

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

PROJETO EXPERIMENTAL PARA COMPARAÇÃO DE SOLUÇÃO GERADA A PARTIR DO
MÉTODO INVERSO EM CÁLCULOS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL PARA UMA CONDIÇÃO
DE ILUMINAMENTO UNIFORME NO PLANO DE TRABALHO

por

Tiago Haubert Andriotty

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 29 de junho de 2012.

PROJETO EXPERIMENTAL PARA COMPARAÇÃO DE SOLUÇÃO GERADA A PARTIR DO
MÉTODO INVERSO EM CÁLCULOS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL PARA UMA CONDIÇÃO
DE ILUMINAMENTO UNIFORME NO PLANO DE TRABALHO

por

Tiago Haubert Andriotty

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Dra. Eng. Letícia Jenisch Rodrigues

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Bardo Ernst Josef Bodmann

Prof. Dr. Francis Henrique Ramos França

Prof. Dr. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 29 de junho de 2012.

Dedico este trabalho a minha mãe,
Dalva Haubert, quem sempre esteve
presente e me apoiou.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à minha mãe Dalva e a todos os meus familiares, que ao longo de todo este caminho estiveram ao meu lado.

Ao meu supervisor do estágio e atual chefe, Fernando Luiz Todeschini, que sempre compreendeu os meus deveres para com a minha formação.

Um agradecimento especial à minha orientadora Letícia Jenisch Rodrigues e ao professor e co-orientador Paulo Smith Schneider, pela dedicação com que mostraram em me auxiliar sempre que necessário.

Ao bolsista Juliano Oestreich, que muito ajudou na construção da bancada experimental para este TCC.

Quem me conhece, sabe que não sou de muitas palavras. Mas, a todos os meus colegas do curso, estejam certos que sempre serei grato por todo o tempo de convívio ao longo destes 6 anos. Seja em uma sala de aula, em um bar ou mesmo na rua de bobeira; sempre me lembrarei dos momentos compartilhados.

Também gostaria de agradecer aos meus amigos do Pastor Dohms, que também perceberam as minhas angústias e alegrias durante o curso.

Um último obrigado a todos, por contribuírem para a pessoa que hoje sou.

*“Dinheiro perdido, nada perdido; saúde perdida, muito perdido;
caráter perdido, tudo perdido.”*

Provérbio chinês

Haubert Andriotty, T. **Projeto experimental para comparação de solução gerada a partir do método inverso em cálculos de iluminação artificial para uma condição de iluminamento uniforme no plano de trabalho**. 2012. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo avaliar experimentalmente um cenário ótimo de iluminação artificial gerado a partir de um algoritmo computacional que utiliza o método inverso. Para tanto, construiu-se uma bancada experimental (cavidade) em escala reduzida, de forma a preservar as proporções utilizadas na simulação e as propriedades físicas envolvidas. Utilizando o mesmo arranjo de lâmpadas que fora usado na simulação, mediu-se a iluminância no plano de trabalho visando à avaliação da uniformidade da mesma. A cavidade foi construída com placas de MDF cru, que foram pintadas com tinta acrílica fosca. Foram utilizados soquetes de plástico e lâmpadas incandescentes de 15 W. Os resultados obtidos se apresentam em concordância com os resultados gerados pelo algoritmo, evidenciando a robustez do método inverso quando aplicado a problemas de iluminação artificial e a adequação da bancada proposta, para fins de avaliação da uniformidade da iluminação.

PALAVRAS-CHAVE: (iluminação artificial, método inverso, projeto experimental)

Haubert Andriotty, T. **Experimental design to compare the solution generated from the inverse method in lighting calculations for a uniform luminance condition in the work plan**. 2012. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate an optimal scenario of artificial illumination generated by an algorithm that uses the inverse method. For this purpose, a test bench (cavity) was constructed in a reduced scale, in order to preserve the ratios used in the simulation and the physical properties involved. The same array of bulbs, used in the simulation, was built. Measures of the luminance of the work plan were done in order to evaluate its uniformity. The cavity was constructed with MDF boards, which were painted with matte acrylic paint. Plastic sockets and light bulbs of 15 W were used. The accordance between the measured results and the results generated by the algorithm demonstrates the robustness of the inverse method when applied to problems of artificial lighting and the adequacy of the proposed bench, for evaluation of the uniformity of illumination.

KEYWORDS: (artificial lighting, inverse method, experimental design).

ÍNDICE

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
4. MODELO FÍSICO E MATEMÁTICO	2
5. CASO DE ESTUDO	4
6. METODOLOGIA	5
6.1 Construção do experimento	5
6.2 Determinação das refletividades das superfícies internas	8
6.3 Metodologia de medição	9
7. RESULTADOS	11
8. CONCLUSÕES	12
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	13
APÊNDICE A - Dados medidos em função da posição	14

1. INTRODUÇÃO

Os métodos utilizados em projetos de sistemas de iluminação artificial, em ambientes fechados, têm por objetivo uniformizar a intensidade luminosa que chega ao plano de trabalho. Esta uniformidade é de grande importância para os seres humanos, pois propicia condições adequadas de trabalho, evitando, por exemplo, posturas corporais desconfortáveis. Além disso, uma iluminação adequada, durante a execução de tarefas diárias, contribui para a minimização de um desconforto visual comumente conhecido como “olhos avermelhados”. Entretanto, sua aplicação não se limita apenas a fatores ergonômicos.

Consultando-se a literatura especializada, é possível localizar estudos que relacionam a criação de animais com uma distribuição de luz adequada. Como exemplo, cita-se Jordan e Tavares, 2005, cujos experimentos em aviários associaram o aumento da produção a um sistema de iluminação bem dimensionado. Para plantas, os efeitos são semelhantes. Segundo Cavichioli *et al.*, 2006, o desenvolvimento das mesmas é melhorado de forma significativa com uma luminosidade, isto é, oferecendo um ambiente com intensidade e distribuição ajustadas.

Em processos industriais também se observa a mesma necessidade. Isto é, em aplicações envolvendo tratamentos térmicos, deve-se garantir que o campo de radiação incidente sobre a superfície tratada seja uniforme. Este aspecto influencia diretamente na qualidade do produto fabricado.

A área do conhecimento que se dedica ao estudo da aplicação da iluminação artificial é chamada de luminotécnica. Existem vários métodos empregados no dimensionamento de sistemas de iluminação. Grande parte desses métodos emprega uma metodologia de solução direta. Dentre os mais tradicionais, tem-se o Método dos Lúmens [IESNA, 2000] e o Método Ponto-a-Ponto [EEE, 2012]. Embora possuam algumas diferenças, ambos partem de um cenário prévio, montado pelo projetista. Caso o resultado não esteja de acordo com o projeto, o cenário inicial pode ser modificado. Realiza-se, então uma nova simulação e obtém-se uma nova distribuição de iluminação para o plano de trabalho.

Essa metodologia de solução é bastante subjetiva, dependendo fortemente da experiência do projetista. Por isso, pode ser exaustiva e dispendiosa. Neste contexto, a pesquisa por novos métodos mostra-se promissora. Aliado a isso, tem-se o constante desenvolvimento da informática, oferecendo máquinas cada vez mais rápidas e com maior capacidade de processamento.

Um dos procedimentos que se mostra bastante promissor é o Método Inverso. Basicamente, esse método consiste em definir o valor da iluminação no plano de trabalho como uma das condições de contorno do problema. A definição da posição das fontes, bem como de suas intensidades, ambas localizadas no teto do ambiente, são as variáveis do problema, cujos valores serão determinados pelo método.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo avaliar experimentalmente os resultados gerados através do algoritmo computacional desenvolvido por Cassol, 2009, para o cálculo de iluminação de ambientes fechados. Para realizar esta avaliação, uma bancada em escala reduzida foi construída, e lâmpadas incandescentes foram utilizadas para representar as fontes luminosas. O campo de luminosidade no plano de trabalho, gerado por uma determinada configuração de lâmpadas, foi avaliado em termos de sua uniformidade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os primeiros trabalhos relacionados à aplicação do Método Inverso em problemas de iluminação datam de 2004. Mais especificamente, o primeiro deles (Fontana *et al.*, 2004) apresenta a problemática da iluminação e sua solução com um método alternativo. O campo de radiação incidente sobre o plano de trabalho passa a ser um parâmetro de projeto a ser respeitado, e não apenas uma resposta do sistema.

Este tipo de metodologia possui algumas vantagens em relação aos métodos tradicionais, dentre elas destaca-se sua “independência” em relação à experiência do projetista, garantindo menores desvios dos parâmetros de projeto. Por outro lado, metodologias inversas geram sistemas de equações mal-condicionados, os quais necessitam de um método de regularização para serem solucionados.

Neste sentido, Ertürk *et al.*, 2002, realizaram um trabalho de análise comparativa entre três métodos de regularização (gradiente conjugado (*CGM*), gradiente bi-conjugado (*BiCGM*) e *TSVD* (*Truncated Singular Value Decomposition*)) para a solução de problemas inversos em cavidades radiantes. Os três métodos foram testados em uma cavidade paralelepípeda, com proporções de 2,5 x 1 x 1, na qual o único modo de transferência de calor é por radiação térmica. A variação espectral das propriedades radiantes foi desconsiderada, e as superfícies foram tratadas como superfícies cinzas. Os resultados mostraram que os métodos *CGM* e *TSVD* proporcionaram soluções similares e estabilidade na convergência. Entretanto, foram gerados poderes emissivos negativos, ou seja, informações desprovidas de significado físico.

Por outro lado, o método *BiCGM* preservou as propriedades físicas (gerando resultados fisicamente aceitáveis). Porém, a convergência do método mostrou-se instável. Dentre todos, o *CGM* foi o que despendeu menor tempo de processamento. Por fim, o *TSVD* pode ser vantajoso na análise de sistemas e em certos problemas inversos transientes ou não-lineares, que requerem soluções iterativas.

Posteriormente, Seewald, 2006, analisou este mesmo algoritmo demonstrando a independência de malha, os erros associados às soluções geradas pelo programa e o dimensionamento das lâmpadas a serem utilizadas. O método de regularização utilizado foi o *TSVD*. Neste mesmo trabalho, também foi realizada a comparação, para uma mesma cavidade, entre a solução obtida por um método de solução direta, o Método dos Lúmens, e o método de solução inversa. O resultado oriundo do modelo de solução direta obteve desvios da condição de projeto de até 45%, evidenciando a inexatidão do método para projetos de iluminação mais apurados. Na aplicação do modelo inverso, a uniformidade foi muito mais próxima da condição desejada, obtendo-se desvios máximos de, aproximadamente, 3%.

Seguindo a mesma linha de desenvolvimento, Cassol, 2009, aplicou um método de otimização no algoritmo numérico, em substituição ao método de regularização *TSVD*. Esse método, denominado Otimização Extrema Generalizada (*GEO – Generalized Extremal Optimization*) é um método estocástico, baseado em busca aleatória, orientado por decisões probabilísticas, o qual tem por objetivo procurar um mínimo ou um máximo global, dependendo do caso. A utilização desse método proporcionou resultados satisfatórios, com desvios máximos próximos aos encontrados por Seewald, 2006, demonstrando novamente a estabilidade da metodologia inversa.

4. MODELO FÍSICO E MATEMÁTICO

Matematicamente, a metodologia inversa, aplicada a projetos de iluminação, consiste em resolver um sistema de equações, no qual a iluminação desejada no plano de trabalho deixa de ser uma resposta do sistema e passa a ser um dos parâmetros do mesmo. A configuração física do sistema analisado consiste em uma cavidade paralelepípedica com comprimento L , largura W e altura H . Devido à simetria da cavidade, o equacionamento pôde ser restringido a um quarto do sistema. Na Figura 4.1(a) tem-se um esquema da cavidade e na Figura 4.1(b) destaca-se um dos quadrantes do sistema.

Para que os resultados obtidos pudessem ser extrapolados para outras cavidades, de mesma geometria (e proporcionais), a cavidade foi adimensionalizada em função do maior comprimento, L . Os fluxos também foram adimensionalizados, tendo-se como referência o fluxo luminoso prescrito no plano de trabalho, isto é,

$$Q = \frac{q''}{q''_{ref}} \quad (4.1)$$

na qual, Q é o fluxo luminoso adimensional, q'' é o fluxo luminoso e q''_{ref} é o fluxo luminoso de referência no plano de trabalho, ambos em lx.

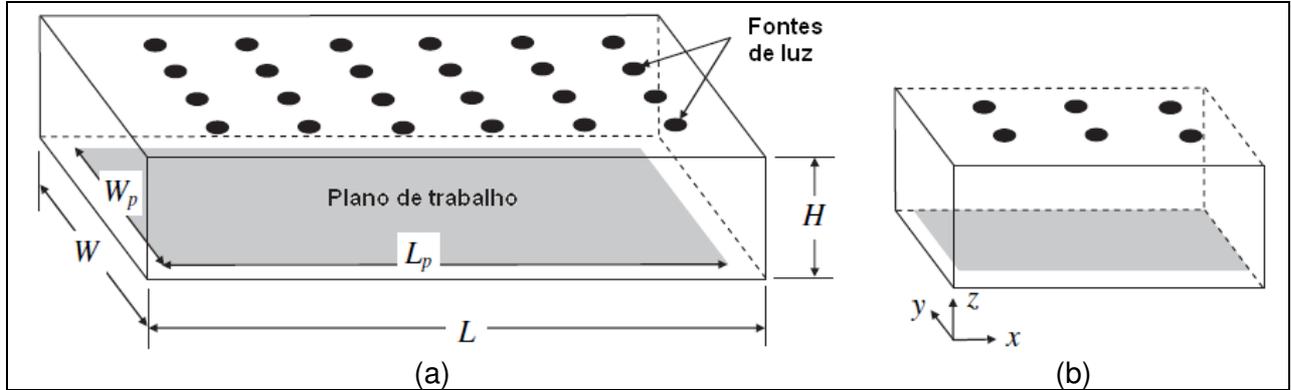


Figura 4.1: (a) Esquema da cavidade utilizada nas simulações e neste trabalho. (b) Quadrante da cavidade utilizado nas simulações. Fonte: adaptado de Cassol *et al.*, 2011.

O sistema de equações citado anteriormente, que permite chegar aos valores de potência e posicionamento das lâmpadas, é dado por [Incropera *et al.*, 2008]:

para o plano de trabalho,

$$jd: \quad Q_{o,jd} = \varepsilon_{jd} \frac{e_{jd}^{(l)}}{q_{ref}} + \rho_{jd} \left(\sum_{jd^*=1}^{jdl} F_{jd-jd^*} Q_{o,jd^*} + \sum_{jw=1}^{jwl} F_{jd-jw} Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jll} F_{jd-jl} Q_{o,jl} \right) \quad (4.2)$$

para as paredes,

$$jw: \quad Q_{o,jw} = \varepsilon_{jw} \frac{e_{jw}^{(l)}}{q_{ref}} + \rho_{jw} \left(\sum_{jd=1}^{jdl} F_{jw-jd} Q_{o,jd} + \sum_{jw^*=1}^{jwl} F_{jw-jw^*} Q_{o,jw^*} + \sum_{jl=1}^{jll} F_{jw-jl} Q_{o,jl} \right) \quad (4.3)$$

e para as lâmpadas,

$$jl: \quad Q_{o,jl} = Q_{r,jl} + \left(\sum_{jd=1}^{jdl} F_{jl-jd} Q_{o,jd} + \sum_{jw=1}^{jwl} F_{jl-jw} Q_{o,jw} + \sum_{jl^*=1}^{jll} F_{jl-jl^*} Q_{o,jl^*} \right) \quad (4.4)$$

nas quais jd , jw , jl , representam os elementos de superfície de projeto, parede e lâmpadas, respectivamente, jdl , jwl , jll representam o número total de superfícies de projeto, paredes e lâmpadas, respectivamente, ρ_{jd} e ρ_{jw} são as refletividades do plano de trabalho e das paredes, ε_{jw} é a emissividade das paredes, ε_{jd} é a emissividade do plano de trabalho, F são os fatores de forma entre as superfícies (indicadas no subíndice), q''_{ref} é o fluxo luminoso de referência no plano de trabalho, em lx. Todas as radiosidades ($Q_{o,jd}$, $Q_{o,jw}$ e $Q_{o,jl}$) e os fluxos líquidos ($Q_{r,jl}$) são desconhecidos.

As condições de contorno utilizadas em [Cassol, 2009] são detalhadas a seguir. A superfície de trabalho, jd , possui condição de luminosidade prescrita, isto é, o parâmetro de projeto a ser atingido, e condição de parede fria, juntamente com as superfícies de parede, jw . A condição de parede fria é aplicável, pois estas superfícies estão a baixas temperaturas

(cerca de 300K). Nesta temperatura, o poder emissivo luminoso possui ordem inferior a 10^{-20} lx, podendo então ser desconsiderado [Cassol, 2009]. As fontes de luz, j_l , não possuem qualquer condição de contorno; porém lhes foi atribuída condição de fluxo luminoso conhecido, uma vez que este é um dos objetivos do cálculo de iluminação. Aplicando-se estas condições de contorno ao sistema formado pelas Equações 4.2, 4.3 e 4.4, o sistema de equações, a ser resolvido pelo método de otimização, torna-se:

$$jd: \quad Q_{o,jd} = \rho_{jd} \left(\sum_{jw=1}^{jw1} F_{jd-jw} Q_{o,jw} + \sum_{jl=1}^{jl1} F_{jd-jl} Q_{o,jl} \right) \quad (4.5)$$

$$jw: \quad Q_{o,jw} = \rho_{jw} \left(\sum_{jd=1}^{jd1} F_{jw-jd} Q_{o,jd} + \sum_{jw^*=1}^{jw1} F_{jw-jw^*} Q_{o,jw^*} + \sum_{jl=1}^{jl1} F_{jw-jl} Q_{o,jl} \right) \quad (4.6)$$

$$jl: \quad Q_{o,jl} = Q_{r,jl} + \rho_{jl} \left(\sum_{jd=1}^{jd1} F_{jl-jd} Q_{o,jd} + \sum_{jw=1}^{jw1} F_{jl-jw} Q_{o,jw} \right) \quad (4.7)$$

5. CASO DE ESTUDO

Conforme mencionado anteriormente, os parâmetros utilizados na construção da bancada se baseiam nas características da geometria simulada em [Cassol, 2009]. Por este motivo, faz-se uma breve descrição das características da cavidade.

Visando à complementação adequada a respeito do tema, as configurações de geometria utilizadas em [Cassol, 2009] foram semelhantes às encontradas em [Seewald, 2006]. Desta forma, o ambiente possui a forma de uma cavidade paralelepípedica, sem janelas, apenas com iluminação artificial oriunda de lâmpadas incandescentes instaladas no teto da mesma. Suas dimensões são de $L = 15$ m (eixo x), $W = 12$ m (eixo y) e $H = 3$ m (eixo z).

Como mencionado anteriormente, a cavidade foi adimensionalizada em função do maior comprimento. Assim, tem-se a relação de proporção de $1 \times 0,8 \times 0,2$. A vantagem de se realizar esta operação é que os resultados obtidos podem ser estendidos para outras dimensões, desde que essa proporcionalidade seja respeitada. Assim, na Tabela 5.1 apresenta-se as dimensões da cavidade construída, uma vez que a utilização das dimensões simuladas seria inviável.

Tabela 5.1 – Características da cavidade construída e da cavidade simulada em [Cassol, 2009].

Parâmetros	Valores	
	Experimental	[Cassol, 2009]
Comprimento (L)	2,25 m	15 m
Largura (W)	1,80 m	12 m
Pé direito (H)	0,45 m	3 m
Refletividade da parede	0,663	0,5
Refletividade do piso	0,038	0,1
Refletividade do teto	0,663	0,5

As superfícies internas foram diferenciadas em três tipos: teto (onde foram colocadas as fontes de iluminação), paredes e piso (plano de trabalho). Todas as superfícies internas foram consideradas como cinzas, difusas e opacas. Originalmente, as paredes e o teto foram definidos com refletividade de 0,5 e o piso com 0,1. Entretanto, o experimento foi executado

com os valores de refletividade obtidos para as tintas utilizadas, Tabela 5.1. Este procedimento será detalhado na seção seguinte.

6. METODOLOGIA

Neste capítulo descreve-se a construção do experimento, bem como a metodologia utilizada para realizar as medições. A Seção 6.1 explica a construção da bancada e quais as adaptações necessárias. A Seção 6.2 aborda o procedimento utilizado para determinar as refletividades das tintas utilizadas na pintura interior da bancada. Por fim, a Seção 6.3 explica como foram realizadas as medições, isto é, em que pontos da cavidade, e quais os tipos de sensores e equipamentos utilizados.

6.1 Construção do experimento

Conforme mencionado no capítulo anterior, a bancada foi construída nas dimensões de 225x180x45 centímetros. Entretanto, a dimensão do pé direito teve que ser aumentada com a finalidade de compensar algumas adaptações realizadas, que serão abordadas a seguir.

Na simulação, as fontes de iluminação são consideradas superfícies planas, sendo posicionadas no mesmo plano do teto. Entretanto, as lâmpadas incandescentes comuns possuem um formato esférico, além de necessitarem de uma base para fixação (soquete). O conjunto resultante, soquete e lâmpada, aumentou a proximidade entre a fonte de iluminação e o plano de trabalho da bancada.

Ademais, o sensor utilizado na medição também teve que ser considerado. Neste ponto, foi necessário fazer uma adaptação entre a cavidade simulada e a bancada. Manteve-se a distância de 45 cm entre a fonte de iluminação e o plano de trabalho. Deste modo, a dimensão do pé direito do experimento teve que ser aumentada em 14 cm. A Figura 6.1(a) mostra o acréscimo ao pé direito devido ao sensor e ao conjunto lâmpada e soquete. Já a Figura 6.1(b) exibe as dimensões finais da bancada. Devido a esta adaptação, o plano de trabalho não é mais considerado o piso da bancada, como na cavidade simulada, mas um plano, paralelo ao piso, situado na cota $z = 4$ cm.

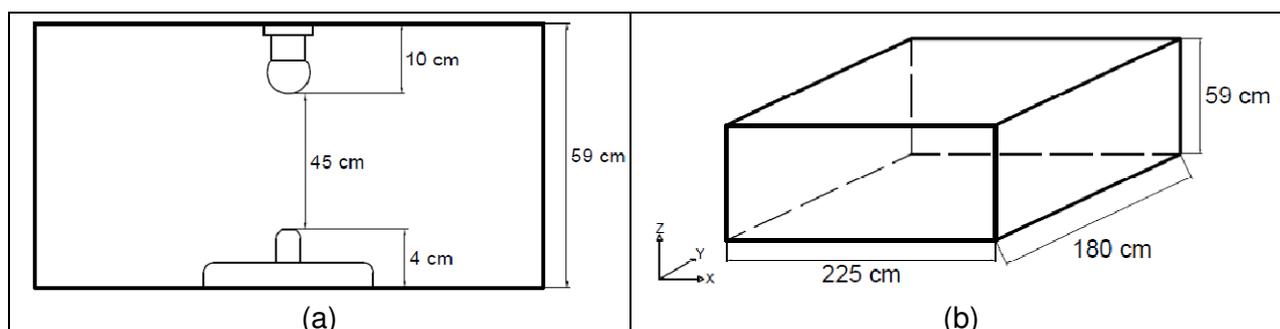


Figura 6.1: (a) Esquema dos acréscimos na dimensão z (pé direito), devido ao sensor e ao conjunto soquete e lâmpada. (b) Esquema das dimensões finais do experimento.

Na construção da estrutura da bancada (teto, piso, duas paredes laterais menores e duas paredes laterais maiores), foram utilizadas chapas de MDF cru, com 15 mm de espessura. Para a fixação das paredes laterais menores com o teto, utilizou-se de dois parafusos fenda 1/4x60" em cada lateral e duas porcas 1/4. Estes parafusos foram fixados através de furos passantes em suportes de madeira (seção transversal de 2x2 cm e 40 cm de comprimento) pregados nas laterais menores, igualmente espaçados. Na fixação das laterais menores com o piso, foram utilizadas duas mãos-francesas de 4x4", para cada lateral, com dois parafusos philips 3/16"x13, rosca soberba, para cada mão-francesa. A Figura 6.2 mostra estas duas formas de união.

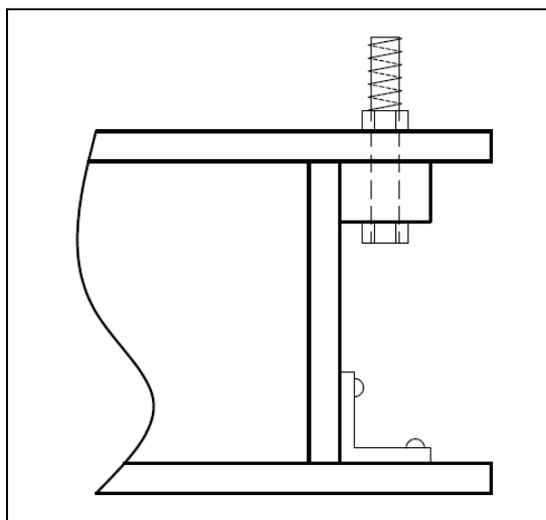


Figura 6.2: Esquema mostrando a união entre as laterais menores, o piso e o teto da bancada.

Neste momento da montagem, verificou-se que o teto bi-apoiado nos extremos sofreu deflexão devido à sua própria massa. Para corrigir este problema, utilizou-se dois suportes de MDF, com dimensões de 1,5x3x59 cm, para sustentar o teto. Como não era previsto a utilização destas colunas, para minimizar a interferência nas medições, as mesmas foram pintadas com a mesma tinta usada nas paredes, sendo posicionadas no centro do comprimento L , o mais próximo possível das paredes laterais maiores, diminuindo o efeito de sombreamento no plano de trabalho. Em uma das paredes laterais menores, fez-se um furo para a passagem do cabo de sinal do sensor utilizado para fazer as medições.

As portas demandaram uma análise mais cuidadosa, pois era essencial que as mesmas se fechassem de forma a isolar o interior da cavidade da luz externa, bem como impedir a “fuga” da luz interna. Para tanto, as portas foram montadas conforme o ilustrado na Figura 6.3.

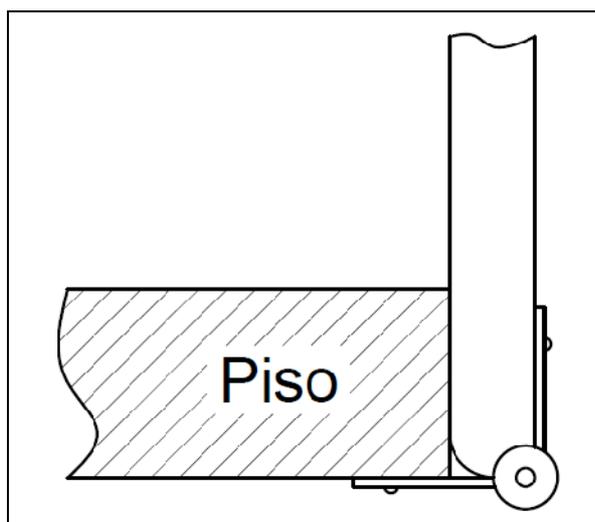


Figura 6.3: Esquema de montagem das portas, de modo a diminuir a influência da luz externa e a “fuga” de luz interna.

Este tipo de configuração mostrou-se bastante prático, pois além de proporcionar boa vedação contra frestas, também possibilitou a abertura em 180° da porta, facilitando o acesso ao interior da bancada. Foram utilizadas quatro dobradiças, da marca União Mundial, modelo 3x3", em cada uma das portas e posicionadas igualmente espaçadas entre si, com quatro parafusos philips 3/16"x13, rosca soberba, em cada dobradiça (dois na porta e dois no piso da bancada).

As fontes de iluminação também foram adaptadas, uma vez que a simulação não dimensiona a potência das lâmpadas. Como o objetivo deste trabalho é a verificação da uniformidade da luminosidade no plano de trabalho, a potência das lâmpadas foi selecionada em prol da segurança e praticidade, optando-se pelas lâmpadas incandescentes de 15 W. Para diminuir o efeito de fonte de luz pontual, ocasionado pelo filamento incandescente de tungstênio, optou-se pelo modelo de bulbo leitoso, o qual ameniza este efeito. A lâmpada utilizada no experimento possui as características mostradas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Características das lâmpadas utilizadas na bancada – Marca Sadokin.

Característica	Valor
Tipo	Incandescente
Potência	15 W
Tensão de operação (nominal)	220 V
Modelo	Bolinha
Tipo de bulbo	Leitoso
Tipo de soquete	E27

Em sistemas elétricos, as lâmpadas podem ser consideradas como resistores em um circuito. Nas ligações em série, a corrente varia conforme a resistência encontrada no circuito, onde a cada resistor, que é acrescentado ao mesmo, aumenta a sua resistência à passagem de corrente, como demonstra a Equação 6.1, Lei de Ohm,

$$V = IR \quad (6.1)$$

na qual, V é a tensão aplicada ao circuito, medida em V, I é a corrente que passa pelo circuito, medida em A e R é a resistência, medida em Ω . Sabendo-se que a potência é o resultado do produto entre a resistência e a corrente ao quadrado, percebe-se que a cada resistor (lâmpada) acrescentado ao circuito, a potência dissipada em cada um diminui. Devido a este fenômeno, a ligação elétrica escolhida para a bancada foi a ligação em paralelo. Neste tipo de ligação, garante-se que cada resistor (lâmpada) estará sujeito a mesma corrente, ou seja, mesma potência dissipada, desde que as resistências de cada um sejam iguais.

A distribuição das fontes de iluminação no teto foi retirada de Cassol, 2009, optando-se pela configuração de menor número de lâmpadas, 32, de mesma potência, para facilitar a montagem. A Figura 6.4(a) mostra a configuração para um quarto do teto, enquanto que a Figura 6.4(b) mostra a configuração para todo o teto.

As superfícies internas foram pintadas com cores que já se encontravam disponíveis no LETA, Laboratório de Ensaios Térmicos e Aerodinâmicos. As superfícies foram lixadas, limpas e então pintadas. Utilizou-se três demãos, para tornar mais uniforme a pintura nas superfícies. Mediu-se as refletividades das tintas utilizadas, para saber se estavam muito distantes das utilizadas na simulação (0,5 para as paredes e teto e 0,1 para o plano de trabalho). Na Seção 6.2 será abordado o procedimento utilizado para o cálculo das refletividades e os resultados encontrados para as mesmas. A bancada construída é mostrada na Figura 6.5.

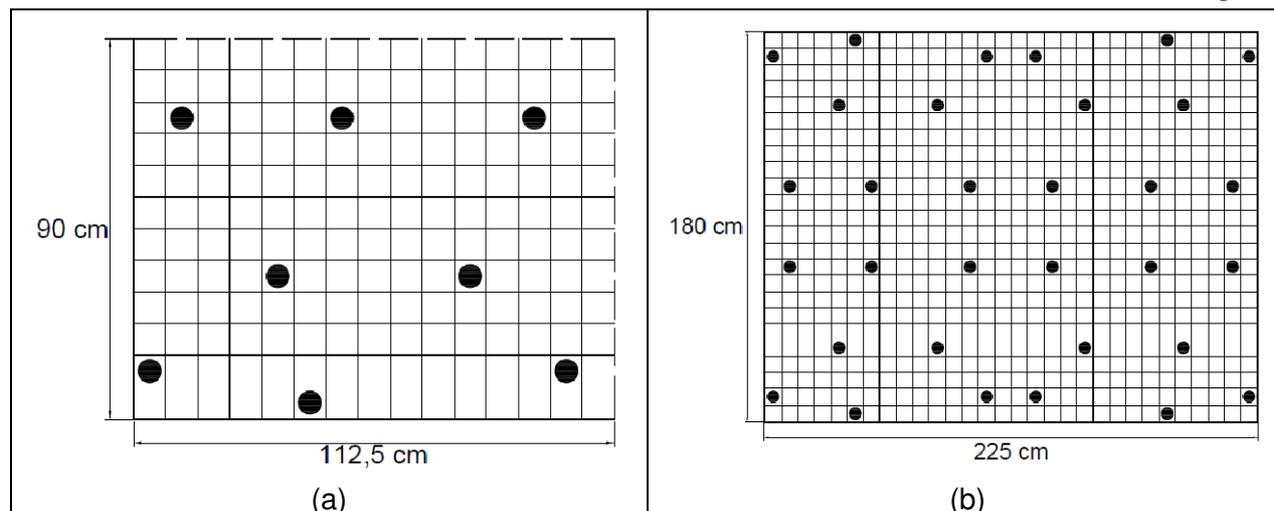


Figura 6.4: esquema da distribuição das lâmpadas no teto da bancada; (a) para um quadrante e (b) para todo o teto.



Figura 6.5: Bancada construída.

6.2 Determinação das refletividades das superfícies internas

Para fazer a análise das refletividades prepararam-se duas amostras, uma para cada cor de tinta. As amostras eram placas quadradas de 6 cm de lado e 3 mm de espessura de MDF cru, tendo-se passado três demão em cada uma. As medidas foram realizadas no LabSolar, onde há disponível um espectrômetro capaz de realizar a medição necessária para se determinar, posteriormente, a refletividade da tinta. O espectrômetro utilizado é da marca *StellarNet*, modelo BLACK-Comet-BLK-CXR-SR, possuindo faixa de operação de 220 nm até 1100 nm.

Com o auxílio de um computador, foi realizado o tratamento dos resultados, efetuando-se a divisão dos dados medidos das amostras pelos dados das referências (amostras que

pertencem ao conjunto do espectrômetro), para cada comprimento de onda. O resultado gerado é a distribuição da refletividade espectral da amostra. A faixa de comprimentos de onda de interesse do presente trabalho restringiu-se à faixa do visível, isto é, de 380 nm até 780 nm. Por definição, a refletividade é obtida através

$$\rho = \frac{\int L(\lambda)R(\lambda)d\lambda}{\int L(\lambda) d\lambda} \quad (6.2)$$

na qual $L(\lambda)$ é a função da distribuição espectral do poder emissivo da fonte de iluminação e $R(\lambda)$ é a função da refletividade espectral.

Na prática, utilizando apenas os dados experimentais, a refletividade pode ser aproximada através de

$$\rho = \frac{\sum_n L_n(\lambda)R_n(\lambda)}{\sum_n L_n(\lambda)} \quad (6.3)$$

na qual, $L_n(\lambda)$ é o poder emissivo espectral para um determinado comprimento de onda e $R_n(\lambda)$ é a refletividade espectral para cada comprimento de onda. A função $L_n(\lambda)$ foi obtida utilizando o gráfico da Figura 6.6, fornecido por um comerciante de lâmpadas incandescentes. A curva de ajuste obtida para a Figura 6.6 é dada por

$$L_n(\lambda) = -(2,6946)10^{-11}\lambda^4 + (4,7345)10^{-8}\lambda^3 - (2,5449)10^{-5}\lambda^2 + (5,8657)10^{-3}\lambda - 0,5774 \quad (6.4)$$

na qual, λ é o comprimento de onda, em nm.

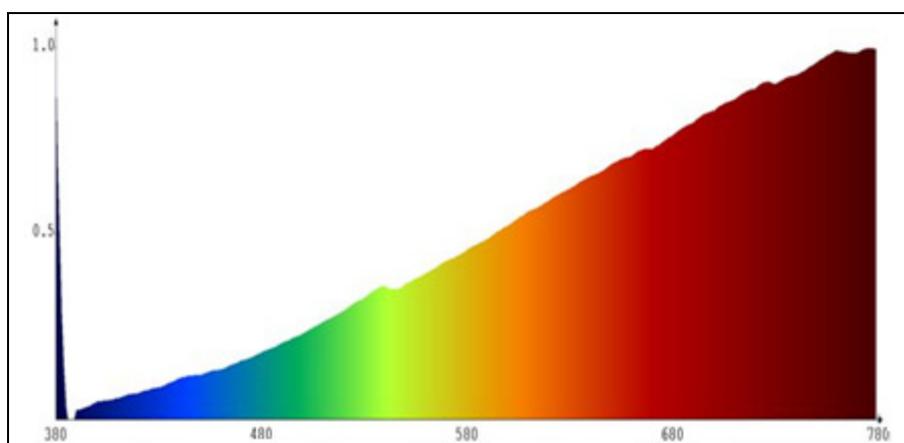


Figura 6.6: Distribuição espectral normalizada para uma lâmpada de tungstênio. Fonte: Remari Xelux, 2012.

Aplicando-se a Equação 6.3, com os dados calculados para as amostras e a Equação 6.4, calculada para cada comprimento de onda utilizado em $R_n(\lambda)$, obteve-se as refletividades de 0,663 para a tinta clara (usada nas paredes e no teto) e 0,038 para a tinta escura (usada no plano de trabalho).

6.3 Metodologia de medição

Para realizar as medições na cavidade, utilizou-se um sensor do tipo piranômetro, da marca *Apogee*, modelo SP-110, mostrado na Figura 6.7. O SP-110 foi projetado para medir a irradiação proveniente do sol, na faixa de 300 a 1200 nm e sendo auto-alimentado, não foi

preciso utilizar outro cabo no experimento, além do cabo de sinal. Este sensor é montado sobre uma base rígida, proporcionando uma boa estabilidade nos momentos de medição.



Figura 6.7: Sensor *Apogee*, modelo SP-110, utilizado para efetuar as medições na bancada.

A resposta do sensor é linear e possui um fator de conversão de 5 W m^{-2} por mV, que deve ser multiplicada pelo sinal enviado (em mV). Para medir o sinal enviado pelo *Apogee*, utilizou-se um multímetro da marca *Politem*, modelo POL – 777. Foi selecionada a menor escala deste multímetro, escala esta que tem a faixa de medição de 0 a 400 mV e resolução de 0,01 mV. Para diminuir a possibilidade de riscos ou arranhões no piso, durante o posicionamento do sensor, o mesmo teve que ser posicionado manualmente.

Os pontos de medição foram definidos de acordo com os pontos calculados por Cassol, 2009. Entretanto, em Cassol, 2009, foram calculados 432 pontos. Essa quantidade é inviável, pois se dispõe de um único sensor. Ponderou-se sobre a distribuição e a quantidade de pontos a serem medidos, optando-se pela configuração com 12 pontos, conforme a Figura 6.8(a), para um quarto da bancada, e a Figura 6.8(b), para toda a bancada. A área *hachurada* foi desconsiderada nas medições, pois em Cassol, 2009, esta mesma proporção de área na cavidade não foi avaliada.

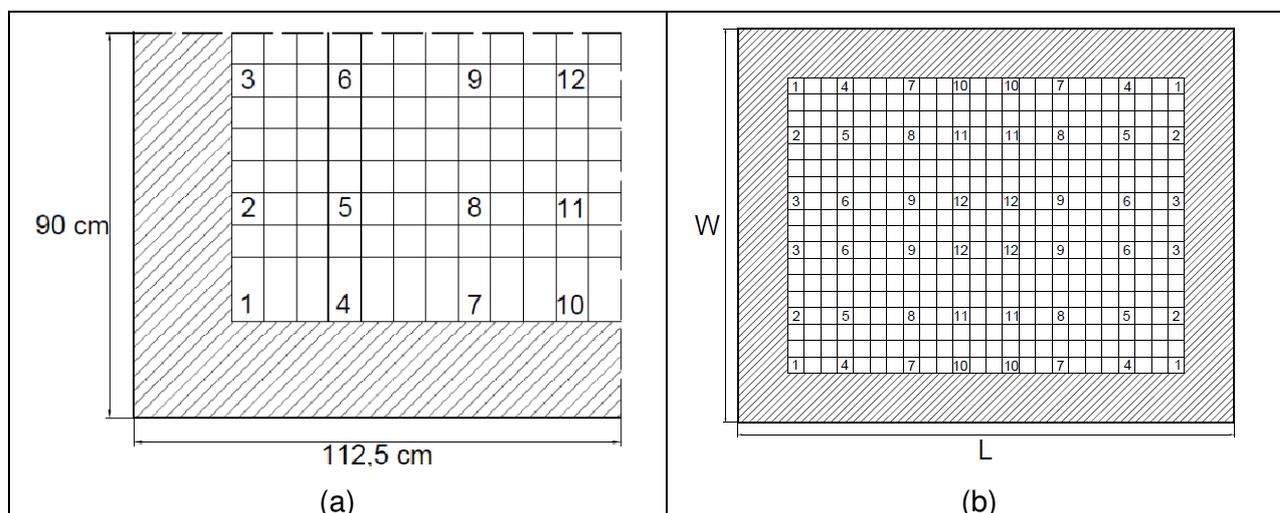


Figura 6.8: (a) Esquema da localização dos pontos de medição para o primeiro quadrante. (b) Esquema dos pontos de medição para todo o plano de trabalho. A área hachurada foi excluída das medições.

Todas as medidas foram realizadas durante o período da noite, pois se verificou que a luz solar interferia nas medições. À noite, a influência da luz artificial (sala, rua etc.) não era significativa nas medições.

7. RESULTADOS

Para efetuar a comparação entre os resultados obtidos neste trabalho com os obtidos por Cassol, 2009, adimensionalizou-se os dados, tendo como referência a média das medições realizadas. Este procedimento se justifica pelo fato das lâmpadas possuírem a mesma potência, de maneira que a uniformidade de iluminação no plano de trabalho independe da potência das mesmas, sendo função apenas de seu posicionamento. No apêndice A tem-se a tabela com os valores originais, em mV e em $W\ m^{-2}$, e o posicionamento dos pontos de medição nos eixos x e y .

Aplicando-se a metodologia de medição na bancada, conforme especificado na Seção 6.3, obteve-se os resultados mostrados na Figura 7.1(a). Na Figura 7.1(b), o gráfico representa os resultados obtidos por Cassol, 2009, nos mesmos pontos em que foram realizadas as medições no experimento.

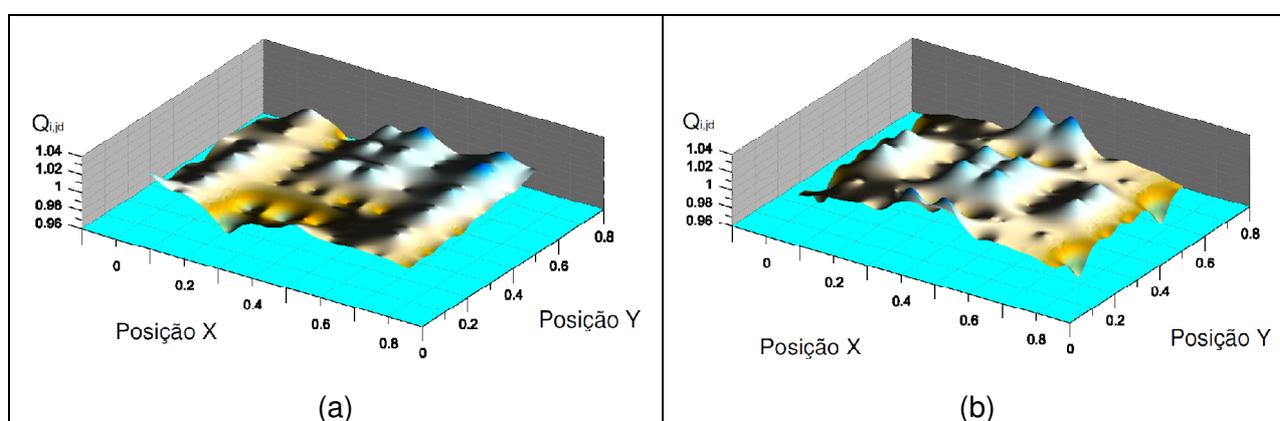


Figura 7.1: (a) Resultados obtidos experimentalmente. (b) Resultados obtidos na simulação.

Analisando-se os gráficos, observa-se que as medidas do experimento geraram um campo de iluminação uniforme no plano de trabalho, semelhante ao gerado pelo algoritmo computacional. Também se observa na Figura 7.1(a) que os quadrantes 1 e 4 formaram campos semelhantes, o segundo quadrante apresentou um comportamento ligeiramente diferente, enquanto o terceiro quadrante foi o que apresentou uma diferença significativa. A Tabela 7.1 mostra os resultados obtidos neste trabalho e os obtidos por Cassol, 2009.

Analisando-se a Tabela 7.1, pode-se perceber a uniformidade dos valores obtidos. Os resultados foram próximos aos calculados por Cassol, 2009. A maior diferença relativa entre os resultados foi de 3,94% para o ponto 10 do primeiro quadrante. Com relação aos dados obtidos neste trabalho, a maior diferença, entre o valor máximo (1,0217) e mínimo (0,974) medido, foi de 4,9%.

Tabela 7.1: Resultados obtidos neste trabalho e por Cassol, 2009.

N° Ponto	Presente trabalho				Cassol, 2009
	Quadrantes				Quadrantes
	1	2	3	4	1,2,3,4
1	1,0149	0,9922	1,0103	0,9854	0,9888
2	0,9945	0,9922	1,0013	0,9967	0,9639
3	0,9899	0,9922	0,9990	1,0013	0,9861
4	1,0035	0,9967	1,0194	1,0058	0,9957
5	1,0058	1,0035	1,0217	0,9990	0,9992
6	1,0103	1,0081	1,0149	1,0035	1,0179
7	0,9741	0,9967	1,0035	0,9786	0,9964
8	0,9832	0,9967	1,0058	0,9922	1,0008
9	0,9945	0,9899	1,0013	0,9945	0,9953
10	0,9922	1,0035	1,0217	1,0126	1,0316
11	0,9809	0,9877	1,0103	1,0081	0,9886
12	0,9945	0,9899	1,0126	1,0126	1,0247
Média	0,9949	0,9958	1,0101	0,9992	0,9991
Desvio padrão	0,0122	0,0064	0,0081	0,0104	0,0184

8. CONCLUSÕES

A partir das análises realizadas, pode-se concluir que o experimento foi bem sucedido, posto que a uniformidade no plano de trabalho foi alcançada, dentro das limitações impostas pelos materiais disponíveis. Esse comportamento evidencia a eficácia do método inverso quando utilizado em projetos de iluminação artificial. Desta forma, este trabalho figura como o primeiro passo nos testes dos resultados gerados por este método, para uma cavidade com as características descritas.

Desta forma, tem-se que o tema está longe de ser encerrado. Pelo contrário, ainda há muito a ser realizado para a efetiva validação dos resultados produzidos pelas simulações. Uma gama de trabalhos e experimentos podem ser realizados nesse sentido. Sugere-se, por exemplo, os seguintes procedimentos: aprimorar o código numérico para que o mesmo seja capaz de simular uma maior variedade de geometrias, tanto das cavidades como das fontes de iluminação; aprimorar a bancada construída no presente trabalho, uma vez que esta possui nítidas limitações, isto é, sugere-se que seja projetado um modo de efetuar as medições dentro da bancada sem a necessidade de abri-la toda a vez que se deseja mudar o ponto de medição; e realizar medições da refletividade em diferentes cores de tintas, para selecionar a mais adequada para um futuro experimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Cassol, F., Smith Schneider, P, França, F.H.R. e Silva Neto, A.J. **“Multi-objective optimization as a new approach to illumination design of interior spaces”**. Building and Environment, v. 46, p. 331-338, 2011.

Cassol, F.; **Aplicação da análise inversa via otimização extrema generalizada em projetos de iluminação**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), UFRGS. Porto Alegre, 2009.

Cavichioli, J.C., Ruggiero, C. Volpe, C.A., Paulo, E.M., Fagundes, J.L., Kasai, F.S. **“Florescimento e frutificação do maracujeiro-amarelo submetido á iluminação artificial, irrigação e sombreamento”**. Revista Brasileira de Fruticultura. Vol. 28 n.1. Jaboticaba, 2006.

EEE. **“Empresa de Equipamento Elétrico SA”**. Águeda, Portugal. Disponível em www.eee.pt. Acessado em 15.mai.2012.

Ertürk, H., Ezekoye O.A., Howell J.R. **“Comparison of three regularized solution techniques in a three-dimensional inverse radiation problem”**. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer v. 73, p. 307-316, 2002.

Fontana, D.H.G., Schneider, P.S. e França, F.H.R. **“Projeto inverso aplicado ao dimensionamento de sistemas de iluminação de ambientes”**. XXV Iberian Latin American Congress in Computational Methods in Engineering, Recife, 2004.

IESNA – Illumination engineering society of North America; **“The IESNA Lighting Handbook: reference & application”**, 9° ed., Nova Iorque, 2000.

Incropera, F.P., Dewitt, P.D., Bergman, L.T., Lavine, A.S., **“Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa”**. 6° Ed., LTC, 2008.

Jordan, R.A., Tavares, M.H.F. **“Análise de diferentes sistemas de iluminação para aviários de produção de ovos férteis”**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.9, n. 3, p. 420-423. Campina Grande, 2005.

Remari Xelux, **“Comunicação via e-mail”**, em 25.mai.2012.

Seewald, A. **“Projeto inverso em cavidades radiantes com superfícies não cinzas: uma abordagem para o projeto de iluminação”**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PROMEC), UFRGS. Porto Alegre, 2006.

APÊNDICE A – Dados medidos em função da posição.

Quadrante	Pontos	Eixo X	Eixo Y	Adimensional	Medida [mV]	Medida [$W\ m^{-2}$]
1	1	0,2625	0,2625	1,0149	4,4800	22,4000
	2	0,2625	0,4875	0,9945	4,3900	21,9500
	3	0,2625	0,7875	0,9899	4,3700	21,8500
	4	0,4875	0,2625	1,0035	4,4300	22,1500
	5	0,4875	0,4875	1,0058	4,4400	22,2000
	6	0,4875	0,7875	1,0103	4,4600	22,3000
	7	0,7875	0,2625	0,9741	4,3000	21,5000
	8	0,7875	0,4875	0,9832	4,3400	21,7000
	9	0,7875	0,7875	0,9945	4,3900	21,9500
	10	1,0125	0,2625	0,9922	4,3800	21,9000
	11	1,0125	0,4875	0,9809	4,3300	21,6500
	12	1,0125	0,7875	0,9945	4,3900	21,9500
2	1	1,9875	0,2625	0,9922	4,3800	21,9000
	2	1,9875	0,4875	0,9922	4,3800	21,9000
	3	1,9875	0,7875	0,9922	4,3800	21,9000
	4	1,7625	0,2625	0,9967	4,4000	22,0000
	5	1,7625	0,4875	1,0035	4,4300	22,1500
	6	1,7625	0,7875	1,0081	4,4500	22,2500
	7	1,4625	0,2625	0,9967	4,4000	22,0000
	8	1,4625	0,4875	0,9967	4,4000	22,0000
	9	1,4625	0,7875	0,9899	4,3700	21,8500
	10	1,2375	0,2625	1,0035	4,4300	22,1500
	11	1,2375	0,4875	0,9877	4,3600	21,8000
	12	1,2375	0,7875	0,9899	4,3700	21,8500
3	1	1,9875	1,5375	1,0103	4,4600	22,3000
	2	1,9875	1,3125	1,0013	4,4200	22,1000
	3	1,9875	1,0125	0,9990	4,4100	22,0500
	4	1,7625	1,5375	1,0194	4,5000	22,5000
	5	1,7625	1,3125	1,0217	4,5100	22,5500
	6	1,7625	1,0125	1,0149	4,4800	22,4000
	7	1,4625	1,5375	1,0035	4,4300	22,1500
	8	1,4625	1,3125	1,0058	4,4400	22,2000
	9	1,4625	1,0125	1,0013	4,4200	22,1000
	10	1,2375	1,5375	1,0217	4,5100	22,5500
	11	1,2375	1,3125	1,0103	4,4600	22,3000
	12	1,2375	1,0125	1,0126	4,4700	22,3500
4	1	0,2625	1,5375	0,9854	4,3500	21,7500
	2	0,2625	1,3125	0,9967	4,4000	22,0000
	3	0,2625	1,0125	1,0013	4,4200	22,1000
	4	0,4875	1,5375	1,0058	4,4400	22,2000
	5	0,4875	1,3125	0,9990	4,4100	22,0500

	Pontos	Eixo X	Eixo Y	Adimensional	Medida [mV]	Medida [$W m^{-2}$]
4	6	0,4875	1,0125	1,0035	4,4300	22,1500
	7	0,7875	1,5375	0,9786	4,3200	21,6000
	8	0,7875	1,3125	0,9922	4,3800	21,9000
	9	0,7875	1,0125	0,9945	4,3900	21,9500
	10	1,0125	1,5375	1,0126	4,4700	22,3500
	11	1,0125	1,3125	1,0081	4,4500	22,2500
	12	1,0125	1,0125	1,0126	4,4700	22,3500
Média	-	-	-	1,0000	4,4144	22,0719
Desvio Padrão	-	-	-	0,0111	0,0489	0,2445