

Universidade Federal de Juiz de Fora



Radiometria e Fotometria Experimental Utilizando as Esferas Integradoras LMS 200 e LMS 400

Disciplina: Sistemas Eletrônicos de Iluminação

Professor: Henrique Antônio Carvalho Braga

Aluno: Dênis de Castro Pereira

Matrícula: 103080084

Juiz de Fora, Julho de 2015

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 3 |
| 2. PRINCÍPIOS DE OPERAÇÃO DA ESFERA INTEGRADORA | 4 |
| 3. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO | 6 |
| 4. PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO | 7 |
| 5. LEITURA DOS RESULTADOS DE MEDIÇÃO | 8 |
| 6. MEDIÇÕES REALIZADAS E RESULTADOS | 9 |
| 7. CONCLUSÕES | 18 |
| 8. REFERÊNCIAS | 18 |

1. Introdução

A esfera integradora para fontes omnidirecionais, apresentada na Figura 1, é usada na medição de parâmetros radiométricos, fotométricos e espectralradiométricos. Isto significa obter, principalmente, informações quantitativas sobre o fluxo luminoso da fonte (fotópico e escotópico), coordenadas de cromaticidade, índice de reprodução de cores, cor correlata, potência da radiação e sua distribuição espectral de potência (ALMEIDA, 2011).

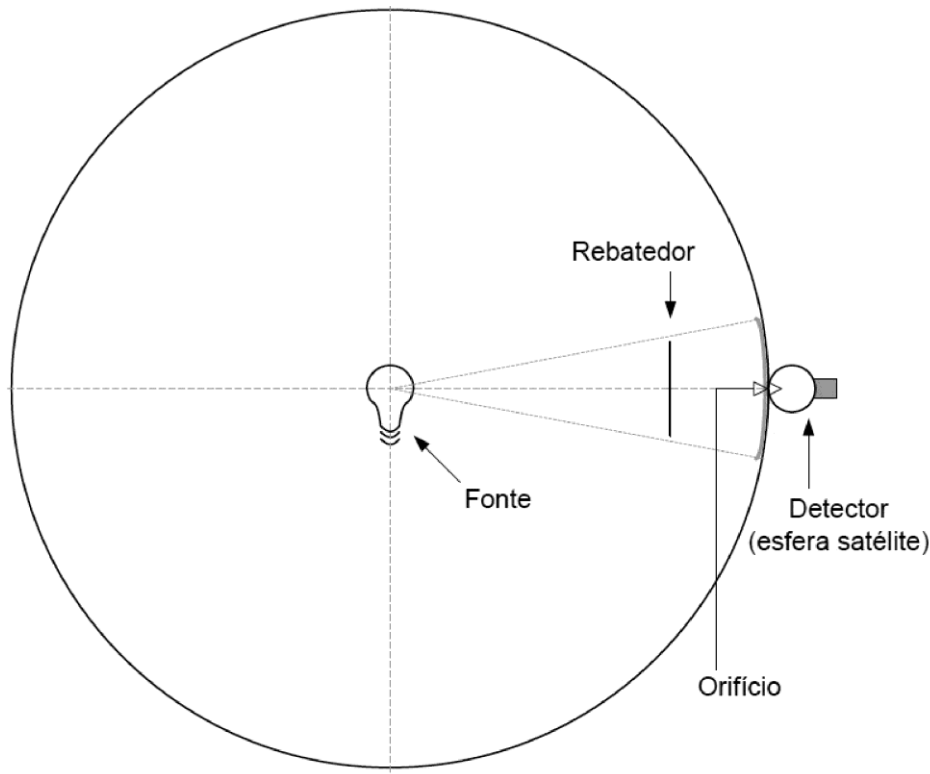


Figura 1 - Esfera integradora para fontes omnidirecionais.

Os constituintes críticos da esfera são sua pintura reflexiva interna ($> 97\%$ de reflexão garante redução da influência na medida) e o detector (constituído por uma esfera satélite em conjunto com uma fibra ótica ligada a um espectrômetro). A entrada da esfera satélite (detector) é um orifício, que deve ser protegido de incidência direta de luz por um rebatedor de diâmetro adequado.

Em teoria, quanto maior a esfera, melhor a medição, menor a influência do equipamento e maior pode ser a fonte, que ainda assim parecerá pontual. O problema com esta análise é que o tempo de integração (tempo de exposição do espectrômetro à incidência de luz) cresce junto com o tamanho da esfera e é inversamente proporcional à potência da radiação da fonte. Isto torna esferas pequenas adequadas a fontes de pequenos tamanhos e potências, e esferas grandes adequadas a fontes de médias e grandes potências e tamanhos.

O espectrômetro é calibrado para medições fotométricas, portanto sua resposta é regulada para ser aproximadamente como a resposta do olho humano, sob as condições adequadas.

Alguns conceitos são introduzidos conforme se segue, sendo que as unidades pertinentes a estas grandezas podem ser observadas na Tabela 1.

- Radiometria – medição de qualquer radiação eletromagnética (IR, NIR, UV, luz) quanto à potência da radiação, sem considerar o observador, mas a radiação em si.
- Fotometria – medição da radiação eletromagnética como é percebida pelo observador humano (i.e., luz) quanto ao fluxo luminoso, cor, entre outros.
- Espectroradiometria – radiometria com ênfase nos intervalos de comprimentos de onda das radiações (espectro e distribuição espectral de potência de uma fonte). No caso de estudar a percepção do observador humano, reduz-se à colorimetria, usada para quantificar e classificar o que chamamos de cor: a percepção humana às diferenças de frequência da radiação.

Tabela 1 - Grandezas e unidades importantes.

| Radiometria | Espectrometria | Fotometria |
|--|--|---|
| Potência da radiação (ou fluxo radiante) SI: W | Potência em um intervalo de comprimento de onda SI: W/nm | Fluxo luminoso SI: lm |
| Irradiância SI: W/m ² | Irradiância espectral SI: W/m ² nm | Iluminância SI: lm/m ² = lx |
| Intensidade radiante SI: W/sr | Intensidade espectral SI: W/sr nm | Intensidade luminosa SI: lm/sr = cd |
| Radiância SI: W/m ² sr | Radiância espectral SI: W/m ² sr nm | Luminância SI: lm/m ² sr = cd/m ² |

2. Princípios de Operação da Esfera Integradora

Alguns conceitos importantes à operação das esferas devem ser observados como a seguir.

- Quanto à instalação:

A esfera deve ser instalada preferencialmente em ambiente climatizado e longe de janelas, para evitar a incidência de poeira.

- Quanto à pintura interna:

O manejo do suporte para fontes luminosas dentro da esfera deve ser com luvas de látex, e nunca se deve tocar a pintura interna (mesmo com luvas). A abertura intermitente da casca deve ser evitada, a fim de reduzir a deposição de poeira na pintura, que prejudica sua refletância.

- Quanto ao espectrômetro:

Deve-se ligar o espectrômetro e aguardar um tempo (dez minutos) para estabilização térmica do dispositivo. A fibra ótica deve permanecer na mesma posição sempre. Deve ser conectado ao computador somente um espectrômetro por vez, com o software fechado, ao invés de diversos ao mesmo tempo, para evitar conflito de detecção de dispositivo pelo software.

- Quanto à calibração:

A calibração deve ser feita, no caso de medidas constantes, a cada duas semanas no máximo. Para medições esporádicas, é recomendado calibrar a esfera antes, caso não tenha sido usada nas últimas duas semanas.

- Quanto ao posicionamento das fontes luminosas:

O suporte central é regulável em altura. Esta deve ser ajustada para que, quando aberta a esfera, a sombra incidente da fonte (ligada) cubra todo o orifício que dá acesso ao detector. Quanto mais centralizada, melhor. Deve-se ligar a fonte luminosa, abrir a esfera e ajustar a altura até que a sombra esteja redonda e cobrindo todo o orifício atrás do rebatedor. O rebatedor é responsável pela produção desta sombra, e deve ser tão pequeno quanto possível, porém deve ser capaz de cobrir a incidência direta da luz no detector, ou seja, produzir uma sombra suficiente para determinada fonte luminosa, como mostrado na Figura 2. Ao fechar a esfera, a sombra some devido à reflexão da luz na superfície integradora.

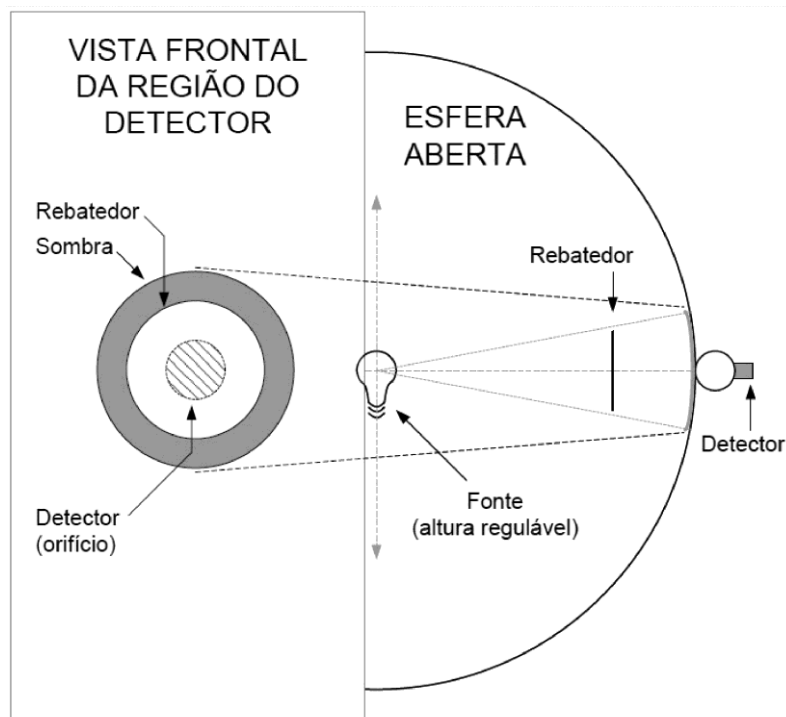


Figura 2 - Projeção da sombra para regulagem da altura da fonte na esfera aberta.

3. Procedimento de Calibração

Todos os espectrômetros devem ser calibrados em qualquer uma das esferas, sendo esta calibração também dependente da esfera em si. Tanto os espectrômetros menores (CDS-600 e CDS-610) quanto o maior (CDS-2100) podem trabalhar em qualquer uma das esferas – para este caso seriam necessários seis arquivos diferentes de calibração, um para cada espectrômetro em cada esfera. Pode-se também dedicar determinados espectrômetros a determinada esfera (como os CDS-600 e CDS- 610 para a LMS 200 e o CDS-2100 para a LMS 400) (ALMEIDA, 2011).

Para a esfera maior (LMS 400) deve ser utilizada a lâmpada padrão SCL-1400 e para esfera menor (LMS 200) deve ser utilizada a lâmpada padrão SCL-600. Estas lâmpadas são alimentadas pelas respectivas fontes dedicadas: fonte LPS-150 para a SCL-1400 e fonte LPS-100 para a SCL-600.

O procedimento de calibração realizado nos experimentos é descrito a seguir (ALMEIDA, 2011):

- a. A lâmpada padrão adequada à esfera em questão deve ser colocada no suporte e centralizada (usando as técnicas já descritas). Após isto, deve ser desligada para os ajustes de escuro.
- b. O espectrômetro a ser utilizado deve ser conectado à porta USB e o programa deve ser aberto (*Light MtrX*).
- c. Em seguida, o espectrômetro conectado deve ser selecionado no *software* (se já não estiver) através do menu *Edit >> Application Configuration >> Select Spectrometer*. Clica-se em “*Apply*” após a seleção do espectrômetro.
- d. No caso do espectrômetro CDS-2100, deve-se selecionar também no menu *Instrument >> Dark Correction* e logo após *Instrument >> Dark Correction >> Use Shutter*. Para os espectrômetros CDS-600 e CDS-610, deve-se selecionar o menu *Instrument >> Dark Correction* e logo após *Instrument >> Dark Correction >> Baseline Offset Correction*.
- e. Liga-se a lâmpada padrão através da fonte adequada e esperam-se dez minutos para a sua estabilização térmica.
- f. Seleciona-se o menu *Edit >> Calibration*. Escolhe-se um nome adequado para a calibração, que indique a esfera e o espectrômetro usado (nome indicado: “*Calib-LMS200-CDS600*”). Isto é necessário para apontar qual conjunto foi calibrado.
- g. Em “*Head Type*”, seleciona-se “*Flux*” e em “*Cal Type*”, seleciona-se “*Reference Lamp Calibration*”. Em “*Reference Lamp*”, utiliza-se o arquivo .txt fornecido junto à lâmpada

padrão (*Calibration Disk*, SCL-XXX) . Este arquivo deve ser copiado do CD e colado na pasta .../LightMtrX/Data/Standards do programa e em seguida selecionado neste instante. Para cada uma das lâmpadas, são fornecidos dois arquivos .txt: o arquivo a ser utilizado é o que possui a extensão “-Euro” no nome. Este arquivo contém toda a informação espectral sobre a lâmpada necessária ao programa para comparar a medida efetuada com o esperado, para calibrar o conjunto.

- h. Coloca-se “3” em “*Scans to Average*” e depois clica-se em “*Auto Exposure*” para calcular-se automaticamente o tempo de integração. Clica-se em seguida em “*Calibrate*”. Após a conclusão, clica-se em “*Validate*” para exibir o valor percentual da discrepância. Clica-se então em “*Save*” para salvar a calibração sob o nome escolhido – esta calibração será válida para esta associação espectrômetro-esfera-fibra.
- i. É aconselhável, em seguida, realizar uma medição com a própria lâmpada padrão para verificar se os parâmetros de fluxo e cor correlata estão de acordo com o documento de calibração fornecido junto à lâmpada (estas informações também se encontram em anexo ao final deste documento).

4. Procedimento de Medição

Para cada medição, deve-se selecionar a exposição adequada para que a medida seja feita.

O procedimento realizado nos experimentos é descrito abaixo:

- Seleciona-se o menu *Edit >> Method Values* e entra-se com um nome para o método (não é crítica a nomenclatura).
- De acordo com a combinação espectrômetro-esfera-fibra que se está usando, deve-se selecionar a calibração adequada em “*System Calibration*” (aqui se faz importante saber qual espectrômetro foi calibrado em qual esfera, justificando nomear cada calibração do conjunto de forma adequada).
- Em “*Scans to Average*”, insere-se “4”.Clica-se em “*Auto Exposure*” para calcular o tempo de integração desta medida a ser efetuada. Clica-se então em “*Save*” e logo em seguida “*Apply*”.
- Estes procedimentos anteriores devem ser repetidos antes de cada medida na esfera, pois configuram o equipamento para adequar o tempo de integração à fonte luminosa a ser medida. Tempos de integração adequados são da ordem de dezenas de milissegundos até alguns milhares. Tempos muito grandes são indesejados, e dependem do tamanho da esfera e da potência da fonte luminosa.

- A medida pode ser agora realizada através do ícone “*Scan Once*” (ou no menu *Instrument* >> *Scan Once*). Os resultados aparecem na tela, i.e. distribuição espectral de potência, diagrama de cromaticidade e dados quantitativos.

5. Leitura dos Resultados de Medição

Na tela de resultados do programa, é possível ler as grandezas apresentadas na Tabela 2, além de identificar os seguintes dados relevantes (Fig. 3):

- *SPECTRAL RESULT* – dados gerais espectralradiométricos, radiométricos e fotométricos:
- *SPECTRAL FLUX GRAPH* – mostra a distribuição espectral de potência da fonte medida, em W/nm, para cada comprimento de onda (em nm).
- *CHROMATICITY DIAGRAM* – mostra o diagrama de cromaticidade, com as coordenadas x e y da fonte, o *locus* do corpo negro e as tolerâncias para considerar cada TCC e tipo de fonte. A medição é mostrada por um pequeno losango azul-claro no diagrama, indicando onde a fonte luminosa testada se encontra no diagrama.
- *METHOD* – indica dados relevantes do método de medição configurado.
- *DETAILS* – mostra uma lista das medidas efetuadas.

Tabela 2 - Símbolos e unidades para cada grandeza lida nos resultados.

| Símbolo | Significado | Unidade |
|-----------------------------|---------------------------------------|---------|
| Φ | Fluxo radiante (potência de radiação) | W |
| $\Phi(v)$ | Fluxo luminoso fotópico | lm |
| $\Phi(v')$ | Fluxo luminoso escotópico | lm' |
| Chrom x | Coordenada x de cromaticidade | N/A |
| Chrom y | Coordenada y de cromaticidade | N/A |
| λ (<i>peak</i>) | Comprimento de onda de pico | nm |
| λ (<i>center</i>) | Comprimento de onda central | nm |
| λ (<i>dom</i>) | Comprimento de onda dominante | nm |
| CCT | Temperatura de cor correlata | K |
| RA | Índice de reprodução de cores médio | N/A |

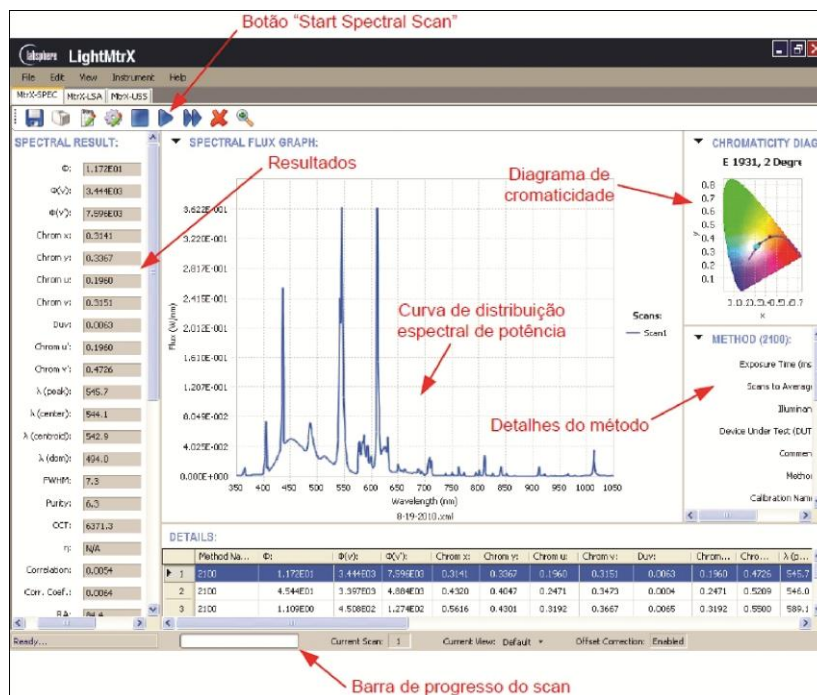


Figura 3 - Distribuição dos resultados na tela do *software Light MtrX*.

6. Medições Realizadas e Resultados

As medições foram realizadas utilizando os seguintes tipos de lâmpadas, desde incandescente, fluorescente, tipo descarga em alta pressão e também LEDs (*Light emitting diodes*), de acordo com as tabelas abaixo.

Tabela 3 - Medições realizadas para lâmpadas dos tipos halógena e incandescente.

| Parâmetro | SCL 1400 75W | SCL 600 30W | Incandescente 100W |
|---------------------------|--------------|-------------|--------------------|
| Fluxo luminoso radiante | 25,38 W | 7,91 W | 21,82 W |
| Fluxo luminoso fotópico | 1785 lm | 572,1 lm | 1253 lm |
| Fluxo luminoso escotópico | 2645 lm' | 851,2 lm' | 1697 lm' |
| TCC | 3009 K | 3027 K | 2742 K |
| IRC | 99,72 | 99,56 | 99,58 |

Tabela 4 - Medições realizadas para lâmpadas do tipo fluorescente compacta.

| Parâmetro | Fluorescente compacta 20W | Fluorescente compacta 58W | Fluorescente compacta 87W |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Fluxo luminoso radiante | 3,923 W | 11,72 W | 17,21 W |
| Fluxo luminoso fotópico | 1155 lm | 3444 lm | 5087 lm |
| Fluxo luminoso escotópico | 2540 lm' | 7596 lm' | 11120 lm' |
| TCC | 6431 K | 6371 K | 6248 K |
| IRC | 84,86 | 84,40 | 85,38 |

Tabela 5 - Medições realizadas para lâmpadas do tipo de descarga alta pressão.

| Parâmetro | Vapor de sódio 100W | Vapor de mercúrio 400W | Vapores metálicos 250W |
|---------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Fluxo luminoso radiante | 25,21 W | 49,51 W | 77,54 W |
| Fluxo luminoso fotópico | 6799 lm | 10390 lm | 14010 lm |
| Fluxo luminoso escotópico | 3842 lm' | 13150 lm' | 31810 lm' |
| TCC | 1950 K | 5562 K | 6432 K |
| IRC | 18,21 | 18,17 | 83,96 |

Tabela 6 - Medições realizadas para lâmpadas a LED.

| Parâmetro | LED 10W E20 | LED 10W E20 (LMS 200) | Módulo a LEDs 67W |
|---------------------------|-------------|--------------------------|----------------------|
| Fluxo luminoso radiante | 2,712 W | 2,729 W | 16,33 W |
| Fluxo luminoso fotópico | 859,8 lm | 870,0 lm | 5512 lm |
| Fluxo luminoso escotópico | 1098 lm' | 1106 lm' | 8488 lm' |
| TCC | 2864 K | 2875 K | 4023 K |
| IRC | 81,37 | 80,92 | 73,54 |

Todos os resultados obtidos foram equivalentes para os valores encontrados nas tabelas dos fabricantes (lidos nas próprias embalagens das lâmpadas), sendo que estes valores são apresentados no Anexo B (para lâmpadas-padrão) e Anexo C (para demais lâmpadas ensaiadas). O Anexo A apresenta a descrição dos equipamentos de medição integrantes para cada tipo de esfera integradora.

O procedimento de medição envolveu basicamente o que foi descrito anteriormente nas seções 4 e 5. Ambas as esferas foram utilizadas em conjunto com o espectrômetro CDS-2100.

Primeiramente, é configurado o método de medição, onde se usa a auto-exposição para determinar o tempo de integração. Em seguida, é realizada a medição através do botão “Start Spectral Scan”. Os resultados das medições são mostrados a seguir.

O diagrama de cromaticidade exibido à direita do resultado espectral mostra onde a fonte luminosa medida se encontra com relação à cor. O diagrama também mostra o locus Planckiano para comparação de temperatura de cor correlata.

É possível ainda, exibir o diagrama de cromaticidade estendido, pelo menu View >> Chromacity Diagram (Large). Neste diagrama, além do locus, é possível ver os comprimentos de onda para as cores puras, na borda, e alguns iluminantes padrões do CIE (A, B, C, D6 e E), junto às coordenadas de cromaticidade (x,y). O resultado cromático desta medição é mostrado a seguir, como exemplo, para a lâmpada fluorescente de 58W.

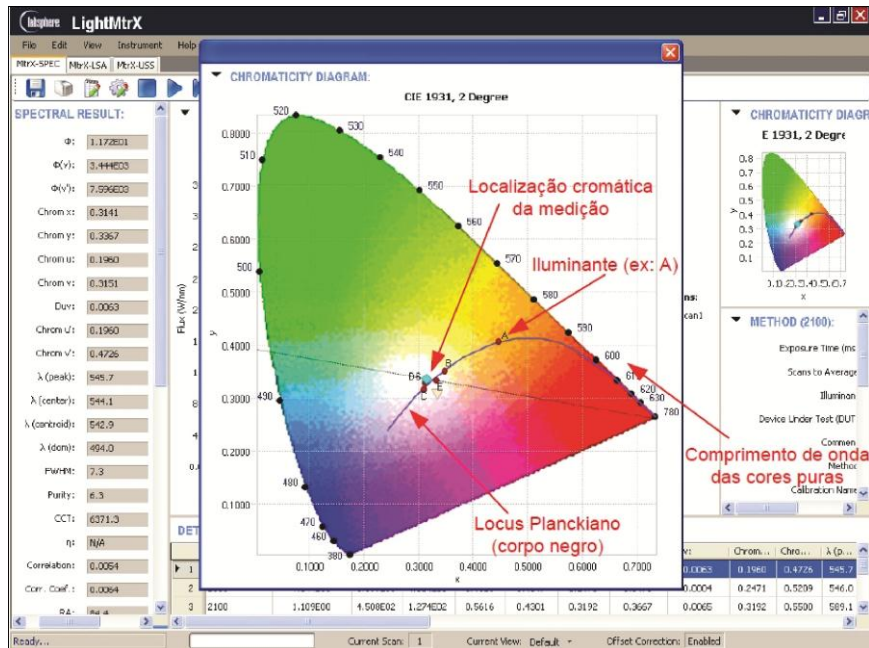
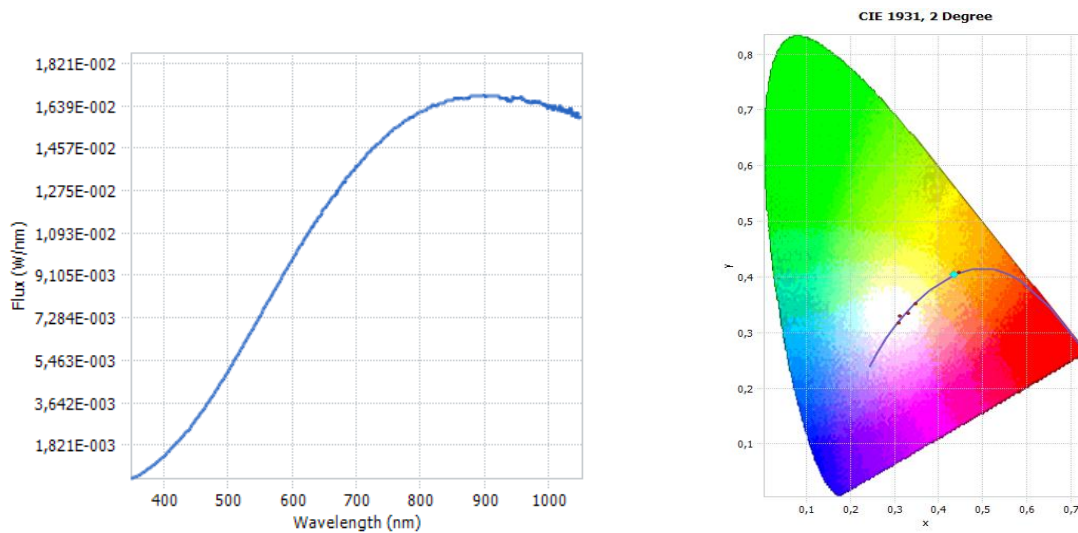


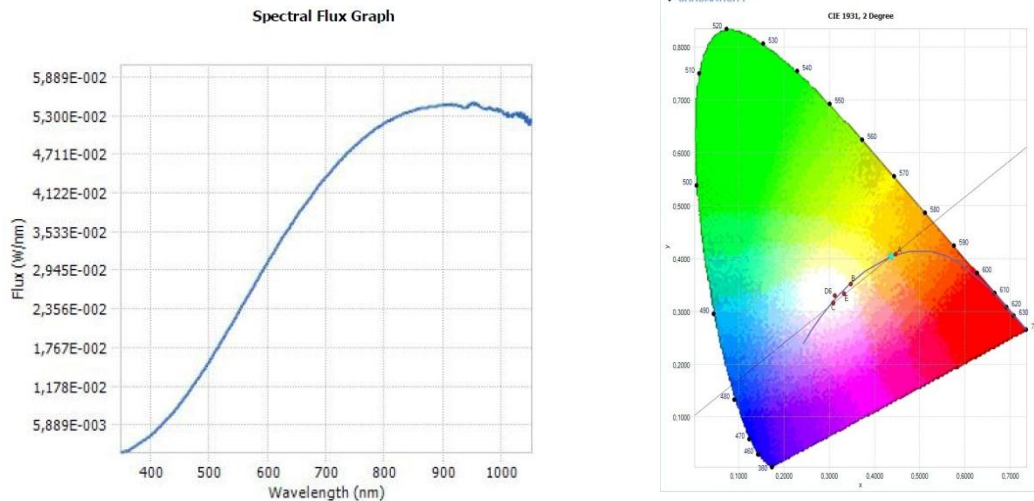
Figura 4 - Diagrama de cromaticidade estendido e identificação dos parâmetros apresentados.

Os demais resultados i.e. gráficos de distribuição espectral de potência e diagrama de cromaticidade são apresentados nas figuras abaixo, para as lâmpadas halógenas (padrão), incandescente, fluorescente compacta, vapor de sódio, vapor de mercúrio, vapores metálicos, respectivamente.



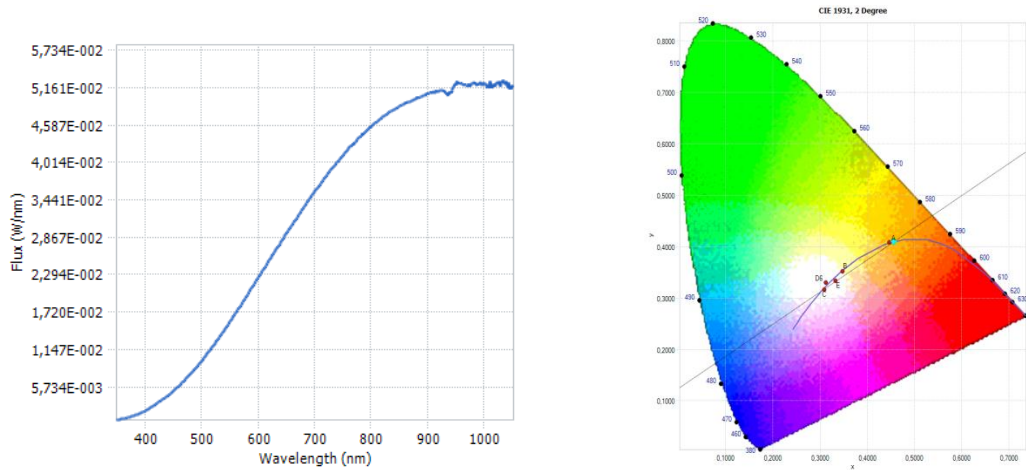
$\Phi=7,909$ W; $\Phi(v)=572$ lm ; $\Phi(v')=851$ lm'; TCC=3027 K ; IRC=99,56

Figura 5 - Resultados para lâmpada SCL 600 (LMS 200).



$\Phi=25,38$ W ; $\Phi(v)=1785$ lm ; $\Phi(v')=2645$ lm' ; TCC=3009 K ; IRC=99,72

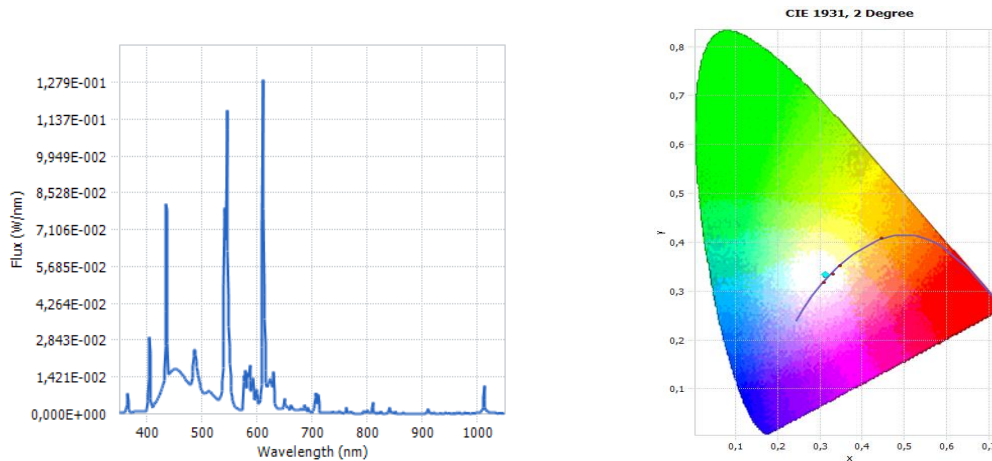
Figura 6 - Resultados para a lâmpada SCL 1400 (LMS 400).



$\Phi=21,82$ W ; $\Phi(v)=1253$ lm ; $\Phi(v')=1697$ lm' ; TCC=2742 K ; IRC=99,58

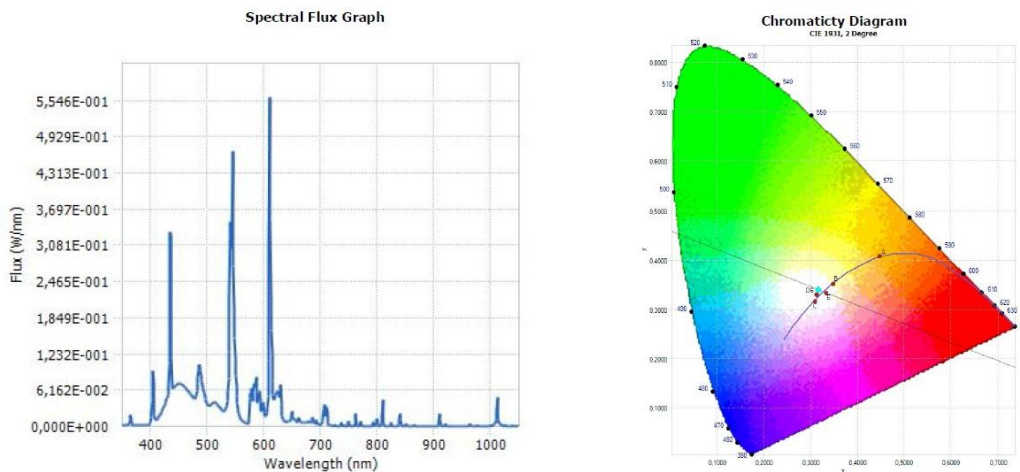
Figura 7 - Resultados para a lâmpada incandescente de 100W (LMS 400).

Ao se observar as figuras acima, pode-se notar que, para lâmpadas de natureza incandescente, o pico do diagrama espectral se dá em comprimentos de onda mais elevados, seguindo formas de distribuição similares, tanto para halógenas, quanto propriamente incandescentes. Tem-se ainda, pelo diagrama de cromaticidade, que são lâmpadas as quais assumem cor amarelada, pelos elevados índices de fluxo luminoso em baixas frequências, ou seja, em grandes comprimentos de onda. São lâmpadas que possuem fluxo luminoso fotópico inferior, se comparadas às lâmpadas de descarga em alta pressão por exemplo. Possuem baixa temperatura de cor correlata e alto índice de reprodução de cor, perto de 100.



$\Phi=3,92$ W ; $\Phi(v)=1155$ lm ; $\Phi(v')=2540$ lm' ; TCC=6431 K ; IRC=84,86

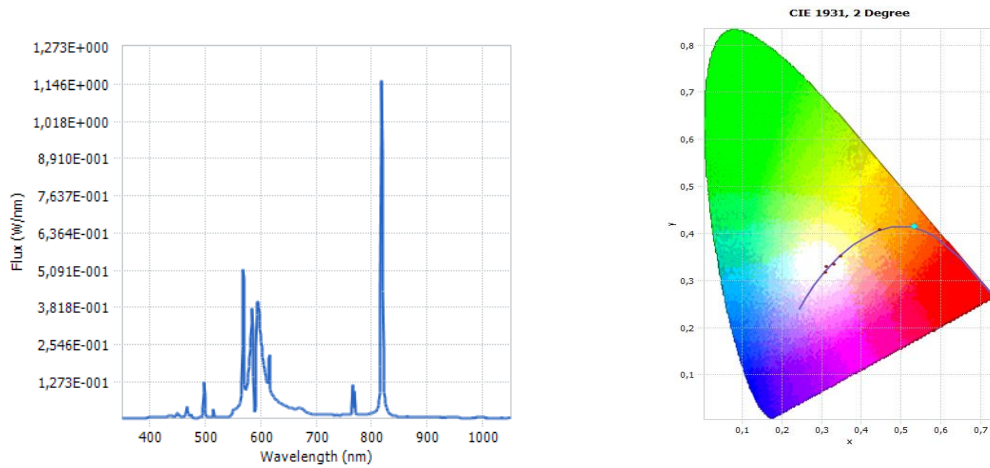
Figura 8 - Resultados para a lâmpada fluorescente de 20W (LMS 400).



$\Phi=17,21$ W ; $\Phi(v)=5087$ lm ; $\Phi(v')=11120$ lm' ; TCC=6248 K ; IRC=85,38

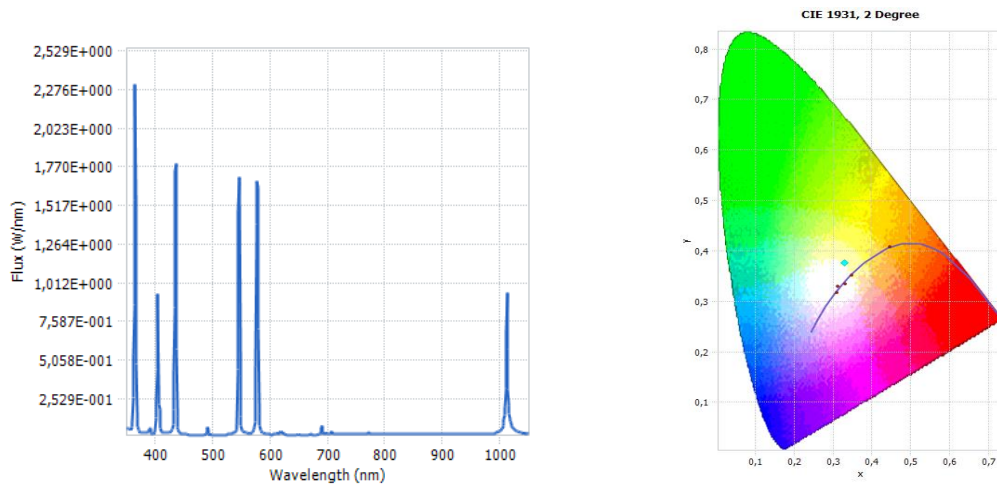
Figura 9 - Resultados para a lâmpada fluorescente de 87W (LMS 400).

Ao se observar as figuras acima, pode-se notar que, para lâmpadas de natureza fluorescente, existem diversos picos de fluxo luminoso radiante em comprimentos de onda intermediários. Tem-se ainda, pelo diagrama de cromaticidade, que são lâmpadas as quais assumem cor branca, pelos elevados índices dos picos de fluxo luminoso em frequências e comprimentos de onda intermediários. São lâmpadas que possuem fluxos luminosos fotópico e escotópico satisfatórios para iluminação de interiores. Possuem elevada temperatura de cor correlata e alto índice de reprodução de cor, na faixa de 85.



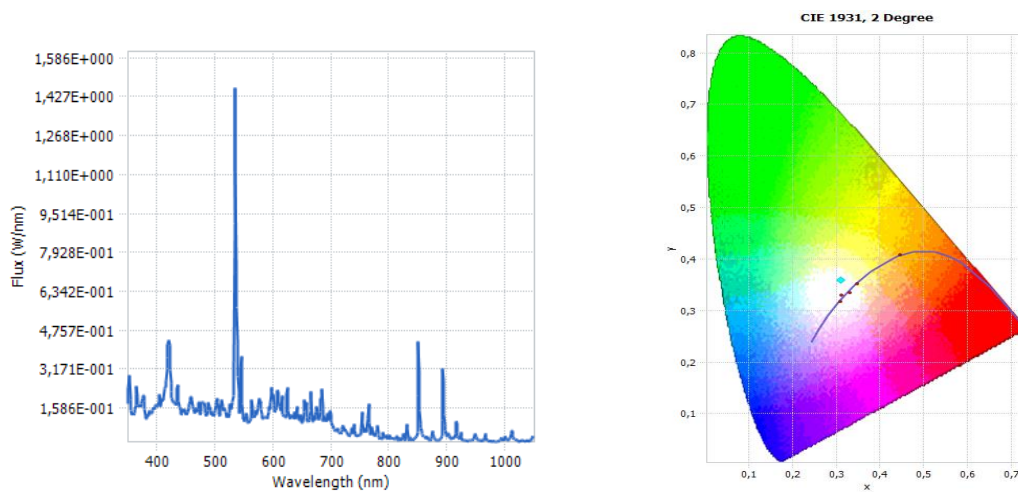
$\Phi=25,21$ W; $\Phi(v)=6799$ lm ; $\Phi(v')=3842$ lm'; TCC=1950 K ; IRC=18,21

Figura 10 - Resultados para a lâmpada de vapor de sódio de 100W (LMS 400).



$\Phi=49,51$ W; $\Phi(v)=10390$ lm ; $\Phi(v')=13150$ lm'; TCC=5562 K ; IRC=18,17

Figura 11 - Resultados para a lâmpada de vapor de mercúrio de 400W (LMS 400).



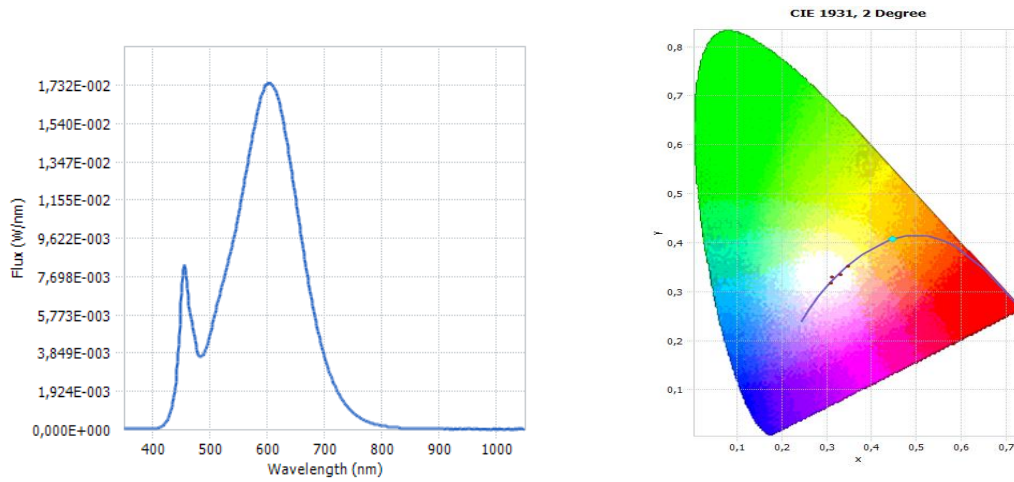
$\Phi=77,54$ W; $\Phi(v)=14010$ lm ; $\Phi(v')=31810$ lm'; TCC=6432 K ; IRC=83,96

Figura 12 - Resultados para a lâmpada de vapores metálicos de 250W (LMS 400).

Ao se observar as figuras acima, pode-se notar que, para lâmpadas de natureza de descarga de gases em alta pressão, existem diversos picos de fluxo luminoso radiante em variados comprimentos de onda. Para a lâmpada a vapor de sódio, o pico ocorre em comprimentos de onda elevados. Tem-se ainda, pelo diagrama de cromaticidade, que ela assume cor amarelada, pelos elevados índices de fluxo luminoso em baixas frequências, ou seja, em grandes comprimentos de onda. São lâmpadas que possuem grandes fluxos luminosos fotópico e escotópico, sendo indicadas para iluminação de exteriores. Possuem baixa temperatura de cor correlata e baixo índice de reprodução de cor, na faixa de 18.

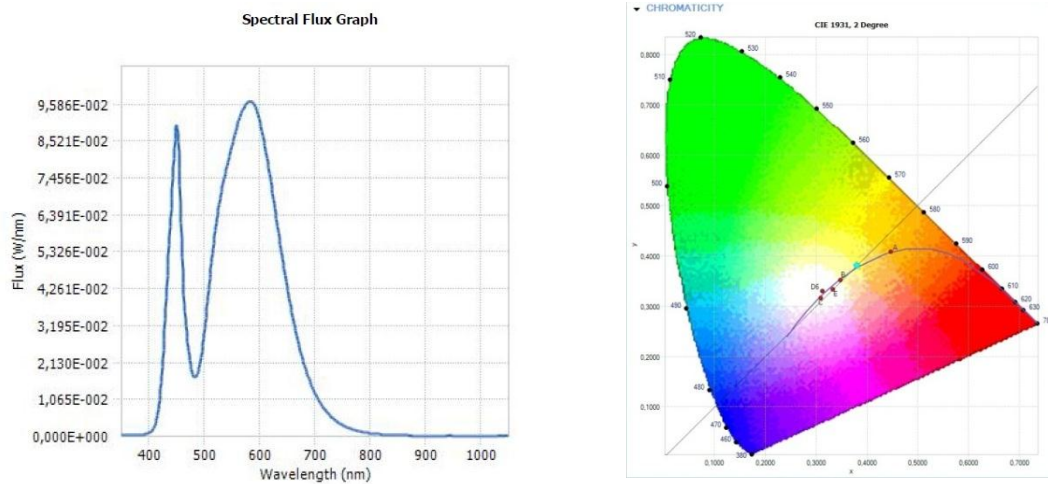
Para a lâmpada a vapor de mercúrio, os picos ocorrem em baixos comprimentos de onda. Tem-se ainda, pelo diagrama de cromaticidade, que ela assume cor branca, pelos elevados índices de fluxo luminoso em altas frequências, ou seja, em pequenos comprimentos de onda. Durante a sua estabilização térmica, chega a assumir cor azulada/roxa pelo elevado TCC e baixo IRC. São lâmpadas que possuem grandes fluxos luminosos fotópico e escotópico, sendo indicadas para iluminação de exteriores. Possuem alta temperatura de cor correlata e baixo índice de reprodução de cor, na faixa de 18.

Para a lâmpada a vapores metálicos, os picos ocorrem durante todo o espectro, sendo que o maior se dá em comprimentos de onda intermediários. Tem-se ainda, pelo diagrama de cromaticidade, que ela assume cor branca, pelos elevados índices de fluxo luminoso em frequências e comprimentos de onda intermediários. São lâmpadas que possuem os maiores valores de fluxos luminosos fotópico e escotópico dentre as ensaiadas, sendo indicada para iluminação de exteriores e grandes estádios. Possuem alta temperatura de cor correlata e alto índice de reprodução de cor, na faixa de 80.



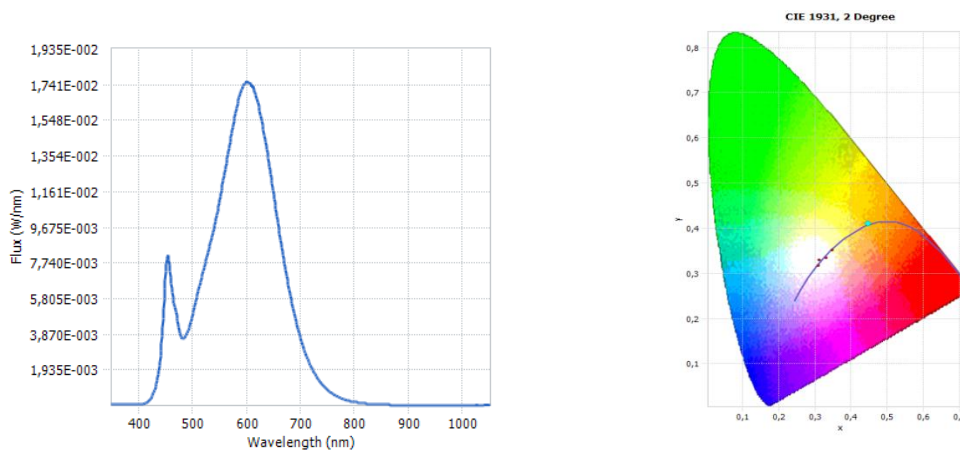
$\Phi=2,71$ W; $\Phi(v)=859,8$ lm ; $\Phi(v')=1098$ lm'; TCC=2864 K ; IRC=81,36

Figura 13 - Resultados para a lâmpada de LED de 10W (LMS 400).



$\Phi=16,33$ W; $\Phi(v)=5512$ lm ; $\Phi(v')=8488$ lm'; TCC=4023 K ; IRC=73,54

Figura 14 - Resultados para o módulo de LEDs de 67W (LMS 400).



$\Phi=2,73$ W; $\Phi(v)=870$ lm ; $\Phi(v')=1106$ lm'; TCC=2875 K ; IRC=80,92

Figura 15 - Resultados para a lâmpada de LED de 10W (LMS 200).

Observando-se as figuras acima, pode-se notar que, para lâmpadas de natureza de estado sólido, os fluxos luminosos radiante e visível seguem um padrão durante todo o espectro, sendo que seu pico pode se dar em um determinado comprimento de onda, viabilizando assim o uso dos LEDs em diversas cores e aplicações. A lâmpada padrão E20 de 10W ensaiada, apresentou pico em comprimentos de onda maiores, se comparado com o módulo de LEDs de 67W. Tem-se ainda, pelos diagramas de cromaticidade, que a lâmpada E20 assumiu cor mais amarelada (pelo pico em comprimentos de onda maiores) e o módulo de LEDs assumiu cor branca (comprimentos de onda menores). São lâmpadas que possuem fluxos luminosos fotópico e escotópico satisfatórios para iluminação de interiores. Para iluminação de exteriores, essa tecnologia tem evolução já estimada para os próximos anos, sendo que sua viabilidade total poderá se dar nos próximos anos/décadas, aumentando bastante seu fluxo luminoso e superando as lâmpadas de descarga em alta pressão em diversos parâmetros fotométricos. As lâmpadas a LED possuem temperatura de cor correlata variada (de acordo com a cor assumida) e alto índice de reprodução de cor, na faixa de 80.

Comparando-se as medições realizadas para a lâmpada a LEDs padrão E20 nas esferas LMS 400 e LMS 200, observam-se pequenas variações nos parâmetros encontrados. Isso se deve a aspectos construtivos, estudados em esfero-radianos, que influenciam na refletância da esfera, e na medida realizada pelo espectrômetro. Em GANDHI, 2014 estes aspectos são estudados, de forma que correções de leitura e calibração são propostos ao se avaliar uma comparação entre os dois tipos de esferas. A mais indicada, trata-se da utilização de uma lâmpada auxiliar, a qual pode solucionar o problema de absorção de luz pelos componentes do sistema de iluminação (LABSPHERE TECH GUIDE). Esse método consiste em colocar uma lâmpada auxiliar dentro da esfera, que emitirá um fluxo luminoso correspondente ao absorvido pelos equipamentos (IES LM-79-08, 2007). Como no laboratório não há possibilidade de realizar essa montagem, um índice de correção é adotado para esse tipo de leitura, dependendo se a lâmpada está montada sobre suporte em madeira, ou apenas em soquete.

A medição adotada para as lâmpadas a LED não apresentou grande variação, sendo que o índice de correção não se faz necessário para esse caso. Parâmetros externos e os suportes utilizados são os principais causadores das variações nas medidas ao se comparar os dois tipos de esferas (GANDHI, 2014).

7. Conclusões

Neste trabalho foram estudadas as duas esferas integradoras existentes no laboratório do núcleo de iluminação moderna (NIMO) do PPEE. Um estudo sistemático sobre o método de funcionamento das mesmas, bem como o *software* dedicado, foi realizado com o intuito de entender melhor parâmetros radiométricos e fotométricos.

Foram realizados ensaios e medições para lâmpadas incandescentes, halógenas, fluorescentes compactas, descarga de gases em alta pressão e de lâmpadas a LEDs, sendo que puderam ser observados os detalhes que regem as medições dos fluxos luminosos radiante, fotópico e escotópico, bem como os valores da temperatura de cor correlata (TCC) e do índice de reprodução de cor (IRC).

Esse trabalho é interessante no que tange o entendimento e relação destas grandezas com a melhor empregabilidade da lâmpada, em ambientes internos ou externos. Lâmpadas de descarga em alta pressão são atualmente mais empregadas em iluminação de exteriores, enquanto as lâmpadas incandescentes, fluorescente e a LEDs, empregadas em iluminação de interiores. Lâmpadas de natureza incandescente estão caindo progressivamente em desuso e proibição comercial, tanto em mercado brasileiro quanto em internacional (BASTOS, 2011). Neste ponto é importante ressaltar o esperado salto na qualidade da iluminação que a tecnologia de estado sólido impactará nos próximos anos na iluminação de interiores e exteriores, pois com as pesquisas recentes, é esperado um grande aumento no fluxo luminoso deste tipo de tecnologia, além de altíssimos níveis de eficiência energética.

8. Referências

- ALMEIDA, Pedro S., “Considerações sobre a Prática Experimental em Laboratório com Esferas Integradoras: Manuseio, Fotometria e Radiometria”, NIMO-UFJF, 2011.
- BASTOS, Felipe C., “Análise da Política de Banimento de Lâmpadas Incandescentes do Mercado Brasileiro”, Dissertação de Mestrado, COPPE-UFRJ.
- GANDHI, Alcindo B., “Análise da Divergência entre as Medidas das Esferas Integradoras do NIMO”, NIMO-UFJF, 2014.
- IES LM-79-08, “Approved Method: Electrical and Photometric Measurements on Solid-State Lighting”, Illuminating Engineering Society, 2007.
- LABSPHERE, “A Guide to Integrating Sphere Radiometry and Photometry”, disponível em <<http://www.labsphere.com/uploads/technical-guides/a-guide-to-integrating-sphere-radiometry-and-photometry.pdf>>. Acesso em 13/07/2015.

Anexo A: Descrição dos equipamentos integrantes dos sistemas de medição de cada esfera integradora do NIMO.

- Para esfera LMS 400:
LMS 400 – esfera integradora de 40 polegadas.
SCL-1400 – lâmpada padrão para calibração.
LPS-150 – fonte de alimentação para lâmpada padrão SCL-1400.
CDS-2100 – espectrômetro VIS-NIR (350 nm – 1050 nm) de alta precisão.
- Para esfera LMS 200:
LMS 200 – esfera integradora de 20 polegadas.
SCL-600 – lâmpada padrão para calibração.
LPS-100 – fonte de alimentação para lâmpada padrão SCL-600.
CDS-2100 – espectrômetro VIS-NIR (350 nm – 1050 nm) de alta precisão.
CDS-600 – espectrômetro VIS (350 nm – 850 nm) de média precisão.
CDS-610 – espectrômetro VIS-NIR (350 nm – 1000 nm) de média precisão.

Anexo B: Parâmetros das lâmpadas padrão segundo o NIST (*National Institute of Standards and Technology*).

Tabela 7 - Dados relevantes do fabricante das lâmpadas padrão.

| Parâmetro | Esfera LMS 400 | Esfera LMS 200 |
|------------------|--------------------|-------------------|
| Modelo | SCL – 1400 (G76) | SCL – 600 (C74) |
| Potência nominal | 75 W | 30 W |
| Tensão DC | 30,6 V | 12,6 V |
| Corrente DC | 2,679 A | 2,6 A |
| Fluxo nominal | 1785 lm \pm 0,7% | 572 lm \pm 0,7% |
| Vida útil | 800-1200 hrs | 800-1200 hrs |
| TCC aproximada | 3000 K | 3000 K |

ANEXO C: Parâmetros dos fabricantes das lâmpadas ensaiadas nas esferas integradoras LMS-200 e LMS-400.

Tabela 8 - Informações de fabricante sobre grandezas fotométricas das lâmpadas ensaiadas.

| Lâmpada | Fabricante | Fluxo luminoso fotópico [lm] | TCC [K] | IRC |
|------------------------|------------|---------------------------------|---------|-----|
| Incandescente 100W | OSRAM | 1300 | 2800 | 99 |
| Fluorescente 20W | AVANT | 1200 | 6500 | 80 |
| Fluorescente 58W | AVANT | 3400 | 6300 | 85 |
| Fluorescente 87W | AVANT | 5050 | 6200 | 85 |
| Vapor de sódio 100W | AVANT | 10700 | 2000 | 20 |
| Vapor de mercúrio 400W | CADS | 10400 | 5600 | 20 |
| Vapores metálicos 250W | OSRAM | 14500 | 6500 | 85 |
| LED 10W | OSRAM | 870 | 2800 | 80 |