

ANÁLISE COMPARATIVA DE VIABILIDADE DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA EM VAPOR DE SÓDIO, VAPOR METÁLICO E LED

Gustavo Gabriel da Rosa (1), Luiz Cesar de Castro (2).

UNESC – Universidade do Extremo Sul Catarinense
(1)gustavogdarosa@gmail.com, (2)luz@unescc.net

RESUMO

A iluminação pública tem grande influência na vida das pessoas, atuando como uma relevante ferramenta para o desenvolvimento social e econômico, além de apresentar eficácia na redução da criminalidade e no aumento da segurança em sistemas viários. Em busca de eficiência energética e economia, o emprego de tecnologias e projetos eficientes em sistemas de iluminação pública são imprescindíveis. Entretanto, praticamente todos os meios de tornar as instalações de iluminação pública mais eficientes exigem algum investimento inicial. Pretende-se no presente estudo determinar o sistema de iluminação pública mais eficiente e mais viável financeiramente entre sistemas de lâmpadas a vapor de sódio, vapor metálico e LED. Para este fim, foram realizadas medições fotométricas, simulações e dimensionamentos por meio de *software* para cada sistema em estudo, a fim de coletar dados e embasar a análise de eficiência e viabilidade de cada solução. As análises realizadas indicam que o sistema em vapor de sódio tem o menor custo inicial, e também o menor custo acumulado ao final de um período de análise de 11,88 anos (8,65% e 8,27% menor em relação ao sistema LED e vapor metálico, respectivamente), demonstrando ser o sistema mais viável economicamente. Em contrapartida, a maior economia energética anual por quilômetro foi proporcionada pela adoção do sistema em tecnologia LED (21,87% e 24,39% menor em relação ao sistema em vapor de sódio e vapor metálico, respectivamente). É evidente a redução do consumo energético obtida com a adoção de sistemas de iluminação pública em LED, porém o ainda elevado custo de implantação da tecnologia torna o investimento não tão vantajoso quanto o senso comum indica.

Palavras-Chave: Iluminação pública, Eficiência energética, LED, Eficácia luminosa.

1. INTRODUÇÃO

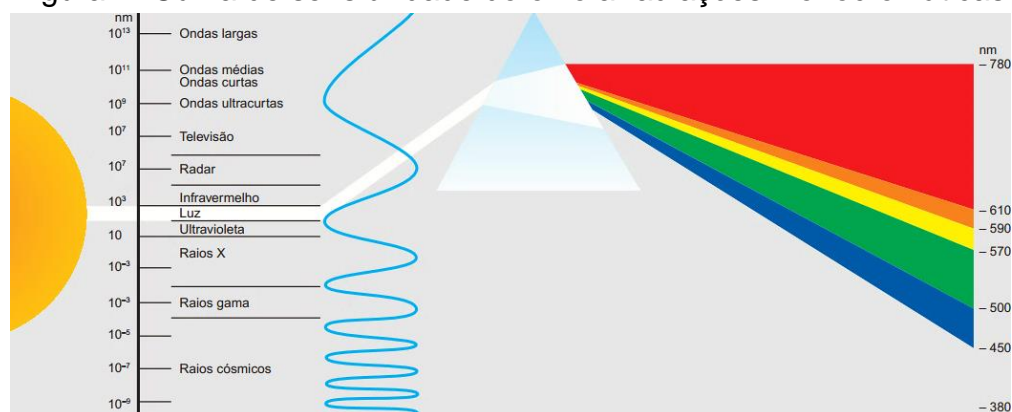
A iluminação pública (IP) é o serviço que tem por finalidade prover de luz ou claridade artificial as vias públicas em períodos noturnos. Este serviço influencia diretamente a vida de todo cidadão, uma vez que com o uso adequado da IP, a segurança pública e no trânsito, o lazer noturno, o comércio e o turismo são fortemente potencializados (PINTO; KIRCHNER, 2016). Conforme Mascaró *et al.* (2006), ilumina-se um ambiente à noite com a finalidade de alcançar objetivos sociais e econômicos, que incluem segurança, destaque às áreas históricas ou

espaços verdes públicos e apoio ao desenvolvimento local. A IP é uma necessidade básica para o bom funcionamento de uma cidade, e é essencial para o aumento da qualidade de vida das pessoas, permitindo que se faça o reconhecimento dos espaços públicos e das direções de trajetos no período noturno com segurança.

Desde a década de 1930 até a década de 1970 a IP brasileira utilizava, predominantemente, lâmpadas incandescentes. Na década de 1970, as lâmpadas de vapor de mercúrio começaram a ser utilizadas em larga escala devido à sua maior eficácia e vida útil. O passo seguinte na evolução dos sistemas nacionais de IP se deu nos anos 1990 por meio do emprego em larga escala das lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão. O processo de migração dos pontos de IP para tecnologia vapor de sódio continua até os dias atuais (RODRIGUES, 2012).

Os aspectos considerados para a substituição de um sistema por outro são econômicos e qualitativos, fazendo-se necessário, então, o conhecimento de conceitos básicos de fotometria para a realização das análises. Conforme Zumtobel (2017), luz é a parte do espectro eletromagnético cuja radiação pode ser captada pela visão humana, e identifica-se esta faixa de radiação como sendo a luz visível. A luz visível abrange uma parte pequena do espectro eletromagnético na região de cerca de 380 nanômetros até 780 nanômetros de comprimento da onda. Para cada frequência da luz visível é associada uma cor, conforme figura 1.

Figura 1: Curva de sensibilidade do olho a radiações monocromáticas

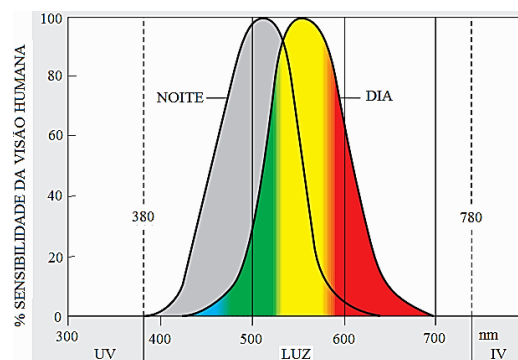


Fonte: Osram, 2012.

Todo e qualquer sistema de IP deve ser projetado para atender aos requisitos estabelecidos nas normas NBR 5101:2012 – Iluminação pública (ABNT, 2012) e NBR 5181:2013 – Iluminação de túneis (ABNT, 2013), que visam a adequação da iluminação artificial às necessidades das vias onde o sistema será implantado. As

normas garantem que a percepção do indivíduo sobre o ambiente seja levada em consideração na concepção de um projeto de iluminação. Conforme Casagrande (2016), o olho humano possui dois tipos diferentes de células sensitivas: os cones e os bastonetes. Os cones são responsáveis pela visão em locais com grandes níveis de luminosidade, quando se pode diferenciar com clareza as cores, chamada visão fotópica. Já os bastonetes, são adaptados para baixos níveis de luminosidade e são responsáveis pela percepção de claro e escuro, chamada visão escotópica (CASAGRANDE, 2016). As curvas de sensibilidade do olho humano relativas as condições fotópica e escotópica (dia e noite) são apresentadas na figura 2.

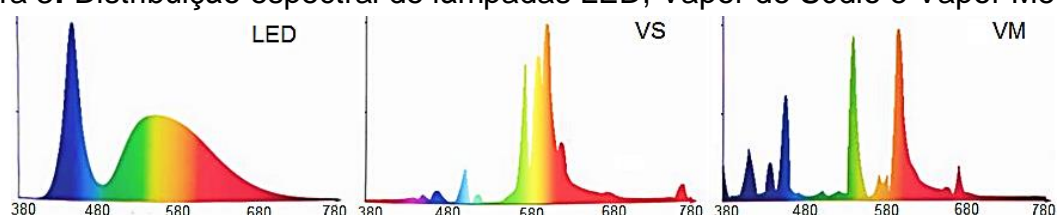
Figura 2: Curva de sensibilidade do olho à luz visível



Fonte: Osram, 2012.

A definição atualmente usada, conforme NBR 5101:2012 (ABNT, 2012), para fluxo luminoso é baseada na resposta fotópica do olho humano. Esta definição é adequada para aplicações em interiores, uma vez que as atividades são desempenhadas sob níveis de luminância relativamente altos. Entretanto, em aplicações de IP, onde os níveis de luminância são significativamente mais baixos, a resposta escotópica representa melhor a realidade da sensibilização do olho humano (RODRIGUES, 2012). Portanto, é de suma importância avaliar a distribuição espectral das lâmpadas utilizadas (figura 3) a fim de conhecer o estímulo que causarão aos olhos dos usuários e como aparentarão os objetos iluminados à noite.





Figura 3: Distribuição espectral de lâmpadas LED, Vapor de Sódio e Vapor Metálico



Fonte: XED Light, 2016.

Além da visão humana, o desempenho dos sistemas de iluminação está ligado às grandezas e conceitos relacionados no quadro 1, fundamentais para o entendimento dos elementos da luminotécnica.

Figura 4: Grandezas e conceitos de luminotécnica

Termo	Unidade	Definição (simplificada)	Ilustração
Fluxo Luminoso (Φ)	lúmen (lm)	Quantidade de luz emitida por uma fonte luminosa. A eficácia luminosa é a razão do fluxo luminoso pela potência consumida (lm/W).	
Iluminância (E)	lux (lx) (lm/m ²)	Quantidade de fluxo luminoso atingindo uma superfície.	
Índice de Reprodução de Cor (IRC)	%	Fidelidade com que as cores são reproduzidas sob uma determinada fonte de luz. Quanto maior o IRC maior será a reprodução das cores.	
Classe de iluminação de via	-	Apresentada pela NBR 5101:2012, relaciona a importância da via com os níveis mínimos aceitáveis de iluminância média e uniformidade para a rua em análise.	
Temperatura de Cor	K	Expressa a cor aparente da luz emitida.	

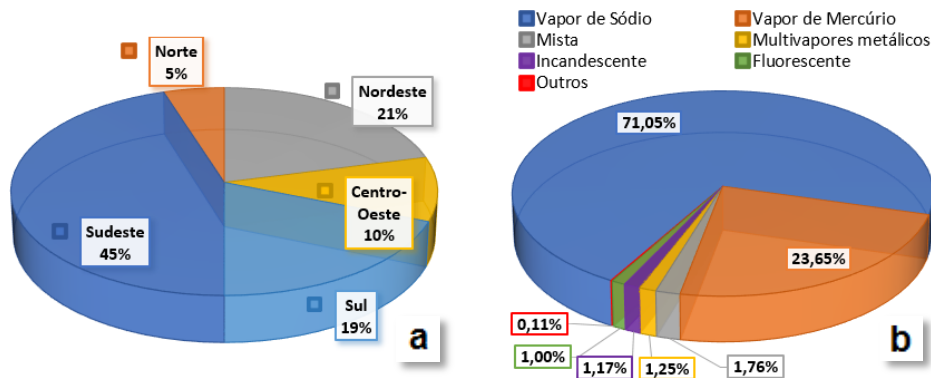
Fonte: adaptado de Zumtobel, 2017.

Para os novos projetos de IP, a especificação das luminárias é de fundamental importância, já que desempenha uma importante função no conjunto lumínico. Conforme Rodrigues (2012), além de desempenhar a função de fixação e abrigo das lâmpadas, as luminárias promovem a distribuição e o aproveitamento do fluxo luminoso emitido pela lâmpada, o que interfere de forma significativa no desempenho de um sistema de IP. As luminárias mais empregadas em IP são fixadas em postes por meio de braços de sustentação. Podem ser abertas ou fechadas, possuem ou não corpo refletor e ainda incorporar ou não os equipamentos auxiliares, como reator e relé fotoelétrico. São características importantes que devem ser analisadas em luminárias o seu rendimento luminotécnico, a distribuição fotométrica e o seu grau de proteção. As lâmpadas de LED são integradas na luminária, enquanto as lâmpadas de vapor de sódio e vapor metálico podem ser colocadas em qualquer luminária que tenha o receptáculo adequado para tomada de energia da lâmpada.

Conforme Casagrande (2016), as soluções de lâmpadas mais eficientes habitualmente utilizadas no mercado da IP são as seguintes: vapor de sódio, vapor

de mercúrio, vapor metálico e LED. Dessa forma, a figura 5 apresenta um panorama da IP no Brasil com as tecnologias mais utilizadas.

Figura 5: Panorama da IP no Brasil. (a) Distribuição aproximada entre as regiões brasileiras; (b) tecnologias utilizadas.



Fonte: Eletrobras (2012).

Conforme Pinto e Kirchner (2016), a tecnologia LED parece possuir vantagens absolutas sobre as outras opções, apesar da ausência de experiências em escala internacional que comprovem os resultados esperados.

Com o aumento da população e a expansão dos centros urbanos, há uma crescente demanda pela ampliação dos sistemas de IP nas cidades. Dessa forma, aumenta-se cada vez mais a demanda de energia elétrica para alimentar os sistemas de IP. Por este motivo, deve-se buscar cada vez mais a implementação de sistemas energeticamente mais eficientes. A utilização de tecnologias eficientes nos sistemas de IP pode reduzir a demanda em horários de ponta e combater o desperdício de energia elétrica com melhora na qualidade dos serviços prestados (KRUGER, 2016). Existem meios de tornar as instalações de IP mais eficientes e com isso conseguir redução de custos. Entretanto, praticamente todos exigem algum investimento inicial. Dessa forma, é necessário que os novos projetos de IP sejam elaborados com foco na redução do consumo energético, mas sem que isso vá contra os aspectos técnicos e regulamentares associados a cada tipo de via ou espaço.

As lâmpadas constituem-se como elemento principal no sistema lumínico. Dentre a diversidade de lâmpadas existentes voltadas para a IP, a lâmpada vapor de sódio (VS) em alta pressão é a mais eficiente do grupo de lâmpadas de alta intensidade de descarga e, por consequência, é a mais utilizada em IP (RODRIGUES, 2012). Como limitação, este tipo de lâmpada tem temperatura de cor e índice de reprodução de

cor baixos, produzindo imagens com pouca definição de cores e em tons quentes. Conforme Casagrande (2016) outra limitação das lâmpadas VS é o tempo necessário para o reacendimento em caso de desligamento da lâmpada, que é de no mínimo 1 minuto. Estas lâmpadas necessitam de reator e ignitor como equipamentos auxiliares, o que faz com que o sistema em funcionamento tenha um consumo maior que o consumo nominal das lâmpadas (RODRIGUES, 2012).

Já as lâmpadas de vapor metálico (VM) têm a mesma forma de operar que as lâmpadas de VS, diferindo na mistura de substâncias contida no tubo de descarga. Este tipo de lâmpada apresenta um bom índice de reprodução de cores e a luz emitida é neutra ou fria, com temperatura de cor entre os 3000 e os 6000K. No entanto, a cor é afetada ao longo da vida útil, possuindo uma durabilidade média menor que das lâmpadas VS e LED. Outro ponto fraco das lâmpadas VM é elevado tempo para reacendimento - entre 5 e 10 minutos (RODRIGUES, 2012).

Os LED são diodos emissores de luz, que quando polarizados fazem com que os elétrons se recombinem no interior do dispositivo, libertando energia na forma de fótons (ROBERTO; SCHULTZ, 2016). Os LEDs já eram utilizados desde os anos 1960, porém apenas para sinalização ou como indicadores luminosos em equipamentos eletrônicos, já que sua luz era monocromática e de pequena intensidade. Recentemente, com o desenvolvimento dos LEDs de potência, a tecnologia começou a ser utilizada também na sinalização viária e em sistemas de IP (CASAGRANDE, 2016). Os LEDs de cor branca vêm evoluindo rapidamente tanto em potência quanto em eficácia luminosa.

A utilização da tecnologia LED na IP começa a ser uma alternativa viável, com a evolução da tecnologia associada à diminuição dos preços das luminárias. Na IP de praças e monumentos, esta tecnologia encontra-se bem implementada, já na iluminação viária ela ainda não consegue superar a tradicional utilização do VS. Porém, as características positivas do LED, como a grande eficácia luminosa, o elevado índice de reprodução de cores, a capacidade de acendimento imediato, a boa projeção de luz com redução da poluição luminosa, a robustez e a vida útil superior às demais tecnologias, fazem com que o mesmo seja interessante para aplicações na IP. Os pontos fracos do LED como fonte de iluminação para vias públicas são o maior custo das luminárias, a ainda pouca oferta de opções comerciais credíveis e a incerteza da confiabilidade - por serem equipamentos com muita eletrônica exposta a condições climáticas adversas.




O presente estudo visa coletar dados, analisar, comparar e determinar desempenho, eficiência e atendimento às normas de três diferentes sistemas de IP utilizados no Brasil. Para este estudo, foram considerados sistemas com lâmpada vapor de sódio, vapor metálico e LED. Sistemas em vapor de mercúrio, lâmpada mista, incandescente e fluorescente, apesar de serem ainda muito utilizados no Brasil, não foram considerados por ser unanimidade entre os autores a sua menor eficiência quando comparados com os sistemas em estudo (CASAGRANDE, 2016; MACHADO, 2016; OSRAM, 2014).

Além do desempenho de cada sistema avaliado, pretende-se determinar com o presente estudo a alternativa mais viável economicamente por meio de comparação da eficiência, custos de manutenção e investimento inicial de cada sistema estudado.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foram realizadas medições fotométricas *in loco* de iluminância em sistemas existentes implantados nas três tecnologias em estudo, conforme figura 6.

Figura 6: Lâmpadas e luminária analisadas

	Vapor de Sódio	Vapor Metálico	LED
			
Fabricante	A	B	C
Potência (W)	150	150	150
Fluxo Luminoso (Lm)	15.000	14.500	14.619
Eficácia Luminosa (Lm/W)	100,00	96,67	97,46
Vida Útil Média (h)	24.000	12.000	50.000
Temperatura de Cor (K)	2.000	5.000	5.000
IRC (%)	25	70	80

Fonte: Osram, 2017; Empalux, 2017; Zagonel, 2017.

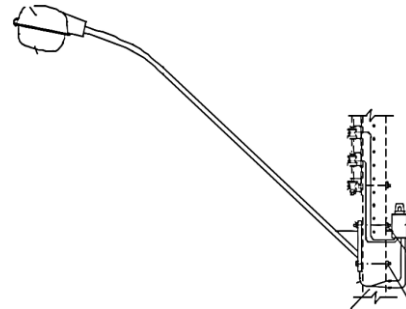
No presente estudo, as luminárias utilizadas para as lâmpadas VS e VM foram do tipo LM3, conforme denominação da Copel (2005), genéricas e de fabricantes não identificados e conforme figuras 7 e 8.

Figura 7: Luminária dos sistemas
VS e VM



Fonte: Autor, 2017.

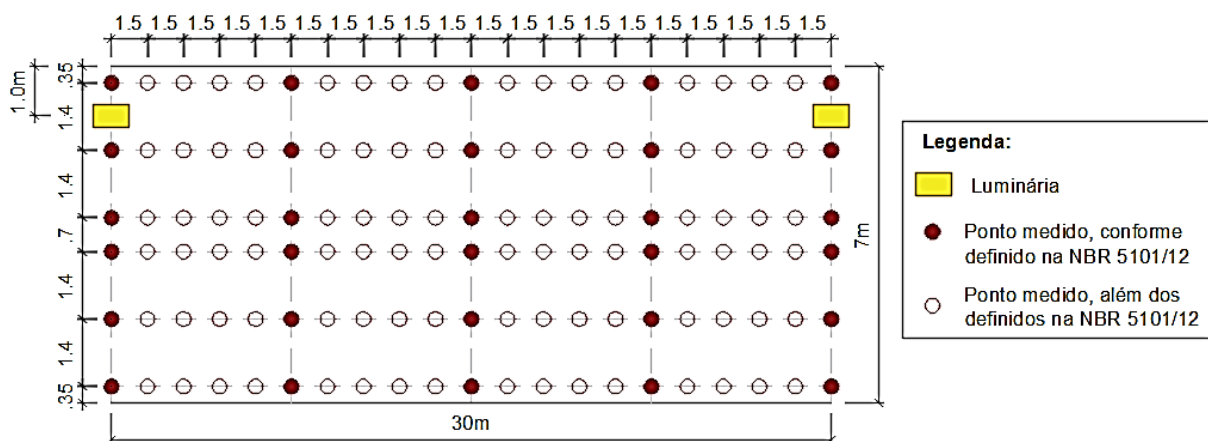
Figura 8: Luminária LM3



Fonte: Copel, 2005.

As medições de iluminância *in loco* foram realizadas com o auxílio do aparelho luxímetro digital LDR-380, da fabricante Instrutherm. Os pontos de aferição de iluminância foram definidos de acordo com os procedimentos descritos na NBR 5101:2012 (ABNT, 2012), por meio de uma malha de medição padrão. A quantidade e a posição de pontos de medição para cada sistema dependem da distância entre postes e da largura da pista de rolamento do sistema analisado. Foi fixado, portanto, a largura de pista padrão da malha em 7m e foram analisados sistemas com luminárias espaçadas em 30m, a fim de padronizar a malha de verificação e obter comparações mais precisas. Neste caso, a malha de verificação padrão tem 30 pontos de verificação, conforme NBR 5101:2012 (ABNT, 2012). Para verificar melhor o comportamento do sistema e a uniformidade dos valores de iluminância, foram medidos 96 pontos além dos definidos pela norma. Dessa forma, a malha de medição utilizada no presente estudo ficou conforme figura 9.

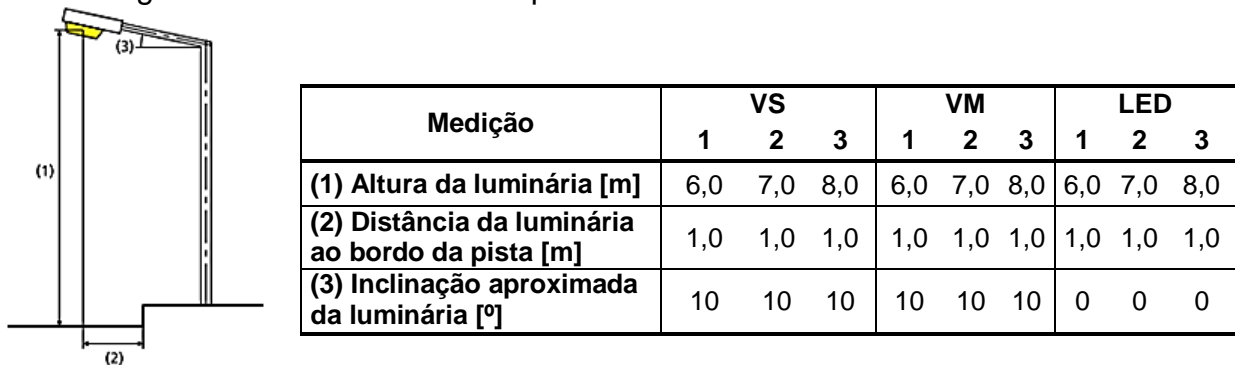
Figura 9: Malha de medição utilizada



Fonte: Autor, 2017.

A fim de padronizar as medidas, as iluminâncias foram aferidas em alturas iguais para os três sistemas de iluminação, considerando a mesma distância do ponto de luz ao bordo de pista e com inclinação das luminárias aproximadamente igual, conforme ilustrado na figura 10.

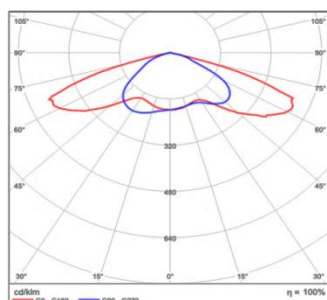
Figura 10: Características de posicionamento das luminárias analisadas



Fonte: Autor, 2017.

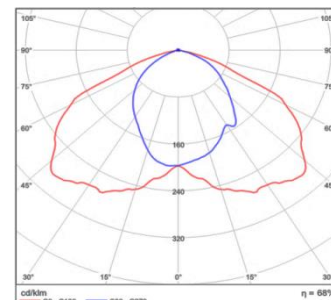
Para comparação e reforço dos resultados, foram realizadas simulações com o software gratuito Dialux Evo versão 7.1, da empresa alemã Dial, utilizado e recomendado por grandes empresas como Philips e Osram para cálculos luminotécnicos. Foram utilizados na simulação as mesmas condições dos sistemas medidos *in loco*, como espaçamento, altura e inclinação das luminárias. Os arquivos fotométricos necessários para as simulações da luminária LED foram disponibilizados pela fabricante. Entretanto, as luminárias genéricas VS e VM não têm arquivos fotométricos próprios. Portanto, foi adotado para as simulações do sistema VS e VM, devido à similaridade na distribuição de iluminância, os arquivos fotométricos da luminária Nikkon S429, da fabricante Nikkon, disponibilizado no banco de dados LUMsearch (2017). As curvas de emissão luminosa das luminárias utilizadas são conforme as figuras 11 e 12.

Figura 11: Curvas de emissão luminosa da luminária LED



Fonte: Zagonel, 2017.

Figura 12: Curva de emissão luminosa da luminária Nikkon S429



Fonte: LUMsearch, 2017.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com os valores de iluminância medidos *in loco*, foram calculados os parâmetros exigidos pela NBR 5101:2012 (ABNT, 2012) para cada sistema em estudo: iluminância média (Emed) – caracterizado pela média aritmética das medições de iluminância, iluminância mínima (Emin) – menor valor medido na malha, e Uniformidade Geral (Uo), dada pela razão entre Emin e Emed, conforme tabela 1.

Tabela 1: Resultados das medições de iluminância *in loco*

	VM			VS			LED		
	6m	7m	8m	6m	7m	8m	6m	7m	8m
Altura									
Emed (lux)	20,5	19,3	18,2	22,9	21,6	20,4	23,5	20,9	18,7
Emin (lux)	3,0	4,5	6,0	2,8	4,4	6,0	9,4	11,0	11,6
Uo	0,15	0,23	0,33	0,12	0,20	0,29	0,40	0,53	0,62
Classe atendida	-	V3	V2	-	V3	V3	V2	V2	V3

Fonte: Autor, 2017.

As simulações realizadas com o *software* Dialux forneceram valores que podem ser conferidos na tabela 2.

Tabela 2: Resultados das simulações de iluminância no *software* Dialux

	VM			VS			LED		
	6m	7m	8m	6m	7m	8m	6m	7m	8m
Altura									
Emed (lux)	23,3	21,4	19,6	24,1	22,1	20,3	23,0	20,5	18,4
Emin (lux)	2,8	4,7	5,9	2,9	4,8	6,1	9,2	11,2	12,0
Uo	0,12	0,22	0,30	0,12	0,22	0,30	0,40	0,55	0,65
Classe atendida	-	V3	V2	-	V3	V2	V2	V2	V3

Fonte: Autor, 2017.

Em consonância com os resultados de Roberto e Schultz (2016), os sistemas VS e LED apresentaram maior destaque devido à sua maior iluminância média e a maior uniformidade geral, respectivamente. Os resultados da tabela 1 apontam que o sistema em VS analisado tem os maiores valores de iluminância média nas alturas de 7m e 8m. Entretanto, a iluminância mínima apresentada pelo sistema LED foi superior aos demais sistemas em todos os casos, fazendo com que a uniformidade média do sistema em LED seja superior, evitando zebração na pista. Apesar da menor eficácia luminosa da luminária LED em estudo, este fato está associado à melhor distribuição do fluxo luminoso emitido pelo LED devido ao fato de a luminária

utilizar lentes eficientes, que projetam a luz do LED de forma distribuída longitudinalmente em relação à pista. O sistema em VM apresentou os menores valores de iluminância média entre os sistemas medidos. Este fato está atrelado ao menor fluxo luminoso da lâmpada.

Os resultados simulados são próximos aos valores medidos *in loco*. É possível, por meio dos dados da tabela 1 e 2, avaliar a confiabilidade da simulação do *software* Dialux. Dessa forma, a tabela 3 apresenta as diferenças percentuais entre as medições reais e as simuladas.

Tabela 3: Diferença entre valores medidos *in loco* e calculados com *software* Dialux

	VM			VS			LED		
	6m	7m	8m	6m	7m	8m	6m	7m	8m
Altura									
Emed (lux)	13,8%	10,6%	7,4%	5,3%	2,3%	0,6%	2,1%	1,8%	1,5%
Emin (lux)	7,0%	4,0%	1,0%	3,2%	9,1%	3,0%	2,0%	1,8%	3,4%
U _o	18,3%	5,9%	7,9%	2,0%	6,6%	3,6%	0,0%	3,7%	5,1%

Fonte: Autor, 2017.

As diferenças entre os valores simulados e os medidos *in loco* se dão, principalmente no caso do sistema em VM, pela depreciação do fluxo luminoso das lâmpadas. Os sistemas em VS e LED foram analisados logo após a implantação, enquanto o sistema VM já estava implantado há um tempo indeterminado. Considerando esse motivo, é possível afirmar que as simulações do *software* Dialux são de nível satisfatório, pois as variações de iluminância e uniformidade apresentadas foram pequenas. Entre todos os casos de comparação, apenas para o sistema em VS à 8m de altura ocorreu diferença de classe possível de iluminação. Conforme os valores medidos *in loco*, o sistema atenderia à classe V3 da NBR 5101:2012 (ABNT, 2012) e por meio da simulação o sistema atenderia à classe V2.

3.1 DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS ÓTIMOS

Para realizar a análise econômica dos diferentes sistemas estudados, se faz necessário dimensionar os mesmos de forma que atendam minimamente aos parâmetros exigidos pela NBR 5101:2012 (ABNT, 2012). Para este fim, foi efetuado um dimensionamento otimizado por meio do *software* Dialux, utilizando como variáveis a altura dos pontos de luz, a inclinação do braço extensor e o avanço da luminária ao bordo da pista, de forma a utilizar a maior distância entre postes

possível. Para padronização, os sistemas foram dimensionados com posteação unilateral e foram fixados critérios para atender aos requisitos da classe V2 da NBR 5101:2012 (ABNT, 2012) por englobar a maior quantidade de tipos de vias: trânsito rápido, autoestradas e vias arteriais com tráfego médio, além de vias coletoras de tráfego intenso. A NBR 5101:2012 (ABNT, 2012) exige, para esta classe, valores de $E_{med} \geq 20$ lux e $U_o \geq 0,30$. O resultado do dimensionamento pode ser conferido na tabela 4.

Tabela 4: Dimensionamento ótimo para cada sistema

	LED	VS	VM
Altura da luminária [m]	6,00	8,00	7,00
Avanço da luminária após o bordo da pista [m]	1,00	1,00	1,00
Inclinação da luminária [°]	5,00	15,00	15,00
Iluminância média (E_{med}) [lux]	20,33	20,04	20,07
Uniformidade global (U_o)	0,31	0,32	0,30
Distância otimizada entre luminárias [m]	34,50	31,00	30,00

Fonte: Autor, 2017.

Pode-se concluir por meio do disposto na tabela 4, que entre os três sistemas em estudo, o sistema de iluminação em LED possibilita a adoção de maior distância entre luminárias sem deixar de atender às normas vigentes e mantendo o mesmo consumo por luminária. É, portanto, o sistema que necessita de menos luminárias por quilômetro de instalação, o que faz com que o sistema tenha uma menor potência instalada. Apesar de as lâmpadas VS e VM possuírem maior eficácia luminosa (lm/W) que a luminária LED em estudo, os sistemas em VS e VM necessitam que as luminárias fiquem mais próximas entre si do que o sistema LED. Este fato está possivelmente atrelado à limitação na uniformidade global dos sistemas VS e VM com as luminárias utilizadas.

3.2 ANÁLISE ECONÔMICA DOS SISTEMAS

Um dos principais fatores da análise econômica dos sistemas estudados é o custo com energia elétrica. Conforme determinado pela ANEEL (2010), para fins de faturamento da energia elétrica destinada à IP, o tempo a ser considerado para consumo é de 11,87 horas diárias e a tarifa – considerando se tratar de iluminação pública de responsabilidade de prefeitura municipal – é da classe denominada B4a pela ANEEL, cujo valor cobrado pela CELESC (Centrais Elétricas de Santa Catarina)

em outubro de 2017, acrescido de ICMS (25%), PIS (1,15%) e COFINS (5,32%) é R\$ 0,36906/kWh. O cálculo da incidência dos impostos é do tipo “por dentro”, e por esse motivo o peso dos impostos acaba sendo maior que a alíquota nominal. Foi considerado para as tecnologias VS e VM um acréscimo de 15% de potência devido às perdas do reator, conforme Pinto e Kirchner (2016). A tabela 5 apresenta o custo com energia elétrica anual por quilômetro para cada sistema ótimo dimensionado.

Tabela 5: Custo anual de energia elétrica por quilômetro para cada sistema

	LED	VS	VM
Consumo por lâmpada [W]	150,00	150,00	150,00
Consumo do reator [W]	-	22,50	22,50
Consumo total por luminária [W]	150,00	172,50	172,50
Tempo de funcionamento/ano [h]	4.332,55	4.332,55	4.332,55
Distância entre luminárias [m]	34,50	31,00	30,00
Luminárias/km [un]	28,99	32,26	33,33
Consumo anual/km (kWh)	18.837,17	24.108,54	24.912,16
Custo da energia - Celesc [R\$/kWh]	0,36906	0,36906	0,36906
Custo com energia por km por ano [R\$]	6.952,13	8.897,61	9.194,20

Fonte: Autor, 2017.

A economia energética anual por quilômetro obtida com a utilização do sistema em LED é de R\$ 1.945,48 (21,87%) em relação ao sistema em VS e R\$ 2.242,07 (24,39%) em relação ao sistema em VM. Será considerado nos cálculos um reajuste anual na tarifa de energia elétrica conforme o reajuste médio de tarifa de energia publicado para o ano de 2017 pela CELESC (2017), que foi de 7,85%.

Outro fator importante a ser considerado é o custo de implantação dos sistemas. A tabela 6 apresenta esses custos com dados coletados na região do estudo (Criciúma – SC) no mês de novembro de 2017.

Tabela 6: Custo de implantação dos sistemas por quilômetro

	LED	VS	VM
Luminária	1.166,00	95,20	95,20
Lâmpada	-	34,75	43,15
Reator externo 150w	-	84,25	100,65
Poste de concreto circular, 200kg, h=9m	823,54	823,54	823,54
Braço tipo BR-2 - 1,5m de comprimento	34,80	34,80	34,80
Base para Relé fotoelétrico	10,25	10,25	10,25
Relé fotoelétrico	17,96	17,96	17,96
Custo de implantação/luminária [R\$]	2.052,55	1.100,75	1.125,55
Custo de implantação/km [R\$]	59.494,20	35.508,06	37.518,33

Fonte: Autor, 2017.

Verifica-se que o custo de implantação por quilômetro do sistema em VS é o menor entre os três analisados, seguido do sistema VM e por último pelo sistema em LED, conforme tabela 7.

Tabela 7: Diferenças de custo de implantação dos sistemas em relação ao sistema vapor de sódio

Tecnologia	Custo	Diferença (R\$)	Diferença (%)
Vapor de Sódio	35.508,06	0,00	0,00%
Vapor Metálico	37.518,33	2.010,27	5,66%
LED	59.494,20	23.986,14	67,55%

Fonte: Autor, 2017.

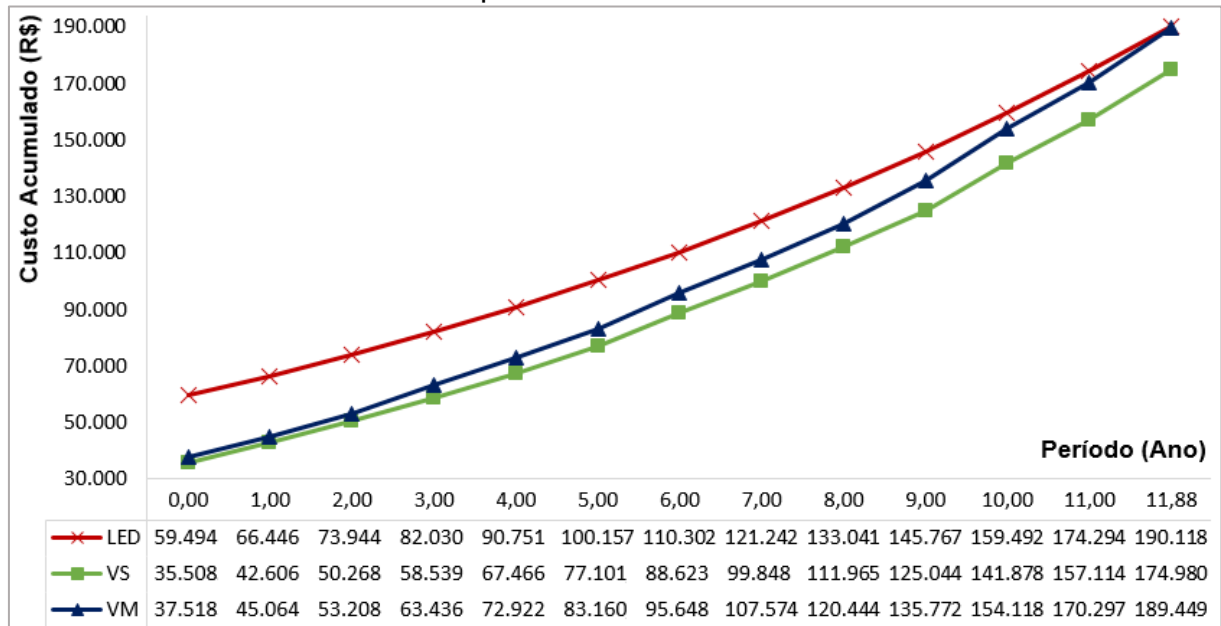
Devido à grande diferença nos custos de implantação dos sistemas, foi aplicado, para efeito de análise de viabilidade, reajuste nas diferenças do custo de implantação com base na taxa SELIC de outubro de 2017, de 7,50% a.a., conforme o Banco Central do Brasil (2017).

Para o custo de manutenção dos sistemas, foi considerada a troca das lâmpadas ao final da sua vida útil, além de troca de reator, no caso dos sistemas VM e VS, ao final de 10 anos de utilização, conforme vida útil dos reatores orçados da fabricante Intral (2017). Para os custos futuros de manutenção, foram admitidos os valores dos itens específicos constantes na tabela 6.

A vida útil do sistema em LED analisado é de 50.000h de funcionamento e é a mais longa entre os sistemas, possibilitando um tempo de vida útil de 11,88 anos do sistema. Portanto, o estudo econômico do presente trabalho levará em consideração um período de análise de 11,88 anos.

Coletados e calculados todos os dados necessários, pode-se calcular os custos acumulados para cada sistema ao longo do período de análise. A comparação econômica dos sistemas foi feita por meio do gráfico de custo acumulado para cada sistema, conforme figura 13.

Figura 13: Gráfico dos custos acumulados ao longo de 11,88 anos por quilômetro para cada sistema



Fonte: Autor, 2017.

Conforme resultados apresentados na figura 13, o sistema que se mostrou mais viável economicamente entre os analisados foi o sistema em VS, seguido do sistema em VM e então do sistema em LED, conforme tabela 8.

Tabela 8: Diferenças de custo acumulado dos sistemas em relação ao sistema vapor de sódio

Tecnologia	Custo	Diferença (R\$)	Diferença (%)
Vapor de Sódio	174.980,70	0,00	0,00%
Vapor Metálico	189.449,89	14.469,19	8,27%
LED	190.118,65	15.137,95	8,65%

Fonte: Autor, 2017.

No momento atual, existe uma maior vantagem econômica na adoção do sistema a VS em relação ao LED. Este resultado é diferente do que indica o senso comum, que adverte que a utilização do LED gera economias de 50% na iluminação pública (CARVALHO; TREVISAN, 2017). Entretanto, os resultados obtidos no presente estudo apresentaram concordância com resultados obtidos em outras pesquisas recentes (ROBERTO; SCHULTZ, 2016).

Entre os sistemas em VM e LED – que possuem alto índice de reprodução de cores, característica desejável em projetos de praças e locais de prática esportiva – o sistema em VM apresentou menor custo acumulado ao final do período de análise,

porém apenas 0,35% menor que o custo apresentado pelo sistema LED. Entretanto, a disparidade no custo de implantação de sistemas de iluminação pública em LED em relação aos outros sistemas analisados é grande. Esta diferença pode representar o não investimento de importâncias consideráveis em outras finalidades que necessitem com mais urgência. Portanto, se faz necessária análise individualizada para cada caso a fim de definir a solução mais vantajosa.

4. CONCLUSÃO

Por meio das análises realizadas, conclui-se que o sistema em vapor de sódio apresenta o menor custo de implantação e o menor custo acumulado ao final de um período de análise de 11,88 anos (8,27% e 8,65% menor em relação ao sistema em vapor metálico e LED, respectivamente).

Entretanto, o sistema em LED analisado possibilita economia energética anual por quilômetro de 21,87% em relação ao sistema em vapor de sódio e de 24,39% em relação ao sistema em vapor metálico. Entretanto, a disparidade no custo de implantação de sistemas de iluminação pública em LED em relação aos outros sistemas analisados é grande. Esta diferença pode representar o não investimento de importâncias consideráveis em outras finalidades que necessitem com mais urgência.

Quanto ao atendimento aos requisitos de iluminação impostos pela NBR 5101:2012 (ABNT, 2012), todos os sistemas analisados se mostraram aptos a compor projetos de iluminação pública, sendo que o sistema em vapor de sódio apresentou valores de iluminância média superiores aos demais enquanto o sistema LED apresentou iluminância mínima e uniformidade superiores aos outros sistemas. Logo, quando se necessitar usar grandes distâncias entre postes ou uniformidade alta no local iluminado, o LED se mostra como solução mais adequada.

Cabe ressaltar que os custos de luminárias LED vêm sendo rapidamente reduzidos com o desenvolvimento da tecnologia, ao passo em que sua eficácia luminosa vem aumentando. Já as tecnologias das lâmpadas VS e VM encontram-se consolidadas e evoluídas, o que torna sua melhora de certa forma estagnada. Dessa forma, é possível que as implantações de sistemas em LED se tornem cada vez mais vantajosas economicamente em relação às demais soluções.

Sugestões para trabalhos futuros:

- Analisar a viabilidade de implantação de sistema de controle inteligente para telegestão da iluminação pública;
- Estudar a viabilidade técnico-econômica da implantação de painéis fotovoltaicos em sistemas de iluminação pública;
- Repetir o estudo, levando em consideração a fotometria escotópica ou mesópica;

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica de forma atualizada e consolidada.** Resolução Normativa N° 414. Distrito Federal, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Tipos de lâmpadas empregadas na iluminação pública nacional.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 01 abr. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5461:** Iluminação – terminologia. Rio de Janeiro, 1998.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5101:** Iluminação Pública – procedimento. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5181:** Iluminação de túneis. Rio de Janeiro, 2013.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Notas da 210ª Reunião do Comitê de Política Monetária (Copom) do Banco Central do Brasil.** 2017. Disponível em: <http://www.bcb.gov.br/htms/copom/not20171025210.pdf>. Acesso em 05/11/2017.

CARVALHO, Fernanda Souza; TREVISAN, Simone Martins. **Sustentabilidade e eficácia energética em iluminação viária:** método de medição. Revista Intellectus, Campinas, v. 1, n. 38, 2017.

CASAGRANDE, Cristiano Gomes. **Desafios da iluminação pública no Brasil e nova técnica de projetos luminotécnicos fundamentada na fotometria mesópica.** 238p. Tese (Doutorado) Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

CELESC. **Reajuste tem efeito médio de 7,85% na tarifa de energia.** 2017. Disponível em: <http://www.celesc.com.br/portal/index.php/noticias/2008-reajuste-tem-efeito-medio-de-785-na-tarifa-de-energia>. Acesso em 05/11/2017.

CELESC. **Resolução homologatória nº 2.286.** 2017. Disponível em: <http://www.celesc.com.br/portal/index.php/duvidas-mais-frequentes/1140-tarifa>. Acesso em 12/11/2017.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA. **NTC 811353**: Luminária fechada sem equipamento – LM-3. Curitiba, 2011. 4 p.

ELETROBRAS. **Iluminação Pública**. Portal da Eletrobras, Centrais Elétricas Brasileiras. Disponível em: www.eletrobras.com. Acesso em 27/06/2017.

EMPALUX. **Descarga Vapor Metálico**. 2017. Disponível em: <http://www.empalux.com.br/?a1=p&c=000013&s=000078>. Acesso em 14/10/2017.

INTRAL. **Reator para lâmpadas de descarga alta pressão**. 2017. Disponível em: http://intral.com.br/_files/product/53e03678bc3203b28d3c32a7202fd41c.pdf. Acesso em 12/11/2017.

KRUGER, Cristiane; RAMOS, Lucas Feksa. **Iluminação pública e efficientização energética**. Revista Espaço Acadêmico, Maringá, n. 185, p.37-49, 27 jun. 2016. Mensal.

LUMSEARCH. **Product data sheet**: Nikkon S429. 2017. Disponível em: http://lumsearch.com/en/article/ksg-xyQ9QHe0raYMagjAEw?_Y=221. Acesso em 14/10/2017.

MACHADO, Andreia Margarida Queirós. **Gestão e Eficiência Energética em Redes de Iluminação Pública**. 2016. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrotécnica e de Computadores, Universidade de Trás-os-montes e Alto Douro, Vila Real, 2016.

MASCARÓ, Lucia et al. **A Iluminação do espaço urbano**. 156 p. Editora Masquatro. Porto Alegre, 2006.

OSRAM. **Manual Luminotécnico Prático**. 2012. Disponível em: www.osram.com.br. Acesso em 27/10/2017.

PINTO, Marco Aurélio Cabral; KIRCHNER, Carlos Augusto Ramos. **Cenário atual e oportunidades para atuação em Iluminação Pública no Brasil**. Brasília: Federação Nacional dos Engenheiros, 2016. 32 f.

ROBERTO, Thais Jeniffer; SCHULTZ, Edson Luiz. **Estudo comparativo de sistemas de iluminação pública**: lâmpadas led, lâmpadas de indução e lâmpadas a vapor de sódio. Revista Técnico-científica do Crea-PR, Curitiba, 2016.

RODRIGUES, Cláudio Roberto Barbosa Simões. **Contribuições ao uso de diodos emissores de luz em iluminação pública**. 2012. 217 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.

XED LIGHT. **How to choose the best factory lighting**. 2017. Disponível em: <http://www.xedlight.com/2017/07/03/xed-factory-lighting>. Acesso em 11/11/2017.

ZAGONEL. **Luminárias Públicas 150W**. 2017. Disponível em: <http://www.zagonel.com.br/detalhe-produto/13/>. Acesso em 13/04/2017.

ZUMTOBEL LIGHTING. **The lighting handbook**: Your concise reference book. 5. ed. Dornbirn, Austria. 2017.