



MODELOS MATEMÁTICOS EMPÍRICOS PARA O CÁLCULO DE ILUMINÂNCIAS INTERNAS – COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS DE CÁLCULO – PARTE 2

Roberta Vieira Gonçalves de Souza (1); Fernando Oscar Ruttkay Pereira (2)

(1) Universidade Federal de Minas Gerais, R. Paraíba, 697 – Funcionários, BH/MG 30.130-140,
Telefone: +31 3269 1851, fax: +31 3269 1822

E-mail: roberta@arq.ufmg.br

(2) Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Arquitetura, CTC, Campus Trindade, Florianópolis/SC +48 3319393.

RESUMO

Este artigo mostra a comparação de valores obtidos por equações empíricas para o cálculo de iluminâncias internas - desenvolvidas no doutorado da primeira autora - com outros dois métodos de cálculo de iluminâncias. Estas equações empíricas são descritas em outro artigo deste congresso – parte 1. Foram selecionados para a comparação dos valores obtidos pela aplicação destas equações, valores de iluminâncias internas obtidos por um método gráfico, o DCRL, e um programa computacional, o Lightscape 3.2. O desempenho destas três ferramentas foi avaliado frente a dados medidos em maquete para diferentes condições de céu, dois tamanhos de abertura e três refletâncias internas distintas.

Os resultados obtidos mostram que, os três métodos apresentam, em variadas circunstâncias diferentes desvios frente aos valores medidos, e que as equações empíricas não apresentam resultado que possa ser considerado inferior aos demais métodos.

ABSTRACT

This paper describes the results obtained in the comparison of internal diffuse illuminance values obtained by three different calculation methods. The methods are: empirical equations developed by the first author – and presented in another paper in this congress, a graphic model – DRCL, and a simulation software, Lightscape 3.2. The performance of this three calculation tools was evaluated in comparison with data measured in scale models with different window sizes, and internal reflectances. Measurements were taken under clear and overcast sky conditions.

The results obtained show that the three methods present, under different circumstances, deviations from the measured values, and that the empirical equations do not present results that can be considered to be less precise than the other two evaluate methods.

1. INTRODUÇÃO

O uso de modelos matemáticos para o cálculo de iluminâncias internas pode evitar que se gaste demasiado tempo na predição de iluminâncias internas, seja em métodos gráficos de cálculo ponto a ponto, ou em simulações computacionais. A partir da identificação de um mínimo de variáveis significativas, poder-se descrever, com precisão razoável, iluminâncias internas permite que se possa fazer análises paramétricas de sistemas de iluminação e suas componentes principais.

Este tipo de modelo poderá ser usado para avaliações iniciais do desempenho luminoso de sistemas de iluminação natural lateral, em ambientes de forma regular que possuam proporção entre área de abertura e área de piso entre 1/4 e 1/7, ou seja, uma relação entre área da janela e área das superfícies internas de 10 a 20%. Sua aplicação permite a verificação do peso de diversos parâmetros no nível final de iluminação obtido, como a cor das superfícies, o tamanho da abertura, a localização dos pontos no interior do ambiente e a condição de céu. Não se questiona aqui a óbvia limitação deste tipo de modelo em termos de sua precisão final, mas a sua possível aplicabilidade em etapas iniciais de projeto, no ensino da dinâmica da luz natural em ambientes internos e no possível uso em mecanismos regulatórios como códigos de construção e normas de avaliação de iluminação em ambientes internos.

O que a pesquisa aqui apresentada pretende se estes modelos matemáticos empíricos desenvolvidos a partir de um número limitado de variáveis, descrevem com precisão aceitável iluminâncias em ambientes internos, quando comparados a outros métodos de predição.

2. METODOLOGIA

Para a análise da precisão da predição de níveis de iluminação e distribuição de luz em ambientes internos, foram usadas medições feitas em maquetes em dias de céu claro e encoberto, que foram posteriormente comparadas a resultados obtidos através de três métodos de cálculo.

2.1 Obtenção de dados

As medições em maquetes (na escala de 1:10) representam médias de um minuto de registros tomados a cada segundo. Foram medidos simultaneamente com um *data logger* Delta T, valores de 09 pontos internos e de iluminâncias difusas externas medidas pela Estação de Medição de Iluminação Natural de Florianópolis (SOUZA E PEREIRA, 2004).

O ambiente simulado e medido representa uma sala com dimensões de 3,3 x 6,0 x 2,8 m, na qual variou-se o tamanho das aberturas (30% ou 50% da área da parede em que estão inseridas) e a refletividade interna: 0,73, 0,32 e 0,17 respectivamente para as salas branca, cinza clara, cinza escura.

Nas figuras 1 e 2 a seguir, mostram-se uma planta com a distribuição dos nove pontos de medição interna e uma foto da maquete. Os pontos 1, 2 e 3 são chamados pontos da frente; os pontos 4,5 e 6 são denominados pontos do meio e os pontos 7, 8 e 9 são os pontos do fundo, mais distantes da abertura.

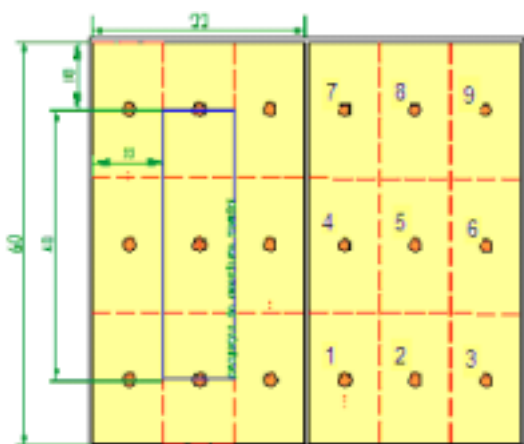


Figura 1 – Planta baixa do modelo em escala utilizada com dimensões e localização dos pontos de medição.

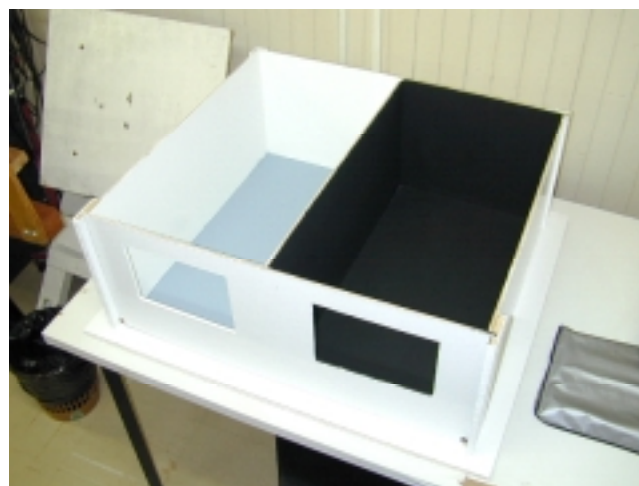


Figura 2 - Vista da maquete construída, mostrando o interior das salas branca e preta. Aberturas com 30% da área da parede (o piso da sala branca foi pintado de preto).

Foram selecionados 10 conjuntos de medições que representam a combinação das variáveis analisadas, de acordo com o apresentado no quadro a seguir:

Tabela 1 – Comparações feitas na simulação do método de equações empíricas, métodos gráfico DCRL, e método computacional Lightscape 3.2 com valores medidos

COMPARAÇÃO	PARÂMETROS	CÉU CLARO	CÉU ENCOBERTO
Refletividade	Sala Branca	Dez. 1, 11:20	Nov. 18, 13:55
	Sala Cinza Claro	Fev. 5, 09:47	Dez.14, 10:42
	Sala Cinza Escuro	Out.18, 15:27	Out. 18, 16:14
WWR	WWW 30%		Nov.18, 13:55, Sala branca.
	WWW 50%		Dez. 2, 09:38, Sala branca.
Brilho do céu	Baixo		Dez. 15, 10:00, Sala cinza claro.
	Alto		Fev. 5, 11:20, Sala cinza claro.

Um fator de correção dado pela divisão da iluminância externa global medida pela iluminância externa global dada pelo programa Lightscape foi aplicado aos valores internos de forma que as comparações pudessem ser feitas tomando-se como base a mesma iluminância externa.

2.2 Ajustes no método DRCL

O método DCRL sofreu ajustes no que concerne ao cálculo da Componente Refletida Interna percentual, CRI%, de acordo com SOUZA (2004). Em estudos realizados em 2001 junto ao LABCON/UFSC, e por observações feitas por pesquisadores que compararam o método a medições em ambiente reais e maquetes (SOUZA E CARLO, 1999), chegou-se à conclusão que o método tende a subestimar a reflexão interna e fez-se então a proposição da introdução de índices de correção para o cálculo da CRI, de acordo com a refletividade interna do ambiente (baixa, média e alta). Refletividades abaixo de 20% são consideradas baixas, entre 21 e 50% médias e acima de 51%, altas. Os índices de correção são propostos diferenciadamente para pontos situados no terço mais próximo à janela (pontos da frente), no terço médio do ambiente (pontos médios) e no terço mais afastado da abertura de iluminação (pontos do fundo do ambiente), para ambientes iluminados unilateralmente. Ambientes com mais de uma abertura para iluminação natural devem ser considerados caso a caso.

De acordo com o projeto de norma a CRI% deve ser calculada da seguinte maneira:

$$CRI\% = \left\{ \sum_{n=i}^{n=1} (FF_{si} * \rho_{mi}) \right\} * (CC + CRE) * k_p \quad [\text{Equ. 01}]$$

Onde: n é igual ao número de superfícies; CC é a componente celeste; CRE é a componente refletida externa; FF_{si} é igual ao fator de forma de cada uma das superfícies internas em relação ao ponto P; ρ_{mi} é igual à refletância média de cada superfície interna, k_p é um fator empírico de correção em função da posição do ponto

Na primeira introdução do índice K_p para a correção da CRI, foram adotados valores únicos para todos as faixas de refletividade. O que este trabalho de tese vem propor é a modificação destes K_p com a introdução de índices variáveis não só pela profundidade do ponto calculado, mas também pela refletividade média do ambiente.

Estes valores foram obtidos através da comparação dos resultados da aplicação do método DCRL com diversas situações medidas. Estabeleceram-se valores de K_p de forma a minorar o desvio apresentado pelo método que tendia a subestimar os valores da componente refletida, uma vez que na concepção original do método a taxa de reflexão foi considerada uniforme em todo o ambiente, para pontos próximos e afastados da abertura. Neste trabalho de tese, verificou-se que há uma variação nesta distribuição e foi então introduzida uma correção para o índice K_p , como exposto na Tabela 2.

Os valores de níveis de iluminação interna obtidos para o método DCRL apresentados nas tabelas a seguir foram corrigidos usando estes novos valores de K_p .

Tabela 2 – Índices K_p para a correção da CRI no método DCRL.

Posição do ponto	Valor de k_p		
	Refletividade baixa	Refletividade média	Refletividade alta
próximo à abertura	6	2	1
posição intermediária	7	3	1
afastado da abertura	8	4	2

2.3 Equações empíricas

Foram desenvolvidas as seguintes equações para o cálculo da CC e da CRI para as condições de céu claro e de céu encoberto, que levam em conta as variáveis, iluminância difusa externa, E_d , ângulo sólido, Ω' , ângulo entre o centro da abertura e o ponto interno considerado, Z_i , e azimute do sol em relação à normal à abertura, ψ_i .

Tabela 3 – Equações para a CC e para a CRI para céu claro e céu encoberto.

Componente celeste (lux)	Componente Refletida interna (%)
<u>Céu claro</u>	
$CC_{cl} = 0,90E_d^{0,73} \Omega'^{0,63} e^{(0,23 \text{ sen}Z_i + 0,05 \text{ cos}\psi_i)}$ [Eq. 02]	$CRI_{cl} = 3,14 E_d^{0,06} \Omega'_{p \ 3,4} \rho^{0,67} e^{(0,02 \text{ sen}Z_i)}$ [Eq. 03]
<u>Céu Encoberto</u>	
$CC_{en} = 1,63E_d^{0,68} \Omega'^{0,79} e^{(0,11 \text{ sen}\psi_i - 0,29 \text{ cos}\psi_i)}$ [Eq. 04]	$CRI_{en} = 2,16E_d^{0,06} \Omega'_{p \ 3,50} \rho^{0,25} e^{(-0,06 \text{ sen}Z_i)}$ [Eq. 05]

3. COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE E_I

Os valores de iluminância interna, E_{di} , fornecidos pelas equações empíricas foram comparados a valores medidos e a valores fornecidos por outros métodos propostos para o mesmo fim, de forma a verificar sua viabilidade de aplicação. Buscou-se comparar o método matemático aqui proposto a dois outros tipos de método: um gráfico e outro computacional, que, graças à tecnologia moderna, consegue resolver o fenômeno de trocas de radiação entre superfícies (através do método da radiosidade) com precisão bastante elevada. Como método gráfico foi selecionado o DCRL, desenvolvido pela autora em seu trabalho de mestrado (SOUZA, 1997) e ora componente do projeto de norma 02:135.02-003 da ABNT (2003, B). Como programa computacional foi selecionado o Lightscape 3.1, programa extensamente avaliado.

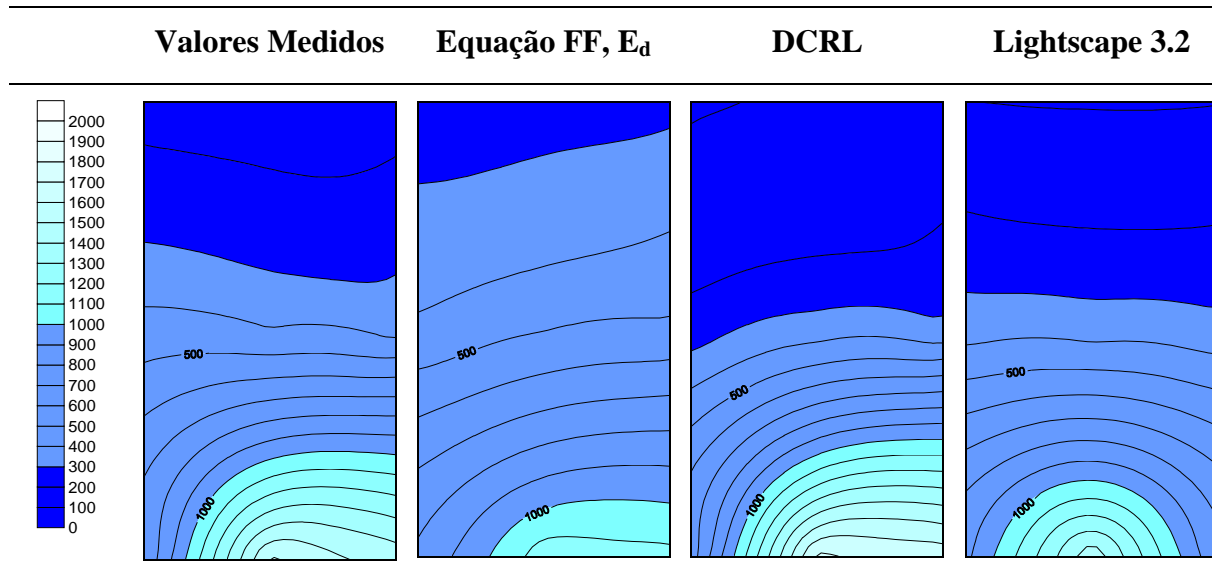
Os resultados fornecidos pelo três métodos foram normalizados para a iluminância difusa ou global externa medida, de forma a obter-se uma comparação sob mesmas condições de iluminação externa.

3.1 Comparações sob condição de céu claro

A seguir apresentam-se as comparações entre os três métodos considerando-se a **condição de céu claro**. Este tipo de céu apresenta distribuição de luminâncias fortemente dependente da posição do sol no céu, o que se reflete marcadamente na lateralidade da entrada da luz no ambiente, em especial em regiões próximas à abertura. A iluminação difusa horizontal externa, em geral apresenta valores que variam entre 10.000 e 20.000 lux, se horários extremos do dia não forem considerados. Tal “estabilidade” indica que haverá pouca flutuação dos níveis internos em função da variável E_d , ao contrário do que ocorre sob céus encobertos onde a iluminância externa difusa pode variar entre 5 e 40 mil lux.

A Figura 3 apresenta o comportamento de uma sala **cinza escura**, de refletividade $\rho = 0,17$ e janela com 30% da área da parede em que está inserida. As medições foram feitas sob céu claro, com índice de brilho, $\Delta = 0,12$, índice de claridade $\varepsilon' = 5,50$ e iluminância difusa horizontal $E_d = 11.300$ lux.

Figura 3 – Comparação de valores medidos e estimados pelas equações propostas, pelo método gráfico DCRL e pelo programa Lightscape 3.2. Sala cinza escuro, céu claro, dia 18/out/02, 15:27



Nota-se na sala medida uma clara diferenciação dos níveis de iluminação próximos à janela com maiores níveis mais altos à direita da janela e também uma marcante diminuição das iluminâncias na medida em que se afasta da janela.

Ao se analisar o desempenho dos métodos avaliados, nota-se que tanto o método matemático, chamando doravante de MM, quanto o DCRL, mostram de forma bastante razoável a lateralidade da luz, enquanto os métodos DCRL e Lightscape são os que mais se aproximam do decaimento da luz na medida em que se afasta da abertura. O MM tende a superestimar os valores de iluminâncias obtidas no fundo da sala, quando refletividades baixas são consideradas, como já esperado.

Nota-se em especial o fraco comportamento do método computacional para explicar o fenômeno da lateralidade da entrada de luz no ambiente interno, característica que se repete para todas as situações de céu claro em que esta lateralidade é bastante marcada, devido às pronunciadas diferenças, nesta condição, da luminância do céu vista a partir do ponto através da abertura. Acredita-se que tal comportamento deva-se ao algoritmo do programa que é baseado no método da radiosidade e que considera que todo o fluxo incidente em determinada superfície será igualmente refletido em todas as direções, independentemente da direção de incidência. Acredita-se que esta característica aliada ao grande número de trocas por reflexão que o programa realiza (o que ameniza ainda mais as diferenças de luminosidade por direção do fluxo incidente), irá reduzir a denotação da lateralidade da luz em pontos próximos à janela.

Verifica-se pelo corte transversal que o desempenho do MM é o que apresenta os maiores desvios em relação ao ambiente medido, com maiores sobre-estimações no fundo da sala e maiores subestimações próximo à abertura, enquanto o método DCRL apresenta uma aproximação bastante boa do comportamento da curva.

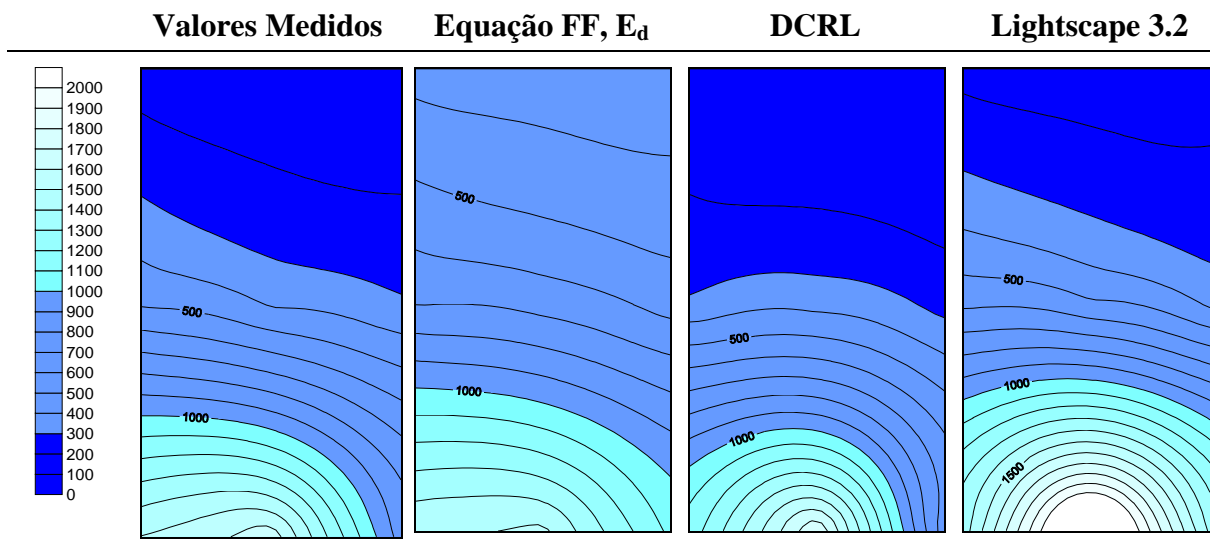
A distribuição de níveis bons, ruins e ótimos é melhor representada neste caso pelo método computacional que apresenta uma boa relação com os níveis medidos, apresentando apenas uma deficiência na representação da lateralidade da entrada de luz.

A Figura 4 traz a comparação dos métodos citados para uma sala **cinza claro** ($\rho = 0,32$) abertura de 30%, iluminada sob céu claro, no verão, dia 5 de fevereiro. $E_d = 13.000$ lux com índice de brilho, $\Delta = 0,10$ e índice de claridade $\epsilon' = 7,00$, o que indica uma atmosfera mais limpa que na comparação anterior.

Novamente nota-se que o MM fornece valores superestimados para pontos mais afastados da janela, embora seja o método que mais se aproxima do valor medido próximo à abertura, apresentando também boa representação da lateralidade da entrada da luz no ambiente interno. O DCRL ainda faz

notar uma certa lateralidade da luz próximo à abertura, enquanto o Lightscape novamente não reproduz adequadamente o fenômeno. Os métodos que melhor reproduzem a distribuição da luz no ambiente interno são novamente o gráfico e o computacional – nota-se, no entanto, que enquanto o primeiro tende a subestimar os valores medidos o outro superestima estes valores. Ambos apresentando desvios médios da ordem de 20%.

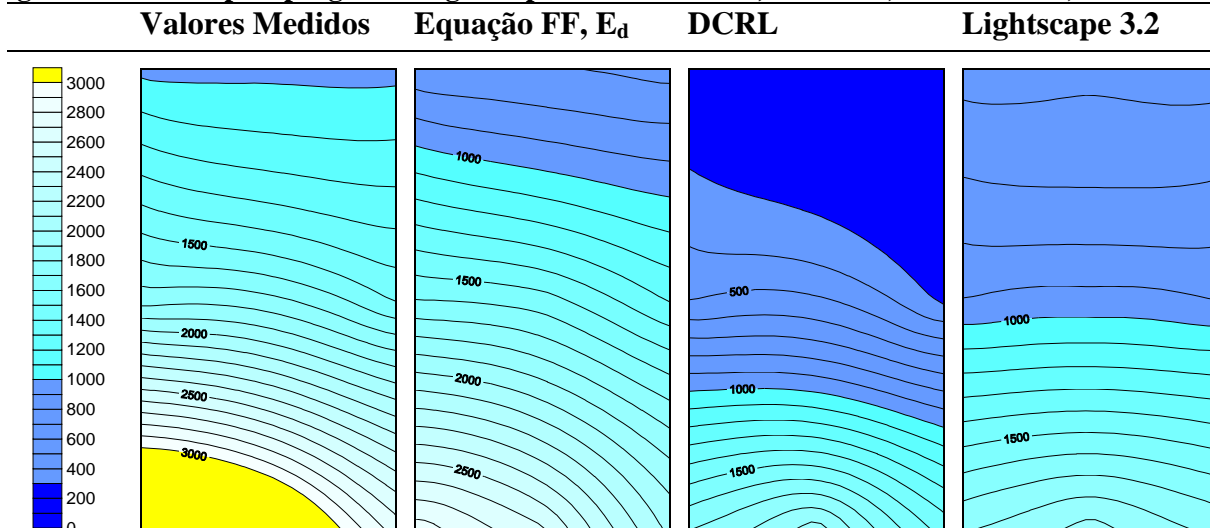
Figura 4 - Comparação de valores medidos e estimados pelas equações propostas, pelo método gráfico DCRL e pelo programa Lightscape 3.2. Sala cinza claro, céu claro, dia 05/fev/03, 09:47



O Lightscape é o que fornece a pior representação os níveis de iluminância encontrados próximos à abertura, com superestimação de até 50%. O MM é o método que fornece os maiores desvios no fundo do ambiente com superestimação da ordem de 2,3 vezes. A distribuição de níveis bons, ruins e ótimos é adequadamente representada nos métodos gráfico e computacional, o método matemático falhando, neste caso, em registrar adequadamente o decaimento dos níveis no fundo do ambiente, uma vez que a superestimação dos níveis ocorridos no fundo da sala faz com que não se registre a faixa de valores com iluminância “insuficiente”, abaixo de 300 lux como representado pelos demais métodos. O método DCRL é o mais se aproxima dos níveis medidos, quando os níveis são vistos em corte transversal.

A Figura 5 traz a comparação dos métodos matemático, gráfico e computacional para uma sala branca ($\rho = 0,73$) abertura de 50%, iluminada sob céu claro, no verão, dia 1o de dezembro. $E_d = 13.000$ lux com índice de brilho, $\Delta = 0,11$ e índice de claridade $\epsilon' = 7,50$.

Figura 5 - Comparação de valores medidos e estimados pelas equações propostas, pelo método gráfico DCRL e pelo programa Lightscape 3.2. Sala branca, céu claro, dia 01/dez/04, 11:20



Como dito anteriormente, o MM tende a subestimar valores sob refletividades altas, mas a subestimação apresentada pelos demais métodos é ainda maior. Neste caso, o MM foi o que melhor representou tanto os níveis de iluminância quanto a distribuição da luz no ambiente interno, o que pode ser claramente visto tanto através da representação em curvas isolux quanto do corte transversal.

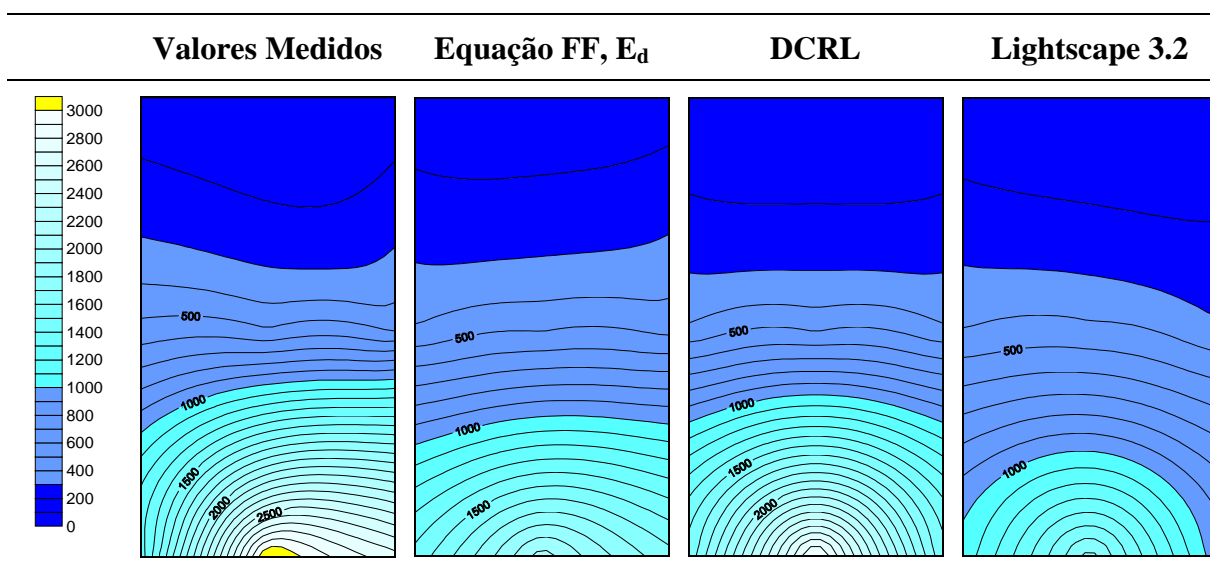
O MM representa adequadamente a lateralidade da luz, o que os demais métodos falham em fazer. O método gráfico tende a subestimar grandemente os níveis de iluminação obtidos, não representando adequadamente a distribuição de níveis considerados insuficientes, adequados e ótimos. Os métodos matemático e gráfico são os que mais se aproximam desta distribuição.

3.2 Comparações sob condição de céu claro

O comportamento destes três métodos quando os ambientes são iluminados sob **condições de céu encoberto** é analisado. Este tipo de céu, diferentemente do céu claro, não apresenta tão marcada lateralidade na entrada da luz, uma vez que as iluminâncias tendem a se distribuir mais uniformemente ao longo da abóbada. No entanto, os níveis de iluminância obtidos variam mais do que sob condições de céu claro uma vez que os níveis de iluminância difusa externos também são bastante mais variáveis.

A Figura 6 traz a comparação dos métodos matemático, gráfico e computacional para uma sala cinza escuro ($\rho = 0,17$) abertura de 30%, iluminada sob céu encoberto, na primavera, dia 18 de outubro. $E_d = 14.500$ lux com índice de brilho, $\Delta = 0,24$ e índice de claridade $\epsilon' = 1,15$.

Figura 6 - Comparação de valores medidos e estimados pelas equações propostas, pelo método gráfico DCRL e pelo Lightscape 3.2. Sala cinza escuro, céu encoberto, dia 18/out/02, 16:14.



Verifica-se que para o horário considerado, apesar de as medições terem sido tomadas sob céu considerado como completamente encoberto, há uma clara lateralidade na entrada da luz. Esta lateralidade só é ligeiramente representada no método MM já que a Equação da CRI deste método inclui o $\text{sen}Z_i$ que é responsável por sutis diferenças na entrada da luz no sentido lateral. O DCRL representa o céu como fornecendo uma distribuição uniforme ao longo do eixo azimutal com variação apenas em relação à altura e, portanto, fornece níveis simétricos em relação ao centro da janela. Tal comportamento seria esperado também do programa computacional Lightscape, embora este apresente uma ligeira diferença nos níveis à esquerda e à direita do ambiente.

No caso da sala cinza escura iluminada sob uma abóbada de brilho médio, de 14 klux, todos os três métodos fornecem uma aproximação bastante razoável da distribuição dos níveis de iluminação no

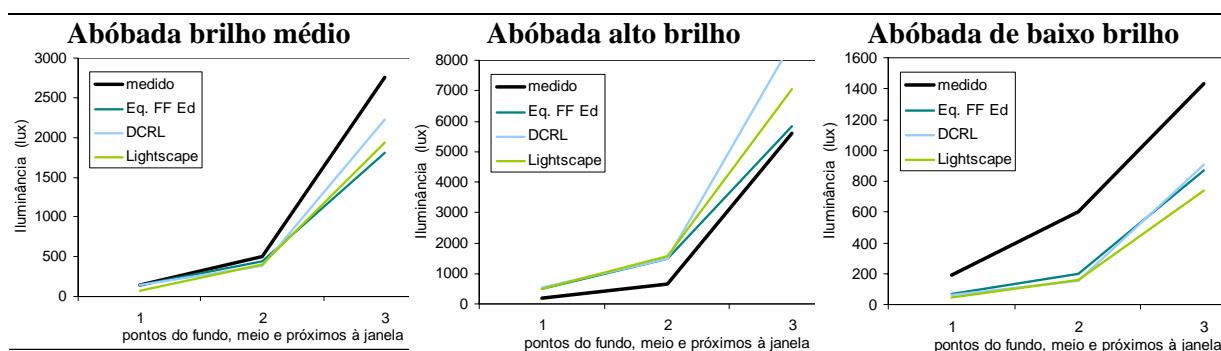
ambiente, apesar de todos apresentarem algumas subestimações ou sobre-estimações acima de 30% em regiões distintas da sala. Em especial nota-se a boa reprodução de níveis e distribuição de iluminância apresentada pelo método DCRL.

A seguir, na Figura 7, apresentam-se três situações distintas da sala de refletividade média, cinza claro, em que se notou que variações extremas no nível externo de iluminância difusa, E_d , mudaram significativamente o comportamento dos resultados apresentados pelos 3 métodos analisados, embora não tenham mudado significativamente o comportamento da distribuição da luz no ambiente interno.

A primeira situação considerada é a de iluminâncias internas obtidas sob uma abóbada de iluminância média, de 13.500 lux. O segundo caso, sob uma abóbada bastante clara, que forneceu nível de iluminância difusa de 50.000 lux e o terceiro sob uma abóbada escura de 5.000 lux de iluminação difusa externa em plano horizontal.

Enquanto nas três situações medidas a sala cinza clara tendeu a apresentar níveis ótimos ou excessivos próximos à abertura e níveis insuficientes no fundo da sala, os métodos de análise apresentaram comportamentos diferenciados na distribuição da luz no ambiente interno em função do nível externo considerado.

Figura 7 – Comparação de iluminâncias dos pontos centrais na sala cinza claro para condição de céu encoberto de brilho “médio”, “alto” e “baixo”, com iluminâncias difusas externas E_d , de 13.500 lux, 50.700 lux e 5.400 lux respectivamente.



Na primeira situação, apresenta-se uma sala com abertura de 30%, iluminada sob céu encoberto, no verão, dia 14 de dezembro, 11:20 horas, com abóbada de iluminância difusa média de $E_d = 13.500$ lux ($\Delta = 0,09$ e $\epsilon' = 1,00$). Considera-se que os três métodos apresentam adequada reprodução dos níveis de iluminação internos medidos, todos com ligeira (maior ou menor) subestimação dos níveis próximos à janela e boa estimacão dos níveis no terço médio e mais profundo do ambiente. A distribuição dos níveis ao longo do ambiente mostra-se bastante coerente quando os métodos de cálculo são comparados com os valores medidos.

Na segunda situação, dia 5/fev/02, o dia analisado apresenta abóbada bastante mais luminosa com $E_d = 50.700$ lux, veremos que todos os métodos superestimam os valores obtidos experimentalmente, uma vez que todos são normalizados para a iluminância externa difusa (considera-se que o valor de iluminância externa fornecida pelo Lightscape seja igual ao valor da E_d uma vez que não há incidência solar direta neste tipo de céu), que neste caso é bastante elevada, sendo que os maiores desvios (que podem chegar a 2.6 vezes o valor experimental) ocorrem do meio para o fundo do ambiente, o que nos indica, que sob céus muito luminosos, todos os métodos analisados superestimam a refletividade interna desta porção do ambiente e mascaram o pronunciado decaimento da luz à medida em que se afasta da abertura de iluminação natural.

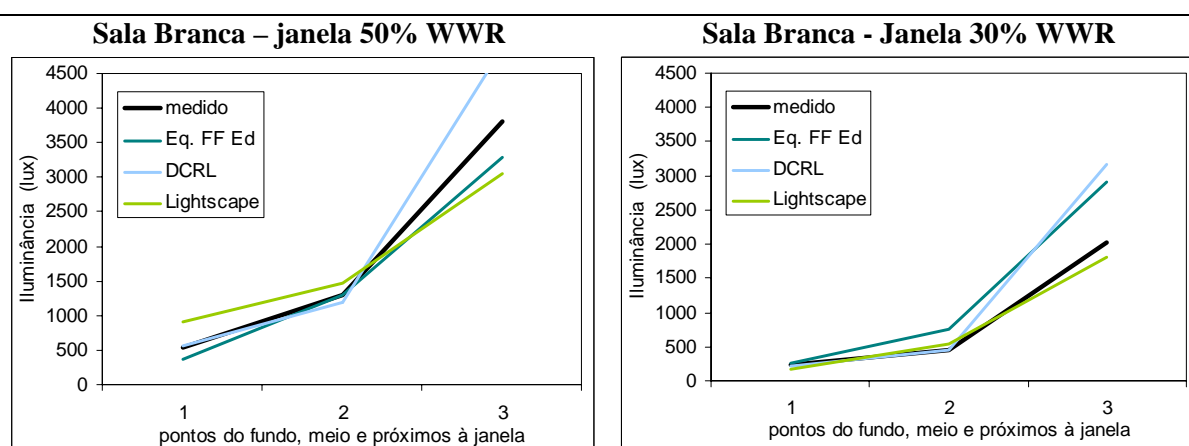
Efeito contrário ocorre quando se trabalha com abóbadas demasiado escuras, como é o caso da mesma sala cinza clara, no dia 15/dez/03 às 10:00, com $E_d = 5.400$ lux. A sala, sob esta condição de iluminação externa, apresenta, assim como nas demais situações, um rápido decaimento da luz que passa de 1.400 lux próximos à abertura a menos de 200 lux no fundo do ambiente. Nesta situação, os métodos avaliados apresentam subestimação dos níveis experimentais medidos. Uma vez que os

métodos são alimentados com a baixa iluminância externa há pouca luz a ser distribuída internamente. As subestimações são da ordem de 1/3 do nível interno medido.

As comparações feitas para a sala cinza sob céu claro indicam que todos os métodos avaliados funcionam melhor na predição de níveis de iluminância internos quando iluminados por abóbodas de brilho médio, da ordem de 10.000 a 20.000 lux e que desvios maiores são esperados quando os ambientes forem iluminados por céus de abóbodas muito claras ou muito escuras. Lembra-se aqui que os valores do Lightscape foram normalizados para a iluminância de céu medida, sendo que os valores de saída do programa forneciam menores desvios da condição real que os valores normalizados quando os ambientes foram iluminados sob abóbodas extremas. Tal fato pode indicar que a iluminação natural obtida em ambientes internos esteja mais relacionada à posição do sol no céu do que a efeitos de dispersão da luz na abóboda. Para a verificação de tal fato, estudos que abranjam um maior número de ocorrência destes fenômenos devem ser realizados.

Parte-se então para o terceiro tipo de ambiente, de alta refletividade, iluminado sob céu encoberto. São analisadas salas brancas com aberturas de 30 e 50% da área da parede (30% WWR e 50% WWR) em que estão inseridas, ambas expostas a céus de luminosidade média com E_d da ordem de 17.000 lux. A sala com abertura maior, de 50% da área da parede, apresenta níveis mais altos (média de 1.800 lux) e mais uniformes em sua distribuição, com uma diferença de 1/7 entre o fundo e a frente da sala, enquanto a sala com 30% da área da parede, apresenta níveis internos mais baixos (média de 760 lux) e uma diferença de aproximadamente 1/9 entre os pontos do fundo e da frente da sala.

Figura 8 – Comparação de iluminâncias para sala branca, céu encoberto, com abertura de 50% e com 30% da área da parede em que está inserida.



Como pode se verificar pelos resultados apresentados Figura 8, os métodos fornecem um indicativo razoável do comportamento da luz no ambiente interno, com uma proporção no decaimento da luz semelhante à encontrada nos valores experimentais para a sala com abertura de 50% e apresentando um decaimento mais marcado do que o real (da ordem de 1/11) para a sala com abertura de 30%. Exceção deve ser feita ao comportamento do programa Lightscape para a sala com 50% da área da parede, que parece sobre-estimar a influência da reflexão interna na sala com abertura de 50%, superestimando os níveis no fundo da sala em aproximadamente 60%.

4. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos pela aplicação do método de cálculo matemático aqui proposto foram comparados aos de outros dois tipos de método de estimação de iluminâncias internas para verificação da validade da ferramenta proposta. Verificou-se que, em determinadas situações, todos os métodos apresentam desvios relativamente altos com relação a valores medidos, embora em geral, representem de forma considerada adequada a distribuição de iluminâncias internamente, com delimitações de zonas excessivamente iluminadas ou pouco iluminadas semelhantes à do ambiente real. Verificou-se

ainda que os desvios apresentados pelas equações aqui propostas não são maiores que os apresentados pelos dois outros métodos avaliados.

Considera-se que as ferramentas apresentem melhor desempenho sob condições de luminosidade média da abóbada celeste, ou seja, sob níveis de iluminação difusa externa da ordem de 10 a 20 mil lux. Todos os métodos apresentam desvios mais significativos na análise da distribuição dos níveis de iluminação para regiões mais distantes da abertura de iluminação, com sobre-estimação dos níveis medidos experimentalmente.

O Lightscape, diferentemente dos demais métodos, não representa bem a lateralidade na entrada da luz, em pontos próximos à janela. Acredita-se que tal comportamento deva-se ao algoritmo do programa que é baseado no método da radiosidade e que considera que todo o fluxo incidente em determinada superfície será igualmente refletido em todas as direções, independentemente da direção de incidência. Acredita-se que esta característica aliada ao grande número de trocas por reflexão que o programa realiza (o que ameniza ainda mais as diferenças de luminosidade por direção do fluxo incidente), irá reduzir a denotação da lateralidade da luz em pontos próximos à janela.

Encontraram-se diferentes tipos de desvio dos valores medidos e estimados em cada método, de acordo com a situação considerada, não sendo os desvios do método ora proposto considerados maiores que os das outras duas ferramentas avaliadas. No caso do método matemático, sugere-se aqui dois procedimentos possíveis para a correção destes desvios: o primeiro seria a aplicação de um índice de correção, nos moldes do K_p usado no método DCRL. O outro seria a elaboração de equações específicas para faixas distintas de refletividade (pelo menos para altas e baixas refletividades). Não se acredita, no entanto, que este 2º procedimento seja aconselhável, uma vez que o método se pretende simplificado e a introdução de um grande número de equações não é desejável. A primeira solução parece mais viável.

Considera-se, finalmente, que estas equações sejam válidas e passíveis de serem usadas como instrumento para a estimação de níveis de iluminância em ambientes internos de forma retangular, guardadas as proporções entre abertura e superfícies internas de 10 a 20%, sem que haja distorções demasiado grosseiras. Este tipo de ambiente contempla ambientes como escritórios, salas, salas de aula, dormitórios, etc.

5. AGRADECIMENTOS

A realização deste trabalho não seria possível sem o fomento da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, CAPES, dado através de bolsa PICDT e bolsa sanduíche, concedidas à primeira autora, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, que financiou a montagem da Estação EMIN, e do apoio instrumental e computacional do Laboratório de Conforto Ambiental LABCON/UFSC.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT/CB-02, Projeto 02:135.02-002: *Iluminação natural – Parte 2: Procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural*, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comitê Brasileiro de Construção Civil, Agosto de 2003,
- GIVONI, B. (1999) “*Minimum climatic information needed to predict performance of passive building in hot climates*”, PLEA99, Conference on Passive Low Energy Architecture 1999, Edited by Steven Szokolay, pp 197- 204.
- SOUZA, R. V. G. (1997), *Iluminação Natural em edificações: cálculo de iluminâncias internas – desenvolvimento de ferramentas simplificadas*, Dissertação de mestrado - CPGEC, CTC - UFSC, Florianópolis.
- SOUZA, R. V. G. (2004) *Desenvolvimento de modelos matemáticos empíricos para a caracterização dos fenômenos de iluminação natural interna e externa*. Tese de doutorado, PPGEC, CTC/UFSC, Florianópolis.
- SOUZA, R. V. G.; PEREIRA, F. O. R. (2004) Primeira estação de medição de iluminação natural em território Brasileiro: análise dos dados dos dois primeiros anos de funcionamento, *Revista Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 79-94.