sódio. Antes de continuar, deve-se fazer uma consideração. A Praça do Ciclo Básico é um ambiente com alta concentração de alunos no

período noturno, por ser o principal eixo de circulação entre o Ciclo Básico I (CB) e o Ciclo Básico II (PB). Fez durante algumas noites uma análise dos hábitos dos estudantes que por ali circulam e notou-se que o hábito de leitura ao ar livre é praticado por grande parte desses estudantes (leitura de material didático e literatura em geral). A leitura é um hábito que requer boa iluminação, de modo que é imperativo que haja boa eficiência perceptiva num ambiente em que as pessoas leem.

Entretanto, como foi dito, utiliza-se muita iluminação por lâmpadas de vapor de sódio, de 250W, neste ambiente. Pelas medições



realizadas, ficou claro que as lâmpadas de vapor metálico, de 150W, mesmo iluminando essa área indiretamente, possuem maior eficiência perceptiva se comparadas com as de vapor de sódio. Parece evidente que, ao se trocar todas as lâmpadas de vapor de sódio encontradas nas imediações internas do CB e do PB por lâmpadas de vapor de metal, isso significaria um aumento da eficiência perceptiva da luz disponível no local, além de uma diminuição considerável da potência elétrica consumida pelas lâmpadas ali encontradas. A luz mais branca encorajaria os transeuntes a se aproveitarem da iluminação de boa qualidade disponível, aumentando o número de pessoas que por ali ficam lendo e interagindo academicamente durante o período noturno. Para aumentar ainda mais a eficiência perceptiva da luz na praça do CB, seria possível aperfeiçoar a iluminação indireta das lâmpadas de vapor metálico, já que os anteparos metálicos atualmente instalados não refletem toda a luz produzida pela lâmpada e ainda por cima deslocam o pico do espectro luminoso da lâmpada de vapor metálico para longe do pico de percepção visual humana.

Extrapolando a análise feita dentro da Praça do Ciclo Básico, pode-se dizer que as lâmpadas de vapor de sódio encontradas nas fachadas dos prédios da Unicamp poderiam ser todas trocadas por lâmpadas de vapor metálico de menor potência, mas de maior eficiência perceptiva. Lâmpadas de vapor de sódio são muito úteis quando é necessária a iluminação de uma área extensa, onde a necessidade da

percepção de detalhes pelo ser humano não é grande. Assim, é justificado o uso dessas lâmpadas nas avenidas e ruas do Campus. Porém, baseando-se nas medições realizadas, considera-se que seria melhor, para os estudantes e para a economia de energia, que lâmpadas de vapor metálico fossem utilizadas nas áreas externas onde há possibilidade de interação acadêmica e leitura pelos estudantes.

**AGRADECIMENTOS:** Agradecemos ao diretor da Divisão de Sistemas da Prefeitura da Unicamp, Eng. Vicente José Costa Valle, pela solicitude e pelo apoio ao nos fornecer informações e dados fundamentais à realização deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BORBÉLY, Á.; SÁMSON, Á.; SCHANDA, J., 2001. The concept of correlated colour temperature revisited. **Color Research & Application**, Dezembro 2001. 450-457.
- BOWMAKER, J. K.; DARTNALL, H. J., 1980. Visual pigments of rods and cones in a human retina. **The Journal of Physiology**, 298, Janeiro 1980. 501-511.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P., 2003. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 5ª edição. ed. Rio de Janeiro, RJ: Livros técnicos e científicos, 2003.
- OSTER, S. LED vs. Sodium Lamps. **AL&E**, 2009. Disponível em: <http://www.al-e.com/led-vs-sodium-lamps> Acesso em: 3 Julho 2013.