

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Greici Ramos

*A*nálise da iluminação natural calculada por meio
do programa Energyplus

Florianópolis, setembro de 2008.

Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Análise da iluminação natural calculada por meio do
programa Energyplus

Greici Ramos

Orientador: Prof. EneDir Ghisi, *Ph.D.*

Dissertação submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Florianópolis, setembro de 2008.

Greici Ramos

**Análise da iluminação natural calculada por meio do
programa Energyplus**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina em 22 de setembro de 2008.

Prof. Dr. Glicério Trichês - Coordenador do PPGEC

Banca Examinadora:

Prof. Enedir Ghisi, Ph.D. - Orientador

Prof. Ricardo Carvalho Cabús, Ph.D. – CTEC/UFAL

Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, Ph.D. – ARQ/UFSC

Prof. Roberto Lamberts, Ph.D. – ECV/UFSC

*A*gradecimentos

Ao professor Enedir Ghisi pelo apoio, dedicação, paciência e competência na orientação desta dissertação

Ao Labsolar e ao bolsista Daniel Taqueda, pela disponibilização de parte dos dados utilizados na dissertação.

Ao professor Fernando Oscar Ruttkay Pereira, pela disponibilização de parte dos dados utilizados na dissertação, e pela ajuda com questões do cálculo da iluminação natural.

Ao professor Ricardo Carvalho Cabús, pelo esclarecimento e por sua prontidão em ajudar nas minhas dúvidas a respeito do programa TropLux.

Aos professores membros da banca examinadora: Fernando Oscar Ruttkay Pereira, Roberto Lamberts e Ricardo Carvalho Cabús; que aceitaram participar e contribuir para a avaliação e conclusão desta pesquisa.

À Solange V. G. Goulart, pela participação e contribuições na banca de qualificação.

À Marinea, pela cooperação e assistências prestadas.

Aos amigos do LabEEE, pela amizade, companheirismo, incentivo e troca de conhecimento.

A todos os amigos pelo apoio e pelos momentos de distração e divertimento que me deram força pra continuar.

A amiga Veridiana pelo apoio, força e pelo estímulo para iniciar esta caminhada.

E principalmente a minha família, pelo amor e apoio incondicional, exemplo de vida e incentivo em seguir em frente.

Sumário

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	xii
Resumo	xiii
Abstract	xiv
1. Introdução.....	15
1.1 Justificativa	15
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo Geral.....	19
1.2.2 Objetivos Especificos.....	19
1.3 Estrutura do Trabalho	19
2. Revisão Bibliográfica.....	21
2.1 Introdução.....	21
2.2 Iluminação	21
2.2.1 Avaliação da iluminação natural no ambiente interno	22
2.2.2 Cálculo da iluminação natural	26
2.2.3 Modelos de cálculo da eficácia luminosa e iluminação natural.....	28
2.3 Programas de simulação	44
2.3.1 Energyplus.....	44
2.3.2 Daysim/Radiance.....	49
2.3.3 TropLux	52
2.4 Arquivos climáticos	56
2.5 Considerações finais	57
3. Metodologia	59
3.1 Introdução.....	59
3.2 Avaliação do cálculo da iluminação natural no ambiente interno	59
3.2.1 Simulação da iluminação natural	60
3.2.2 Análise da distribuição da iluminação natural.....	61
3.2.3 Análise das iluminâncias internas para Florianópolis	62
3.2.4 Análise das iluminâncias em função da latitude	63

3.2.5	Verificação do cálculo do fator de luz diurna para Florianópolis.....	63
3.3	Avaliação do modelo desenvolvido por Perez para o clima de Florianópolis.....	64
3.4	Correção dos coeficientes utilizados para o cálculo das iluminâncias	68
4.	Resultados e Discussão	70
4.1	Introdução.....	70
4.2	Avaliação do cálculo da iluminação natural.....	70
4.2.1	Análise das iluminâncias internas	70
4.2.2	Análise das iluminâncias internas em função da geometria da sala	73
4.2.3	Análise das iluminâncias internas em função do tamanho da abertura	77
4.2.4	Análise das iluminâncias em função da latitude	80
4.2.5	Verificação do cálculo do fator de luz diurna	83
4.2.6	Considerações referentes à análise das iluminâncias internas	86
4.3	Avaliação do modelo desenvolvido por Perez para o clima de Florianópolis.....	86
4.3.1	Avaliação do cálculo da iluminância externa difusa.....	89
4.3.2	Avaliação do cálculo da iluminância externa direta	93
4.4	Correção dos coeficientes utilizados para o cálculo das iluminâncias	96
4.4.1	Coeficientes locais para iluminação difusa.....	97
4.4.2	Coeficientes locais para iluminação direta	99
5.	Conclusão	102
5.1	Análise do cálculo da iluminância interna.....	102
5.2	Análise do modelo dinâmico de céu.....	104
5.3	Considerações	105
5.4	Limitações do trabalho	106
5.5	Sugestões para trabalhos futuros.....	106
	Referências Bibliográficas.....	107
	Anexo	112

Estudo da distribuição das iluminâncias calculadas pelo programa Energyplus.....	112
Apêndice 1	117
Resultados complementares das simulações apresentadas na dissertação	117
A2.1 Iluminâncias do Modelo de proporção 2:1	117
A2.2 Fator de Luz Diurna do Modelo de proporção 2:1	118
Apêndice 2.....	119
Exemplo de valores de iluminâncias calculadas e medidas.....	119

Lista de Figuras

1. Introdução.....	15
Figura 1.1. Consumo de eletricidade no Brasil.....	16
Figura 1.2. Participação setorial no consumo de energia elétrica no país em 2006. ...	17
Figura 1.3. Usos finais no Brasil - setor comercial.	17
Figura 1.4. Usos finais no Brasil - setor público.	17
Figura 1.5. Usos finais no Brasil - setor industrial.	17
Figura 1.6. Usos finais no Brasil - setor residencial.....	17
2. Revisão Bibliográfica	21
Figura 2.1. Modelo de edifício estudado, com aberturas nas quatro fachadas e lanternin, e refletâncias iguais a: paredes - 0,5; piso - 0,3; e teto - 0,7.	24
Figura 2.2. Gráficos de Fator de Luz Diurna, Autonomia da luz natural e Iluminância Útil da Luz Natural.....	25
Figura 2.3. Probabilidade de ocorrência dos tipos de céu em Florianópolis.....	26
Figura 2.4. Hemisfera de raio unitário.....	27
Figura 2.5. Princípio do ângulo sólido projetado.	27
Figura 2.6. Fontes da luz natural distribuída no ambiente interno.	27
Figura 2.7. Eficácia luminosa direta em função da altura solar para todos os tipos de céu.....	29
Figura 2.8. Eficácia luminosa difusa em função da altura solar para todos os tipos de céu.....	30
Figura 2.9. Exemplo da parametrização das condições de céu	31
Figura 2.10. Variação da eficácia luminosa global com θ e ϕ , para Z entre 35° e 50°	31
Figura 2.11. Variação da eficácia luminosa difusa com θ e ϕ , para Z entre 65° e 75°	31
Figura 2.12. Variações da eficácia global em função de: a. ângulo zenital para condições céu encoberto; b. claridade do céu para um ângulo zenital limitado; c. ângulo zenital para céu claro e, d. brilho do céu para céu encoberto. Com dados de Nova Iorque e Genebra.	34

Figura 2.13. Superfície Polinomial com variação da eficácia luminosa global (KG) em função da claridade do céu (τ) e brilho do céu (ρ), para ângulo zenital e temperatura constantes.....	35
Figura 2.14. Variação da eficácia luminosa difusa (KD) em função da claridade do céu.....	35
Figura 2.15. Variação da eficácia luminosa difusa (KD) para dados de Albany, em função do ângulo zenital para céu claro.	35
Figura 2.16. Superfície Polinomial com variação da eficácia luminosa difusa (KD) em função da claridade do céu (τ) e brilho do céu (ρ), para ângulo zenital e temperatura constantes.....	36
Figura 2.17. Superfície Polinomial com variação da eficácia luminosa direta (KB) em função da claridade do céu (τ) e brilho do céu (ρ), para ângulo zenital e temperatura constantes.....	36
Figura 2.18. Correlação entre as iluminâncias medidas e as calculadas através dos coeficientes reais e locais para os modelos de Muneer, Chung e Robledo, para todos os tipos de céu, em Florianópolis	38
Figura 2.19. Correlação entre iluminâncias difusas modeladas e medidas de Nova Zelândia.	39
Figura 2.20. Características atmosféricas dos cinco dias escolhidos para a comparação entre os dados medidos e os calculados pelos modelos.....	40
Figura 2.21. Desempenho diário dos modelos de Littlefair e Perez para a eficácia luminosa difusa, os resultados medidos estão representados pela linha clara.	41
Figura 2.22. Desempenho diário dos modelos de Olseth, Perez e Dumortier, para a eficácia luminosa direta, os resultados medidos estão representados pela linha clara.....	41
Figura 2.23. Eficácia luminosa direta em função da altura solar e curvas originadas pelos modelos: Littlefair, Chung e Robledo.	43
Figura 2.24. Caminho da luz até a superfície de trabalho, a partir: do céu (a – e) e do sol (f – j).	45
Figura 2.25. Estrutura do programa Energyplus.....	46
Figura 2.26. Gráficos da comparação entre DOE-2, Superlite e medições no céu artificial.....	47
Figura 2.27. Definição do ângulo de obstrução externa	48
Figura 2.28. FLD médio para sala de estar com diferentes orientações.....	48
Figura 2.29. Iluminância no ponto de referência para a fachada sul.	49
Figura 2.30. Foto e esquema do modelo em escala real.....	50

Figura 2.31. Iluminâncias externa (a) e internas com a veneziana aberta (b), para condição de céu encoberto.	51
Figura 2.32. Consumo anual de energia em iluminação previsto para cada fachada.	52
Figura 2.33. Iluminância anual no presbitério da Igreja Matriz N. Srª do Pilar.	55
Figura 2.34. Distribuição da iluminância nas salas, variação por ponto de medição. (A: 2,21m da janela, B: 4,42m da janela e C: 6,63m da janela).	56

3. Metodologia59

Figura 3.1. Dimensões dos modelos estudados.	60
Figura 3.2. Dimensões da abertura nos modelos.....	60
Figura 3.3. Localização dos pontos analisados para cálculo da iluminância em função da geometria.....	62
Figura 3.4. Localização dos pontos nas salas para análise do fator de luz diurna.	64
Figura 3.5. Modelos dos gráficos dos resíduos em função dos valores estimados e das variáveis de um modelo de regressão múltipla.	68

4. Resultados e Discussão70

Figura 4.1. IULN calculada através da simulação da iluminação natural, para sala com: PJF de 50%, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60; para Florianópolis.....	71
Figura 4.2. Carta solar de Florianópolis, com os horários de radiação direta para a fachada sul.....	73
Figura 4.3. Valores das iluminâncias internas para o modelo de proporção 1:1, com PJF de 50%; para Florianópolis.....	75
Figura 4.4. Valores das iluminâncias internas para o modelo de proporção 1:2, com PJF de 50%; para Florianópolis.....	75
Figura 4.5. Valores das iluminâncias internas para o modelo de proporção 1:1, com PJF de 50% e refletância igual a zero; para Florianópolis.	77
Figura 4.6. Valores das iluminâncias internas para o modelo com PJF de 25%, proporção 1:1, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60; para Florianópolis.....	79
Figura 4.7. Valores das iluminâncias internas para o modelo com PJF de 50%, proporção 1:1, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60; para Florianópolis.....	79

Figura 4.8. Valores das iluminâncias internas para o modelo com PJF de 100%, proporção 1:1, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60; para Florianópolis.....	79
Figura 4.9. Valores das iluminâncias internas para a cidade de Belém, 1°22'S. Para o modelo com proporção 1:1, PJF de 50% e, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60.....	81
Figura 4.10. Valores das iluminâncias internas para a cidade de Brasília, 15°22'S. Para o modelo com proporção 1:1, PJF de 50% e, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60.....	81
Figura 4.11. Valores das iluminâncias internas para a cidade de Florianópolis 27°40'S. Para o modelo com proporção 1:1, PJF de 50 % e, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60.	81
Figura 4.12. Valores das iluminâncias internas para a cidade de Genebra, 46°15'N. Para o modelo com proporção 1:1, PJF de 50% e, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60.....	82
Figura 4.13. Valores das iluminâncias internas para a cidade de Oslo, 59°54'N. Para o modelo com proporção 1:1, PJF de 50% e, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60.....	82
Figura 4.14. Fator de luz diurna (FLD) para sala com proporção 1:1, para Florianópolis.....	85
Figura 4.15. Fator de luz diurna (FLD) para sala com proporção 1:2, para Florianópolis.....	85
Figura 4.16. Valores máximos diários dos dados medidos em Florianópolis entre 2003 e 2005 e do arquivo climático.	88
Figura 4.17. Erro encontrado entre os dados medidos de 2003 a 2005 e os dados do arquivo climático TRY, de 1963.....	88
Figura 4.18. Correlação entre os dados coletados em 2004 e os encontrados no arquivo climático de Florianópolis, 1963.....	89
Figura 4.19. Correlação entre as iluminâncias difusas medidas e as calculadas através de dados coletados em Florianópolis, entre 2003 e 2005.	91
Figura 4.20. Análise dos resíduos em função dos dados estimados através do modelo de Perez et al. (1990), e do brilho do céu, para céu encoberto.....	93
Figura 4.21. Análise dos resíduos em função dos dados estimados através do modelo de Perez et al. (1990), e do brilho do céu, para céu claro.....	93
Figura 4.22. Correlação entre as iluminâncias diretas medidas e as calculadas através de dados coletados em Florianópolis, entre 2003 e 2005.	94

Figura 4.23. Análise dos resíduos em função dos dados estimados através do modelo de Perez et al. (1990), e do brilho do céu, para céu encoberto.	96
Figura 4.24. Análise dos resíduos em função dos dados estimados através do modelo de Perez et al. (1990), e do brilho do céu, para céu claro.	96
Figura 4.25. Correlação entre as iluminâncias difusas e as calculadas através dos coeficientes originais e os locais, para 2003 e 2005.	98
Figura 4.26. Correlação entre as iluminâncias diretas medidas e as calculadas através dos coeficientes originais e os locais, para 2003 e 2005.	100

Lista de Tabelas

2. Revisão Bibliográfica.....	21
Tabela 2.1. Categorias de claridade do céu de acordo como intervalo do índice de claridade de céu.....	32
Tabela 2.2. Local e clima dos conjuntos de dados, usados no modelo de Perez et al. (1990).....	33
Tabela 2.3. Avaliação estatística dos modelos para estimar a eficácia luminosa difusa, com coeficientes originais e calculados para Florianópolis.	39
Tabela 2.4. Avaliação estatística dos modelos para estimar a eficácia luminosa direta, para as cinco cidades.....	42
Tabela 2.5. Componentes da Iluminância no TropLux – Versão 3.02.	54
3. Metodologia	59
Tabela 3.1. Cidades e latitudes simuladas e arquivos climáticos utilizados	63
Tabela 3.2. Coeficientes para cálculo das iluminâncias externas.....	66
4. Resultados e Discussão	70
Tabela 4.1. Diferença absoluta média encontrada para cada cidade simulada.....	83
Tabela 4.2. Iluminância medida difusa média e avaliação estatística do modelo de Perez, para cada classe de céu, a partir de dados de Florianópolis de 2003 a 2005.....	92
Tabela 4.3. Iluminância medida direta média e avaliação estatística do modelo de Perez, para cada classe de céu, a partir de dados de Florianópolis de 2003 a 2005.....	95
Tabela 4.4. Coeficientes para cálculo das iluminâncias difusas externas	97
Tabela 4.5. Avaliação dos coeficientes locais para o cálculo das iluminâncias difusas.	99
Tabela 4.6. Coeficientes para cálculo das iluminâncias diretas externas	99
Tabela 4.7. Avaliação dos coeficientes locais para o cálculo da iluminâncias diretas.	101

Resumo

Para uma boa avaliação do desempenho termo-energético da edificação é necessário analisar também o uso da iluminação natural, uma vez que esta influencia na carga térmica. Programas de simulação, como o Energyplus, unem a simulação termo-energética com o cálculo da iluminação natural; para tanto, utiliza o modelo de céu dinâmico desenvolvido por Perez et al. (1990), onde as iluminâncias são calculadas a partir do arquivo climático utilizado nas simulações. Desta forma, este trabalho tem como objetivo avaliar o cálculo da iluminação natural efetuado por este programa, através da comparação das iluminâncias internas calculadas através da simulação realizada pelos programas Energyplus, Daysim/Radiance e TropLux. Para esta avaliação também são comparadas as iluminâncias externas calculadas pelo Energyplus com as medidas. As simulações foram realizadas para salas quadradas, retangulares rasas e profundas; com três tamanhos diferentes de aberturas, para a cidade de Florianópolis. A partir destas simulações obtiveram-se valores de iluminância e fator de luz diurna. Para uma melhor verificação da diferença entre os programas foram realizadas simulações, para o modelo de sala quadrada com abertura em 50% da fachada, para as cidades de Belém, Brasília, Florianópolis, Genebra e Oslo. Em um segundo momento foi avaliado o modelo de céu utilizado pelo programa Energyplus, através da comparação entre as iluminâncias externas obtidas através da Estação de Medição de Iluminação Natural de Florianópolis (EMIN-Floripa) e as calculadas, para cada uma das classes de céu. A partir destas análises encontrou-se uma diferença superior a 50% entre as iluminâncias calculadas pelos programas que utilizam modelos de céu diferentes. Já a comparação entre o fator de luz diurna deixa evidente a deficiência que o programa Energyplus apresenta para resolver a reflexão interna, principalmente para salas mais profundas. Outro fator analisado é o cálculo da iluminância externa horizontal, tanto a difusa quanto a direta. Esta análise mostra que as iluminâncias calculadas através do modelo proposto por Perez et al. (1990) resultam em valores superiores aos medidos; onde as classes de céu encoberto apresentam maior erro para as iluminâncias. A principal conclusão deste trabalho foi a verificação das deficiências existentes no programa Energyplus que tem maior influência no cálculo da iluminação natural, sendo elas: o cálculo da parcela de luz refletida no ambiente, e o cálculo das iluminâncias externas maiores que as medidas; surgindo a necessidade de desenvolvimento de um modelo de céu dinâmico mais adequado às características de céu encontrado em Florianópolis.

Abstract

In order to evaluate the energy performance of a building it is necessary to assess the use of daylight, as it can influence the thermal load in the building. Computer programmes such as Energyplus can predict daylight, thermal loads and energy consumption in a building. Energyplus uses the sky model developed by Perez et al. (1990) for dynamic daylight simulation. Thus, the main objective of this study is to evaluate the calculation of daylight levels predicted by this programme by comparing the internal illuminances calculated by Energyplus, Daysim/Radiance and TropLux. For this evaluation the external calculated illuminances are also compared with the external measured ones. The simulations were performed for rooms with three different geometries (square, shallow and deep) and different window sizes, under the climatic conditions of Florianópolis. From the computer simulations, illuminance levels and daylight factors were obtained. In order to evaluate the programmes, a square room with a window to wall ratio of 50%, was simulated for the climatic conditions of five cities: Belém, Brasília, Florianópolis, Geneva and Oslo. Then, the sky model considered by Energyplus was assessed by comparing the calculated and the measured external illuminances for Florianópolis, for each sky clearness index. From these analyses a difference greater than 50% between the programmes with different sky models was found. By comparing the daylight factors it was found that Energyplus does not assess the internal reflected component properly, especially for deep rooms. Both diffuse and direct external horizontal illuminances were also analysed. This analysis showed that illuminances calculated by using the model developed by Perez et al. (1990) are higher than actual illuminances; and they are even higher for overcast sky. The main conclusion obtained from this study is that Energyplus has limitations to perform daylight calculations; and such limitations are due to deficiencies on the method to estimate the daylight internal reflected component and the external horizontal illuminances. This shows that there is need of developing a sky model for dynamic simulation of daylight more adequate for the sky conditions of Florianópolis.

1. Introdução

1.1 Justificativa

Os recursos a partir dos quais a energia é gerada, até pouco tempo, eram tidos como abundantes e baratos, facilitando o uso exacerbado e a dependência aos mesmos. Este fato uniu os hábitos da sociedade ao uso de energia, desde o transporte, as indústrias, os escritórios, o lazer e, principalmente, o crescimento da economia do país.

Após muitos anos de uso intenso dos recursos e da dependência que se estabeleceu sobre eles, apareceram crises provenientes da escassez dos mesmos, como a crise do petróleo, na década de 70, que afetou a economia mundial e despertou olhares para outras fontes de energia. No Brasil, a crise energética de 2001, ocasionada pelos baixos níveis de água nos reservatórios das usinas hidrelétricas, e pela falta de investimentos no setor, provocou o racionamento de energia nas regiões sudeste e centro-oeste (BRASIL, 2007). Esta crise trouxe efeitos como grandes impactos à economia e aos costumes da população, através de políticas de conscientização contra o desperdício e a favor de equipamentos mais eficientes.

Hoje, sabe-se da escassez dos combustíveis fósseis e da crescente demanda energética, necessitando investimentos contínuos nesta área para garantir o fornecimento de energia para todos os setores. Outra preocupação está nos poluentes emitidos para a atmosfera devido à queima de combustíveis fósseis para a geração de energia, e da decomposição da matéria orgânica nos reservatórios das usinas hidrelétricas. Segundo Geller (2003), desde a era pré-industrial ocorreu um aumento de 31% nos níveis de dióxido de carbono na atmosfera e de 151% nos níveis de metano, sendo estes dois gases os maiores responsáveis pelo aquecimento global.

Os problemas ambientais causados pelo aquecimento global e conseqüente mudança climática trouxeram novas preocupações à questão energética: a geração de energia limpa, reduzindo as emissões de poluentes no ambiente; além da redução do consumo de energia através da diminuição do desperdício e aumento da eficiência dos equipamentos e edificações.

Na construção civil, a eficiência energética refere-se às edificações que proporcionam as mesmas condições ambientais com um consumo energético menor (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2004). O desempenho energético e ambiental da

edificação é resultado da relação que a mesma tem com o ambiente onde está inserida. Isto mostra que as decisões do profissional quanto aos materiais a serem utilizados, orientação solar, tamanho das aberturas, aproveitamento da luz natural e cuidados com o ganho ou perda de calor podem tornar o projeto mais adequado às condições climáticas locais e às preocupações atuais.

Estes cuidados são pertinentes também no Brasil, onde a geração de energia teve um crescimento de 3,6% em relação a 2005, e um consumo de energia de 202,9 milhões de tep (tonelada equivalente de petróleo) em 2006, correspondendo a 89,7% da Oferta Interna de Energia (OIE) (BRASIL, 2007). A Figura 1.1, mostra a evolução do consumo da energia elétrica no país, entre 1970 e 2006. Observa-se o crescente consumo até 2001, quando ocorreu uma queda de 6,6% no consumo de energia elétrica, devido à crise de abastecimento de eletricidade que se estabeleceu no país. Esta queda também repercutiu na economia do país, onde o PIB (Produto Interno Bruto) cresceu apenas 1,4% (BRASIL, 2006). Na Figura 1.1 também pode-se observar a importância dos setores industrial e residencial no consumo total da energia elétrica. Estes setores representaram, respectivamente, 48% e 22% do consumo de energia elétrica de 2006, enquanto o setor comercial consumiu 14%, como se pode observar na Figura 1.2.

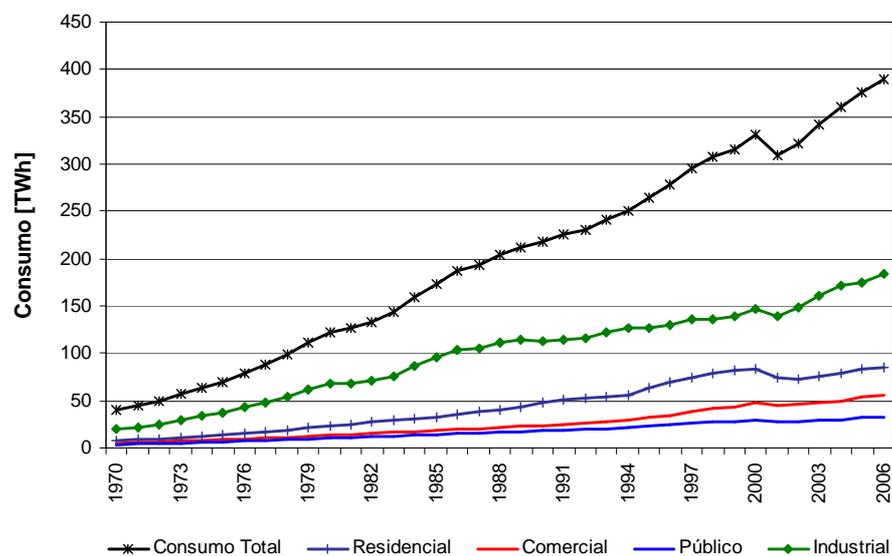


Figura 1.1. Consumo de eletricidade no Brasil.

Fonte: Adaptado de Brasil, 2007.

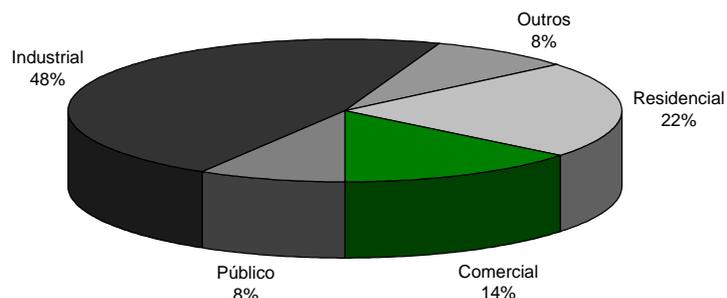


Figura 1.2. Participação setorial no consumo de energia elétrica no país em 2006.

Fonte: Brasil, 2007.

Independentemente do setor, o consumo de energia elétrica em iluminação é elevado, podendo representar um grande potencial de economia de energia. No setor comercial, representado na Figura 1.3, a iluminação equivale a 22% do consumo de energia elétrica; no setor público este uso corresponde a 23% do consumo, conforme a Figura 1.4; 6% no setor industrial (Figura 1.5), e 11% do consumo no setor residencial, conforme Figura 1.6. Assim, a iluminação chega a ser responsável por 10% do consumo total de energia elétrica no país; parcela esta que pode ser reduzida com medidas que propiciem o uso da iluminação natural.

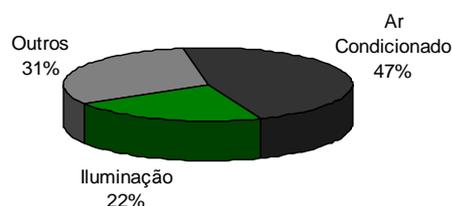


Figura 1.3. Usos finais no Brasil - setor comercial.

Fonte: Correia, 2007a.

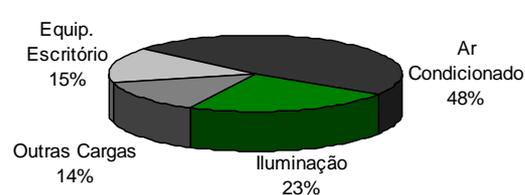


Figura 1.4. Usos finais no Brasil - setor público.

Fonte: Correia, 2007b.

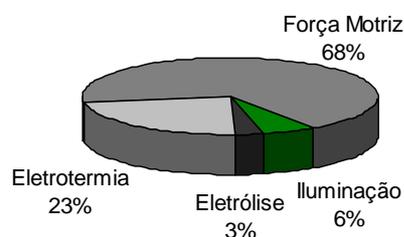


Figura 1.5. Usos finais no Brasil - setor industrial.

Fonte: Correia, 2007c.

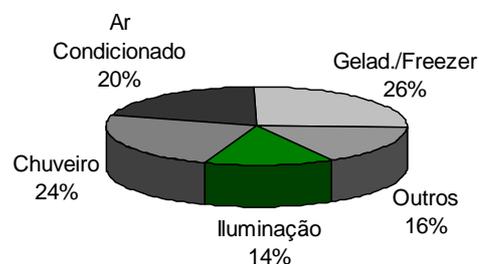


Figura 1.6. Usos finais no Brasil - setor residencial.

Fonte: Correia, 2007d.

Para tornar possível a economia com a iluminação artificial, é necessário que o projeto arquitetônico esteja adequado às condições de iluminação natural e clima do local, evitando a entrada direta dos raios solares, que além do ganho de calor, também propicia luz em excesso, o que pode causar ofuscamento nos usuários do ambiente. O estudo desenvolvido por Ghisi e Tinker (2005) mostra que a adequação do tamanho da abertura pode reduzir consideravelmente o consumo de energia elétrica em edifícios condicionados artificialmente. Outro fator a ser observado para garantir a economia de energia pelo uso da iluminação natural é a escolha de um sistema de controle de iluminação artificial adequado ao projeto. Franzetti, Fraisse e Achard (2004) colocam que a escolha de um sistema de controle de iluminação artificial só é justificável por uma grande redução no consumo de energia; não só da iluminação, mas no consumo total da energia, incluindo o aquecimento e resfriamento da edificação. Em estudo de Atif e Galasiu (2003), realizado em Quebec, no átrio de um edifício iluminado naturalmente com controle da iluminação artificial através de dimmer contínuo, foi verificada uma economia anual de 73% no consumo da iluminação.

Desta forma, observa-se a importância de analisar a economia gerada pelo uso da iluminação natural em conjunto com o ganho de calor através da abertura. Alguns programas como o DOE-2, Esp-r, COMBINE (HONG; CHOU; BONG, 2000) e o Energyplus possibilitam este tipo de análise. Os resultados apresentados pelo Energyplus, referentes às questões termo-energéticas do edifício mostram-se confiáveis (WITTE et al., 2001). No entanto, a parcela da simulação referente à iluminação natural apresenta valores de iluminância maiores do que os esperados, conforme verificado por Ramos (2006) em um estudo preliminar. Este estudo é mostrado no Anexo.

Ao se trabalhar com simulação computacional é importante saber da qualidade dos dados gerados através destas simulações; para isto os programas normalmente passam por um processo de validação. O programa Energyplus, originado através da junção de dois outros programas, BLAST e DOE-2, possui o cálculo da iluminação natural do programa DOE-2 (ENERGYPLUS, 2007a). A validação da iluminação foi realizada para o DOE-2 através da comparação do fator de luz diurna (WINKELMANN; SELKOWITZ, 1985), sem verificar as iluminâncias geradas por este programa. Uma vez que o cálculo da economia gerada pelo uso da iluminação natural é realizado através do nível de iluminação no ambiente, aumentam-se os cuidados necessários nesta análise.

Sabendo da necessidade e da importância de analisar juntamente as cargas térmicas e a iluminação natural e, desta fragilidade no programa Energyplus, este

trabalho busca entender a origem destas deficiências do programa quanto à simulação da iluminação natural.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo avaliar o cálculo da iluminação natural efetuado pelo programa Energyplus.

1.2.2 Objetivos Específicos

Para tornar possível esta avaliação é necessária a realização das análises a seguir:

- Comparar os níveis de iluminação natural interna, gerados pelos três programas de simulação, Energyplus, Daysim/Radiance e TropLux.
- Comparar o fator de luz diurna calculado a partir de cada um destes programas.
- Comparar os dados do arquivo climático de Florianópolis, com os dados medidos.
- Avaliar as iluminâncias horizontais externas geradas através de simulação com as medidas em Florianópolis.
- Verificar a possibilidade do uso de coeficientes, do método de cálculo desenvolvido por Perez, para o clima de Florianópolis.

1.3 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação encontra-se organizada em cinco capítulos: Introdução, Revisão Bibliográfica, Metodologia, Resultados e Conclusão. Na Introdução, fez-se a apresentação do tema a ser desenvolvido, abordando a importância do assunto e os objetivos a serem alcançados.

Na Revisão Bibliográfica, faz-se um estudo do tema proposto na dissertação. Esse capítulo inicia-se com uma breve apresentação do conceito de eficiência energética e da relação com a iluminação natural. São apresentados conceitos da

iluminação natural, e sua avaliação no ambiente, juntamente com alguns estudos que mostram a influência da abertura e do uso da iluminação natural. Em seguida, são apresentados três programas de simulação computacional, que permitem a simulação da iluminação natural: Energyplus, Daysim/Radiance e TropLux. Finalizando com uma apresentação do arquivo climático TRY, com a apresentação das variáveis nele contidas e o processo de estimativa da radiação solar para o mesmo.

O terceiro capítulo apresenta o procedimento metodológico aplicado neste estudo de forma a se obter os objetivos estabelecidos no primeiro capítulo. O capítulo inicia com a apresentação dos modelos para a simulação da iluminação, seguido do método utilizado para a análise da distribuição da iluminação nas salas estudadas, a avaliação das iluminâncias e do fator de luz diurna, para o clima de Florianópolis; e a avaliação das iluminâncias para cidades com diferentes latitudes. Em seguida apresenta-se o método para a avaliação das iluminâncias externas calculadas através do modelo de Perez, além da correção dos índices utilizados nas equações deste modelo.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos através da metodologia apresentada neste trabalho. O capítulo inicia com a análise da distribuição da iluminação natural em uma sala, resultante da simulação de cada programa; seguida das iluminâncias diárias e o fator de luz diurna para cada modelo. Após, realizou-se a análise dos dados encontrados no arquivo climático de Florianópolis, utilizado nas simulações. Por último, foi realizada a análise do modelo de cálculo da iluminação natural utilizado pelos programas Energyplus e Daysim/Radiance.

O quinto capítulo apresenta as conclusões extraídas das análises realizadas a partir dos resultados descritos no quarto capítulo desta dissertação, juntamente com suas limitações e propostas para trabalhos futuros.

2. *Revisão Bibliográfica*

2.1 Introdução

O atual cenário energético, com questões como crises de energia e aquecimento global, leva aos projetistas (arquitetos e engenheiros) a preocupação cada vez maior com a eficiência energética da edificação. Segundo Lamberts, Dutra e Pereira (2004), este conceito consiste na obtenção de um serviço com baixo dispêndio de energia, ou seja, um edifício energeticamente eficiente terá um consumo menor que outro com as mesmas condições ambientais que este. Desta forma, a eficiência energética de uma edificação está diretamente relacionada ao seu desempenho térmico e luminoso.

Quando se trata do desempenho luminoso existem dois fatores a serem analisados: a distribuição e qualidade da luz, relacionados ao conforto, e a economia gerada pelo uso da iluminação natural. Para a verificação da economia gerada, é importante a análise simultânea do desempenho térmico e luminoso, e para tanto é necessária a obtenção de dados confiáveis para a realização desta análise.

A seguir, apresenta-se uma revisão bibliográfica relacionada ao tema abordado nesse trabalho, com ênfase nas pesquisas referentes ao cálculo da iluminação natural.

2.2 Iluminação

Para um edifício ser eficiente energeticamente é necessário atender algumas condições; uma delas é possuir um sistema de iluminação eficiente, ou seja, que assegure condições confortáveis de iluminação no ambiente com um menor consumo de energia. De acordo com Lamberts, Dutra e Pereira (2004), o conforto visual é entendido como a existência de um conjunto de condições que possibilitem ao ser humano desenvolver suas tarefas visuais com o máximo de acuidade e precisão visual, com o menor esforço e menor risco de prejuízos à visão e com reduzidos riscos de acidentes. Para possibilitar esta condição, são necessários: iluminância suficiente com boa distribuição, ausência de ofuscamento e contrastes adequados.

A iluminância suficiente é determinada pela norma NBR 5413 (ABNT, 1992) referente à iluminância de interiores, para diferentes usos, e utilizada para determinar a iluminância de projeto. Esta se relaciona com o trabalho a ser desenvolvido, o usuário e o local; dependendo assim, além do nível de precisão da função, da idade dos usuários, velocidade que a função deve ser executada e refletância do fundo da tarefa. Por exemplo, segundo a mesma norma, os níveis para iluminação geral em área de trabalho variam entre 500 e 2000lx, de acordo com os critérios acima mencionados. No entanto, não é aconselhável o uso de níveis de iluminância altos, para tarefas mais detalhadas, em todo o ambiente de trabalho. Na maioria dos casos, o ideal é que o projeto do sistema de iluminação artificial possua níveis mais baixos de iluminância para a iluminação geral do ambiente, e seja complementado com sistemas adicionais de iluminação na área de trabalho, a serem acionados apenas quando necessário para a realização da tarefa.

A iluminação de um ambiente pode ser feita através da iluminação artificial ou natural, sendo ideal a utilização da iluminação artificial apenas quando a natural não atenda aos níveis desejados para a realização de determinado trabalho. Segundo Galasiu e Veitch (2006), existe a preferência dos usuários pela iluminação natural. Esta preferência está associada ao conforto psicológico, reprodução de cores e, pela crença em ser melhor para a saúde que a luz artificial. O uso da iluminação natural, quando substitui a artificial ou é complementada pela mesma, pode ajudar na redução pela demanda de energia.

2.2.1 Avaliação da iluminação natural no ambiente interno

Outro fator a ser analisado e avaliado quando se utiliza a iluminação natural é a distribuição da luz no ambiente. Em edifícios de escritório normalmente se utiliza a abertura lateral tanto para visão do exterior quanto para a iluminação. Sabe-se que neste posicionamento, os níveis de iluminação são baixos em pontos localizados longe da abertura. Ao mesmo tempo, pontos próximos a esta ou que recebam a incidência direta de raios solares, possuem níveis elevados de iluminação que podem causar ofuscamento nos usuários do ambiente.

O Fator de Luz Diurna (FLD) é comumente utilizado para avaliar a distribuição da luz no ambiente e também o nível de iluminação no mesmo. Segundo a NBR15215-3 (ABNT, 2004), este índice é definido como a razão entre a iluminância em um ponto na superfície de trabalho (E_p), e a iluminância horizontal externa no mesmo instante ($E_{h\ ext}$), de acordo com a Equação 2.1.

$$FLD = \frac{E_p}{E_{hext}} \times 100\% \quad \text{Equação 2.1}$$

Segundo a mesma norma, para o cálculo do FLD, a contribuição da luz direta do sol não é levada em consideração, devido ao ganho de calor, degradação dos materiais e ofuscamento. Assim, por ser calculado apenas através do modelo de céu encoberto, definido pela CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*); o FLD oferece algumas limitações que devem ser levadas em conta ao se avaliar a iluminação do ambiente. Entre elas está o fato de ser invariável quanto à orientação do edifício, por considerar apenas o céu encoberto, que possui uma distribuição de luminâncias homogênea pela abóbada celeste, e não considerar a possibilidade de ocorrência de iluminação excessiva e ganho de calor.

Esta mesma norma, NBR15215-3 (ABNT, 2004), apresenta o procedimento de cálculo da Contribuição da Iluminação Natural (CIN). O cálculo da CIN é baseado na iluminância interna, considerando as componentes celeste, refletida externa e refletida interna, e a iluminância horizontal externa. Para condições de céu encoberto, a CIN assemelha-se ao FLD, apresentando valores constantes para qualquer ponto do ambiente. Para outras condições de céu a CIN apresenta a influência da luz do sol.

Para Nabil e Mardaljevic (2005) os índices de iluminação como o FLD, que levam em consideração apenas as iluminâncias referentes ao céu encoberto padrão, são inaplicáveis para as condições reais onde a contribuição da luz direta do sol leva a grandes diferenças entre a iluminância máxima e mínima. Assim, a Iluminância Útil da Luz Natural (IULN) tem a intenção de propiciar a avaliação da iluminação natural no ambiente interno de forma mais eficaz. A IULN é dada pela frequência da iluminância em um determinado tempo, de acordo com faixas pré-estabelecidas. Assim, o índice permite que se verifique qual porção da sala possui valores úteis (não muito baixos, nem valores que possam causar ofuscamento ou ganho de calor), e qual a porcentagem de ocorrência durante um ano.

No estudo de Nabil e Mardaljevic (2005), as seguintes faixas para a análise da distribuição da iluminação natural são sugeridas:

a. Faixa de iluminâncias menores que 100 lx: são consideradas insuficientes para ser a única fonte de iluminação ou para contribuir significativamente com a iluminação artificial.

b. Faixa de iluminâncias entre 100 lx e 500 lx (ou iluminância determinada para o tipo de tarefa a ser realizada no ambiente): são consideradas úteis para a contribuição da iluminação artificial.

c. Faixa de iluminâncias entre 500 e 2000 lx: são consideradas desejadas ou pelo menos toleráveis.

d. Faixa de iluminâncias superiores a 2000 lx: são consideradas excessivas, podendo causar desconforto visual e/ou térmico.

Esta faixa da IULN, que representa a iluminação em excesso (iluminâncias superiores a 2000lx), mostra que apesar de possuir níveis de iluminação maiores que o estabelecido, os períodos em que ocorre podem não possibilitar a economia de energia. Isto ocorre uma vez que o usuário, para se proteger do desconforto causado pela iluminação excessiva, possivelmente acionará cortinas ou outros sistemas de proteção; e desta forma reduzirá a entrada da iluminação natural.

O estudo de Nabil e Mardaljevic (2006) mostra ainda uma comparação entre três índices de avaliação: fator de luz diurna (FLD), Autonomia da luz natural, frequência em que uma iluminância mínima ocorre no plano de trabalho durante um ano, e Iluminância Útil da Luz Natural (IULN). Simulou-se, através do programa Radiance, para o clima de Londres, o modelo mostrado na Figura 2.1, formado por quatro pavimentos livres, com aberturas nas quatro fachadas e lanternim, sem sombreamento nas aberturas; com refletâncias nas paredes, piso e teto iguais a 0,5, 0,3 e 0,7, respectivamente.

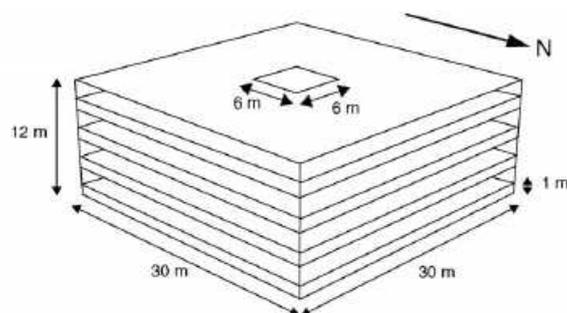


Figura 2.1. Modelo de edifício estudado, com aberturas nas quatro fachadas e lanternim, e refletâncias iguais a: paredes - 0,5; piso - 0,3; e teto - 0,7.

Fonte: Nabil e Mardaljevic, 2006.

A Figura 2.2 mostra a comparação entre os três índices. O primeiro mapa representa a distribuição das iluminâncias segundo o fator de luz diurna, onde o FLD é superior a 10% próximo às aberturas e diminui à medida que se afasta das mesmas, informando apenas o nível de iluminação. O segundo mapa mostra o período do ano em que a iluminância é superior a 500lx, correspondendo a mais de 60% do tempo em mais de 80% da área da sala, no entanto não fornece informações sobre iluminação excessiva que possa causar ofuscamento no usuário do ambiente. No terceiro mapa,

referente à IULN, são apresentados valores baixos para a faixa de iluminância útil, entre 100 e 2000 lx, próximo às aberturas. Através do gráfico percebe-se que o baixo aproveitamento da iluminação natural ocorre devido às iluminâncias excessivas que ocorrem nesta área. Através desta comparação percebe-se que índices como o FLD e a autonomia da luz natural camuflam a distribuição da luz, mostrando valores excessivos como níveis aceitáveis de iluminação, causando desconforto visual e/ou térmico.

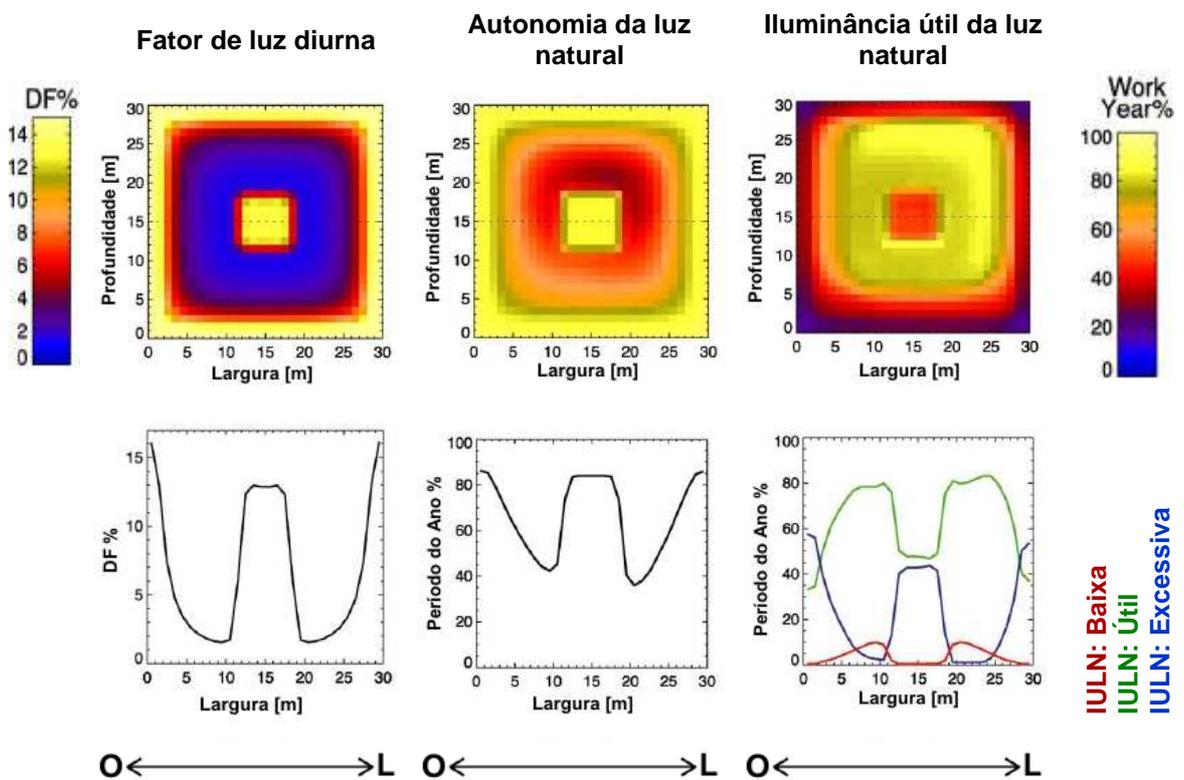


Figura 2.2. Gráficos de Fator de Luz Diurna, Autonomia da luz natural e Iluminância Útil da Luz Natural.

Fonte: Nabil e Mardaljevic, 2006.

Para a análise da iluminação natural através da IULN, é necessário obter-se dados referentes às horas de trabalho de um ano, assim os dados de iluminância de simulação devem ser gerados de forma dinâmica, a partir de arquivos climáticos, ou através de modelos de céu, analisados através da proporcionalidade de ocorrência de cada um deles no local escolhido. Para isto são necessários estudos como o desenvolvido por Souza e Pereira (2004), onde foram levantadas as ocorrências de tipos de céu para Florianópolis, com base nos dados da Estação de Medição de Iluminação Natural brasileira (EMIN), localizada em Florianópolis. Através dos dados de 2002 e 2003 foi possível verificar que os meses de fevereiro e março apresentam

maior ocorrência de céus claros, e nos meses de junho e julho é mais freqüente o céu encoberto, de acordo com a Figura 2.3.

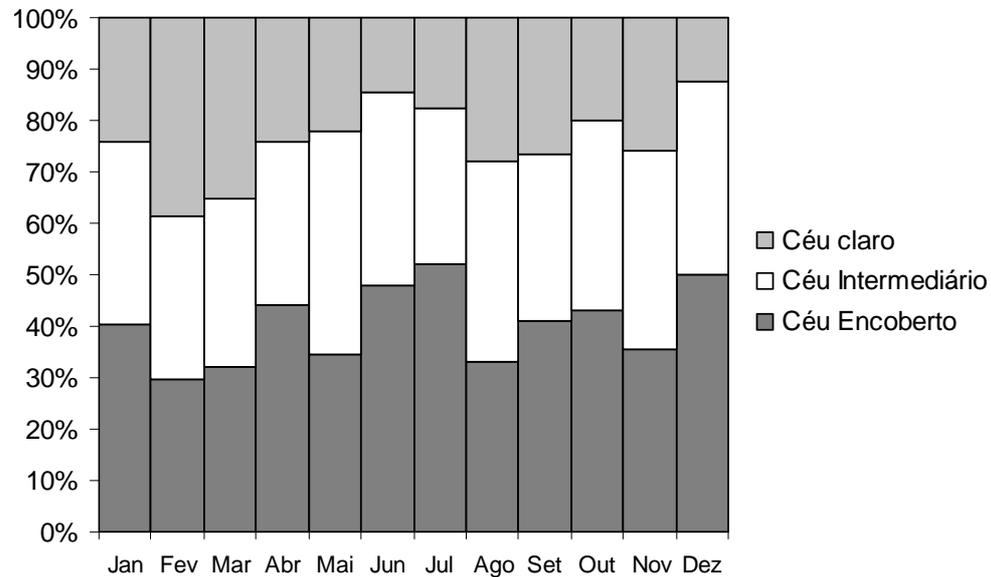


Figura 2.3. Probabilidade de ocorrência dos tipos de céu em Florianópolis.

Fonte: Adaptado de Souza e Pereira, 2004.

2.2.2 Cálculo da iluminação natural

Para as análises mencionadas no item anterior, é necessário possuir dados de iluminância externa e luminâncias da abóbada celeste e do zênite. A NBR15215-3 (ABNT, 2004), referente à determinação da iluminação natural em ambientes internos, apresenta um método gráfico para a determinação do FLD e da iluminância. Este método baseia-se nas luminâncias (fluxo emitido em determinada direção) das 244 subdivisões da abóbada celeste ilustradas na Figura 2.4, de acordo com a NBR, e no ângulo sólido determinado por um ponto P, em um plano horizontal e a abertura, conforme a Figura 2.5.

Através de máscaras de obstrução e Diagramas de Contribuição Relativa de Luz (DCRL), que representam a projeção estereográfica da abóbada celeste, é possível calcular a contribuição de iluminação natural (CIN) de um ou mais pontos localizados em um plano horizontal. Nos DCRL cada zona representa, numericamente, sua contribuição relativa para a iluminância de um ponto no plano horizontal.

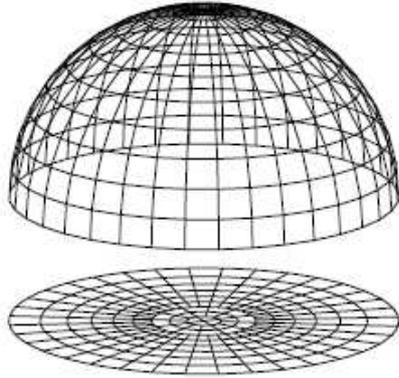


Figura 2.4. Hemisféra de raio unitário.

Fonte: ABNT, 2004.

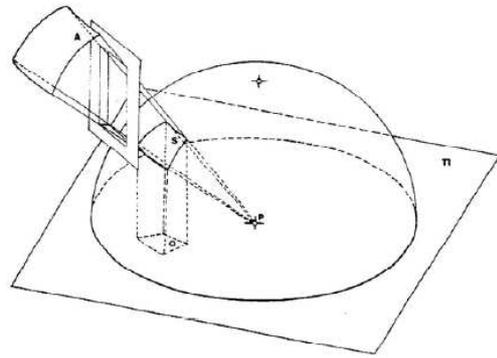


Figura 2.5. Princípio do ângulo sólido projetado.

Fonte: ABNT, 2004

O método apresentado pela norma é baseado na consideração dos vários caminhos através dos quais a luz natural atinge um ponto no interior de uma edificação. De acordo com a NBR 15215-3 (ABNT, 2004), a luz admitida no interior das edificações é proveniente de três parcelas: luz direta do sol, luz difundida na atmosfera (abóbada celeste) e luz refletida no entorno. A luz distribuída pelo interior do ambiente é composta de três componentes: componente celeste (CC), componente refletida externa (CRE) e componente refletida interna (CRI), conforme a Figura 2.6.

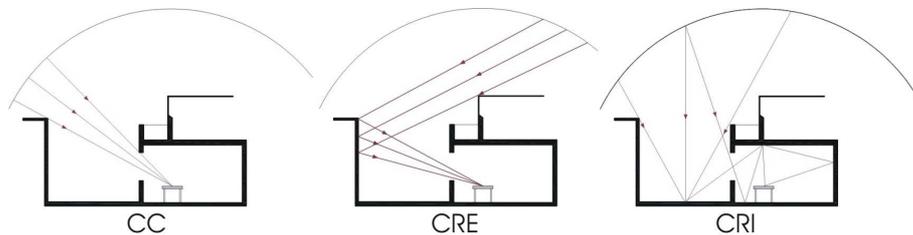


Figura 2.6. Fontes da luz natural distribuída no ambiente interno.

Fonte: ABNT, 2004.

O cálculo da CIN é feito através da soma das três parcelas de luz recebidas pelo ponto analisado, conforme mostrado na Equação 2.2, corrigidas pelos fatores redutores das mesmas, como a transmissividade, manutenção e caixilho do vidro.

$$CIN = [CC + CRE + (FM \times CRI)] \times K_T \times K_M \times K_C \quad \text{Equação 2.2}$$

onde:

- CIN: Contribuição de iluminação natural [%];
- CC: Componente celeste [%];
- CRE: Componente refletida externa [%];
- CRI: Componente refletida interna [%];
- FM: Fator de manutenção das superfícies internas [%];

- K_T : Transmissividade do vidro [%];
 K_M : Fator de manutenção dos vidros [%];
 K_C : Fator de caixilho [%].

Tanto a CIN quanto o FLD são proporcionais à iluminância horizontal externa. Assim, a CIN assemelha-se ao FLD para modelos sem variação de luminância em relação ao azimute, como o modelo de céu encoberto da CIE. Para outros tipos de céu, o DCRL apresenta contribuições diferentes para cada subdivisão da abóbada celeste, resultando em um coeficiente mais preciso.

Este método, apesar de mais completo que o FLD, por apresentar diferenciação entre os tipos de céu e posição do sol, é bastante trabalhoso e depende de dados da iluminância externa, e como dito anteriormente estes dados são de difícil acesso. Desta forma é mais recomendado para utilização nas análises iniciais do projeto.

2.2.3 Modelos de cálculo da eficácia luminosa e iluminação natural

De acordo com Perez et al. (1990), a simulação da iluminação natural em ambientes complexos (com proteção solar, formas não retangulares, e outros) requer conhecimento de dados precisos da distribuição da luz no céu. No entanto, por serem muitos os dados e de difícil mensuração, há a necessidade de se confiar em modelos que possibilitam o cálculo dos mesmos. Neste item serão apresentados alguns modelos de cálculo da eficácia luminosa e de iluminância. A eficácia luminosa da luz natural é definida como a relação entre a iluminância (E) e a radiação solar (I). Esta variável possibilita o estudo da luz natural a partir de dados mais fáceis de serem coletados e disponibilizados para o usuário, como a radiação solar direta e difusa.

Robledo e Soler (2001a, 2001b) desenvolveram modelos da eficácia luminosa direta e difusa, para todos os tipos de céu, a partir de dados coletados entre junho de 1994 e maio de 1995, em Madri (40°26'N). A partir de um conjunto de dados representados na Figura 2.7, Robledo e Soler (2001a), desenvolveram o modelo para o cálculo da eficácia luminosa baseado na altura solar e no brilho do céu; os resultados obtidos através da Equação 2.3 apresentam um erro quadrático médio de 8,7% e um viés médio de -0,8%. A Equação 2.4 mostra o procedimento de cálculo do índice do brilho do céu.

$$K_b = 134,27(\text{sen}\alpha)^{0,269} e^{-0,0045\alpha} (1,045 - 0,427\Delta) \quad \text{Equação 2.3}$$

onde:

K_b : Eficácia luminosa direta [lm/W];

α : Altura solar [°];

Δ : Brilho do céu, adimensional.

$$\Delta = \frac{I_{Dh} \times m}{I_0} \quad \text{Equação 2.4}$$

onde:

Δ : Índice do brilho do céu, adimensional;

I_{Dh} : Radiação difusa horizontal [W/m²];

m : Massa de ar óptica relativa, pode ser determinada por: $m = 1 / \text{sen}\gamma_s$;

γ_s : Altura solar [rad];

I_0 : Radiação extraterrestre [W/m²].

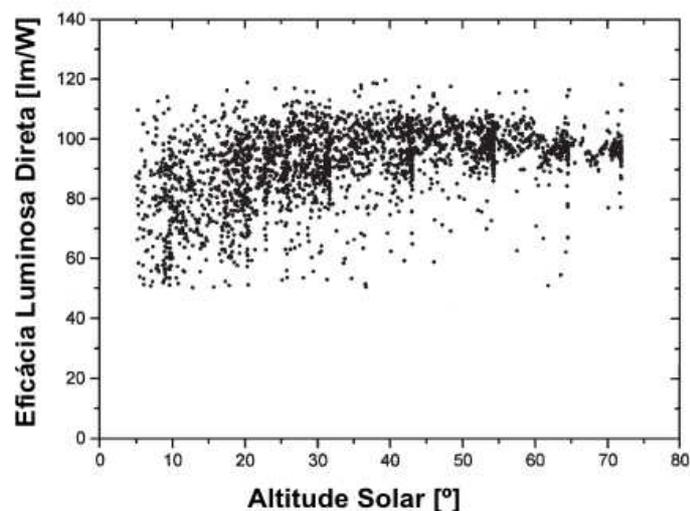


Figura 2.7. Eficácia luminosa direta em função da altura solar para todos os tipos de céu.

Fonte: Robledo e Soler, 2001a.

A Figura 2.8 mostra os dados utilizados para o desenvolvimento do modelo para o cálculo da eficácia luminosa difusa. Este modelo, apresentado na Equação 2.5, possui um erro maior que o encontrado para a eficácia luminosa direta, onde, para todos os tipos de céu, possui um erro quadrático médio de 11,5% e um viés médio de -1,3%.

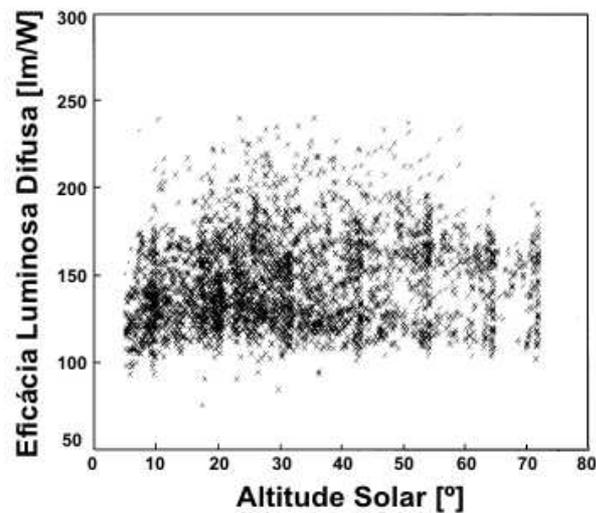


Figura 2.8. Eficácia luminosa difusa em função da altura solar para todos os tipos de céu.

Fonte: Robledo e Soler, 2001b.

$$K_d = 86,88(\text{sen}\alpha)^{-0,034} \Delta^{-0,266} \quad \text{Equação 2.5}$$

onde:

K_d : Eficácia luminosa difusa [lm/W];

α : Altura solar [°];

Δ : Brilho do céu, adimensional.

Perez et al. (1987) propõe o uso mais amplo dos dados solares, extrapolando-os em dados de iluminação necessários para a avaliação das edificações; o modelo final baseado nestes dados é utilizado em programas de simulação como Energyplus e Daysim/Radiance. Segundo os mesmos autores, a partir da combinação de três parâmetros básicos, pode-se construir um espaço tridimensional que representa todas as possibilidades de condições do céu, desde muito claro até o céu encoberto escuro. As coordenadas escolhidas para delimitação deste espaço foram: ângulo zenital (Z), índice de brilho do céu (Δ) e o índice de claridade do céu (ϵ), definidos em Perez et al. (1990). Um exemplo desta parametrização pode ser visto na Figura 2.9.

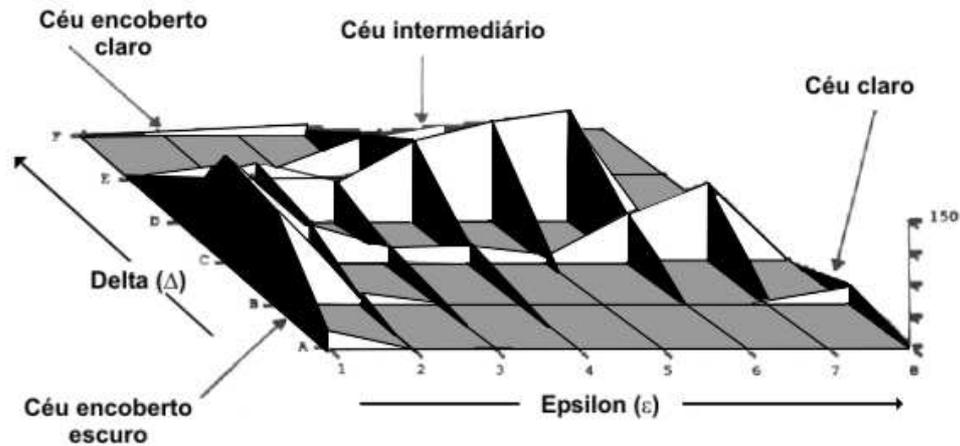


Figura 2.9. Exemplo da parametrização das condições de céu

Fonte: Perez et al., 1987.

Utilizando a parametrização acima e dados coletados em Albany, Perez et al. (1987) analisaram a variação da eficácia luminosa em relação ao brilho do céu (Δ) e claridade do céu (ϵ). Na Figura 2.10, verifica-se que a eficácia luminosa global (K_G) diminui com o brilho (Δ) quando ϵ é constante. Verifica-se também que a eficácia luminosa global decresce com o aumento de ϵ , que mostra a contribuição relativa da radiação direta. Para a eficácia luminosa difusa (K_D), ilustrada na Figura 2.11, percebe-se que esta também diminui com o brilho (Δ) quando ϵ é constante, e, no entanto aumenta com ϵ para um Δ constante.

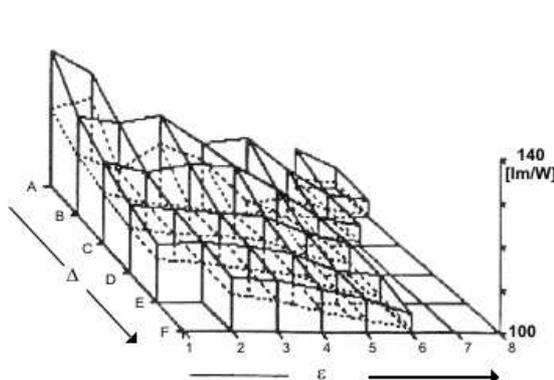


Figura 2.10. Variação da eficácia luminosa global com Δ e ϵ , para Z entre 35° e 50°.

Fonte: Perez et al., 1987.

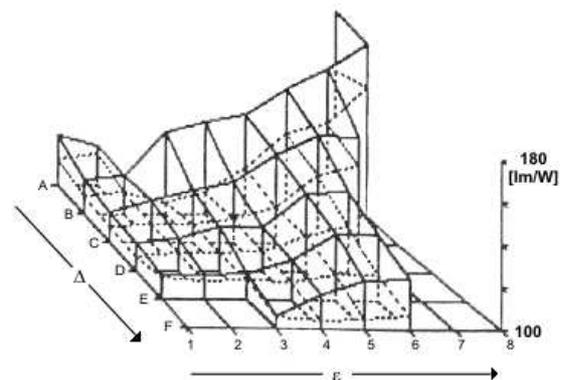


Figura 2.11. Variação da eficácia luminosa difusa com Δ e ϵ , para Z entre 65° e 75°.

Fonte: Perez et al., 1987.

Wright, Perez e Michalsky (1989) analisaram a influência da umidade do ar na variação da eficácia luminosa direta (K_B), uma vez que com o aumento do ângulo

solar, os raios passam por uma maior massa de ar antes de atingir a superfície terrestre, aumentando a atenuação devido à absorção do vapor de água e aerossóis durante o caminho percorrido pelo raio solar. Verificou-se que para céu claro, a eficácia luminosa direta aumenta com o vapor de água na atmosfera, a radiação direta é atenuada principalmente na parte infravermelha do espectro pela absorção da água, o aumento de aerossóis no ar não afeta a eficácia luminosa direta. Para céu intermediário, o nível de vapor de água na atmosfera diminui a eficácia luminosa direta, como há mais partículas de aerossóis onde o vapor de água pode condensar. A partir destes dados verificou-se a necessidade de adicionar este parâmetro ao modelo de conversão da radiação solar em iluminância.

Desta forma, o modelo desenvolvido por Perez et al. (1990) utiliza quatro parâmetros para definir a iluminância: ângulo zenital (Z), índice do brilho do céu (Δ), índice de claridade do céu (ϵ) e vapor de água na atmosfera (W). Destes, o índice de claridade do céu é utilizado para definir o tipo de céu (de encoberto a claro) e os coeficientes a serem utilizados para o cálculo das iluminâncias. A Tabela 2.1 mostra os limites de cada categoria desta classificação, de acordo com o índice de claridade calculado a partir da **Equação 2.6**.

Tabela 2.1. Categorias de claridade do céu de acordo como intervalo do índice de claridade de céu.

Categoria	ϵ	
	Limite inferior	Limite superior
1. Encoberto	1	1,065
2.	1,065	1,230
3.	1,230	1,500
4.	1,500	1,950
5.	1,950	2,800
6.	2,800	4,500
7.	4,500	6,200
8. Claro	6,200	-

Fonte: Perez et al., 1990.

$$\epsilon = \frac{\left[\frac{(I_{Dh} + I)}{I_{Dh}} + kZ^3 \right]}{(1 + kZ^3)}$$

Equação 2.6

onde:

- ε : Índice de claridade do céu, adimensional;
 I_{Dh} : Radiação difusa horizontal [W/m^2];
 I : Radiação normal direta [W/m^2];
 k : Constante igual a 1,041;
 Z : Ângulo zenital [rad].

Para o modelo da eficácia luminosa foram utilizados dados coletados em seis cidades, relatadas na Tabela 2.2, a partir dos quais os modelos foram derivados experimentalmente, desenvolvidos, para cada caso, a partir do método de ajuste dos quadrados mínimos.

Para o desenvolvimento da eficácia luminosa global (K_G), relacionaram-se os dados de medição cruzando a eficácia luminosa global com diversas condições de céu, como mostrado na Figura 2.12. Nesta, observa-se a variação exponencial da eficácia luminosa global com o brilho do céu quando o mesmo está encoberto (d); e a pouca influência do ângulo zenital para céu claro (c), que se torna um pouco mais evidente para ocasiões de céu encoberto (a).

Tabela 2.2. Local e clima dos conjuntos de dados, usados no modelo de Perez et al. (1990).

Local	Latitude	Clima- principais características	Conj. dados e Frequência
Genebra, Suíça	46°12'N	Temperado marítimo, com influencia continental e persistente nebulosidade.	1 ano, horários
Albany, EUA	42°39'35"N	Continental úmido.	3 anos, horários. 2 anos, 15min.
Nova Iorque, EUA	40°47'N	Continental úmido com influência marítma e elevado ambiente urbano.	1 ano, 15 min.
Farmingdale, EUA	40°11'49"N	Continental úmido com influência marítma e ambiente urbano	1 ano, 15 min.
Oswego, EUA	43°27'17"N	Continental úmido, bacia de grandes lagos	6 meses, 15 min.
Glens Falls, EUA	43°18'44"N	Continental úmido	6 meses, 15 min.

Fonte: Adaptado de Perez et al., 1990.

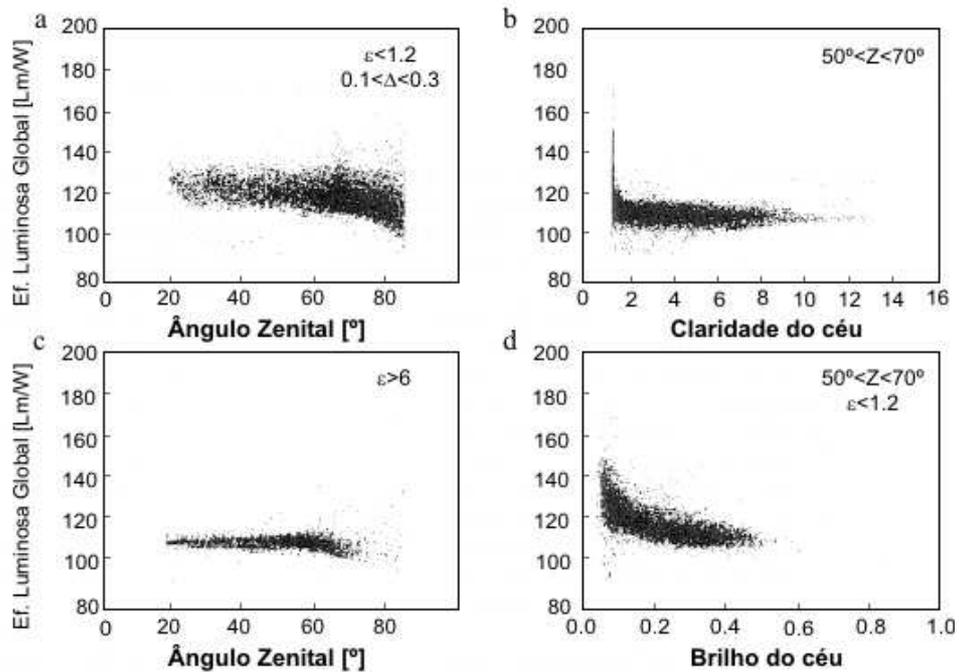


Figura 2.12. Variações da eficácia global em função de: a. ângulo zenital para condições céu encoberto; b. claridade do céu para um ângulo zenital limitado; c. ângulo zenital para céu claro e, d. brilho do céu para céu encoberto. Com dados de Nova Iorque e Genebra.

Fonte: Perez et al., 1990.

A partir de 25000 dados, Perez et al. (1990), chegaram à Equação 2.7, que combina os parâmetros, anteriormente mencionados, com índices diferentes para cada categoria da claridade do céu, mostradas na Tabela 2.1. A Figura 2.13 ilustra o resultado do modelo, mostrando a variação da eficácia luminosa global de acordo com a claridade (ϵ) e brilho do céu (Δ). Nesta imagem, as áreas em que não existem valores da eficácia luminosa, representam situações que não são possíveis de ocorrer.

$$E_G = I_G [a_i + b_i W + c_i \cos(Z) + d_i \ln(\Delta)] \quad \text{Equação 2.7}$$

onde:

- E_G : Iluminância global horizontal [lx];
 I_G : Radiação global horizontal [W/m²];
 W : Vapor de água na atmosfera [cm];
 Z : Ângulo zenital [rad];
 Δ : Brilho do céu, adimensional;
 a_i, b_i, c_i, d_i : Coeficientes determinados para cada tipo de céu.

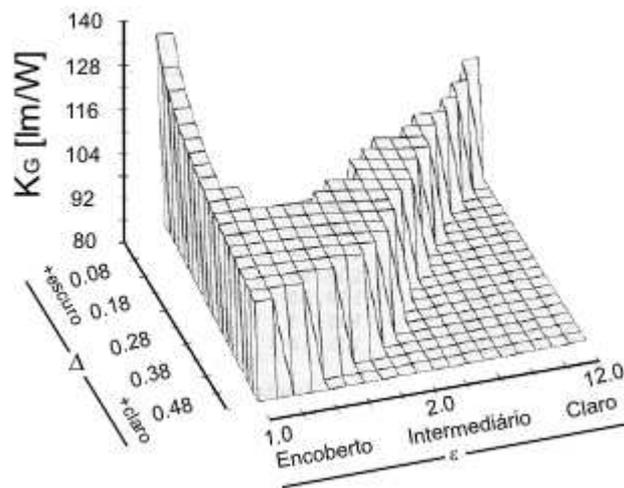


Figura 2.13. Superfície Polinomial com variação da eficácia luminosa global (K_G) em função da claridade do céu (ϵ) e brilho do céu (Δ), para ângulo zenital e temperatura constantes.

Fonte: Perez et al., 1990.

As Figuras 2.14 e 2.15 mostram a variação da eficácia luminosa difusa (K_D) em relação ao índice de claridade do céu e ao ângulo zenital, respectivamente. A primeira mostra o aumento da eficácia luminosa difusa à medida que o céu está mais claro; a segunda, com dado apenas de céu claro, mostra o aumento da eficácia luminosa difusa como aumento do ângulo zenital. A Figura 2.16 mostra o modelo de Perez et al. (1990) para a eficácia luminosa difusa (K_D), que varia entre 110 lm/W para céu encoberto até 150 lm/W para condições de céu claro. A figura mostra que a D_{ef} aumenta com ϵ quando Δ é constante e diminui com Δ para ϵ constante.

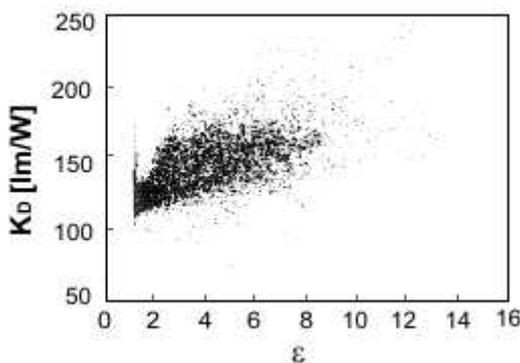


Figura 2.14. Variação da eficácia luminosa difusa (K_D) em função da claridade do céu.

Fonte: Perez et al., 1990.

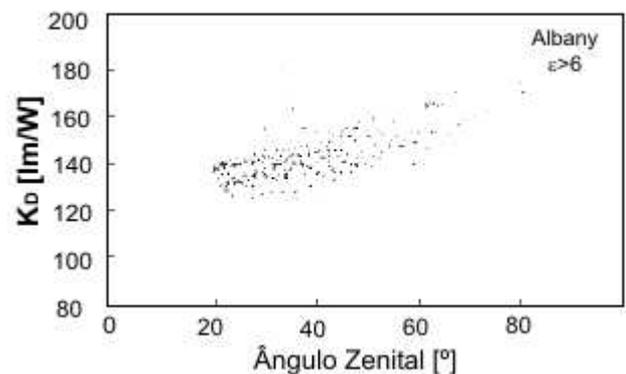


Figura 2.15. Variação da eficácia luminosa difusa (K_D) para dados de Albany, em função do ângulo zenital para céu claro.

Fonte: Perez et al., 1990.

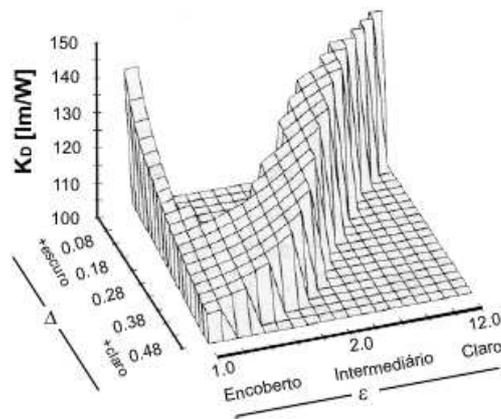


Figura 2.16. Superfície Polinomial com variação da eficácia luminosa difusa (K_D) em função da claridade do céu (ϵ) e brilho do céu (Δ), para ângulo zenital e temperatura constantes.

Fonte: Perez et al., 1990.

De acordo com o modelo de Perez et al. (1990), para a eficácia luminosa direta (K_B), tem-se o modelo representado na Figura 2.17, onde nota-se o efeito acentuado da umidade do ar. A eficácia luminosa direta diminui com o aumento a temperatura de orvalho (T_d) para as condições de céu intermediário, enquanto aumenta para o céu claro, devido à absorção da radiação na faixa do infravermelho do espectro.

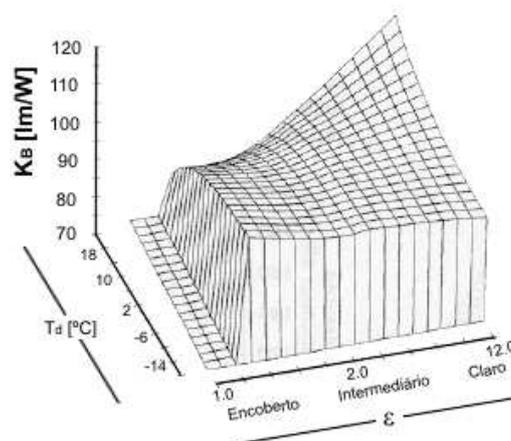


Figura 2.17. Superfície Polinomial com variação da eficácia luminosa direta (K_B) em função da claridade do céu (ϵ) e brilho do céu (Δ), para ângulo zenital e temperatura constantes.

Fonte: Perez et al., 1990.

O modelo desenvolvido por Perez et al. (1990) possibilita a utilização de dados climáticos, como radiação e temperatura, para o cálculo de parâmetros

utilizados para a análise da iluminação no ambiente. Este modelo pode ser utilizado: juntamente com o FLD para uma análise mais detalhada da iluminação no ambiente, para o cálculo da IULN ou para programas de simulação computacional. Sendo, no entanto, necessária uma verificação e o uso cauteloso dos dados encontrados através deste modelo.

Modelos numéricos para a previsão da eficácia luminosa ou da iluminância externa nem sempre apresentam a melhor adaptação aos dados medidos em todos os climas. A avaliação para estes modelos em geral é realizada através dos indicadores estatísticos: erro quadrático médio (EQM), desvio absoluto entre o valor estimado e o real; e o viés médio (viésM), que reflete a tendência do modelo em subestimar ou superestimar valores.

Souza e Robledo (2004) analisaram os modelos de eficácia luminosa difusa, desenvolvidos por Muneer (Equação 2.8), Chung (Equação 2.9) e Robledo (Equação 2.5); confrontando dados de medição de Florianópolis com os calculados pelos modelos originais e modelos com os coeficientes corrigidos para Florianópolis. Para o estudo foram utilizados dados de iluminância horizontal e radiação difusa, coletados entre janeiro de 2002 e maio de 2003 em Florianópolis.

$$K_d = 130,2 - 39,828k_t + 49,979k_t^2 \quad \text{Equação 2.8}$$

onde:

K_d : Eficácia luminosa difusa [lm/W];

k_t : índice de claridade do céu (razão entre radiação global e radiação extraterrestre), adimensional

$$K_d = 135,3 - 25,7CR \quad \text{Equação 2.9}$$

onde:

K_d : Eficácia luminosa difusa [lm/W];

CR: Parcela de nuvens (razão entre radiação difusa e global), adimensional.

A Figura 2.18 mostra a correlação entre os dados medidos e os calculados através dos modelos de Muneer, Chung e Robledo, com os coeficientes originais e locais. Nos gráficos percebe-se que o modelo de Robledo apresenta uma melhor correlação, tanto para os coeficientes originais, quanto os locais. A Tabela 2.3 mostra a melhoria do comportamento dos modelos quando os coeficientes usados são os

para Florianópolis (27°40'S), o modelo de Robledo que possuía o maior erro quadrático médio, 37,7% para o céu claro, a partir dos coeficientes locais passou a um erro de 9%. Já os outros modelos não apresentaram alterações significativas quanto ao erro quadrático médio. O modelo de Robledo apresentou os menores índices, com um EQM de 6,3, para céu encoberto, com uma pequena elevação nos valores de 0,3%.

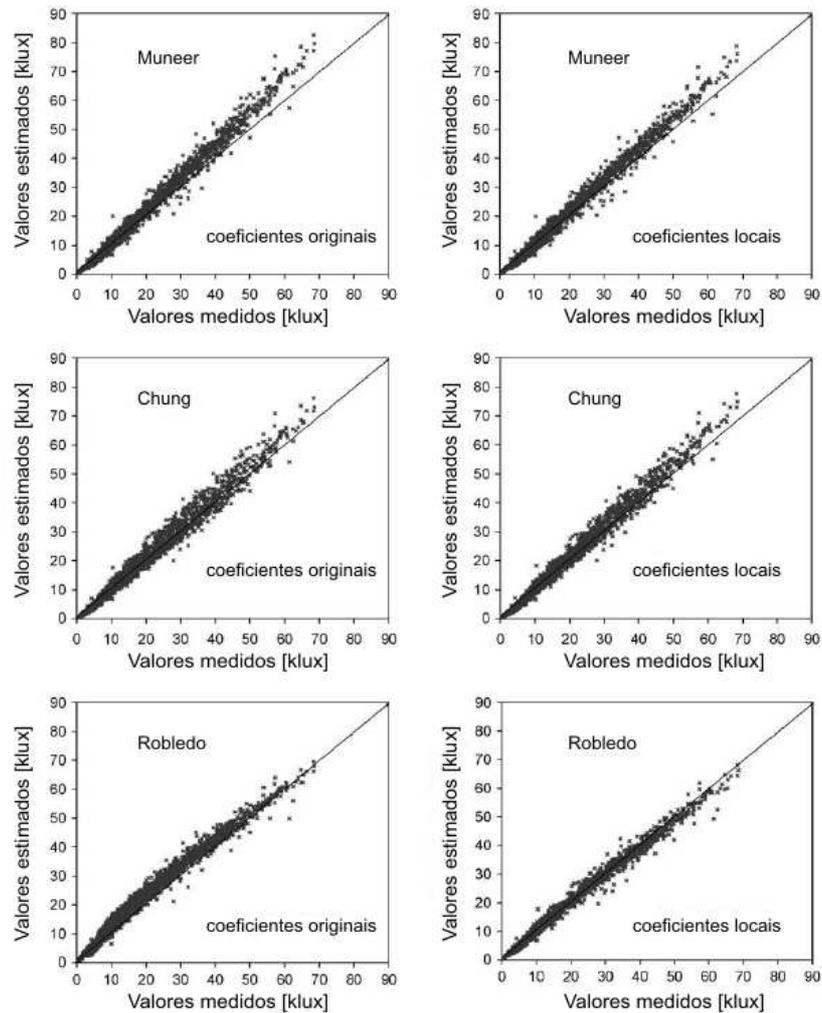


Figura 2.18. Correlação entre as iluminâncias medidas e as calculadas através dos coeficientes reais e locais para os modelos de Muneer, Chung e Robledo, para todos os tipos de céu, em Florianópolis

Fonte: Adaptado de Souza e Robledo, 2004.

Tabela 2.3. Avaliação estatística dos modelos para estimar a eficácia luminosa difusa, com coeficientes originais e calculados para Florianópolis.

Condição do Céu	Muneer [%]		Muneer Fpolis.[%]		Chung [%]		Chung Fpolis.[%]		Robledo [%]		Robledo Fpolis.[%]	
	Viés	EQM	Viés	EQM	Viés	EQM	Viés	EQM	Viés	EQM	Viés	EQM
Todos	8,7	16,6	5,8	13,0	3,5	12,4	4,2	12,1	14,3	17,8	1,1	7,8
Claro	-0,5	10,6	-4,7	10,4	5,3	12,1	1,4	10,1	34,5	37,7	3,1	9,0
Encoberto	9,8	14,4	7,9	11,6	-1,8	7,2	1,3	7,8	10,6	12,8	0,3	6,3
Intermed.	10,9	18,3	7,2	13,8	8,9	15,6	8,3	15,2	11,2	16,0	1,4	8,5

Fonte: Adaptado de Souza e Robledo, 2004.

Pohlen, Ruck e Bittar (1996) avaliaram o modelo de Perez para a Nova Zelândia (41°S) a partir de dados coletados entre dezembro de 1992 e maio de 1994. A correlação entre estes dados está mostrada na Figura 2.19, com um R^2 de 0,90, mostrando uma boa relação entre o modelo e os valores medidos. Segundo os autores o modelo obtém o menor erro para o céu claro, com um EQM de aproximadamente 5% e um viés de -2%; enquanto, o céu encoberto apresenta os maiores erros para o céu encoberto, com um EQM de 16% e um viés de -14%.

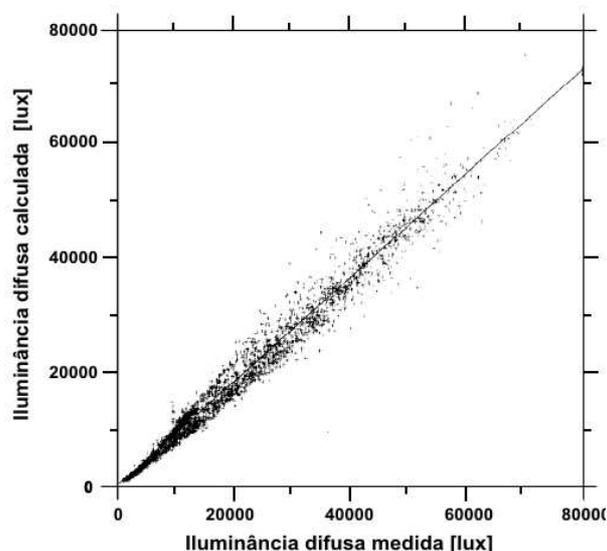


Figura 2.19. Correlação entre iluminâncias difusas modeladas e medidas de Nova Zelândia.

Fonte: Pohlen, Ruck e Bittar, 1996.

Dumortier (1997) analisa este e outros modelos de eficácia luminosa através da comparação com os dados coletados na estação IDMP de Vaulx-em-Velin, França, (45°10'N), com o objetivo de verificar o comportamento destes modelos diante da variação do aerosol, vapor de água na atmosfera e cobertura de nuvens. Para esta

análise o autor compara o resultado dos modelos com os dados medidos de dias representativos para diferentes características de aerossol e vapor de água na atmosfera (10,13 e 14 de março, 1994) e diferentes coberturas de nuvens (17 e 27 de março, 1994). as características atmosféricas de cada dia estão ilustradas na Figura 2.20, onde na primeira linha está a variação do vapor de água na atmosfera, seguido pelo índice de turbidez de Angström e da radiação horizontal global e difusa.

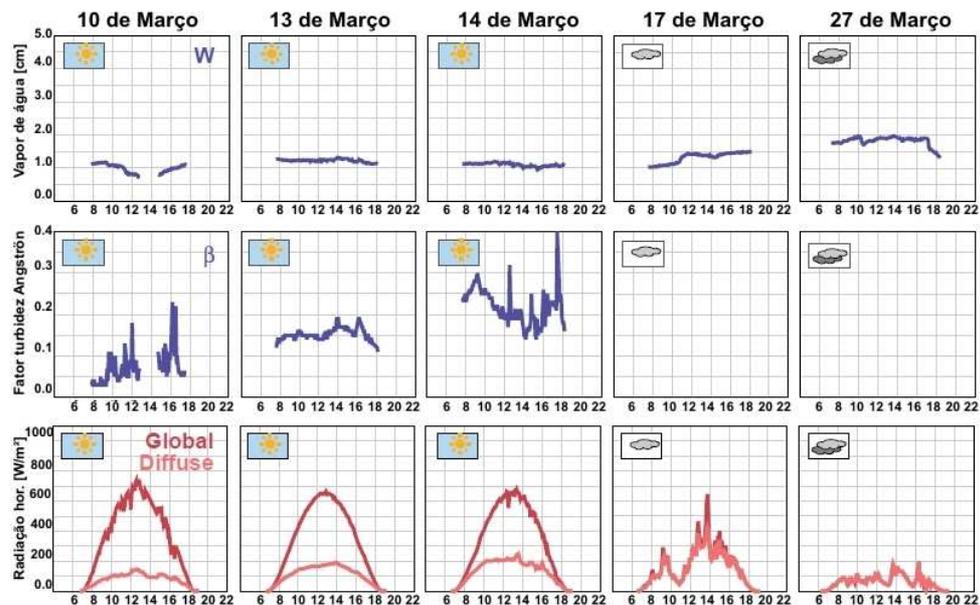


Figura 2.20. Características atmosféricas dos cinco dias escolhidos para a comparação entre os dados medidos e os calculados pelos modelos.

Fonte: Dumortier, 1997.

Para a eficácia luminosa difusa, Dumortier (1997) comparou os dados medidos com os modelos de Littlefair (Daylight II, 1995 apud DUMORTIER, 1997) e Perez et al. (1990). Conforme a Figura 2.21, nenhum dos modelos responde bem as alterações da quantidade de aerossóis na atmosfera; para uma condição com baixo nível de aerossóis (10 de Março) ambos os modelos superestimam a eficácia luminosa difusa, enquanto para níveis mais altos estes modelos subestimam as eficácias luminosas (13 e 14 de Março). Já para a variação da cobertura de nuvens, o modelo de Perez segue adequadamente a variação da eficácia luminosa difusa.

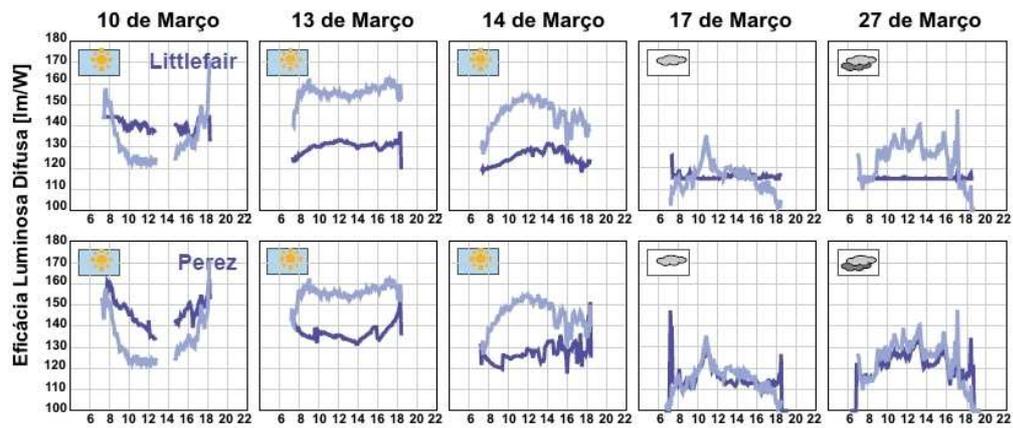


Figura 2.21. Desempenho diário dos modelos de Littlefair e Perez para a eficácia luminosa difusa, os resultados medidos estão representados pela linha clara.

Fonte: Dumortier, 1997.

Esta mesma análise foi realizada para a eficácia luminosa direta a partir dos modelos de Olseth (1989 apud DUMORTIER, 1997), Perez et al. (1990) e Dumortier (1995, apud DUMORTIER, 1997). A partir da Figura 2.22 nota-se que nenhum dos modelos responde bem à diminuição da eficácia luminosa direta decorrente do aumento de aerossóis na atmosfera.

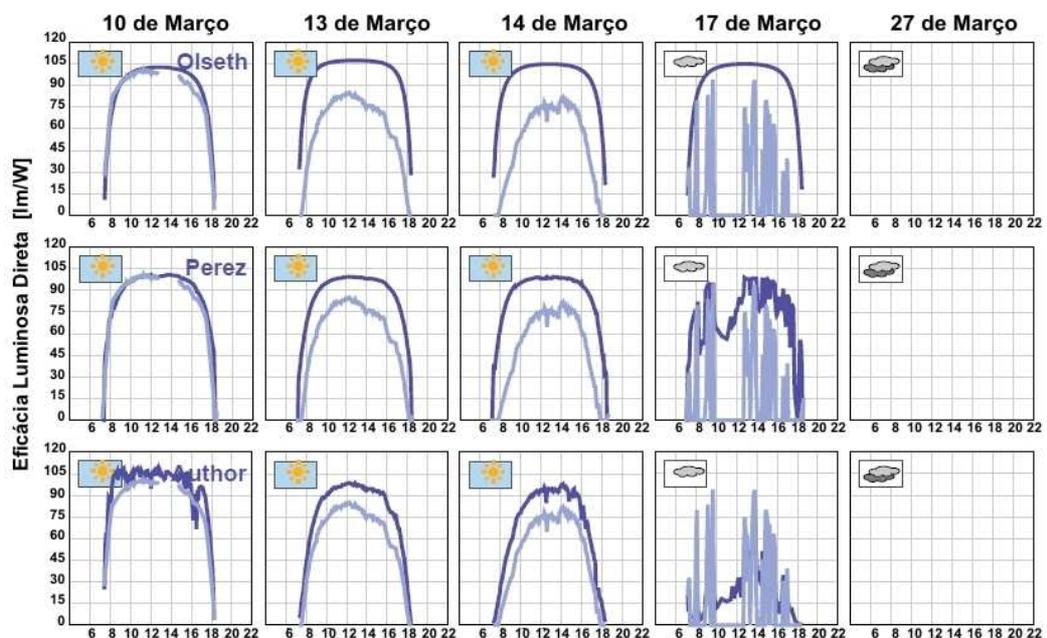


Figura 2.22. Desempenho diário dos modelos de Olseth, Perez e Dumortier, para a eficácia luminosa direta, os resultados medidos estão representados pela linha clara.

Fonte: Dumortier, 1997.

O modelo de Perez et al. (1990), para eficácia luminosa direta, também foi analisado por Pohlen, Ruck e Bittar (1996) para a Nova Zelândia, onde apresentou um viés médio de -12%, e um EQM de 12%, para céu claro e um viés de -18% para o céu intermediário e um erro quadrático médio de 23% para o céu encoberto.

Este modelo também foi avaliado, juntamente com o modelo de Robledo e Soler (2001a), por Cucumo et al. (2008) para as cidades de: Arcavacata di Rende (39°21'N), Genebra (46°20'N), Vaulx-en-Velin (45°47'N), Bratislava (48°10'N) e Osaka (34°36'N). Neste estudo os melhores resultados foram encontrados para a cidade de Genebra, com um viés de -0,38% para o modelo de Robledo, com um erro quadrático médio (EQM) de 18,58 e de 19,84% para o modelo de Perez.

Tabela 2.4. Avaliação estatística dos modelos para estimar a eficácia luminosa direta, para as cinco cidades.

Cidade	Robledo e Soler (2001a)		Perez et al. (1990)	
	Viés [%]	EQM [%]	Viés [%]	EQM [%]
Arcavacata di Rende (Itália)	-11,49	18,30	-10,60	18,09
Genebra (Suíça)	-0,38	18,58	1,10	19,84
Vaulx-en-Velin (França)	-1,39	21,45	0,18	25,44
Bratislava (Eslováquia)	-13,30	23,68	-	-
Osaka (Japão)	-8,64	22,47	-6,62	23,41

Fonte: Adaptado de Cucumo et al., 2008.

A eficácia luminosa direta para Florianópolis foi testada por Souza et al. (2005), para os modelos de Littlefair (Equação 2.10), Chung (Equação 2.11) e Robledo e Soler (Equação 2.3). Para este estudo foram utilizados dados de iluminância difusa e global, coletados entre janeiro de 2002 e maio de 2003 em Florianópolis.

$$K_b = 51,8 + 1,64\alpha - 0,0151\alpha^2 \quad \text{Equação 2.10}$$

onde:

K_b : Eficácia luminosa direta [lm/W];

α : altura solar [°].

$$K_b = 48,5 + 1,67\alpha - 0,0098\alpha^2 \quad \text{Equação 2.11}$$

onde:

K_b : Eficácia luminosa direta [lm/W];

α : altura solar [°].

A Figura 2.23 mostra os dados coletados em Florianópolis para condições de céu claro e as curvas determinadas pelos modelos usados; através desta figura percebe-se que os modelos não apresentam a resposta mais adequada. O modelo de Littlefair apresenta o maior EQM, com um erro de 15,5%, seguido pelo modelo de Robledo e Soler, com um EQM igual a 10,7% e o de Chung, com o menor erro, 9,4%.

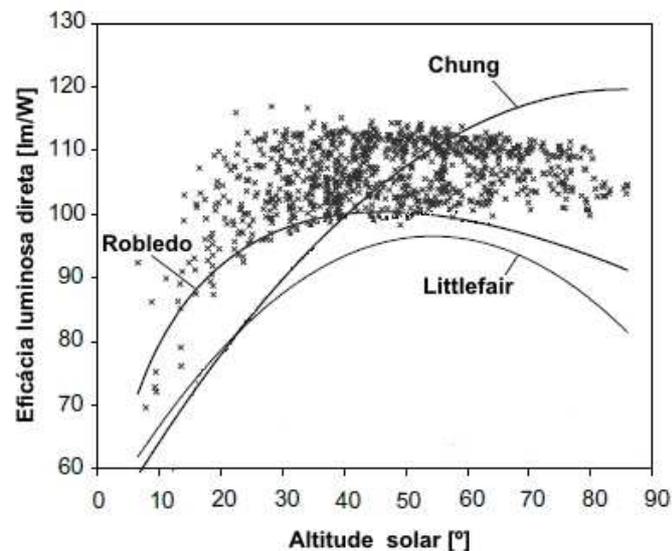


Figura 2.23. Eficácia luminosa direta em função da altura solar e curvas originadas pelos modelos: Littlefair, Chung e Robledo.

Fonte: Souza et al., 2005.

Para um bom uso dos modelos de eficácia luminosa apresentados, é importante a verificação dos mesmos em relação aos dados medidos. O modelo de Perez et al. (1990), utilizado em programas como o Energyplus e Daysim/Radiance, foi avaliado para Nova Zelândia, Arcavacata di Rende, Genebra, Vaulx-en-Velin, Bratislava e Osaka; por Pohlen, Ruck e Bittar (1996) e Cucumo et al. (2008). No entanto, de acordo com Dumortier (1997), este modelo não apresenta uma boa resposta para todas as condições climáticas.

A partir do estudo de Souza e Robledo (2004) e de Souza et al. (2005), que comparam os modelos de Muneer, Chung, Robledo e Soler e Littlefair com os dados de Florianópolis, percebe-se a necessidade de verificar a coerência dos dados obtidos através do modelo de Perez para as condições de céu encontradas em Florianópolis.

2.3 Programas de simulação

Devido ao grande número de dados necessários para o cálculo do desempenho termo-energético e luminoso de edificações, o uso de programas simuladores facilita as análises necessárias. A partir dos resultados das simulações computacionais e das análises realizadas através destes é possível obter orientações para as decisões de projeto. Assim, neste trabalho serão utilizados três programas simuladores: Energyplus, para análise do desempenho termo-energético e luminoso, e os programas TropLux e Daysim/Radiance, para avaliação da iluminação natural. Com a intenção de avaliar o programa Energyplus, quanto à iluminação natural, escolheu-se o programa Daysim/Radiance, por realizar o cálculo a partir do arquivo, assim como o Energyplus. A escolha do programa TropLux deu-se por ele ter o método de cálculo baseado no mesmo algoritmo que o Daysim/Radiance.

2.3.1 Energyplus

O programa Energyplus foi criado a partir da junção entre as melhores características de dois programas, BLAST e DOE-2, e desenvolvido em conjunto com: U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories (CERL), University of Illinois (UI), Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL), Oklahoma State University (OSU), GARD Analytics e Department of Energy (DOE) (CRAWLEY et al., 1999).

O programa trabalha com o balanço de calor do BLAST, com um modelo de ar condicionado genérico, novos algoritmos de transferência de calor e fluxo de ar entre zonas (CRAWLEY et al., 1999), enquanto o cálculo da iluminação natural deriva do programa DOE-2 (ENERGYPLUS, 2007 a).

O programa estima o consumo de energia considerando as trocas térmicas da edificação com o exterior com base no clima e na caracterização do edifício ou da sala a ser estudada: desde a geometria, componentes construtivos, cargas instaladas, sistemas de condicionamento de ar e padrões de uso e ocupação (CRAWLEY, et al. 1999).

Para o cálculo das iluminâncias internas, durante a modelagem são especificados de um a dois pontos de referência localizados na superfície de trabalho definida pelo usuário do programa. A partir destes pontos serão calculados os fatores de luz diurna e da luz do sol, um para cada uma das parcelas de distribuição da luz representadas na Figura 2.24, sendo: um para a contribuição da luz vinda da abóbada celeste (parcela direta - 'a', refletida internamente - 'b, c' e a refletida externamente -

‘d, e’) e outro para a luz direta do sol (parcela direta - ‘f’, refletida internamente - ‘g, h’ e a refletida externamente - ‘i, j’). Este processo é realizado para cada um dos pontos e para cada abertura existente na sala.

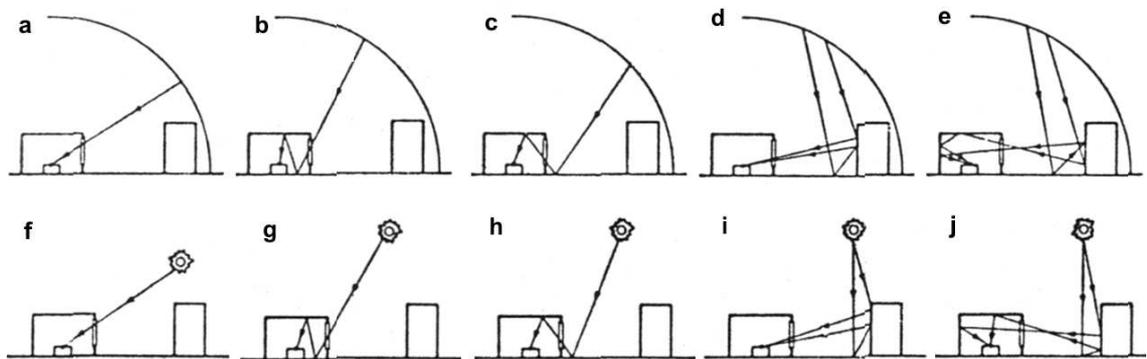


Figura 2.24. Caminho da luz até a superfície de trabalho, a partir: do céu (a - e) e do sol (f - j).

Fonte: Winkelmann e Selkowitz, 1985.

O cálculo da iluminância interna, de cada período do balanço térmico, é feito através da integração entre o FLD referente à parcela da abóbada celeste e o FLS da luz do sol, multiplicados por sua correspondente iluminância externa, como mostra a Equação 2.12. Para o cálculo da parcela da iluminação difusa, é realizada a ponderação do FLD entre dois tipos de céu. O cálculo das iluminâncias horizontais externa é realizado a partir do modelo de Perez et al. (1990), mostrado no item 2.2.2.

$$E(i_L, i_S) = FLS_{sol} E_{hsol} + [FLD_{céu,\varepsilon}(i_L, i_S) f_\varepsilon + FLD_{céu,\varepsilon'}(i_L, i_S) f_{\varepsilon'}] E_{h,céu} \quad \text{Equação 2.12}$$

onde:

E: Iluminância [lx];

$E_{h,sol/céu}$: Iluminância horizontal externa direta/ difusa [lx];

i_L : Ponto de referência (1 ou 2);

i_S : Sombreamento na janela (1 – sem sombreamento; 2 – com sombreamento);

$FLD_{céu}$: Fator de luz diurna, para o céu [%];

FLS_{sol} : Fator de luz diurna, para o sol [%];

ε : Índice de claridade do céu;

f_ε : Fração correspondente ao índice de claridade do céu ε .

Através deste cálculo, o programa permite o controle da iluminação artificial, onde, a partir dos valores de iluminância encontrados para os pontos de referência analisa-se a necessidade de contribuição da iluminação artificial ou substituição total da natural pela artificial, dependendo do sistema de controle da iluminação adotado pelo usuário, quando os níveis de iluminação não chegam aos desejados. Dessa forma, pode ser verificada a economia de energia gerada pelo uso da iluminação natural, e pelo sistema de controle utilizado para a iluminação artificial.

O programa ainda permite ao usuário solicitar relatórios com dados estimados durante o processo de simulação, incluindo temperatura interna de cada zona térmica, consumo de energia por uso final e carga térmica retirada pelo sistema de condicionamento de ar. Esta possibilidade ocorre devido à estrutura do programa composta pelo operador da simulação, módulo de simulação do balanço de calor, e módulo de simulação do sistema da edificação, conforme a Figura 2.25. Esta estrutura permite ainda, adicionar novas características ao modelo e fazer ligações com outros programas, como o Window 5 e o Slab, programa utilizado para o cálculo das temperaturas do solo.



Figura 2.25. Estrutura do programa Energyplus.

Fonte: Energyplus, 2006.

O processo de validação do programa ocorreu em parte durante o desenvolvimento do mesmo, e foi responsável por melhorias à medida que eram encontrados os problemas. Foram realizados: testes analíticos comparando os resultados com soluções matemáticas; testes comparativos com outros programas de

simulação; testes empíricos, comparando os resultados obtidos com dados experimentais (WITTE et al., 2001). Os resultados encontrados através das simulações dos programas mostram-se similares a outros já validados como: DOE-2, BLAST, TRNSYS e ESP.

Segundo Winkelmann e Selkowitz (1985), a validação da iluminação, realizada para o DOE-2, foi executada em duas etapas. A primeira verificou a sensibilidade do programa diante de cada modificação nos parâmetros do modelo. A segunda foi uma comparação entre os resultados do DOE-2, Superlite e medições no céu artificial do LBL (Lawrence Berkeley Laboratory). Os modelos utilizados nas simulações possuem refletância de: 0,25 para o chão, 0,60 para as paredes e 0,80 para o teto. Nesta, verificou-se uma diferença média de 15% entre os três métodos, conforme a Figura 2.26, com exceção das áreas muito próximas ou afastadas da janela, onde o método do fluxo dividido (usado para resolver as reflexões internas) superestima a reflexão interna. No entanto, esta validação não verificou os níveis de iluminação gerados pelo programa. Em estudos preliminares para a pesquisa, mostrados no Apêndice 1, verificou-se que as iluminâncias obtidas através das simulações do Energyplus, que utiliza o mesmo algoritmo do DOE-2, são muito altas em relação às esperadas e as resultantes de outros programas.

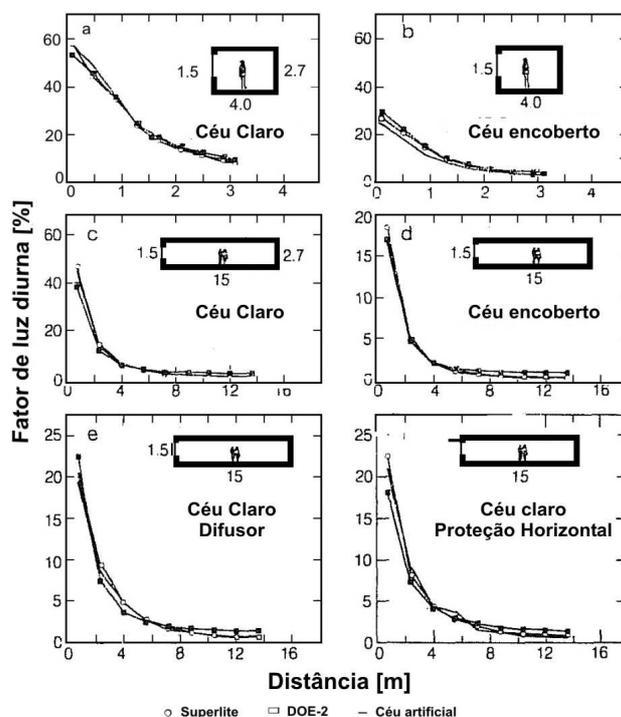


Figura 2.26. Gráficos da comparação entre DOE-2, Superlite e medições no céu artificial.

Fonte: Winkelmann e Selkowitz, 1985.

O programa Energyplus é bastante utilizado em pesquisas voltadas para a avaliação da variação no consumo energético e desempenho térmico da edificação, no estudo da alteração de características da edificação, tais como: materiais, geometria, uso de equipamentos eficientes e orientação. Algumas destas pesquisas são apresentadas a seguir.

Li et al. (2006), em sua pesquisa, utilizaram o Energyplus para verificar, além do consumo energético, a iluminação natural em edifícios residenciais localizados em áreas densas, com alta obstrução, em Hong Kong. A análise dos dados foi feita com base no ângulo de obstrução que o entorno exerce sobre as aberturas, conforme Figura 2.27.

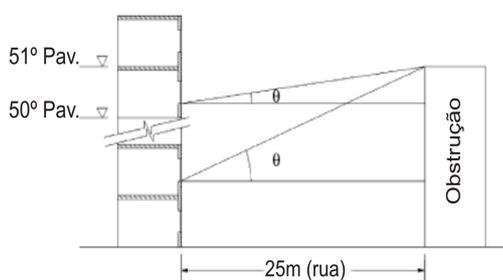


Figura 2.27. Definição do ângulo de obstrução externa

Fonte: Li et al., 2006

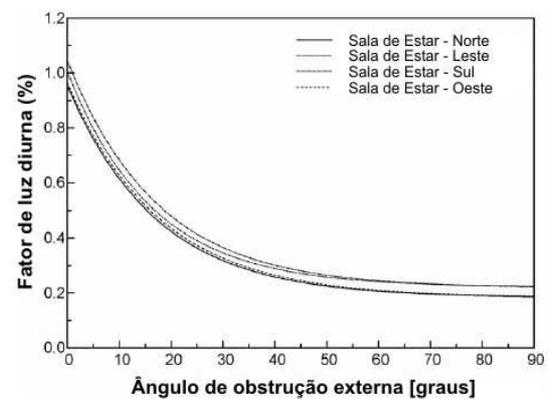


Figura 2.28. FLD médio para sala de estar com diferentes orientações.

Fonte: Li et al., 2006

As salas nos pavimentos inferiores possuem maior obstrução do céu, o que faz com que recebam níveis de iluminação muito baixos, necessitando o uso da iluminação artificial, como pode se observar na Figura 2.28. Nesta, nota-se que: com o aumento do ângulo de obstrução há uma grande queda nos níveis médios do Fator de Luz Diurna (FLD), onde a partir de um ângulo aproximado de 30,5° o FLD é de 0,3%, não havendo reduções consideráveis no nível de iluminação após este nível de obstrução.

O trabalho de Loutzenhiser, Maxell e Manz (2007), mostra uma validação empírica de algoritmos e iluminação natural e sua interação com a simulação energética em edifícios com uso de sistemas de sombreamentos nas aberturas. Nesta análise os resultados de um modelo real são comparados aos resultados das simulações realizadas pelos programas Energyplus e DOE-2.

A Figura 2.29 mostra a comparação entre os resultados do cálculo das iluminâncias, para a fachada sul, que possui abertura com vidro claro 25,2mm, com

cortinas translúcidas na sala A, enquanto a sala B possui persiana horizontal com aletas fixas. Segundo os autores, nenhum dos programas apresentou os resultados das iluminâncias nos pontos de referência com 95% de confiança. A melhor resposta dos algoritmos ocorreu para a entrada da luz difusa no ambiente, para a sala com persianas, quando as aletas estavam na posição horizontal. Já para os períodos matutinos, em que o sol incidia na abertura, o programa Energyplus superestima as iluminâncias no ponto de referência.

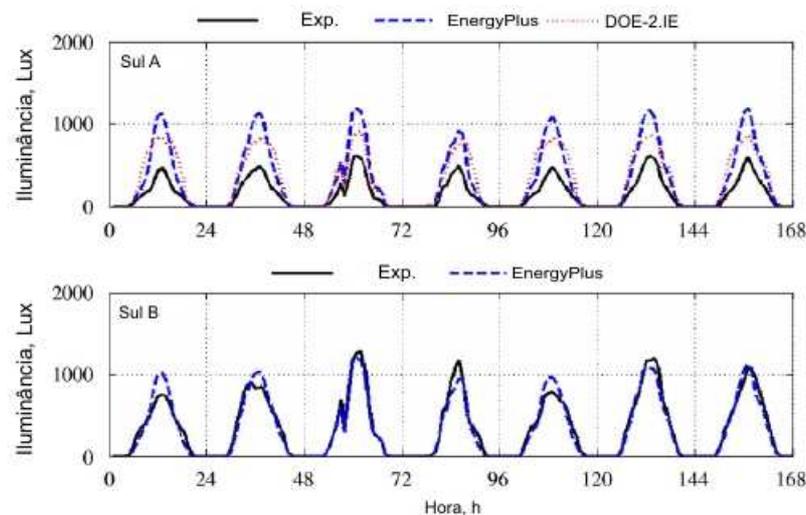


Figura 2.29. Iluminância no ponto de referência para a fachada sul.

Fonte: Loutzenhiser, Maxell e Manz, 2007.

Apesar das pesquisas apresentadas anteriormente, e de possuir métodos de cálculo para a distribuição da luz natural no ambiente interno e cálculo do potencial de economia gerada pela mesma; o trabalho de Loutzenhiser, Maxell e Manz (2007) mostrou que, nem sempre o programa apresenta resultados satisfatórios de iluminação. Também verificou-se que as iluminâncias calculadas para o clima de Florianópolis não são adequadas, de acordo com o Apêndice 1. Desta forma serão utilizados mais dois programas de simulação para avaliar estes resultados de iluminância, sendo eles o Daysim/Radiance e o TropLux.

2.3.2 Daysim/Radiance

O programa Daysim/Radiance, desenvolvido pelo *National Research Council Canada* (NRCC) e o *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems*, na Alemanha; foi elaborado com o intuito de calcular as iluminâncias para o período de um ano, de forma rápida e independente do tipo de céu (REINHART, 2006). Este programa simula a iluminação natural através do coeficiente da luz natural (DC), baseando-se no

programa Radiance, que utiliza o método do raio traçado, e no modelo de céu desenvolvido por Perez et al. (1990), para desta forma, possibilitar a simulação das iluminâncias sob qualquer condição de céu (REINHART e WALKENHORST, 2001).

A simulação é realizada a partir de um modelo tridimensional do ambiente a ser analisado. No modelo são definidas as propriedades ópticas das superfícies, e, do arquivo climático, de onde são retirados dados como latitude, longitude e radiação. Além do cálculo das iluminâncias, o programa permite o cálculo do FLD e IULN para cada ponto de referência. Outra possibilidade é a verificação do consumo da iluminação artificial de acordo com diferentes padrões de uso (número de pessoas no local e horas de permanência), iluminância de projeto e potência e sistema de controle da iluminação artificial.

Em Reinhart e Walkenhorst (2001), confrontaram-se os valores da iluminância, calculados pelo programa Daysim/Radiance, através de dados de radiação difusa e direta externa com as iluminâncias internas, todos os dados foram obtidos através de medição simultânea, em um modelo em escala real. O modelo, representado na Figura 2.30, apresenta abertura com vidro duplo e veneziana externa, os fotosensores dos pontos 1 a 3 estão localizados na superfície de trabalho, com altura de 0,85cm, enquanto os sensores 4 a 7 estão localizados no teto. As medições para este trabalho foram realizadas a cada 30s, em Janeiro de 2000, no *Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems*, na Alemanha.

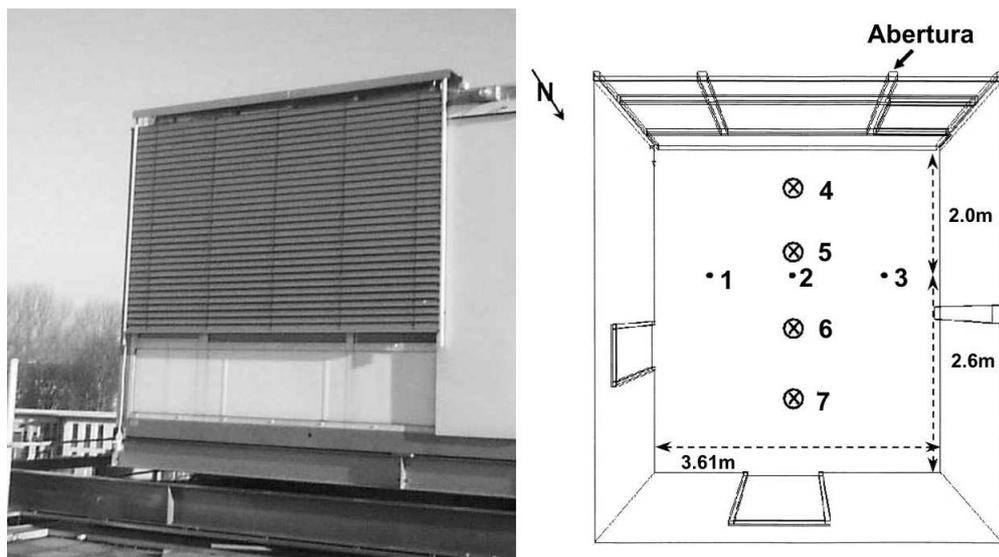


Figura 2.30. Foto e esquema do modelo em escala real.

Fonte: Reinhart e Walkenhorst, 2001.

A Figura 2.31 mostra os resultados das iluminâncias calculadas pelo Daysim/Radiance e obtidas através das medições, para o dia 7 de janeiro, em que o céu apresentava-se encoberto, e as venezianas estavam abertas. A figura ‘a’ apresenta os valores das iluminâncias externas, onde os resultados encontram-se bastante próximos. Enquanto a figura ‘b’ exhibe os resultados das iluminâncias internas para o ponto dois (ver Figura 2.30) nesta, aparece além das curvas com as iluminâncias medidas e simuladas, outra representando a variável simulada normalizada, para possibilitar a verificação dos dados simulados sem a influência de erros referentes ao modelo do céu ou a outros fatores. Através da curva de dados simulados ponderada, percebe-se a semelhança dos valores simulados e medidos. Para esta normalização os dados simulados foram multiplicados pela relação entre as iluminâncias medidas e as simuladas para a fachada.

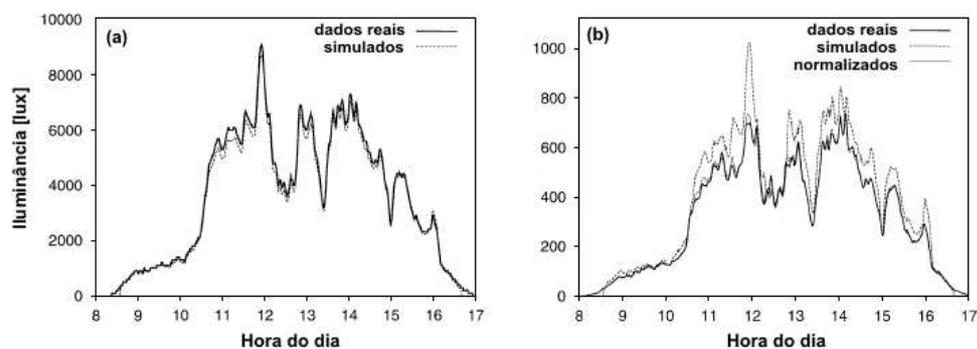


Figura 2.31. Iluminâncias externa (a) e internas com a veneziana aberta (b), para condição de céu encoberto.

Fonte: Adaptado de Reinhart e Walkenhorst, 2001.

Para todas as condições de céu, os autores notaram que o erro nos sensores do teto (viésM - 17% e EQM - 30%) era maior do que para os da superfície de trabalho (viésM - 6% e EQM - 24%), isso porque estes sensores dependem muito dos detalhes externos, mais difíceis de modelar. Este erro pode afetar sensivelmente as análises para o consumo de energia, uma vez que o sensor de controle da iluminação artificial geralmente se encontra no teto das salas.

Reinhart e Jones (2004) compararam os resultados de simulação para a economia de energia gerada pelo uso da iluminação natural entre o DOE2.1 e o Daysim/Radiance. As simulações foram geradas para um escritório com planta livre de 65 m x 36,3 m x 2,8 m. as aberturas compreendem quase toda a fachada, de 0,475 m à 2,75m do chão, de vidro duplo e com 61% de transmitância. Para as simulações foram feitas algumas considerações: as divisórias das células de trabalho de 2,10 m de altura, a ocupação da sala durante os dias de semana das 7 às 18 horas e a

iluminância de projeto em 800 lx, para compensar possíveis imperfeições das fotocélulas para o controle da iluminação artificial.

A Figura 2.32 mostra os resultados do consumo de energia para cada programa em cada fachada, onde, o caso de referência representa o uso de iluminação artificial em todo o período. Nesta figura observa-se que, apesar da grande diferença entre os resultados dos dois programas, a economia de energia é maior com a ausência de venezianas. Nota-se que para este caso as iluminâncias calculadas pelo Daysim/Radiance são maiores que o DOE2, uma vez que o consumo de energia chega à metade do obtido através do DOE2. A partir deste estudo tem-se uma noção maior da diferença existente entre os resultados dos programas de simulação, mostrando o cuidado que se deve ter ao escolher o programa utilizado em uma pesquisa.

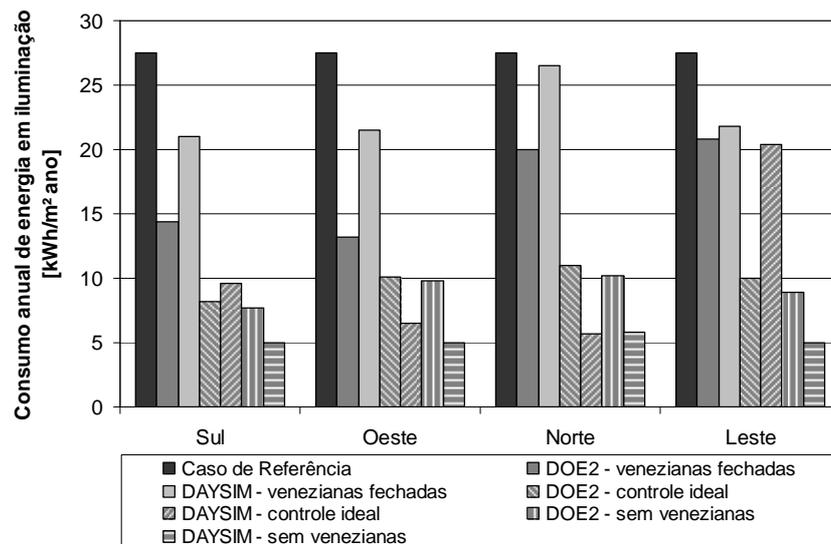


Figura 2.32. Consumo anual de energia em iluminação previsto para cada fachada.

Fonte: Adaptado de Reinhart e Jones; 2004.

2.3.3 TropLux

Segundo Cabús (2005a), os programas disponíveis nem sempre realizavam a simulação de forma adequada aos trópicos, quer pela limitação nos padrões de distribuição de luminâncias do céu, ou pela dificuldade em simular geometrias complexas, característica da arquitetura tropical na tentativa de se proteger da radiação solar.

O TropLux é baseado em três conceitos fundamentais: o método Monte Carlo, o método do raio traçado e o conceito de coeficientes de luz natural. O método

Monte Carlo trata da abordagem estatística para solucionar integrais múltiplas. Este método obtém soluções aproximadas ao utilizar números randômicos para converter um problema determinístico em um estocástico, baseado na premissa de que se a probabilidade de ocorrência de cada evento separado é conhecida, então é possível determinar a probabilidade com que a seqüência completa de eventos irá ocorrer (CABÚS, 2005a).

A técnica do raio traçado segue o caminho de um raio entre superfícies, sua principal vantagem consiste na possibilidade em dar soluções teóricas simples para geometrias complexas (CABÚS, 2005a).

Os coeficientes de luz natural (*Daylight Coefficients* – DC) relacionam a iluminância em uma determinada superfície, a partir de uma dada subdivisão do céu, e a iluminância normal em um plano desobstruído, a partir desta mesma subdivisão. Para este cálculo, o TropLux adota dois tipos de subdivisões do céu: para o cálculo da componente refletida, é usada a subdivisão proposta pela CIE, em 145 partes; para o cálculo da componente direta, usa uma subdivisão com 5221 partes, a fim de melhorar a precisão dos resultados em função do tamanho angular do sol (CABÚS, 2005a).

Para a realização da simulação da distribuição da luz natural em um ambiente, são necessários alguns dados de entrada como: geometria da sala, planos, janelas e características dos materiais, além da localização geográfica. O programa ainda permite o processamento de superfícies difusas, especulares e mistas, bem como opacas, transparentes e translúcidas.

Os dados de saída do programa podem ser retirados de acordo com a componente desejada, podendo assim avaliar a importância de cada uma delas no valor total da iluminância, conforme Tabela 2.5.

Segundo Cabús (2005b), a validação do TropLux foi feita em três estágios: dois relativos ao erro e um ligado ao tempo gasto em processamento padrão. Foram avaliados os erros estocástico, originado pelo método Monte Carlo, e o determinístico. Estes foram analisados comparando com métodos simplificados, com os resultados de um programa padrão, o Lumen Micro, e com dados provenientes de monitoramento, a partir do banco de dados do BRE-IDMP (*Building Research Establishment – International Daylighting Measurement Programme*).

Tabela 2.5. Componentes da Iluminância no TropLux – Versão 3.02.

Ordem	Descrição da Componente	Fonte de Luz
1	Direta	Céu
2	Refletida internamente (apenas)	Céu
3	Refletida internamente e no solo	Céu
4	Refletida internamente e nas obstruções	Céu
5	Refletida nas obstruções (apenas)	Céu
6	Refletida no solo (apenas)	Céu
7	Direta	Sol
8	Refletida internamente (apenas)	Sol
9	Refletida internamente e no solo	Sol
10	Refletida internamente e nas obstruções	Sol
11	Refletida nas obstruções (apenas)	Sol
12	Refletida no solo (apenas)	Sol

Fonte: Cabús, 2005a.

No processo de validação, ao comparar as iluminâncias calculadas pelo TropLux com a ferramenta simplificada, o erro relativo encontrado foi de 16,1% para as componentes do céu e 0,6% para a componente refletida interna. Quando comparado com os resultados obtidos através do programa Lúmen Micro, o erro relativo foi menor que 10% para salas de geometria simples. No entanto, quando comparados os resultados para as salas com prateleira de luz e as salas com brise, o erro foi superior a 24%. Isto pode ocorrer devido às abordagens diferentes para distribuição das luminâncias do céu entre os programas, ou devido a complexidade na geometria, interferindo na inter-reflexão da luz na superfície dos elementos de proteção solar.

A avaliação proveniente da comparação com os dados medidos, dados do BRE-IDMP, analisou seis pontos em uma sala, encontrando um coeficiente de correlação superior a 0,95, o que demonstra que a validação com dados medidos pode ser considerada satisfatória. No processo de validação também foi testado o tempo de simulação, verificando que o programa permite o cálculo rápido da iluminância para diferentes tipos de céu, horas do dia, dias do ano e variações nas orientações das fachadas.

O programa TropLux vem sendo utilizado em trabalhos como Amaral e Cabús (2006), na avaliação das iluminâncias em edifícios históricos como a Igreja Matriz do município de Pilar; e para a avaliação de prateleiras de luz para a uniformização da iluminação natural (CÂNDIDO, TORRES e CABÚS, 2005).

Em Amaral e Cabús (2006), foram analisados os valores da iluminância na nave e no presbitério. Os níveis de iluminação encontrados para as naves são satisfatórios para a atividade realizada neste espaço; já no presbitério, local onde ocorrem as funções da igreja, as iluminâncias foram insuficientes, como pode se verificar na Figura 2.33. Na figura também se percebe a variação das iluminâncias de acordo com o período do ano e horário do dia, mostrando o comportamento das mesmas de acordo com a altura solar.

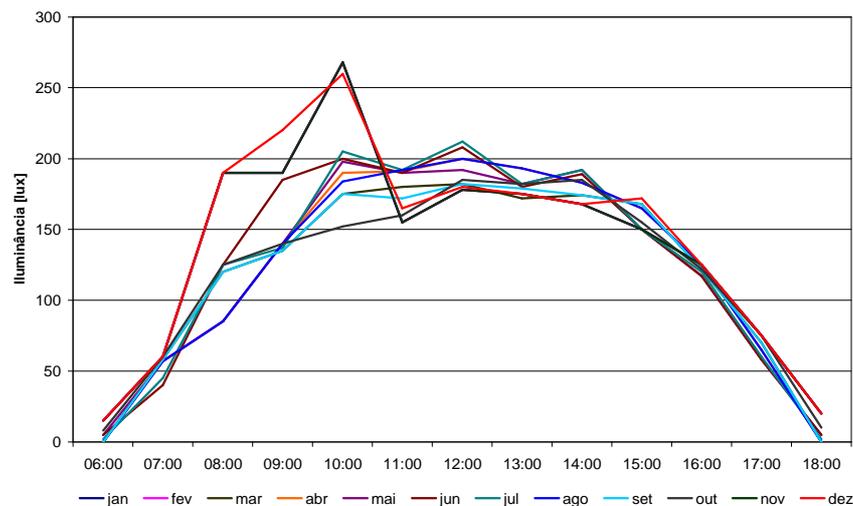


Figura 2.33. Iluminância anual no presbitério da Igreja Matriz N. Srª do Pilar.

Fonte: Amaral e Cabús, 2006.

No trabalho de Cândido, Torres e Cabús (2005), avaliou-se a distribuição da luz em ambientes com utilização de prateleiras de luz. Para o caso avaliado, em comparação com uma sala sem prateleira, verificou-se a diminuição da iluminância em todos os pontos, ver Figura 2.34. No entanto, a redução da diferença entre os valores obtidos nos pontos analisados demonstra uma tendência à uniformização das iluminâncias no modelo que possui a prateleira de luz, o que reflete uma tendência a melhorar a distribuição da luz quando a sala possui este elemento.

A partir destes trabalhos verifica-se a variabilidade e riqueza de resultados obtidos com o programa escolhido para o estudo, o que tornará possível a análise desejada.

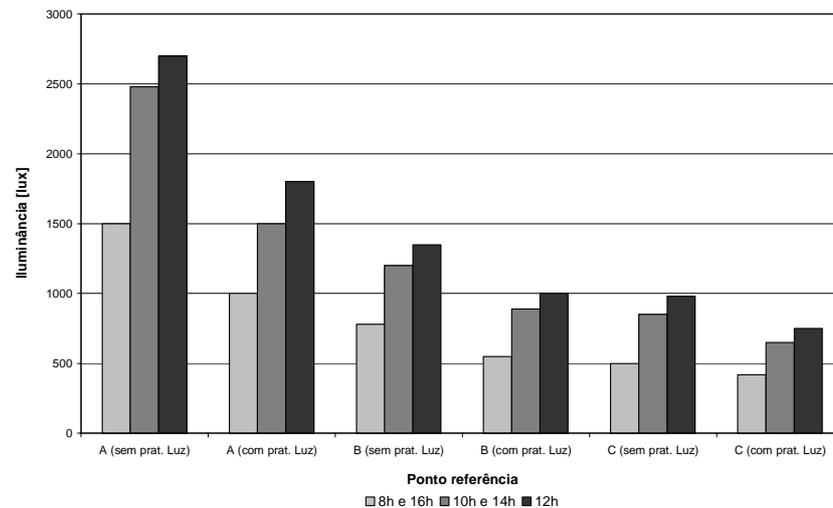


Figura 2.34. Distribuição da iluminância nas salas, variação por ponto de medição. (A: 2,21m da janela, B: 4,42m da janela e C: 6,63m da janela).

Fonte: Adaptado de Cândido, Torres e Cabús, 2005.

2.4 Arquivos climáticos

A maioria dos programas computacionais para a análise termo-energética de edificações utiliza arquivos com dados climáticos horários de um ano para representar a influência do ambiente externo sobre a edificação. Alguns programas também utilizam estes dados para o cálculo da iluminação natural, entre eles estão os programas Energyplus e Daysim/Radiance, citados anteriormente.

Estes arquivos geralmente são obtidos em estações meteorológicas de aeroporto e necessitam de tratamento adequado para adaptá-los ao formato utilizado pelos programas de simulação. Goulart (1993) desenvolveu um arquivo de dados climáticos para a cidade de Florianópolis, no formato TRY (Test Reference Year). Os arquivos deste formato são elaborados a partir de uma série de dados anuais; onde adota-se o critério de eliminação dos anos de dados em que observam-se as temperaturas médias mensais extremas, resultando em um ano de referência em relação ao clima local (GOULART, 1993). As variáveis contidas neste arquivo são:

- Temperatura de bulbo seco;
- Temperatura de bulbo úmido;
- Temperatura de solo;
- Velocidade do vento;
- Direção do vento;

- Pressão barométrica;
- Quantidade de nuvens;
- Tipo de nuvens;
- Altura das nuvens;

Radiação solar.

Como para Florianópolis, os dados climáticos relativos à radiação solar não existem, Carlo (2005) apresenta uma metodologia para: ajustar modelos para a estimativa de dados de radiação solar, revisão dos arquivos climáticos, e compilação de arquivos em formatos compatíveis com programas de simulação termo-energética como o Energyplus.

Segundo Carlo (2005), foram avaliados dois métodos para o cálculo da radiação para cinco cidades brasileiras, onde comparou-se os resultados destes modelos com as médias mensais dos totais diários de radiação global horizontal do Laboratório de Energia Solar (LABSOLAR - UFSC). O método de Kasten, utilizado para a criação de parte dos arquivos IWECC (International Weather Energy Conservation), baseia-se na cobertura total de nuvens, sem considerar o tipo das mesmas. O segundo método, denominado LabEEE, originou-se de pesquisa realizada por Pitta (2001, apud CARLO, 2005), e baseia-se nas médias diárias da cobertura total de nuvens e nos totais de radiação global horizontal medidos na estação do LABSOLAR.

Os resultados do primeiro método apresentaram maiores distorções em relação à principal fonte de dados, o Atlas de Irradiação Solar do Brasil. Assim, o segundo método foi aplicado nos arquivos climáticos referentes a 14 cidades brasileiras, para a produção destes arquivos, foram estimadas as radiações horizontais tanto diretas como difusas obtidas da radiação global horizontal horária, para a obtenção da radiação direta normal (CARLO, 2005). Os arquivos climáticos, das cidades brasileiras, utilizados neste trabalho são resultado deste processo de cálculo da radiação.

2.5 Considerações finais

A revisão bibliográfica relacionada ao tema foi abordada de forma que compreendesse os aspectos que deram embasamento para esse presente trabalho, tratando de conceitos relacionados ao cálculo e avaliação da iluminação natural. Também fez-se referência aos modelos da eficácia luminosa, enfatizando o modelo

desenvolvido por Perez et al. (1990), uma vez que é utilizado no cálculo da iluminância de dois dos programas de simulação utilizados neste trabalho.

Nesta revisão também foram abordados três programas de simulação, apresentando o método de cálculo e modelo de céu utilizados por eles, juntamente com pesquisas que mostram sua utilização e avaliação.

3. Metodologia

3.1 Introdução

Esse trabalho avalia o cálculo das iluminâncias realizado pelo programa Energyplus através da comparação com os programas Daysim/Radiance e TropLux , e da iluminância horizontal externa. Para esta análise a pesquisa será dividida em duas partes: a avaliação do cálculo da iluminância interna e a avaliação do modelo de céu desenvolvido por Perez et al. (1990) para os dados da cidade de Florianópolis.

A seguir apresenta-se detalhadamente este procedimento metodológico.

3.2 Avaliação do cálculo da iluminação natural no ambiente interno

Esta etapa do trabalho será realizada a partir da comparação dos resultados da simulação realizada pelos programas Energyplus, Daysim/Radiance e TropLux.

Para as simulações serão utilizados modelos com três dimensões diferentes, sendo estas: uma sala quadrada, na proporção de 1:1 (5m x 5m x3m); uma sala retangular rasa, com proporção de 2:1 (10m x 5m x 3m) e uma sala retangular profunda, com proporção de 1:2 (5m x 10m x3m), representadas na Figura 3.1. Estes modelos possuem três PJFs (Percentual de janela na fachada) diferentes: 25%, 50% e 100%, como ilustrado na Figura 3.2, com a abertura voltada para a fachada sul. No entanto, quando a cidade analisada estiver localizada no hemisfério norte, a abertura estará na fachada norte. Esta escolha tem o intuito de diminuir a influência da entrada da luz direta no ambiente. Nas aberturas considerou-se o uso de vidro claro de 3mm, com transmissividade à luz visível igual a 0,88. Os modelos possuem paredes e teto brancos, com refletância igual a 0,85 e piso bege, com refletância igual a 0,60. O modelo de proporção 1:1, com PJF de 50% também foi simulado com refletância igual a zero (corpo negro), para verificar se a diferença nos valores das iluminâncias é resultante de possíveis erros no cálculo da reflexão interna. Em todas as simulações considerou-se a superfície de trabalho a 0,75m do piso.

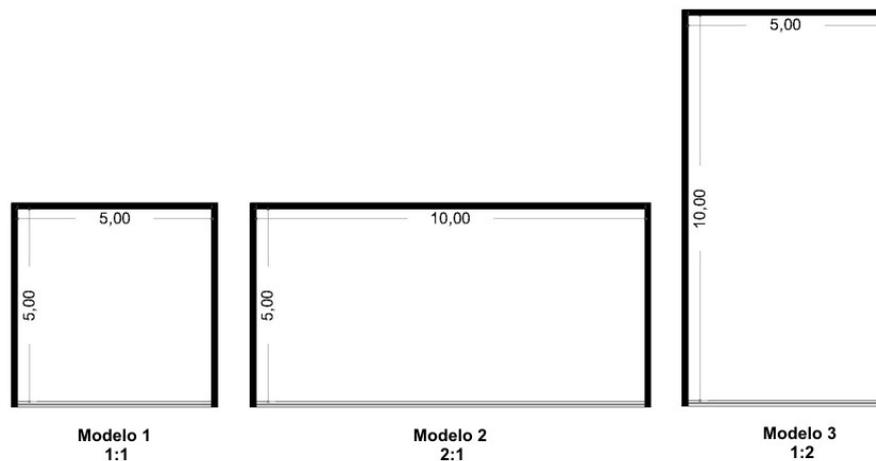


Figura 3.1. Dimensões dos modelos estudados.

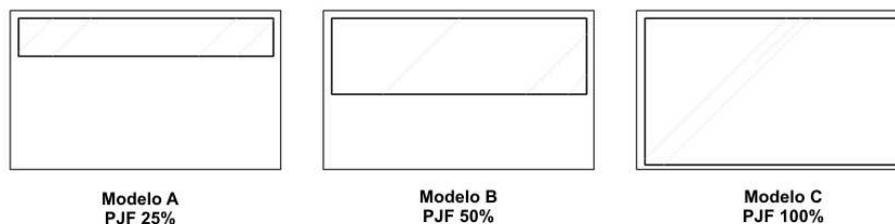


Figura 3.2. Dimensões da abertura nos modelos.

3.2.1 Simulação da iluminação natural

As simulações serão realizadas para três datas, solstício de inverno e de verão e equinócio, procurando representar todo o trajeto do sol no céu; e para o horário de trabalho, entre 8 e 18 horas.

Os programas Energyplus e Daysim/Radiance realizam suas simulações para o período de um ano, com base no arquivo climático. Desta forma, as iluminâncias encontradas variam de acordo com os dados do arquivo, aproximando-se das condições reais da iluminação natural, apresentando todas as variações do céu durante o período analisado. Já o programa TropLux realiza a simulação a partir de um tipo de céu previamente determinado, podendo ser escolhido de céu encoberto a claro.

Desta forma, para as análises das iluminâncias diárias, serão utilizados apenas dados relativos ao céu encoberto. Assim, para os programas Energyplus e Daysim/Radiance serão utilizados apenas os dias com características de céu encoberto, com $\varepsilon < 1,2$ (calculado pelo programa, através do arquivo climático) para todos os horários. Quando as datas determinadas não coincidirem com este tipo de

céu serão utilizados os dados do dia de céu encoberto mais próximo às datas pré-estabelecidas.

Para as análises anuais, as simulações do programa TropLux serão realizadas para as três datas mencionadas e para três tipos de céu: encoberto, claro e intermediário. A partir das iluminâncias encontradas para estas datas e através da ponderação pela frequência de cada tipo de céu em cada mês do ano, apresentadas na Figura 2.3. Assim, será possível obter-se iluminâncias com uma variabilidade da frequência das iluminâncias semelhante àquelas obtidas através dos outros dois programas. O programa TropLux oferece quatro métodos de cálculo da iluminância externa, nas simulações este cálculo foi realizado através do método de Tregenza. Em todas as simulações realizadas no programa TropLux, utilizou-se um erro de 5% no cálculo dos coeficientes da luz natural.

3.2.2 Análise da distribuição da iluminação natural

Para comparar as respostas dos programas para a distribuição da iluminação natural no ambiente, será utilizado a IULN (Iluminância útil da luz natural), que possibilita a verificação da frequência de ocorrência de cada faixa de iluminância. Para esta análise a simulação será realizada para o período de um ano, durante o horário de trabalho, entre 8 e 18 horas, para a cidade de Florianópolis, a partir do modelo com proporção 1:1 (Figura 3.1 - modelo 1) e PJF de 50% (Figura 3.2 - modelo B).

A partir dos valores das iluminâncias para o período de um ano, durante o horário de trabalho, serão verificadas as frequências em que cada faixa de iluminâncias ocorre. As faixas pré-estabelecidas utilizadas são as mesmas determinadas por Nabil e Mardaljevic (2005):

- a. IULN de contribuição, que compreende as iluminâncias entre 100 lx e 500 lx, onde a iluminação artificial é usada apenas para complementar a natural.
- b. IULN de substituição, com as iluminâncias entre 500 e 2000 lx, onde a iluminação natural substitui totalmente a artificial, sem causar desconforto.
- c. IULN excessiva, para as iluminâncias superiores a 2000 lx, que são consideradas excessivas, podendo causar desconforto visual e/ou térmico.

A partir desta separação das iluminâncias em faixas será possível avaliar a distribuição da iluminação no ambiente de acordo com cada programa de simulação.

3.2.3 Análise das iluminâncias internas para Florianópolis

Também, serão comparados os valores absolutos diários das iluminâncias, com o intuito de verificar a diferença entre as iluminâncias calculadas pelos três programas em função da geometria da sala (rasa ou profunda) e tamanho da abertura, para condições de céu encoberto. Embora os programas Daysim/Radiance e o TropLux possibilitem a simulação de vários pontos de referência, o programa Energyplus possibilita o cálculo de apenas dois pontos de referência para cada área da simulação. O mapa de iluminâncias gerado pelo mesmo, utilizado na análise anterior, é resultado da interpolação do resultado destes dois pontos de referência. Desta forma, nesta análise serão considerados apenas dois pontos de referência.

Para a verificação da influência da geometria da sala nas iluminâncias internas encontradas, serão simuladas as salas nas três dimensões mostradas na Figura 3.1 e com PJF de 50%. As simulações referentes à geometria da sala serão feitas para a sala clara, com refletância igual a 0,85 nas paredes e 0,60 no piso; e para uma sala com reflexão interna igual a zero (corpo negro). Os pontos de referência analisados nestas simulações estão representados na Figura 3.3.

Para a análise da influência do tamanho da abertura, serão simuladas três salas com PJFs iguais a 25%, 50% e 100%, conforme a Figura 3.2, para o modelo de sala clara e com proporção igual a 1:1 (5m x 5m x 3m). Os dois pontos onde as iluminâncias serão analisadas estão representados no modelo 1 da Figura 3.3.

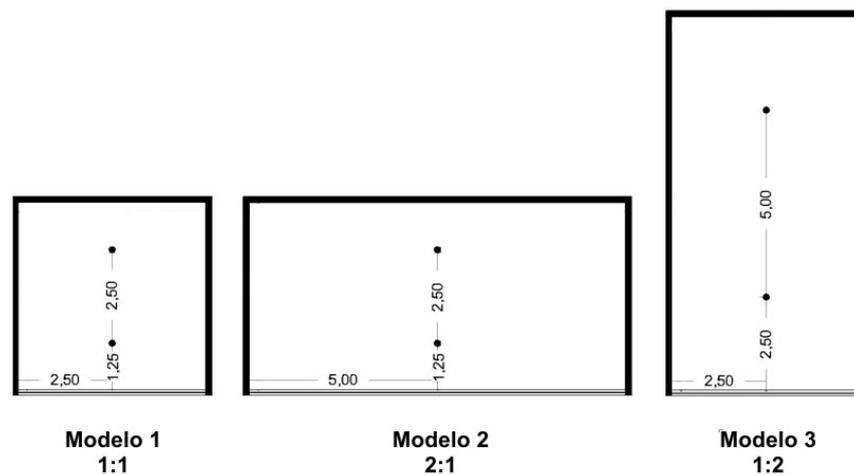


Figura 3.3. Localização dos pontos analisados para cálculo da iluminância em função da geometria.

3.2.4 Análise das iluminâncias em função da latitude

Esta análise verifica a influência da latitude no cálculo das iluminâncias, uma vez que o modelo utilizado pelos programas Energyplus e Daysim/Radiance, desenvolvido por Perez et al. (1990), para o cálculo da iluminância externa horizontal é baseado em dados coletados apenas em cidades com latitude próximas a 45°. Assim, serão comparadas as iluminâncias dos três programas para cada uma das cinco cidades, verificando se a diferença entre as iluminâncias encontradas nas outras análises ocorre para diferentes latitudes.

As simulações serão realizadas para três datas, solstício de verão e inverno e equinócio, a partir do modelo de proporção 1:1, com PJF igual a 50%, de acordo com a Figura 3.1 - modelo 1, e Figura 3.2 - modelo B, para cinco cidades: Belém, Brasília, Florianópolis, Genebra e Oslo. Os arquivos climáticos utilizados para cada cidade estão apresentados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Cidades e latitudes simuladas e arquivos climáticos utilizados

Cidade	Latitude	Arquivo Climático	Fonte
Belém	1°22'S	BelemTRY1964_05CSV	LabEEE, 2006.
Brasília	15°52'S	BrasiliaTRY1962_05CSV	LabEEE, 2006.
Florianópolis	27°40'S	FlorianopolisTRY1963_05CSV	LabEEE, 2006.
Genebra	46°15'N	CHE_Geneva_IWEC	EERE, 2007.
Oslo	59°54'N	NOR_Oslo.Fornebu_IWEC	EERE, 2007.

3.2.5 Verificação do cálculo do fator de luz diurna para Florianópolis

Sabendo que o cálculo da iluminação interna, no programa Energyplus, é realizado com base no fator de luz diurna, optou-se por comparar os valores deste índice com os dos outros dois programas.

As simulações serão realizadas para os três programas, onde serão analisadas todas as dimensões de salas e de abertura anteriormente citadas. Em cada uma delas será verificado o fator de luz diurna de cinco pontos ao longo da sala, todos alinhados com o meio da janela, a uma altura de 0,75m, de acordo com a Figura 3.4. Como mencionado anteriormente, o programa Energyplus realiza o cálculo de apenas dois pontos de referência, a partir dos quais calcula a iluminância, e pondera estes valores para os outros pontos desejados. Esta análise será realizada para cinco pontos, para possibilitar a análise da resposta do programa à medida que aumenta a distância entre o ponto analisado e a abertura.

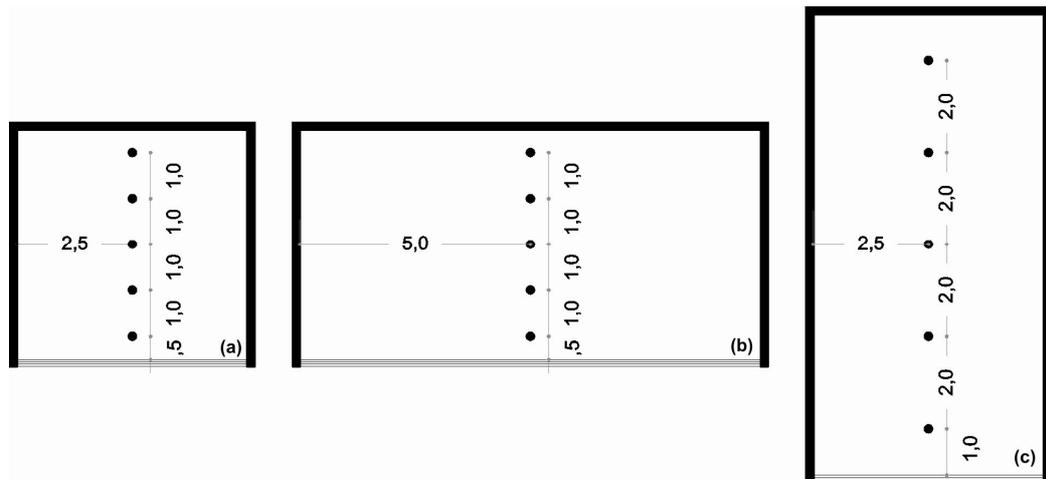


Figura 3.4. Localização dos pontos nas salas para análise do fator de luz diurna.

Os programas Daysim/Radiance e TropLux fornecem o FLD como resultado da simulação, já para o programa Energyplus o FLD será calculado para um dia de céu encoberto a partir da Equação 3.1.

$$FLD = \frac{E_p}{E_{hext}} \times 100\% \quad \text{Equação 3.1}$$

onde:

FLD: Fator de luz diurna, [%];

E_p : Iluminância no ponto de referência [lx];

E_{hext} : Iluminância horizontal externa difusa [lx].

3.3 Avaliação do modelo desenvolvido por Perez para o clima de Florianópolis

Para a verificação da aplicabilidade do modelo desenvolvido por Perez, para o clima de Florianópolis, serão primeiro comparados os dados de radiação do arquivo climático (FlorianopolisTRY1963_05CSV) com os dados medidos, e em seguida será realizada a análise das iluminâncias externas horizontais.

Sabendo que os cálculos do Energyplus e do Daysim/Radiance são todos baseados nos dados do arquivo climático, um possível erro nestes valores poderia ser a causa dos altos valores de iluminância estimados por estes programas. Através das comparações com os dados medidos, será possível saber se as diferenças nas

iluminâncias são decorrentes do arquivo climático ou do método de cálculo do programa.

Assim, será realizada uma comparação entre os dados da radiação difusa e direta, temperatura e umidade do arquivo climático da cidade de Florianópolis, referente ao ano de 1963, com os dados de 2003 a 2005, da estação de medição do LabSolar (Laboratório de Energia Solar - UFSC), localizada em Florianópolis. É importante salientar que as radiações encontradas no arquivo climático TRY foram calculadas a partir da cobertura total de nuvens de um ano sem temperaturas extremas, conforme item 2.4.

Uma vez comparados os dados medidos de radiação, temperatura e umidade com os do arquivo climático, serão comparadas as iluminâncias externas medidas com as calculadas através do modelo de Perez et al. (1990) a partir dos dados coletados juntamente com as iluminâncias. Para esta análise serão utilizados dados de radiação, temperatura, umidade e ângulo zenital, coletados pelo LabSolar, e as iluminâncias externas horizontais difusas (E_{ndif}) e diretas (E_{ndir}) coletadas pela Estação de Medição de Iluminação Natural de Florianópolis (EMIN-Floripa), através do LabSolar e LabCon (Laboratório de Conforto Ambiental), da UFSC. Os dados coletados serão utilizados em base horária.

O modelo de Perez et al. (1990) baseia-se em quatro parâmetros, para caracterizar o céu e estimar a iluminância, sendo eles: índice de claridade do céu (ϵ – da Equação 2.6), ângulo zenital (Z), índice do brilho do céu (Δ – Equação 2.4) e vapor de água na atmosfera (W - Equação 3.2). Estes parâmetros serão calculados a partir dos dados coletados pelo LabSolar, entre 2003 e 2005, a partir das equações a seguir.

$$W = \exp(0,07 \times T_d - 0,075) \quad \text{Equação 3.2}$$

onde:

W: Vapor de água na atmosfera [cm];

T_d : Temperatura de orvalho [°C].

O cálculo das iluminâncias externas é realizado a partir do ângulo zenital, brilho do céu e vapor de água na atmosfera, sendo que são usados diferentes coeficientes para cada categoria da claridade do céu, conforme a Tabela 3.2. Com base nestes dados e coeficientes, a iluminância horizontal difusa será calculada a partir da Equação 3.3, e a iluminância direta da Equação 3.4.

Tabela 3.2. Coeficientes para cálculo das iluminâncias externas

ϵ	Iluminância Horizontal Difusa				Iluminância Horizontal Direta			
	a_i	b_i	c_i	d_i	a_i	b_i	c_i	d_i
1	97,24	-0,46	12,00	-8,91	57,20	-4,55	-2,98	117,12
2	107,22	1,15	0,59	-3,95	98,99	-3,46	-1,21	12,38
3	104,97	2,96	-5,53	-8,77	109,83	-4,90	-1,71	-8,81
4	102,39	5,59	-13,95	-13,90	110,34	-5,84	-1,99	-4,56
5	100,71	5,94	-22,75	-23,74	106,36	-3,97	-1,75	-6,16
6	106,42	3,83	-36,15	-28,83	107,19	-1,25	-1,51	-26,73
7	141,88	1,90	-53,24	-14,03	105,75	0,77	-1,26	-34,44
8	152,23	0,35	-45,27	-7,98	101,18	1,58	-1,10	-8,29

Fonte: Adaptado de Perez et al., 1990.

$$E_{hDif} = I_{Dh} [a_i + b_i W + c_i \cos(Z) + d_i \ln(\Delta)] \quad \text{Equação 3.3}$$

onde:

E_{hDif} : Iluminância horizontal difusa [lx];

I_{Dh} : Radiação difusa horizontal [W/m²];

W : Vapor de água na atmosfera [cm];

Z : Ângulo zenital [rad];

Δ : Índice do brilho do céu;

a_i, b_i, c_i, d_i : coeficientes, obtidos através da Tabela 3.2 de acordo com o índice de claridade do céu (ϵ).

$$E_{hDir} = \max\{0, I[a_i + b_i W + c_i \exp(5,73Z - 5) + d_i \Delta]\} \quad \text{Equação 3.4}$$

onde:

E_{hDir} : Iluminância horizontal direta [lx];

I : Radiação direta [W/m²];

W : Vapor de água na atmosfera [cm];

Z : Ângulo zenital [rad];

Δ : Índice do brilho do céu;

a_i, b_i, c_i, d_i : coeficientes, obtidos através da Tabela 3.2 de acordo com o índice de claridade do céu (ϵ).

Para uma melhor avaliação deste modelo serão utilizados os seguintes índices: viés médio (viesM) e o erro quadrático médio (EQM), mostrados nas

Equações 3.7 e 3.8, respectivamente. A partir do viés será possível verificar a tendência do modelo em superestimar ou subestimar as iluminâncias calculadas, enquanto o erro quadrático médio mostra o erro absoluto entre as grandezas analisadas.

$$viesM = \frac{\sum_i^N (y_i - x_i) / x_i}{N} \quad \text{Equação 3.5}$$

onde:

- viesM*: Viés médio [%];
y_i: Iluminância estimada [lx];
x_i: Iluminância medida [lx];
N: Número de valores analisados, adimensional.

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum_i^N ((y_i - x_i) / x_i)^2}{N}} \quad \text{Equação 3.6}$$

onde:

- EQM*: Erro quadrático médio [%];
y_i: Iluminância estimada [lx];
x_i: Iluminância medida [lx];
N: Número de valores analisados, adimensional.

Para a verificação da coerência do modelo desenvolvido por Perez et al. (1990) serão analisados os gráficos dos resíduos (diferença entre o valor estimado e o real). Segundo Carlson e Thorne (1997), para a verificação de modelos de regressão é importante a análise gráfica dos resíduos, através da qual pode se verificar o ajuste do modelo diante das variáveis independentes e do valor estimado. Os gráficos de resíduos que apresentam padrões podem ser resultado de modelo determinado de forma incorreta.

Desta forma serão analisados os gráficos dos resíduos em função do valor estimado (iluminância). De acordo com Johnson e Wichern (1998), gráficos que se assemelhem a Figura 3.5 (a), representam modelos incorretos ou onde a constante da equação foi omitida. Gráficos em que a variação não é constante, como na Figura 3.5 (b) onde os resíduos formam um padrão de forma afunilada, sugerem a necessidade

de transformações na equação. Os gráficos semelhantes aos da Figura 3.5 (c), representam uma variação homogênea, sem dependência do valor estimado.

Outra análise a ser realizada é o gráfico dos resíduos em função das variáveis do modelo. Quando esta análise resulta em gráficos com padrões sistemáticos, como o encontrado na Figura 3.5 (d), tem-se a necessidade da inclusão de um ou mais termos no modelo.

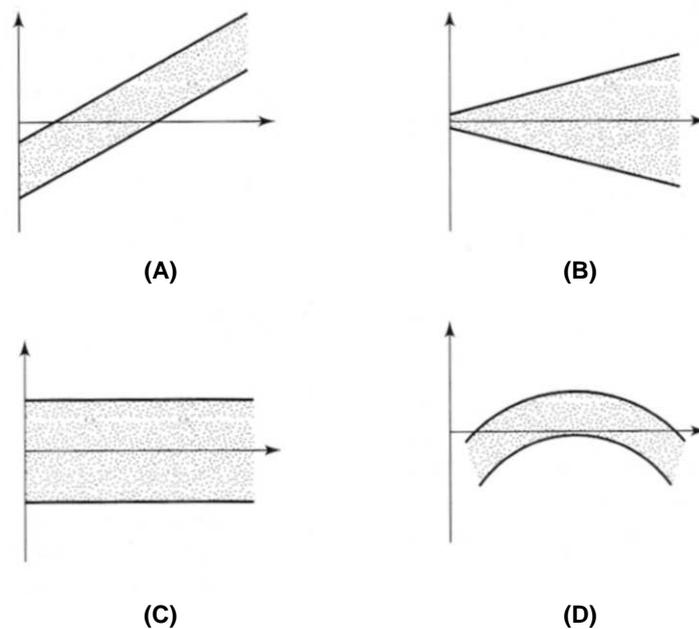


Figura 3.5. Modelos dos gráficos dos resíduos em função dos valores estimados e das variáveis de um modelo de regressão múltipla.

Fonte: Johson e Wichern, 1998.

3.4 Correção dos coeficientes utilizados para o cálculo das iluminâncias

O modelo de previsão da iluminância analisado neste trabalho foi desenvolvido a partir de dados coletados em cidades com latitudes entre 40° e 46°, conforme a Tabela 2.2. Desta forma, o cálculo de coeficientes baseados em dados locais pode resultar em iluminâncias mais próximas às medidas. Partindo da suposição de que a equação é adequada, serão realizadas as correções dos coeficientes utilizados nas equações de Perez et al. (1990); caso a equação não seja a ideal estes novos coeficientes podem diminuir o erro existente.

Para o cálculo dos coeficientes locais será utilizado o mesmo conjunto de dados coletados pela EMIN-Floripa, fornecido pelo LabSolar e LabCon. Os dados dos anos de 2004 serão usados para a correção dos coeficientes, enquanto os dados de 2003 e 2005 serão utilizados apenas para a avaliação dos coeficientes locais. A correção dos coeficientes será realizada por meio do programa Excel, através da ferramenta de análise de dados – Regressão, com base nas equações desenvolvidas por Perez para o cálculo da iluminância horizontal difusa (Equação 3.3) e direta (Equação 3.4).

A avaliação destes coeficientes será realizada através da correlação com as iluminâncias medidas, do cálculo do viés médio (viesM - Equação 3.5) e do erro quadrático médio (EQM - Equação 3.6).

4. Resultados e Discussão

4.1 Introdução

Neste capítulo do trabalho são apresentados os resultados obtidos através das simulações, buscando avaliar o cálculo das iluminâncias realizado através do Energyplus, baseado no método desenvolvido por Perez et al. (1990). Esta avaliação será feita através de comparações com os resultados obtidos dos programas Daysim/Radiance e TropLux, além da comparação com as iluminâncias externas medidas.

4.2 Avaliação do cálculo da iluminação natural

A seguir são apresentadas as comparações entre os resultados das simulações dos programas Energyplus, Daysim/Radiance e TropLux. Os resultados são referentes à distribuição da luz no ambiente interno para o período de um ano, valores das iluminâncias diárias para Florianópolis e também para cinco cidades com latitudes diferentes, e o fator de luz diurna de cada ambiente analisado, para Florianópolis.

4.2.1 Análise das iluminâncias internas

Para possibilitar uma melhor visualização da diferença da distribuição das iluminâncias na sala ao longo de um ano, entre os programas estudados, utilizou-se da iluminância útil da luz natural (IULN). A partir da análise dos resultados anuais da simulação, verificou-se a frequência em que cada faixa de iluminâncias ocorre e a distribuição das mesmas no ambiente. Esta análise foi realizada para a cidade de Florianópolis, para o modelo com proporção 1:1 e um PjF de 50%, com a abertura voltada para o sul.

Neste trabalho, as iluminâncias encontradas através de simulação foram divididas de acordo com a contribuição da iluminação natural para o ambiente estudado. Assim, as iluminâncias foram separadas em três faixas: a primeira, IULN de contribuição, compreende as iluminâncias entre 100 e 500 lx, onde é necessária a complementação da iluminação artificial para atender as condições de conforto visual, referentes ao nível de iluminação do ambiente. A segunda, IULN de substituição,

engloba as iluminâncias entre 500 e 2000 lx, faixa onde a luz natural é a única responsável pela iluminação do ambiente; e a IULN excessiva, que abrange as iluminâncias acima de 2000 lx, uma vez que podem causar desconforto visual aos usuários do ambiente.

A Figura 4.1 mostra a distribuição da frequência de cada faixa de iluminâncias, de acordo com a pré-determinação acima, para os programas Energyplus, Daysim/Radiance e TropLux. A figura representa a frequência em que cada faixa de iluminância ocorre durante o período de um ano, para o horário de trabalho, ao longo da sala. A parte inferior de cada imagem ilustra a área da sala próxima à janela, e conseqüentemente com iluminâncias mais altas.

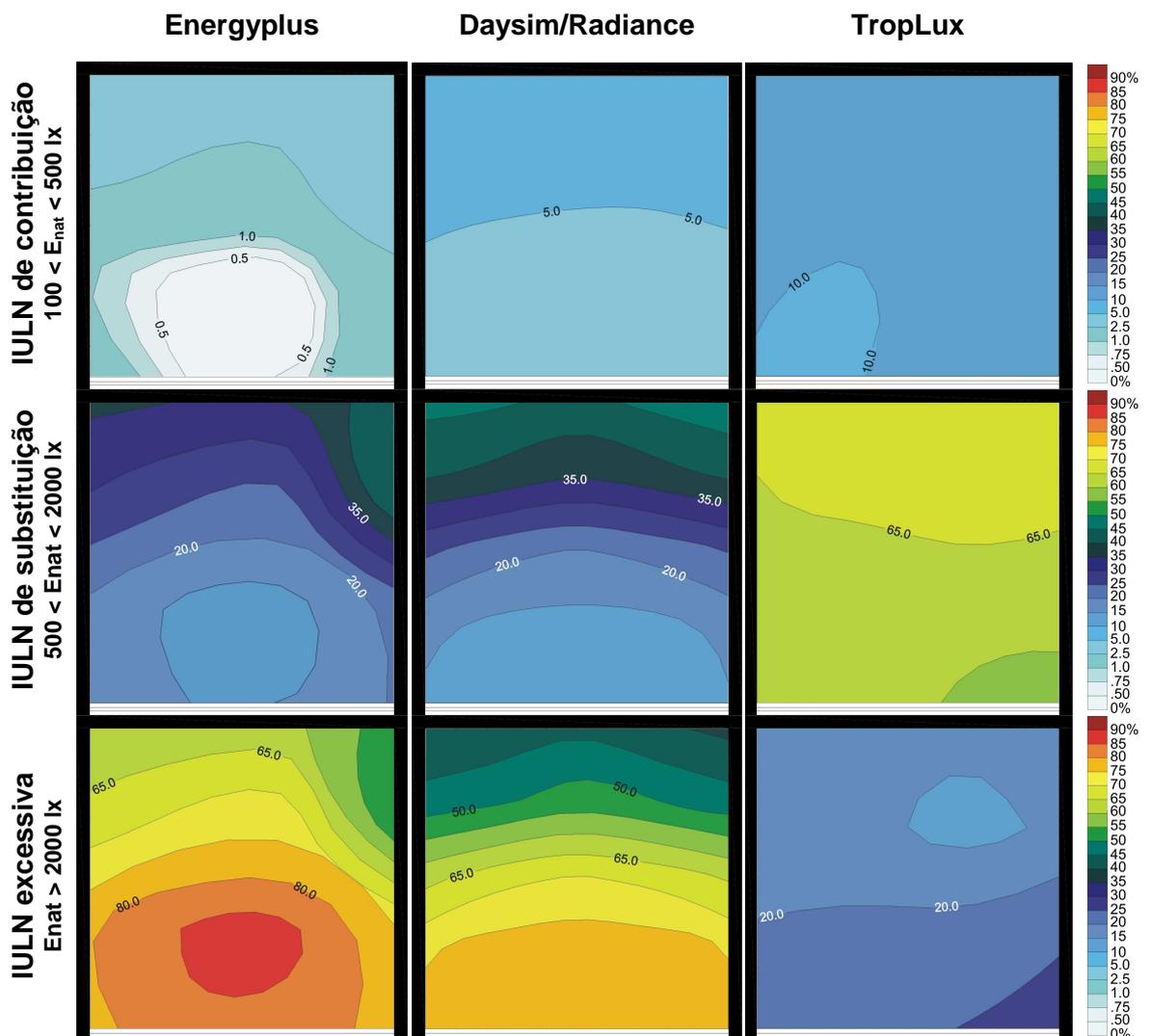


Figura 4.1. IULN calculada através da simulação da iluminação natural, para sala com: PJF de 50%, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60; para Florianópolis.

A partir da Figura 4.1 percebe-se que, apesar dos programas Energyplus e Daysim/Radiance possuírem frequências de ocorrência semelhantes, a distribuição

das iluminâncias é diferente para cada um dos três programas analisados. A distribuição das iluminâncias para o programa Energyplus é consequência do cálculo das iluminâncias com base em apenas dois pontos de referência e ponderando as iluminâncias do resto da sala a partir destes dois pontos. O programa Daysim/Radiance resulta em uma distribuição em que as iluminâncias decrescem, em direção ao fundo da sala, paralelamente à abertura. E o programa TropLux apresenta uma menor variação da ocorrência de cada faixa de iluminância.

Para a IULN de contribuição, onde as iluminâncias estão entre 100 e 500 lx, o programa Energyplus apresentou as menores porcentagens de ocorrência destas iluminâncias, variando de 0 a 2,5% das horas de trabalho em um ano. O programa TropLux, apresenta a maior frequência de ocorrência desta faixa entre os três programas (mais de 10% do tempo). Para os três programas, a ocorrência destas iluminâncias é maior nos pontos mais afastados da abertura, e, devido ao tamanho da abertura e alta refletância das superfícies da sala, esta faixa de iluminâncias ocorre em poucos períodos do ano.

Os programas Energyplus e Daysim/Radiance apresentaram valores semelhantes para a ocorrência da faixa de iluminância onde ocorre a substituição da iluminação artificial pela natural. Estes programas apresentam uma ocorrência desta faixa em 15% próximo à abertura e 45% no fundo da sala. O programa TropLux apresenta uma frequência maior destas iluminâncias, que ocorrem entre 60% e 70% de um ano durante o horário de trabalho. Assim como na faixa anterior estas iluminâncias são mais frequentes no fundo da sala. Este comportamento, no entanto, não ocorre para a IULN excessiva, onde estão apresentadas as iluminâncias que podem causar desconforto ao usuário. Nesta faixa, a frequência maior se dá próxima à abertura, chegando a 85% para o Energyplus e 75% para o Daysim/Radiance. Os resultados obtidos através das simulações realizadas no TropLux mostraram frequências bem menores destas iluminâncias, que ocorrem em menos de 25% das horas de trabalho de um ano.

Os resultados apresentados na Figura 4.1 foram obtidos através de simulações para um modelo com abertura na fachada sul, desta forma, os níveis de iluminação mostrados foram obtidos na maior parte do tempo apenas pela iluminação difusa. A partir da carta solar, apresentada na Figura 4.2, pode-se verificar que há incidência da luz direta no interior da sala em cerca de 15% das horas de um ano, durante o horário de trabalho, o que não justifica a alta ocorrência de iluminâncias superiores a 2000lx que ocorrem para os programas Energyplus e Daysim/Radiance. Assim, estes índices não são originados pela incidência direta dos raios solares na

superfície de trabalho, mas indicam uma diferença originada principalmente pela diferença na base de cálculo da iluminação; onde o programa TropLux utiliza modelos de céu fixos, definidos pela CIE (*Commission Internationale de l'Eclairage*); e os outros dois programas utilizam o modelo de céu desenvolvido por Perez.

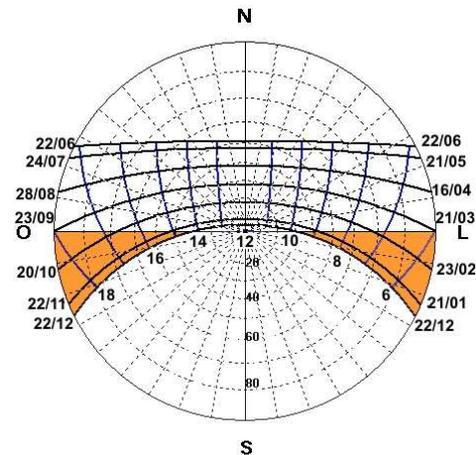


Figura 4.2. Carta solar de Florianópolis, com os horários de radiação direta para a fachada sul.

Fonte: Adaptado de Sol-AR 6.1.1

Dada a diferença da frequência das iluminâncias de cada faixa de iluminação encontrada a partir da simulação realizada em cada programa, parte-se para a análise das iluminâncias para esta e outras geometrias, verificando se esta tendência permanece para outras geometrias, tamanhos de abertura e refletância igual a zero.

4.2.2 Análise das iluminâncias internas em função da geometria da sala

A partir da simulação das iluminâncias para dois pontos de referência, para as três datas estabelecidas com condições de céu encoberto, compararam-se os resultados dos três programas. Para os programas Energyplus e Daysim/Radiance, foram utilizados os dados de dias que apresentavam condições de céu encoberto ($\varepsilon < 1,2$) durante todo o período. Os resultados das simulações são apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4 onde pode-se observar a grande diferença entre as iluminâncias obtidas pelos programas de simulação Energyplus e Daysim/Radiance, cuja simulação é realizada a partir do modelo dinâmico de céu desenvolvido por Perez, e pelo TropLux, que realiza simulação através de modelos estáticos. As iluminâncias encontradas através dos programas que utilizam o modelo desenvolvido por Perez são relativamente semelhantes e, em média, 40% maiores que aquelas encontradas

através de modelos de céu estático. Estas diferenças são ainda maiores para os períodos em que a altura solar é menor, este fato pode ser notado nas Figuras 4.3 (d) e 4.4 (d), nos períodos referentes ao início da manhã e final da tarde.

A Figura 4.3 mostra as iluminâncias internas obtidas pelos três programas, para a sala de proporção 1:1 com alta refletância, para as três datas simuladas, sendo: o gráfico A referente ao solstício de verão, o B para o equinócio e o C para o solstício de inverno, enquanto as diferenças encontradas entre eles estão representadas no gráfico D. Percebe-se que as iluminâncias diminuem entre o verão e o inverno como esperado, com uma diferença de aproximadamente 4klx para os programas Energyplus e Daysim/Radiance, e de 2klx para o TropLux. Na Figura 4.3 (d) observa-se que a menor variação ocorre entre os dois programas que realizam simulação através do arquivo climático (Energyplus e Daysim/Radiance), com uma diferença próxima aos 10% na maior parte do dia.

Para a sala de proporção 2:1, cujos resultados estão no Apêndice , com a abertura na maior fachada, as iluminâncias encontradas são cerca de 1klx maiores que as do primeiro modelo, e as diferenças entre os programas também semelhantes ao modelo anterior, apresentado na Figura 4.3.

A sala com proporção de 1:2, cujos resultados são apresentados na Figura 4.4, possui os menores valores de iluminância. Neste modelo, os dois pontos de referência apresentam uma maior diferença entre as iluminâncias encontradas através de cada programa de simulação. As diferenças são maiores para o ponto de referência dois, afastado da abertura, com exceção da comparação entre os programas Daysim/Radiance e TropLux, em que ambos os programas utilizam o método do raio traçado para o cálculo. As iluminâncias encontradas neste modelo, pelo Energyplus, para o ponto próximo à abertura, variam de -60% a 20% em relação as do Daysim/Radiance; enquanto para o ponto 2, são de 40 a 70% maiores. Já a diferença entre o TropLux e Energyplus varia entre 7 e 70% para o ponto um, e de 50 a 85% para o segundo ponto de referência. E ao contrário da comparação entre os outros programas, para este modelo, as diferenças entre as iluminâncias originadas pelo TropLux e Daysim/Radiance, são menores para o ponto afastado da abertura, onde a diferença varia de 10 a 45%, enquanto para o ponto próximo da abertura esta diferença está entre 33 e 60%.

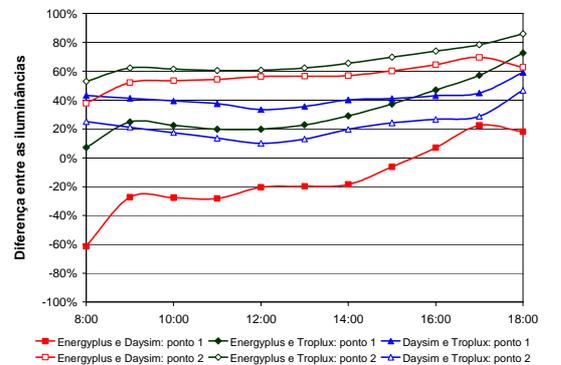
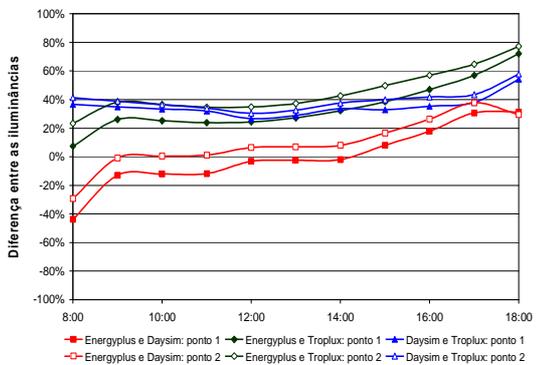
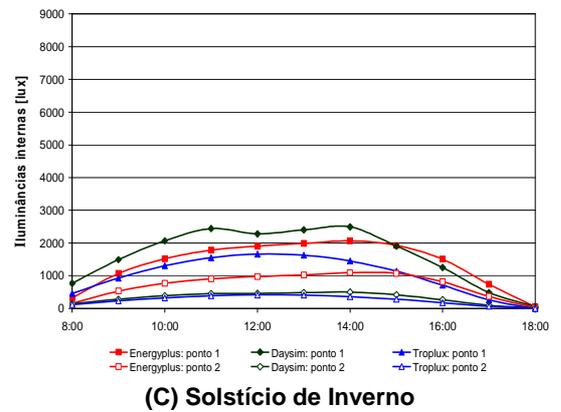
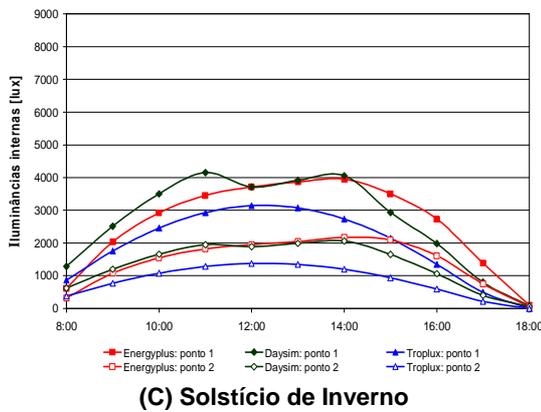
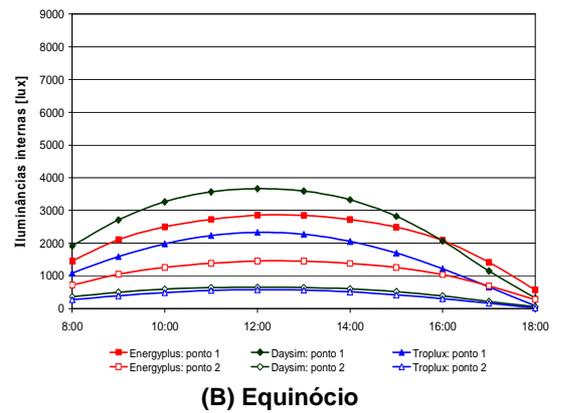
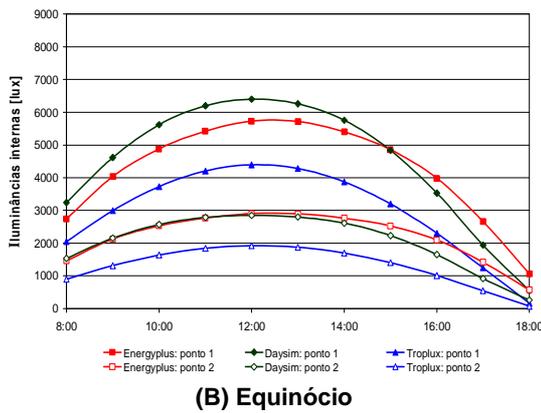
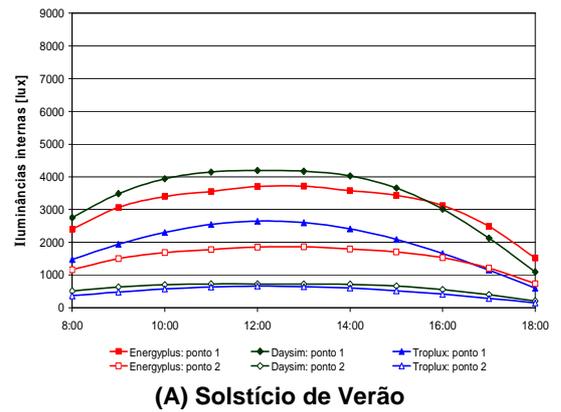
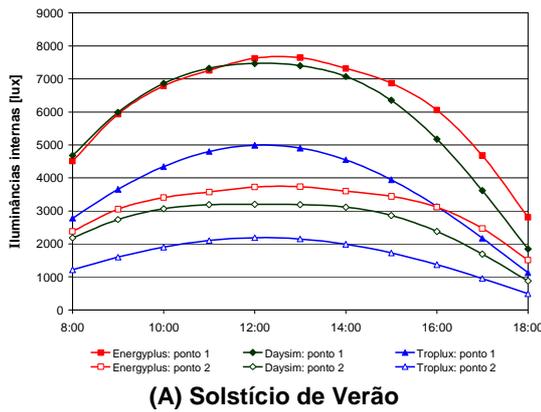


Figura 4.3. Valores das iluinaências internas para o modelo de proporção 1:1, com PJF de 50%; para Florianópolis

Figura 4.4. Valores das iluinaências internas para o modelo de proporção 1:2, com PJF de 50%; para Florianópolis

A Figura 4.3 (c) mostra o reflexo do céu dinâmico de Perez, onde qualquer alteração no céu durante o dia é percebida e altera a curva das iluminâncias. O céu 'estático' dá uma resposta para uma determinada condição, durante todo o período analisado, enquanto o céu 'dinâmico' procura responder as várias condições de céu que ocorrem em determinado período.

Ao comparar as três geometrias percebe-se que, com exceção do erro entre o Daysim/Radiance e TropLux para o ponto dois no modelo de 1:2, as menores diferenças estão sempre relacionadas à sala de proporção 1:1, com um erro médio de 27%. Para o ponto próximo à janela, as maiores diferenças estão relacionadas à sala de proporção 2:1, com uma diferença máxima de 83%. Enquanto para o ponto afastado da janela a maior diferença, 86%, é dada para o modelo com proporção 1:2, modelo em que o segundo ponto de referência é o mais afastado do local de entrada da luz no ambiente.

Como mostrado no item 2.3.1, o método utilizado pelo programa Energyplus apresenta um cálculo simplificado para a resolução da reflexão interna da luz. Assim, simulou-se estes mesmos modelos com reflexão interna igual a zero (corpo negro); desta forma será analisada apenas a parcela de luz proveniente diretamente do céu, verificando qual a parcela do erro é referente ao cálculo da reflexão interna. Os resultados apresentados na Figura 4.5 mostram iluminâncias abaixo das encontradas para o modelo anterior, principalmente para o ponto de referência afastado da abertura. Para o ponto de referência próximo à abertura, a maior queda na iluminância ocorre para o programa Energyplus durante o solstício de verão e o equinócio. Mesmo com uma diminuição de até 3klx, no verão, para o programa Energyplus, a diferença encontrada entre os programas continua alta. Na Figura 4.5 (d) pode-se verificar que o erro entre os programas Energyplus e Daysim/Radiance varia em torno de 40%, enquanto no primeiro modelo era de 10%. Comparando o resultado entre os três programas, percebe-se que as iluminâncias obtidas através do Energyplus obtiveram a maior queda com a retirada da parcela da iluminação natural refletida. No entanto, mesmo sem esta parcela, os valores encontrados pelo Energyplus e Daysim/Radiance são de 20 a 80% maiores que os encontrados pelo TropLux, programa que utiliza modelos de céu como base da simulação. Uma vez que mesmo sem considerar a parcela refletida, a diferença entre os resultados dos programas é alta, optou-se por continuar as simulações apenas com as salas de alta refletância.

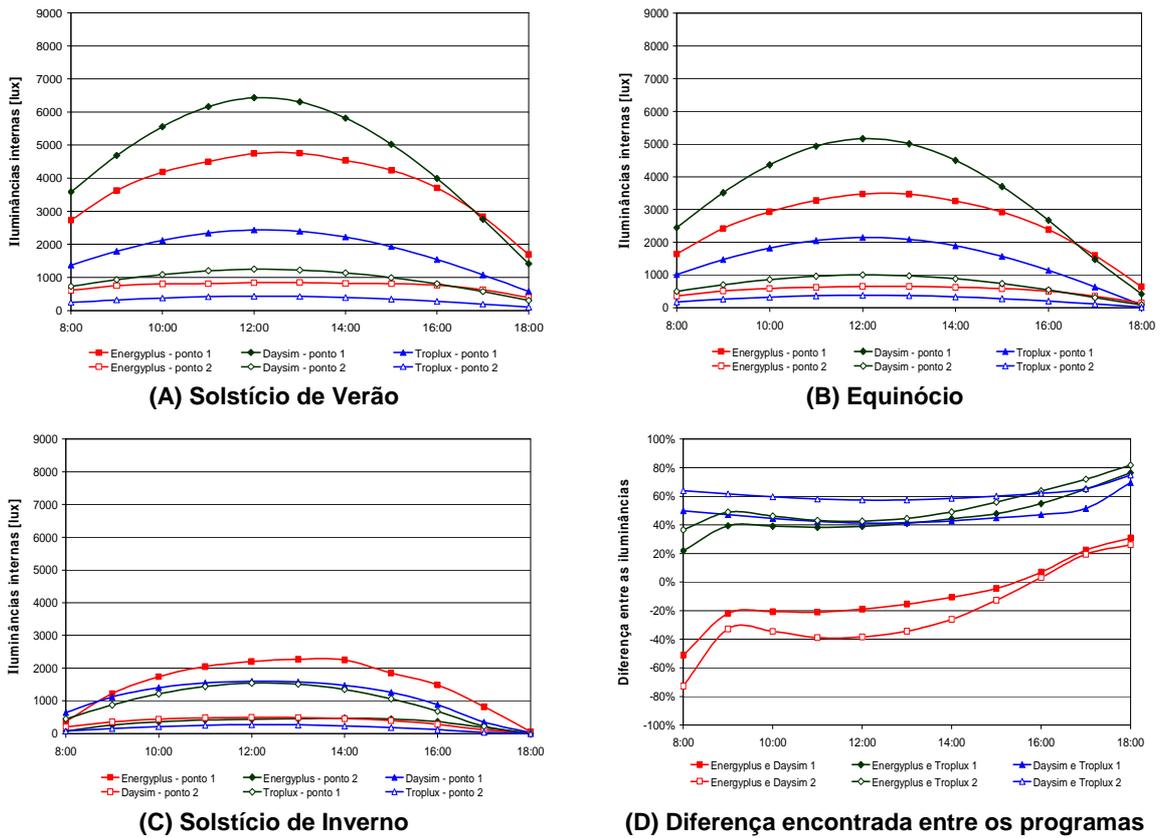


Figura 4.5. Valores das iluminâncias internas para o modelo de proporção 1:1, com PJJ de 50% e refletância igual a zero; para Florianópolis.

4.2.3 Análise das iluminâncias internas em função do tamanho da abertura

A análise da influência do tamanho da abertura foi realizada para três salas de proporção 1:1, com PJFs iguais a 25%, 50% e 100%. Os resultados são apresentados nas Figuras 4.6 a 4.8. Verificou-se que a diferença encontrada entre os programas Daysim/Radiance e TropLux é de aproximadamente 60% para os três modelos, que, ao contrário das outras comparações, possui pequena variação de diferença entre os diferentes tamanhos de abertura analisados.

A Figura 4.6 (a) mostra as iluminâncias encontradas para os dois pontos de referência para o modelo com abertura em 25% da fachada; enquanto a Figura 4.6 (b) mostra as diferenças encontradas nas iluminâncias entre os programas de simulação. Neste modelo, ao comparar os resultados obtidos, observou-se que os erros encontrados foram diferentes entre os dois pontos de referência, com exceção das análises entre os programas Daysim/Radiance e o TropLux. Assim, para o ponto um, o programa Energyplus resulta em dados de 86% menores a 33% maiores que os do Daysim/Radiance, e com uma diferença de -10 a 74% os resultados do programa

TropLux. Já para o ponto de referência afastado da abertura estas diferenças possuem uma amplitude menor, variando de 1 a 47% entre as iluminâncias geradas pelo Energyplus e Daysim/Radiance, e de 40 a 78% entre as do Energyplus e TropLux.

Para a sala com PJF igual a 50%, apresentada na Figura 4.7, a diferença entre os erros encontrados para os dois pontos de referência é menor. Neste modelo os valores obtidos a partir do programa Energyplus são de 7 a 77% maiores que os encontrados através do programa TropLux. E, quando comparadas aos resultados do programa Daysim/Radiance, as iluminâncias obtidas pelo Energyplus são de 44% menores a 31% maiores, para o ponto um; e de 29% menores a 34% maiores para o ponto dois.

A Figura 4.8 mostra os resultados para o modelo com PJF de 100%, em que há maior entrada de luz; este modelo, não apresenta diferença significativa entre os dois pontos de referência, quando comparados os valores obtidos através do Energyplus e Daysim/Radiance. Assim, a variação entre os resultados destes programas é de 5% a 35%; enquanto entre o Energyplus e o TropLux a variação é de 12 a 74% para o ponto próximo à abertura e de 27 a 78 para o segundo ponto.

Ao analisar os três modelos conjuntamente, observa-se que quanto maior a entrada de luz no ambiente, menor é a diferença entre os resultados dos programas Energyplus e Daysim/Radiance. No entanto, a comparação entre estes programas e o TropLux não apresenta grande diferença entre os modelos; entre o TropLux e Daysim/Radiance a diferença é de aproximadamente 40% para os dois pontos.

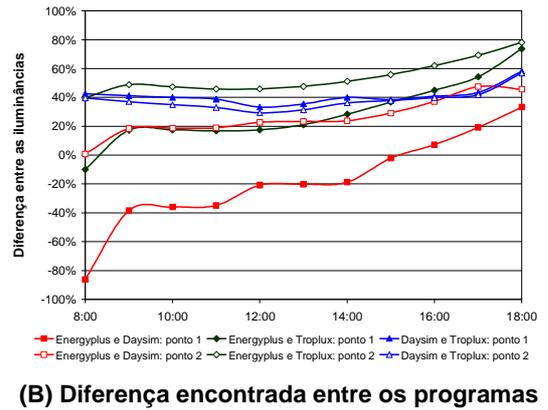
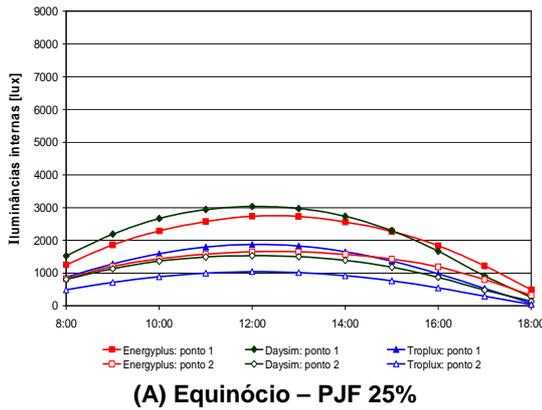


Figura 4.6. Valores das iluminâncias internas para o modelo com PPF de 25%, proporção 1:1, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60; para Florianópolis.

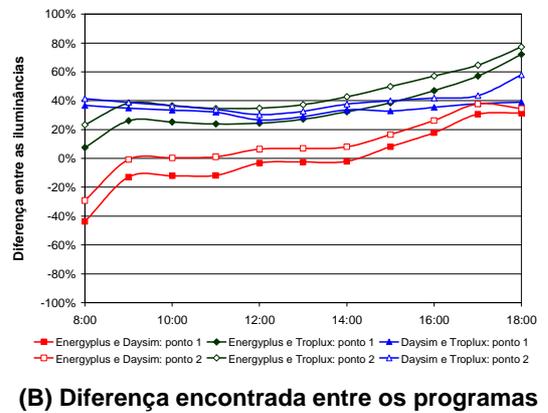
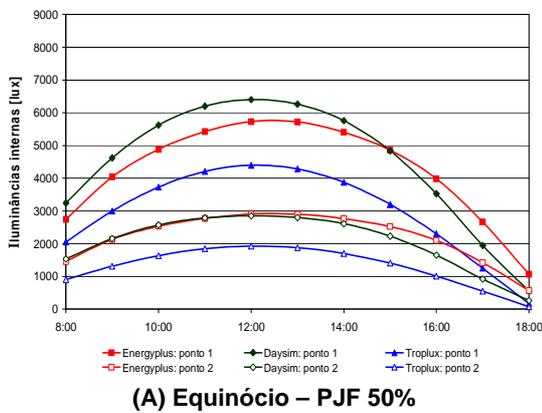


Figura 4.7. Valores das iluminâncias internas para o modelo com PPF de 50%, proporção 1:1, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60; para Florianópolis.

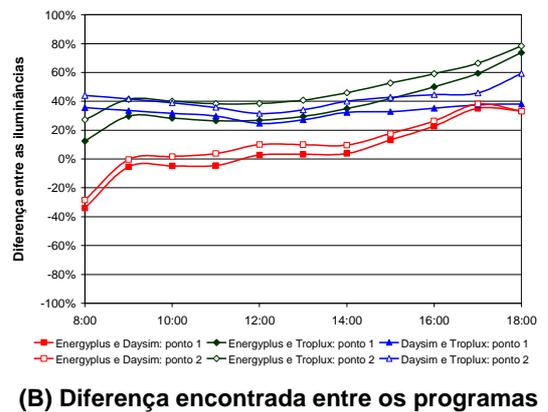
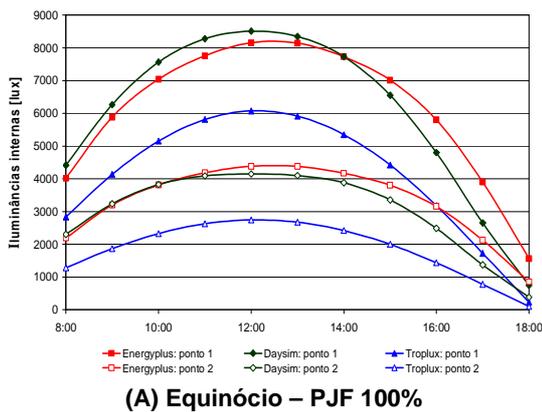


Figura 4.8. Valores das iluminâncias internas para o modelo com PPF de 100%, proporção 1:1, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60; para Florianópolis.

4.2.4 Análise das iluminâncias em função da latitude

Uma vez verificadas as iluminâncias para as três geometrias de salas e três tamanhos de aberturas, para o clima de Florianópolis, foram realizadas simulações para o modelo de sala quadrada com abertura em 50% da fachada com menor incidência direta dos raios solares (sul, para as cidades do hemisfério sul; e norte, para as cidades do hemisfério norte), para o céu encoberto, para cidades com diferentes latitudes. Esta análise tem o intuito de verificar se a diferença entre as iluminâncias, encontradas pelos três programas, ocorre também para o clima de outras cidades.

Os resultados destas simulações são apresentados nas Figuras 4.9 a 4.13, a partir das quais pode-se notar que as iluminâncias diminuem com o aumento da latitude, conforme esperado, principalmente para os dois programas que calculam as iluminâncias a partir do arquivo climático. Na Figura 4.9 onde estão representadas as iluminâncias encontradas para a cidade de Belém, os valores resultantes do programa Daysim/Radiance chegam a mais de 8 klx, enquanto para a cidade de Oslo, com latitude próxima a 60°, alcança no máximo 3 klx, para o mesmo programa, como pode-se verificar na Figura 4.13.

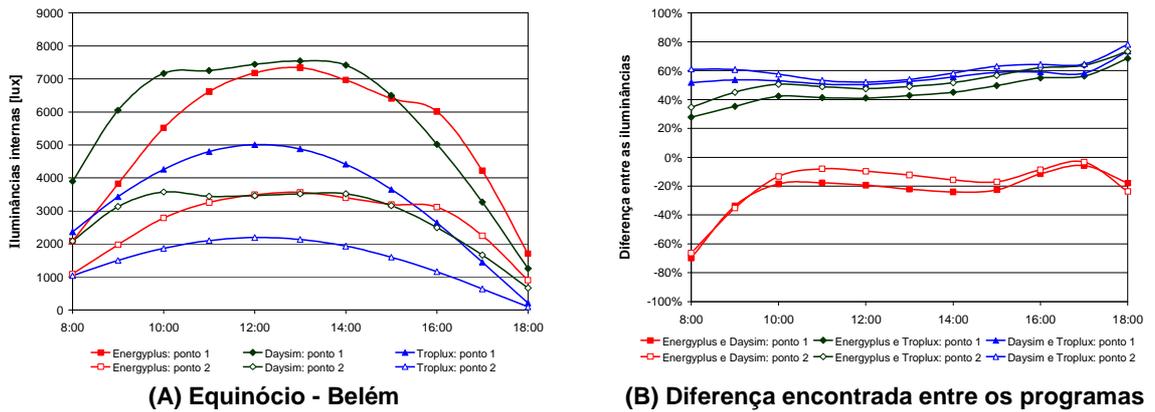


Figura 4.9. Valores das iluminâncias internas para a cidade de Belém, 1²²S. Para o modelo com proporção 1:1, PJJ de 50% e, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60.

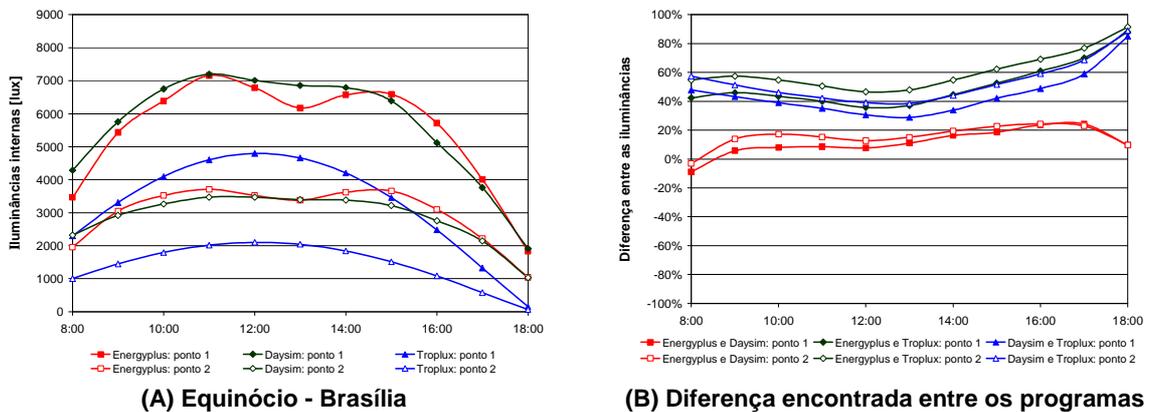


Figura 4.10. Valores das iluminâncias internas para a cidade de Brasília, 15²²S. Para o modelo com proporção 1:1, PJJ de 50% e, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60.

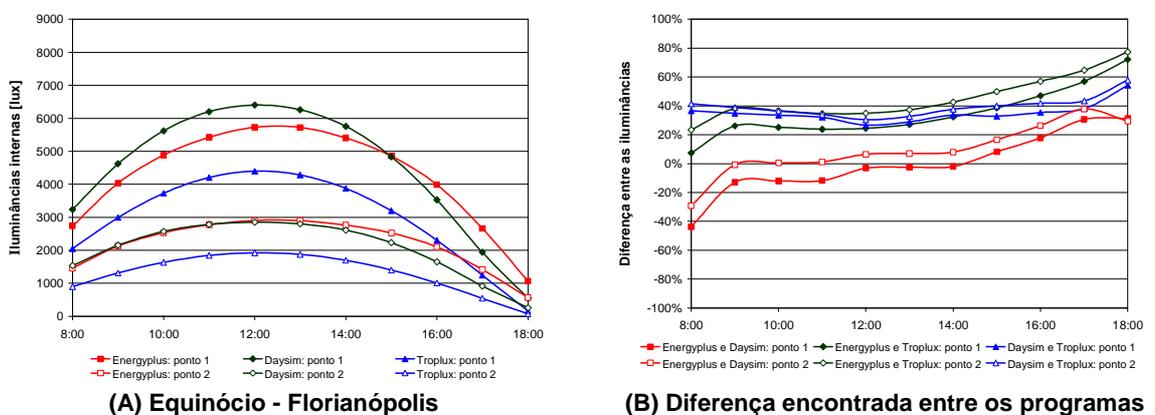
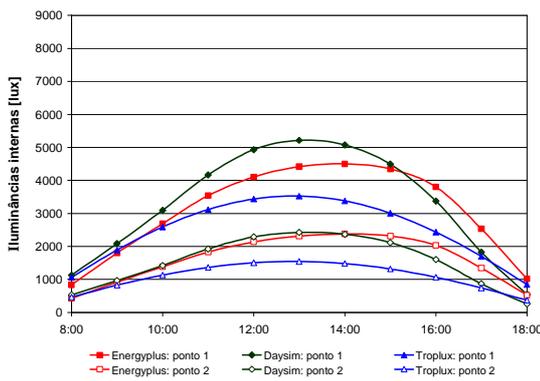
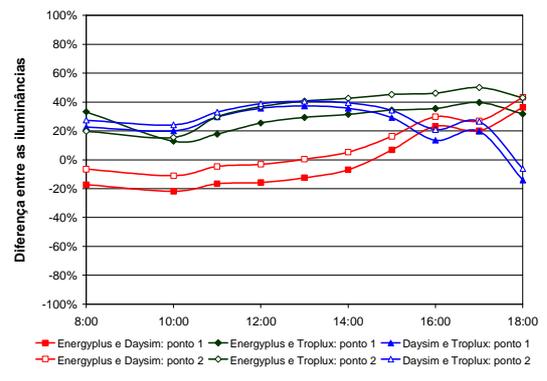


Figura 4.11. Valores das iluminâncias internas para a cidade de Florianópolis 27⁴⁰S. Para o modelo com proporção 1:1, PJJ de 50% e, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60.

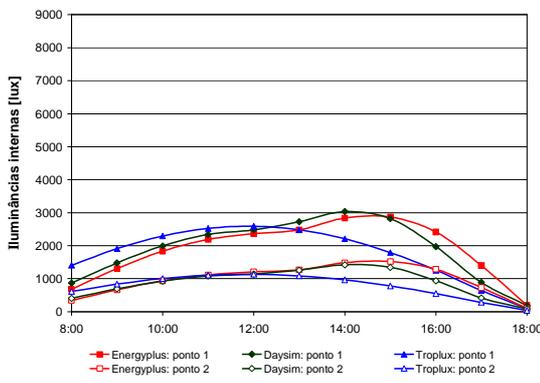


(A) Equinócio - Genebra

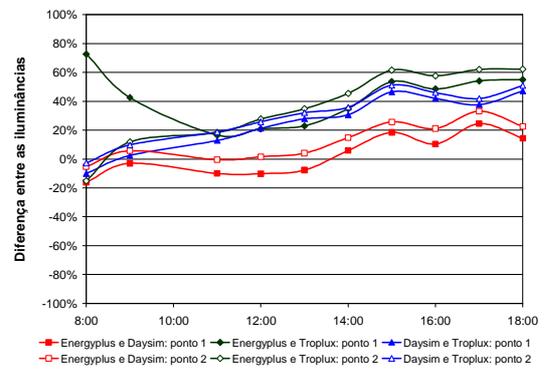


(B) Diferença encontrada entre os programas

Figura 4.12. Valores das iluminâncias internas para a cidade de Genebra, 46°15'N. Para o modelo com proporção 1:1, P/JF de 50% e, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60.



(A) Equinócio - Oslo



(B) Diferença encontrada entre os programas

Figura 4.13. Valores das iluminâncias internas para a cidade de Oslo, 59°54'N. Para o modelo com proporção 1:1, P/JF de 50% e, refletância das paredes e teto de 0,85 e piso de 0,60.

Com base nas diferenças absolutas médias, encontrados a partir dos dados de iluminação simulados para as cidades mostradas nas figuras acima, chegou-se à Tabela 4.1. Nesta, tem-se que as menores diferenças são encontradas entre os programas Energyplus e Daysim/Radiance, como mostrado nos gráficos acima; já, ao comparar dois programas que usam modelos de céu diferente, observa-se que a menor diferença se dá para a latitude mais próxima de 45°, aumentando à medida que a latitude se distancia deste ponto. Apesar disto, os erros encontrados são altos em todas as comparações, com o maior erro ocorrendo para a cidade de Belém, 58%, entre os programas Daysim/Radiance e TropLux.

Tabela 4.1. Diferença absoluta média encontrada para cada cidade simulada

Programas analisados	Belém 1°22'S	Brasília 15°52'S	Florianópolis 27°40'S	Genebra 46°15'N	Oslo 59°54'N
Energyplus e Daysim/Radiance	32,86%	16,47%	16,96%	19,72%	18,04%
Energyplus e TropLux	49,44%	53,03%	39,38%	33,62%	47,04%
Daysim/Radiance e TropLux	58,35%	46,44%	35,61%	30,48%	34,57%

4.2.5 Verificação do cálculo do fator de luz diurna

Como mencionado no tópico 2.3.1, que fala sobre o método de cálculo do Energyplus, a iluminância interna obtida através deste programa é derivada da iluminância externa e do fator de luz diurna (FLD). Assim, verificou-se este índice para as três geometrias de sala e três tamanhos de abertura, de acordo com os modelos apresentados nas Figuras 3.1 e 3.2, para a cidade de Florianópolis.

A Figura 4.14 foi obtida através de simulações para o modelo com proporção 1:1 (5m x 5m x 3m), a partir das quais pode-se verificar um comportamento semelhante entre o FLD dos diferentes programas. Na Figura 4.14 (a), com os resultados para o modelo com PJF de 25%, o FLD máximo é encontrado a 1,5m da abertura, para os resultados de todos os programas, devido à geometria da sala, com um FLD máximo para o programa Daysim/Radiance de 9,8%, diminuindo ao afastar o ponto da abertura. Com o aumento da abertura para 50% da fachada o programa Daysim/Radiance tem o FLD máximo próximo ao local de entrada da luz, enquanto para os outros dois programas o FLD máximo continua 1,5m da abertura, conforme a Figura 4.14 (b). Para este mesmo modelo, mas com abertura em toda a fachada sul, representado na Figura 4.14 (c), o comportamento do valor deste índice volta a ser o mesmo para todos os programas. Assim, o valor máximo está próximo à abertura, onde o Daysim/Radiance resultou em 44%, enquanto para o programa Energyplus o FLD é de 30%; e para o TropLux de 32%; os três programas apresentam um valor mínimo próximo a 10%.

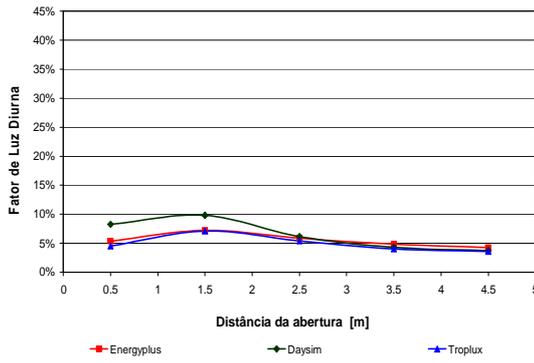
A Figura 4.14 (d) mostra o erro médio encontrado entre os resultados das simulações para os modelos anteriores. A menor diferença entre os programas, para este modelo, se dá entre o Energyplus e TropLux, na parte mais próxima da abertura. Enquanto os programas que apresentam maior diferença entre o FLD calculado são o Energyplus e o Daysim/Radiance com uma diferença de até 50% próximo a abertura.

Os resultados obtidos para o modelo com proporção 2:1 (10m x 5m x 3m), apresentados no Apêndice , mostram que este modelo apresenta o mesmo comportamento da distribuição do fator de luz diurna ao longo da sala que o modelo anterior.

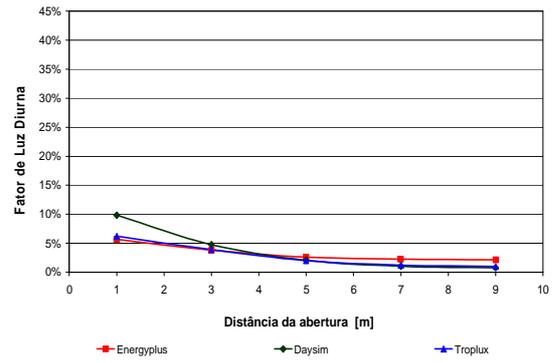
O modelo de proporção 1:2 (5m x 10m x 3m), representado na Figura 4.15, possui os menores valores para o FLD. Para este modelo o FLD resultante do programa Energyplus, após os 6m mantém-se praticamente constante, mostrando a baixa sensibilidade do programa para simular a iluminação nos locais mais afastados do ponto de entrada da luz no ambiente. Através destas imagens pode-se verificar ainda, que enquanto próximo à abertura o maior FLD é encontrado pelo Daysim/Radiance, e o menor pelo Energyplus; afastado da mesma se dá o contrário, com o maior FLD para o Energyplus e o menor para o Daysim/Radiance e TropLux.

A Figura 4.15 (d) mostra as diferenças entre os resultados encontrados pelos programas para este modelo; onde se percebe a grande diferença entre os programas em quase toda a sala. Os programas que apresentam maior erro são o Energyplus e Daysim/Radiance, acima de 60% no ponto mais próximo à abertura e no mais afastado.

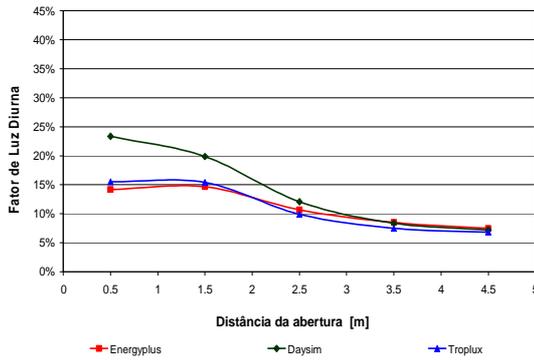
A partir da análise acima nota-se que a sala de proporção 1:1, de forma próxima à cúbica que, segundo Winkelmann e Selkowitz (1985), tem melhores resultados para o método do fluxo dividido, utilizado pelo programa Energyplus para resolver a reflexão interna. Isto explica os melhores resultados do FLD, deste programa, para a sala de proporção 1:1. Os modelos que se afastam desta forma possuem resultados que aumentam esta diferença. Através do modelo com proporção de 1:2, verifica-se que à medida que aumenta a importância da parcela refletida internamente, como no fundo da sala, local com menor incidência da luz direta, a diferença entre os resultados do programa Energyplus e dos outros dois programas aumentam, enquanto as diferenças entre o Daysim/Radiance e o TropLux diminuem. Uma possível causa para este aumento na diferença está nos métodos utilizados para resolver a reflexão interna, uma vez que o primeiro programa utiliza o método do fluxo dividido e o último o método do raio traçado. Como no método do fluxo dividido a parcela refletida é dividida igualmente pelo espaço, alguns pontos acabam recebendo uma parcela maior do que a que realmente ocorre.



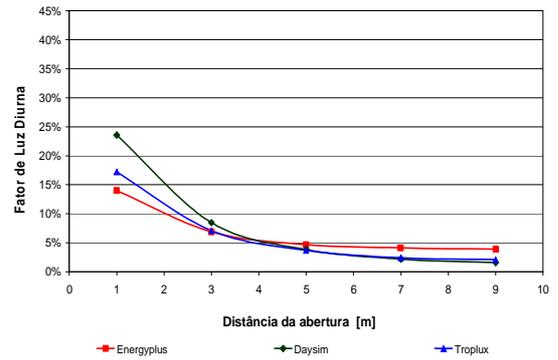
(A) PJJ 25%



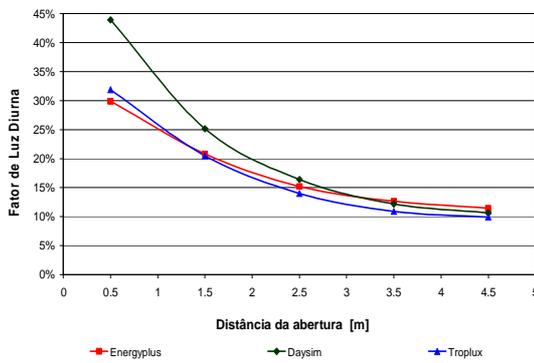
(A) PJJ 25%



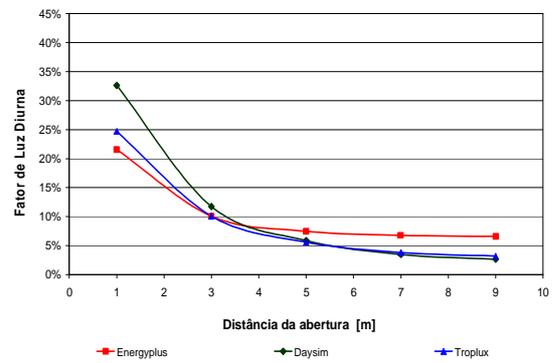
(B) PJJ 50%



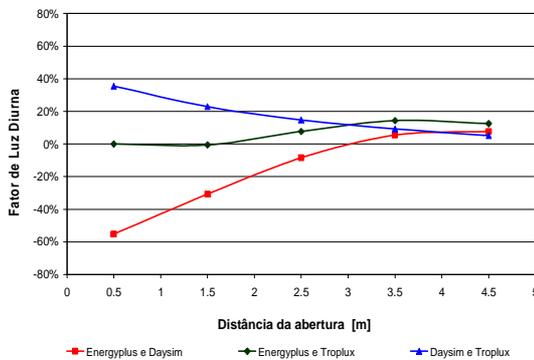
(B) PJJ 50%



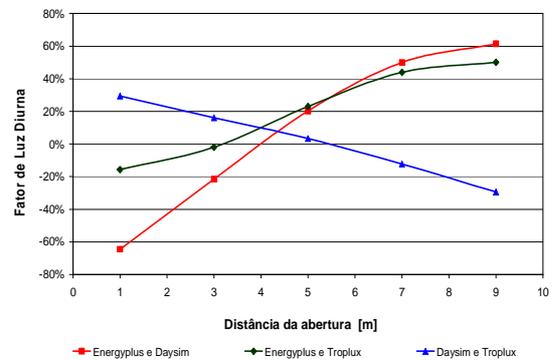
(C) PJJ 100%



(C) PJJ 100%



(D) Diferença encontrada entre os programas



(D) Diferença encontrada entre os programas

Figura 4.14. Fator de luz diurna (FLD) para sala com proporção 1:1, para Florianópolis

Figura 4.15. Fator de luz diurna (FLD) para sala com proporção 1:2, para Florianópolis

4.2.6 Considerações referentes à análise das iluminâncias internas

A análise que avalia a distribuição da luz natural, no modelo com proporção de 1:1, deixa evidente que o método de cálculo de cada programa influencia no resultado da distribuição da luz no ambiente. Nesta análise percebe-se que, a partir das simulações realizadas no TropLux, encontram-se iluminâncias entre 500 e 2000lx em 65% do período analisado; enquanto os outros dois programas possuem em mais de 50% da sala iluminâncias superiores a 2000lx em 70% do período analisado. As simulações em função da geometria e do tamanho da abertura enfatizam a diferença entre os resultados obtidos através dos dois modelos de céu. Para as salas de refletância alta, a diferença entre estes programas fica mais evidente, sendo em média de 60%.

A análise do fator de luz diurna (FLD) mostra a fragilidade do programa Energyplus em calcular as iluminâncias para pontos mais afastados da abertura. Para o modelo de sala profunda (5m x 10m) os resultados deste programa apresentam um FLD constante a partir da metade da sala. Para o modelo com abertura em 50% da fachada, os programas Daysim/Radiance e TropLux apresentam um FLD de 1,8%, para o ponto a 9m da abertura, enquanto para o Energyplus este valor era de 3,9%, mesmo valor encontrado para o meio da sala.

Esta mesma análise mostra, para a sala com proporção 1:1, os valores do FLD dos programas Energyplus e TropLux próximos, quando perto da entrada de luz natural. No entanto, ao comparar os valores de iluminância para este mesmo modelo, a diferença pode chegar a 3000lx, fato que demonstra que o modelo de céu utilizado por estes programas pode ser a justificativa da diferença entre as iluminâncias.

A comparação realizada entre as cinco cidades mostrou uma diminuição na diferença entre os programas à medida que a latitude da cidade se aproxima da latitude de 45°. No entanto, esta diminuição é pequena, mostrando que a deficiência do modelo utilizado pelos programas tem pouca relação com a localização da cidade.

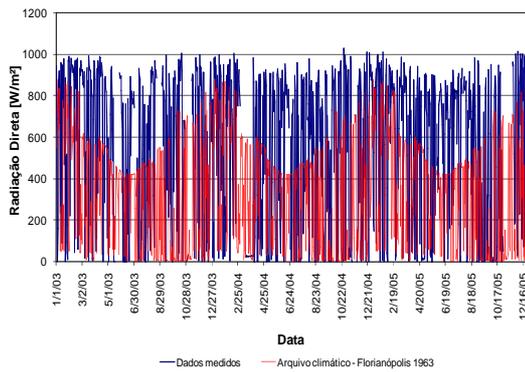
4.3 Avaliação do modelo desenvolvido por Perez para o clima de Florianópolis

A partir dos dados coletados entre 2003 e 2005, pela estação de medição do LabSolar, foram realizadas as comparações dos dados encontrados no arquivo climático de Florianópolis com os medidos; os resultados encontrados nesta comparação estão representados nas Figuras 4.16 e 4.17.

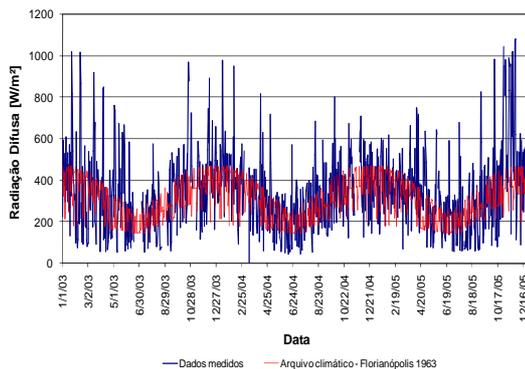
A Figura 4.16 mostra os dados coletados em Florianópolis, entre os anos de 2003 e 2005, e os dados do arquivo climático FlorianopolisTRY1963, onde percebe-se a diferença entre os dados para a radiação direta, Figura 4.16 (a), e para a radiação difusa, Figura 4.16 (b); e uma adequação melhor dos dados de temperatura.

A Figura 4.17, mostra os erros mensais para cada um dos parâmetros, onde percebe-se a alta variabilidade entre estes valores, principalmente para a radiação direta. No período analisado a radiação direta é, em geral de 50 a 70% maior que as encontradas no arquivo climático, com exceção de abril de 2005 onde os dados medidos são 2% menores que os dados do arquivo climático de Florianópolis. Para a radiação difusa o erro é de 10 a 60% maior os valores do arquivo climático, para a temperatura os dados medidos são de 11% menores a 27% maiores que os do arquivo climático. A umidade relativa apresenta os menores erros, com exceção dos meses de agosto de 2003 e março de 2004 o maior erro para este parâmetro é de 14%, já para os meses citados os erros são de -51% e -91%, respectivamente. Estas comparações mostram que mesmo havendo uma diferença entre os valores medidos e os encontrados no arquivo climático, esta diferença não seria responsável pelas iluminâncias elevadas calculadas pelo modelo de Perez et al. (1990).

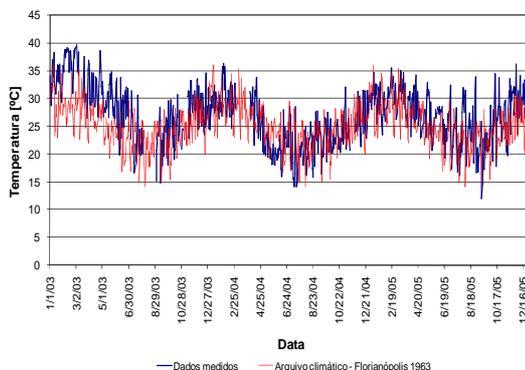
A Figura 4.18 mostra a correlação para a radiação difusa e direta, temperatura e umidade relativa medidas em Florianópolis no ano de 2004 com os dados do arquivo climático. O primeiro gráfico da figura mostra a análise entre a radiação direta medida e a encontrada no arquivo TRY, onde percebe-se a falta de correlação entre os dados analisados, devido a alta dispersão dos pontos e baixo valor do R^2 . A Figura 4.18 (b) deixa mais evidente a diferença entre a radiação difusa medida e a encontrada no arquivo climático TRY. As correlações da temperatura e umidade, apesar da dispersão dos pontos, possuem a linha de tendência da correlação coincidindo com a linha de 45°.



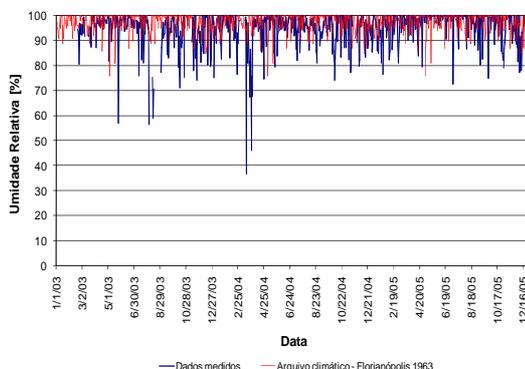
(A) Radiação direta



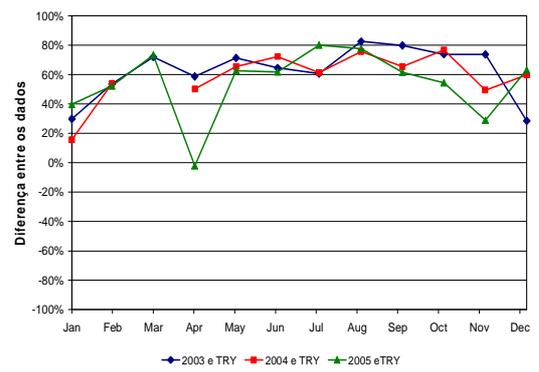
(B) Radiação difusa



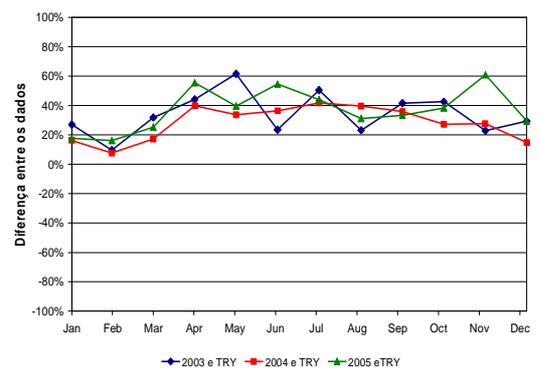
(C) Temperatura



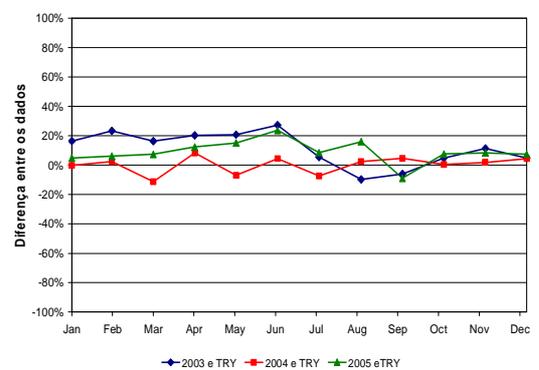
(D) Umidade Relativa



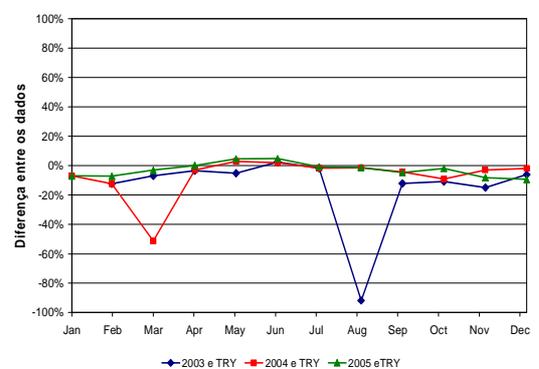
(A) Radiação direta



(B) Radiação difusa



(C) Temperatura



(D) Umidade Relativa

Figura 4.16. Valores máximos diários dos dados medidos em Florianópolis entre 2003 e 2005 e do arquivo climático.

Figura 4.17. Erro encontrado entre os dados medidos de 2003 a 2005 e os dados do arquivo climático TRY, de 1963.

A partir da Figura 4.18 (c e d) verifica-se que a temperatura e umidade apresentam um melhor ajuste à linha de 45°, e os menores erros em relação aos dados do arquivo climático, quando comparados com a radiação, tanto difusa quanto direta, que apresentam valores bem diferentes dos encontrados no arquivo climático.

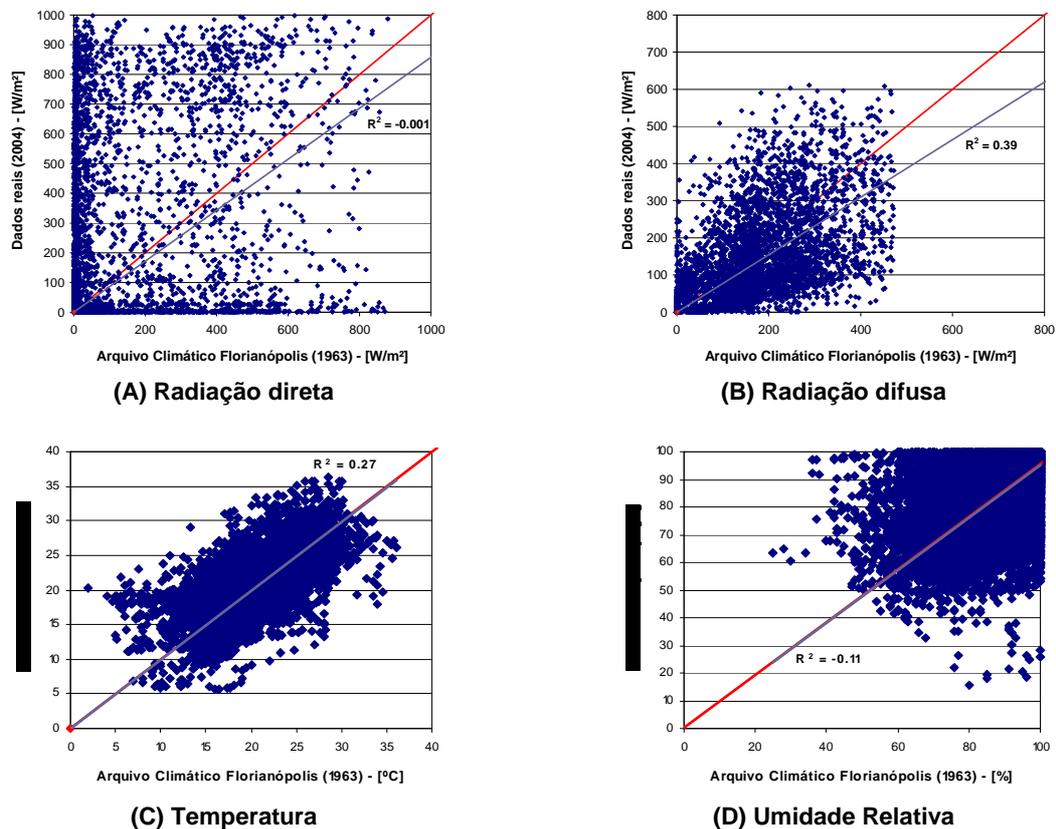


Figura 4.18. Correlação entre os dados coletados em 2004 e os encontrados no arquivo climático de Florianópolis, 1963.

A partir desta análise verifica-se a diferença entre a radiação difusa e a direta em relação aos dados medidos. De acordo com a Figura 4.16 nota-se que a radiação medida é maior que a encontrada no arquivo climático de Florianópolis, referente ao ano de 1963, o que mostra que os altos valores de iluminância encontrados nas simulações não são resultado desta diferença na radiação.

4.3.1 Avaliação do cálculo da iluminância externa difusa

Para esta avaliação comparou-se as iluminâncias horizontais externas com as calculadas através do método desenvolvido por Perez et al. (1990), através dos dados coletados de 2003 a 2005. Para esta análise foram utilizados os dados destes anos, com base horária, para o período entre 8 e 18 horas. O modelo em questão separa os tipos de céu em oito classes, e para cada um deles a equação do cálculo da

iluminância apresenta diferentes coeficientes, de acordo com o item 3.3. Assim, os resultados apresentados na Figura 4.19, mostram os dados para todas as classificações de céu, de acordo com Perez et al. (1990).

A correlação entre a iluminância medida e a calculada está demonstrada na Figura 4.19, onde percebe-se a alta dispersão dos pontos, principalmente nos gráficos que representam céus mais encobertos. A Figura 4.19 (a) mostra a correlação com todos os dados analisados, onde fica claro que os resultados obtidos através do modelo de Perez et al. (1990) são superiores às iluminâncias medidas, uma vez que a linha de tendência não coincide com a de 45° e se aproxima do eixo relacionado às iluminâncias calculadas.

Como para o cálculo da iluminância utilizam-se diferentes coeficientes para cada classificação do céu (de encoberto a claro). Os resultados foram separados de acordo com classificação de Perez. Assim, a Figura 4.19 (b), está relacionada aos dados de céu encoberto ($1 < \epsilon < 1,065$) e a Figura 4.19 (i), aos dados de céu claro ($\epsilon > 6,2$). Nestes gráficos se observa que para as condições de céu encoberto a dispersão dos pontos é maior que a encontrada nos outros gráficos e a linha de tendência da correlação se afasta da ideal.

A Figura 4.19 (b e c) correlaciona as iluminâncias para o céu encoberto. Nestes gráficos, encontra-se a maior dispersão dos pontos, principalmente para a Figura 4.19 (b), onde está a maior nuvem de pontos e o menor R^2 (0,31), mostrando a baixa relação entre as duas grandezas nesta classe de céu. A Figura 4.19 (h e i) representa as condições de céu mais claro, com os menores valores de iluminância difusa e melhor relação entre dados. Através da Figura 4.19, percebe-se que a alta dispersão no gráfico A é reflexo, principalmente, das parcelas referentes ao céu encoberto, B e C, que apresentam as maiores nuvens de pontos.

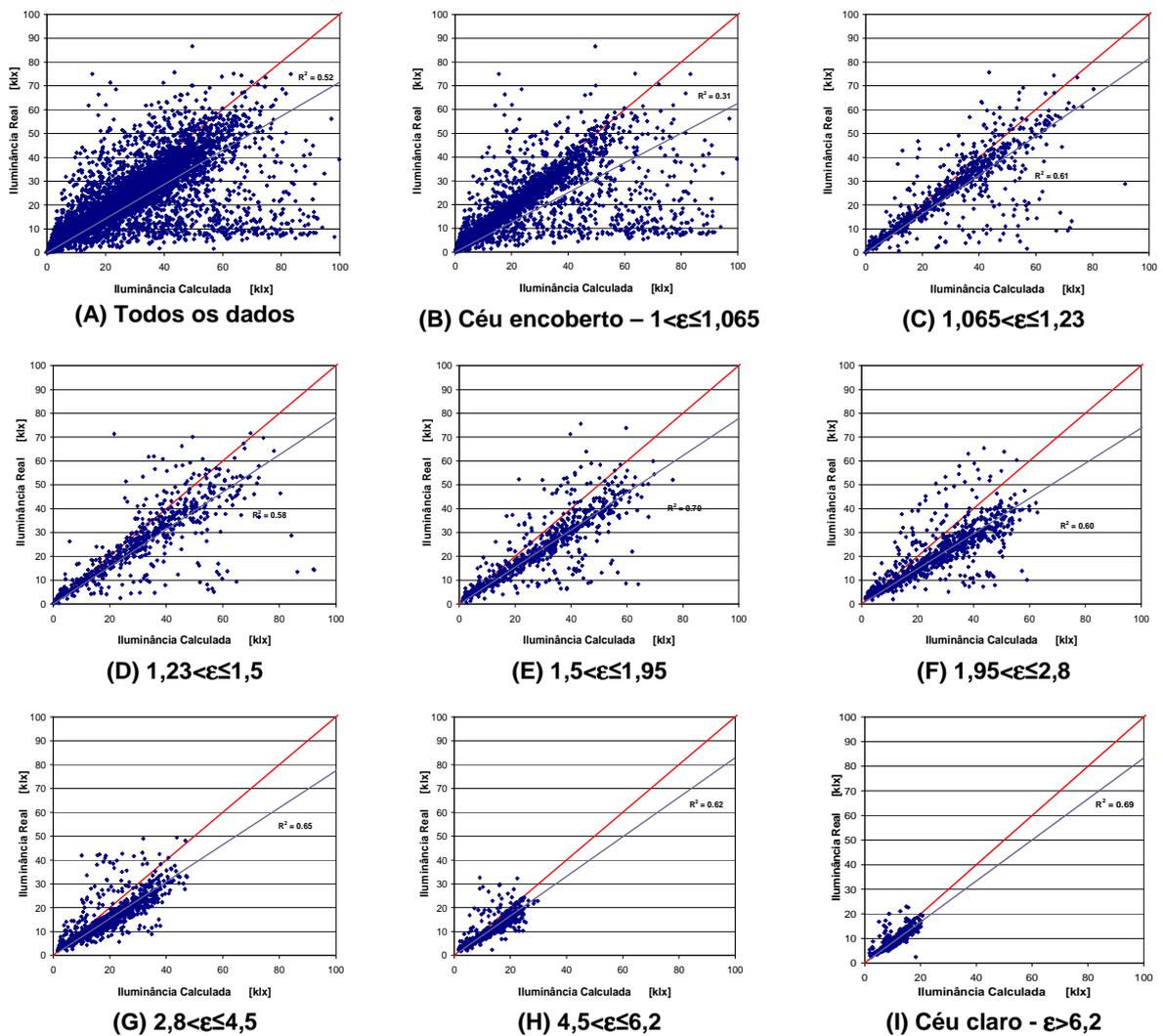


Figura 4.19. Correlação entre as iluminâncias difusas medidas e as calculadas através de dados coletados em Florianópolis, entre 2003 e 2005.

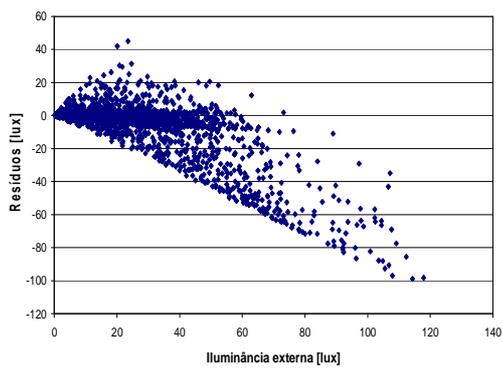
A Tabela 4.2 mostra o viés e o erro quadrático médio (EQM) entre as iluminâncias medidas e as calculadas. O viés mostra a tendência do modelo em superestimar as iluminâncias calculadas, enquanto o EQM mostra o desvio entre os valores mensurados e os previstos pelo modelo analisado. A partir da Tabela 4.2 pode-se verificar que o modelo de Perez et al. (1990) superestima a iluminância de todas as classes de céu; dentre estes o maior viés ocorre para o céu encoberto, seguido do céu intermediário. Como apresentado na Figura 4.19, o maior EQM ocorre para as parcelas de céu encoberto, com um erro superior a 100%, enquanto o céu claro apresenta a melhor resposta do modelo, mas longe do ideal, com um erro de 34%.

Tabela 4.2. Iluminância medida difusa média e avaliação estatística do modelo de Perez, para cada classe de céu, a partir de dados de Florianópolis de 2003 a 2005.

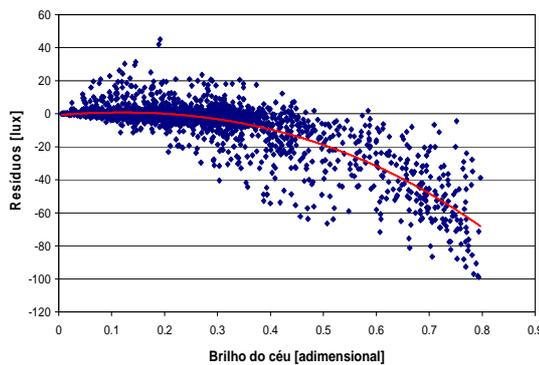
ε	Iluminância Medida Média [klx]	Iluminância Calculada Média [klx]	Viés [%]	EQM [%]
Todos	17,52	21,96	35,49	120,75
1	16,14	20,81	39,76	148,10
2	26,03	30,59	34,50	128,60
3	25,95	31,76	38,55	114,62
4	23,31	29,35	35,60	78,98
5	20,72	27,04	37,96	72,97
6	15,14	18,96	29,61	49,78
7	11,18	13,21	22,22	39,99
8	9,20	10,74	21,24	34,07

Uma vez que as iluminâncias horizontais externas obtidas através do modelo de Perez et al. (1990), apresentaram um grande erro quando comparadas às iluminâncias medidas, realizou-se a análise do modelo através dos gráficos resíduos em função das iluminâncias e das variáveis do modelo. Esta análise foi realizada para as classes de céu com maior e menor EQM, céu encoberto e claro.

A Figura 4.20 mostra a análise para eficácia luminosa e brilho do céu, para os dados de céu encoberto, entre 1 e 1,065, com o maior EQM; enquanto a Figura 4.21 refere-se aos dados para o céu claro, com ε maior que 6,2, com menor EQM. A Figura 4.20 (a) mostra os resíduos com forma afunilada; onde, quanto maior o valor previsto, maior o resíduo, o que mostra uma necessidade de transformações na equação. Na Figura 4.20 (b) observa-se a ocorrência de um padrão na disposição dos resíduos, o que mostra a necessidade de um ou mais termos na equação. Este fato não ocorre na Figura 4.21 (b), o que indica que a necessidade deste termos está ligada às condições de céu encoberto.

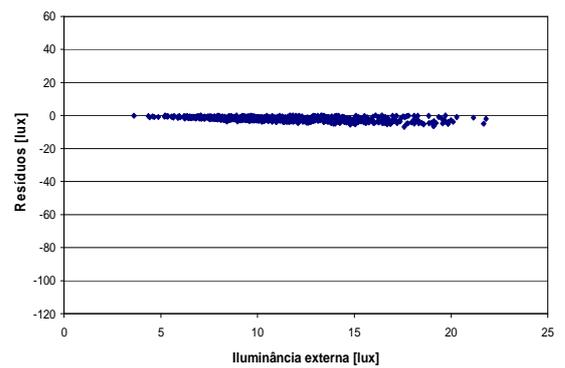


(A) Eficácia luminosa difusa medida – $1 < \epsilon \leq 1,065$

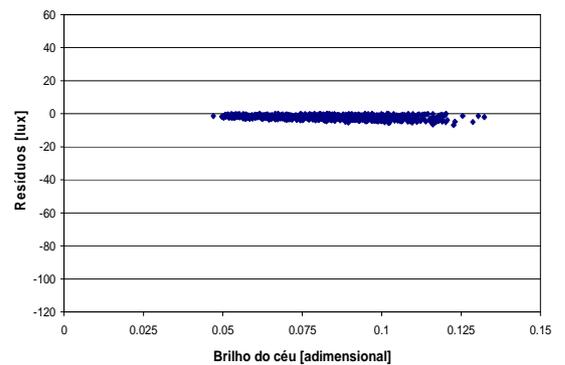


(B) Brilho do céu – $1 < \epsilon \leq 1,065$

Figura 4.20. Análise dos resíduos em função dos dados estimados através do modelo de Perez et al. (1990), e do brilho do céu, para céu encoberto.



(A) Eficácia luminosa difusa medida – $\epsilon > 6,2$



(B) Brilho do céu – $\epsilon > 6,2$

Figura 4.21. Análise dos resíduos em função dos dados estimados através do modelo de Perez et al. (1990), e do brilho do céu, para céu claro.

4.3.2 Avaliação do cálculo da iluminância externa direta

A partir do mesmo conjunto de dados, coletados de 2003 a 2005 em Florianópolis, comparou-se as iluminâncias diretas medidas com as calculadas através do modelo estudado, os resultados são apresentados na Figura 4.22, de acordo com a classe do céu.

A Figura 4.22 (a) representa a correlação entre a iluminância medida e a calculada com base em todos os dados coletados, a partir da qual observa-se a existência de duas nuvens de pontos onde os dados calculados são maiores que os medidos, enquanto a grande maioria destes apresentam-se próximos a linha de correlação ideal. Os gráficos seguintes apresentam as iluminâncias separadas por classe de céu. A Figura 4.22 (b, c e d), para condições de céu encoberto e intermediário, apresentam as maiores diferenças entre os dados e, com as iluminâncias medidas maiores que as calculadas.

A partir do céu intermediário, com $\varepsilon > 1,95$, a comparação entre as iluminâncias começa a mostrar uma melhor correlação entre os dados, onde a linha de tendência está mais próxima da linha de correlação ideal. Destas classes de céu, a Figura 4.22 (h e i), que representam condições de céu claro, apresentam uma menor dispersão dos pontos, e conseqüente um menor erro.

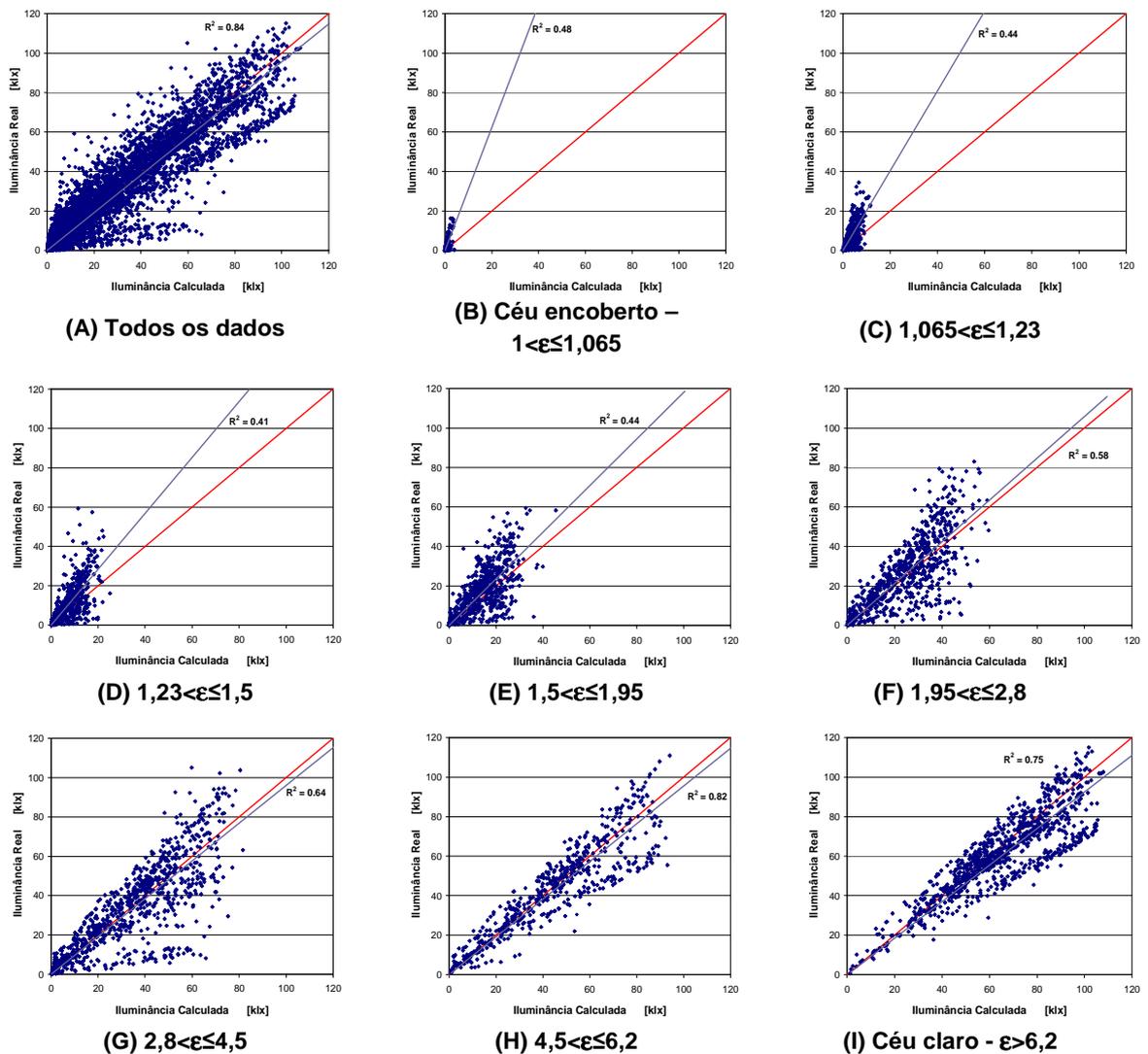


Figura 4.22. Correlação entre as iluminâncias diretas medidas e as calculadas através de dados coletados em Florianópolis, entre 2003 e 2005.

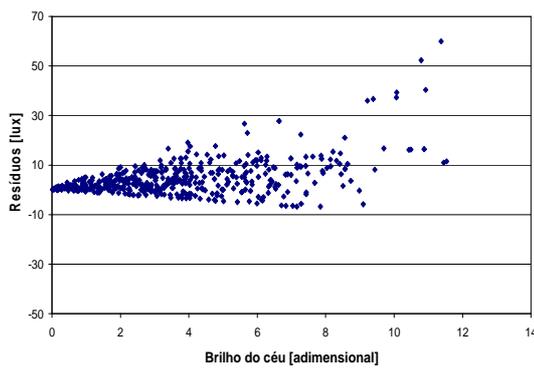
A análise do viés e do erro quadrático médio (EQM) entre as iluminâncias medidas e as calculadas são apresentadas na Tabela 4.3. Verifica-se que o modelo de Perez et al. (1990) tem a tendência em subestimar as iluminâncias para o céu encobertos, com $\varepsilon < 1,065$, demonstrados na Figura 4.22 (b). A Tabela 4.3 mostra que o menor EQM encontrado para iluminância direta é de 20,58%, para a classe de céu 8, ilustrada na Figura 4.22 (i).

Tabela 4.3. Iluminância medida direta média e avaliação estatística do modelo de Perez, para cada classe de céu, a partir de dados de Florianópolis de 2003 a 2005.

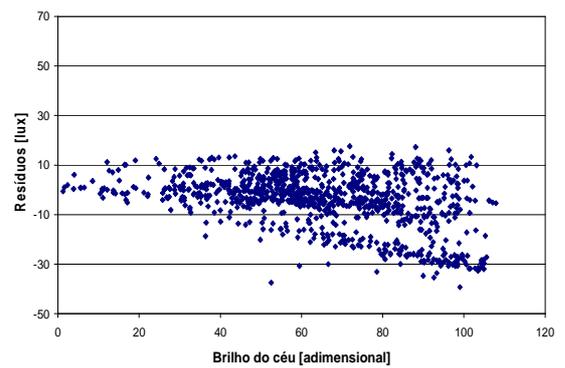
ϵ	Iluminância Medida Média [klx]	Iluminância Calculada Média [klx]	Viés [%]	EQM [%]
Todos	29,60	30,19	12,00	134,13
1	2,11	0,58	-38,70	161,51
2	3,56	7,48	9,78	219,97
3	8,50	12,56	21,36	206,77
4	14,52	17,92	12,48	123,66
5	24,16	26,15	23,19	131,67
6	34,27	34,91	31,09	129,77
7	43,46	44,61	4,42	34,00
8	60,80	64,72	7,31	20,58

Para este modelo também foi realizada a análise do gráfico dos resíduos para as classes de céu com maior e menor EQM, uma vez que as iluminâncias horizontais externas apresentaram um grande erro quando comparadas às iluminâncias medidas. A Figura 4.23 mostra a análise da eficácia luminosa e do brilho do céu, para os dados de céu encoberto, enquanto a Figura 4.24 refere-se aos dados para o céu claro. As Figuras 4.23 (a) e 4.24 (a) mostram os resíduos em função da iluminância calculada com forma afunilada; o que mostra uma necessidade de ajustes na equação. Na Figura 4.23 (b) observa-se a ocorrência de um padrão na disposição dos resíduos, ou seja, há a necessidade de adicionar-se um ou mais termos na equação; assim como para a iluminância difusa este fato não ocorre na Figura 4.24 (b).

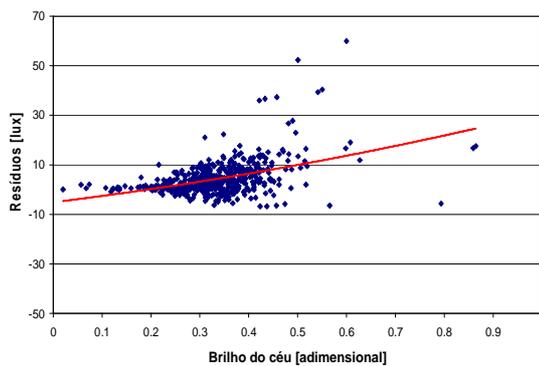
A partir das avaliações acima nota-se que é necessária uma adequação das equações desenvolvidas por Perez et al. (1990), para as características de céu encontradas em Florianópolis; tanto para o modelo da iluminância difusa, quanto a direta, os erros foram sempre altos, onde o menor erro encontrado foi de 20%. Esta adequação exige um maior tempo de estudos e caracterização do céu, desta forma, serão apenas calculados novos coeficientes, verificando se estes reduzem o erro existente nestes modelos.



(A) Eficácia luminosa direta medida – $1,065 < \epsilon \leq 1,23$

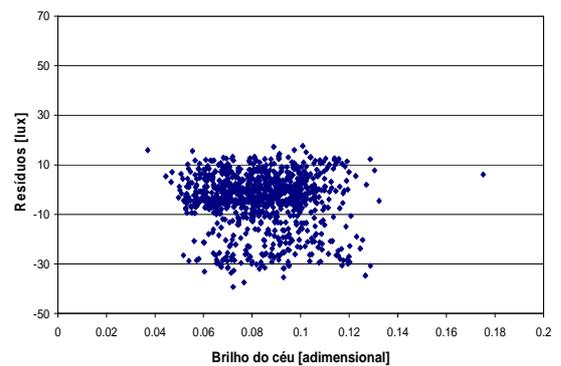


(A) Eficácia luminosa difusa medida – $\epsilon > 6,2$



(B) Brilho do céu – $1,065 < \epsilon \leq 1,23$

Figura 4.23. Análise dos resíduos em função dos dados estimados através do modelo de Perez et al. (1990), e do brilho do céu, para céu encoberto.



(B) Brilho do céu – $\epsilon > 6,2$

Figura 4.24. Análise dos resíduos em função dos dados estimados através do modelo de Perez et al. (1990), e do brilho do céu, para céu claro.

4.4 Correção dos coeficientes utilizados para o cálculo das iluminâncias

O modelo desenvolvido por Perez et al. (1990) foi elaborado a partir de dados coletados em cidades com latitudes próximas a 45° ; assim, coeficientes calculados a partir de dados locais podem se adequar melhor para a previsão de iluminâncias, e diminuir as diferenças decorrentes da falta de termos na equação. Para o cálculo destes coeficientes foram utilizados os dados coletados no ano de 2004, enquanto a avaliação, realizada através do viés e EQM, foi feita com base nos dados de 2003 e 2005.

4.4.1 Coeficientes locais para iluminação difusa

Com base nos dados de 2004 foram calculados novos coeficientes para a equação do cálculo da iluminação difusa, desenvolvida por Perez. A partir dos novos coeficientes, relacionados na Tabela 4.4, calculou-se as iluminâncias, para os dados do ano de 2003 e 2005, utilizando coeficientes do Perez e os coeficientes locais, a correlação entre estas iluminâncias e as medidas são apresentadas na Figura 4.25.

Tabela 4.4. Coeficientes para cálculo das iluminâncias difusas externas

\mathcal{E}	Coeficientes Locais			
	a_i	b_i	c_i	d_i
1	58,78	6,33	-36,68	-30,15
2	22,60	9,57	-6,10	-45,49
3	18,10	6,14	-3,57	-59,60
4	43,93	2,35	-29,24	-58,21
5	84,095	-5,85	-36,14	-55,54
6	112,98	-1,09	-40,41	-15,35
7	156,03	-0,13	-50,30	2,86
8	145,69	-1,41	-39,37	-0,83

Através da Figura 4.25 percebe-se que mesmo com a utilização de coeficientes calculados com base em dados locais, continua a alta dispersão dos pontos; no entanto, as iluminâncias calculadas a partir dos coeficientes locais apresentam uma melhor correlação, principalmente para os céus encobertos e parciais. Para os céus mais claros, Figura 4.25 (h e i), as diferenças em relação ao modelo original são pequenas, e podem ser melhor avaliadas através do viés e do EQM.

A avaliação dos novos coeficientes foi realizada através do viésM (viés médio) e do EQM (erro médio quadrático), em comparação com o resultado destes dados com os obtidos através dos coeficientes originais. Através da Tabela 4.5 pode-se verificar que o cálculo das iluminâncias através dos coeficientes originais possuem um menor viésM, o que representa uma menor tendência em superestimar ou subestimar os valores. O maior viés ocorre para o céu 1, Figura 4.25 (b), com viésM de -24,4%; assim como para o coeficiente do Perez, 153,5%. De acordo com o EQM, o melhor ajuste ocorreu para o céu claro, Figura 4.25 (i), que passou de um erro de 34,5%, para 23,6%; as classes de céu encoberto apresentaram uma maior queda no EQM, mas continuam com um erro bastante alto.

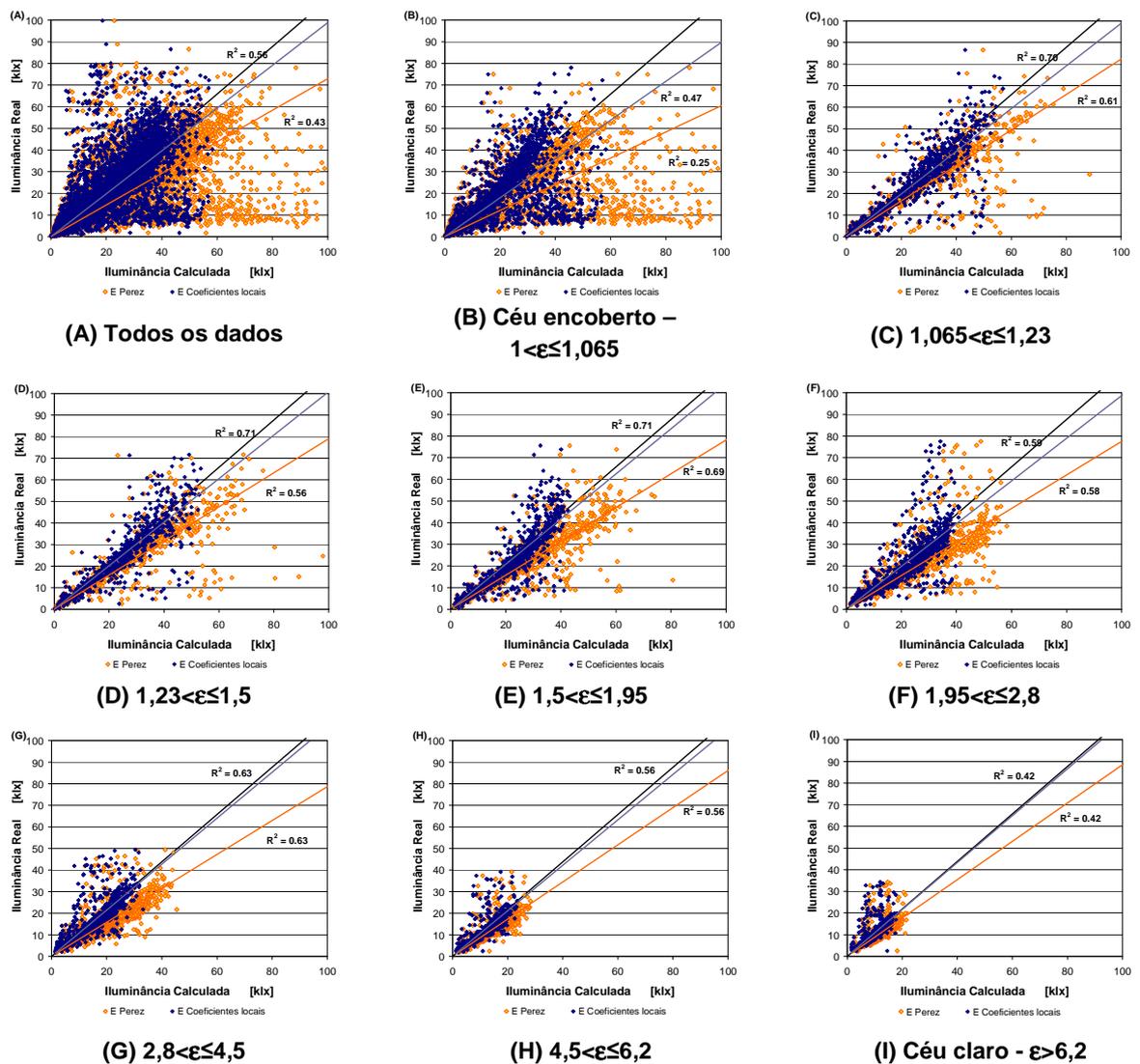


Figura 4.25. Correlação entre as iluminâncias difusas e as calculadas através dos coeficientes originais e os locais, para 2003 e 2005.

Apesar da melhoria decorrente dos coeficientes calculados a partir dos dados de Florianópolis os erros continuam elevados, principalmente para as classes de céu mais próximas ao encoberto; mostrando a necessidade de um estudo maior das características do céu encoberto da região e, desta forma, adicionar termos ou outros ajustes na equação.

Tabela 4.5. Avaliação dos coeficientes locais para o cálculo das iluminâncias difusas.

ϵ	Iluminância Medida Média [klx]	ViésM [%]		EQM [%]	
		Local	Perez	Local	Perez
Todos	18,12	13,01	35,07	79,56	121,64
1 - encoberto	16,09	24,43	42,77	93,80	153,51
2	25,84	15,72	33,76	82,05	122,22
3	26,40	13,53	38,03	73,68	112,95
4	23,97	10,95	37,25	54,50	80,33
5	21,73	13,38	37,42	48,32	72,54
6	15,58	-2,18	30,03	29,13	49,35
7	12,13	-1,10	20,63	28,30	40,03
8 - claro	9,73	-2,91	18,89	23,59	34,50

4.4.2 Coeficientes locais para iluminação direta

Para o cálculo dos coeficientes locais para a iluminância direta foi realizado o mesmo processo que o utilizado para a iluminância difusa. Os novos coeficientes estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4.6. Coeficientes para cálculo das iluminâncias diretas externas

ϵ	Coeficientes Locais			
	a_i	b_i	c_i	d_i
1	331,68	3,85	1,02	-209,41
2	151,73	2,00	-15,06	269,27
3	190,43	0,69	-9,11	-74,37
4	117,47	0,50	-1,29	-22,87
5	82,821	-0,08	-5,39	112,83
6	86,03	-0,16	-2,27	93,49
7	97,91	-0,29	-1,29	37,47
8	114,41	-0,79	2,30	-87,07

A Figura 4.26 mostra a correlação entre as iluminâncias medidas e as calculadas a partir dos coeficientes definidos por Perez et al. (1990) e os calculados para Florianópolis. Através da Figura 4.26 pode-se notar que os novos coeficientes pouco influenciam para um melhor ajuste das iluminâncias para as condições de céu mais claro. No entanto, para o céu mais encoberto, como a Figura 4.26 (a, b,c, d, e),

as iluminâncias calculadas através dos coeficientes locais se aproximam mais das medidas.

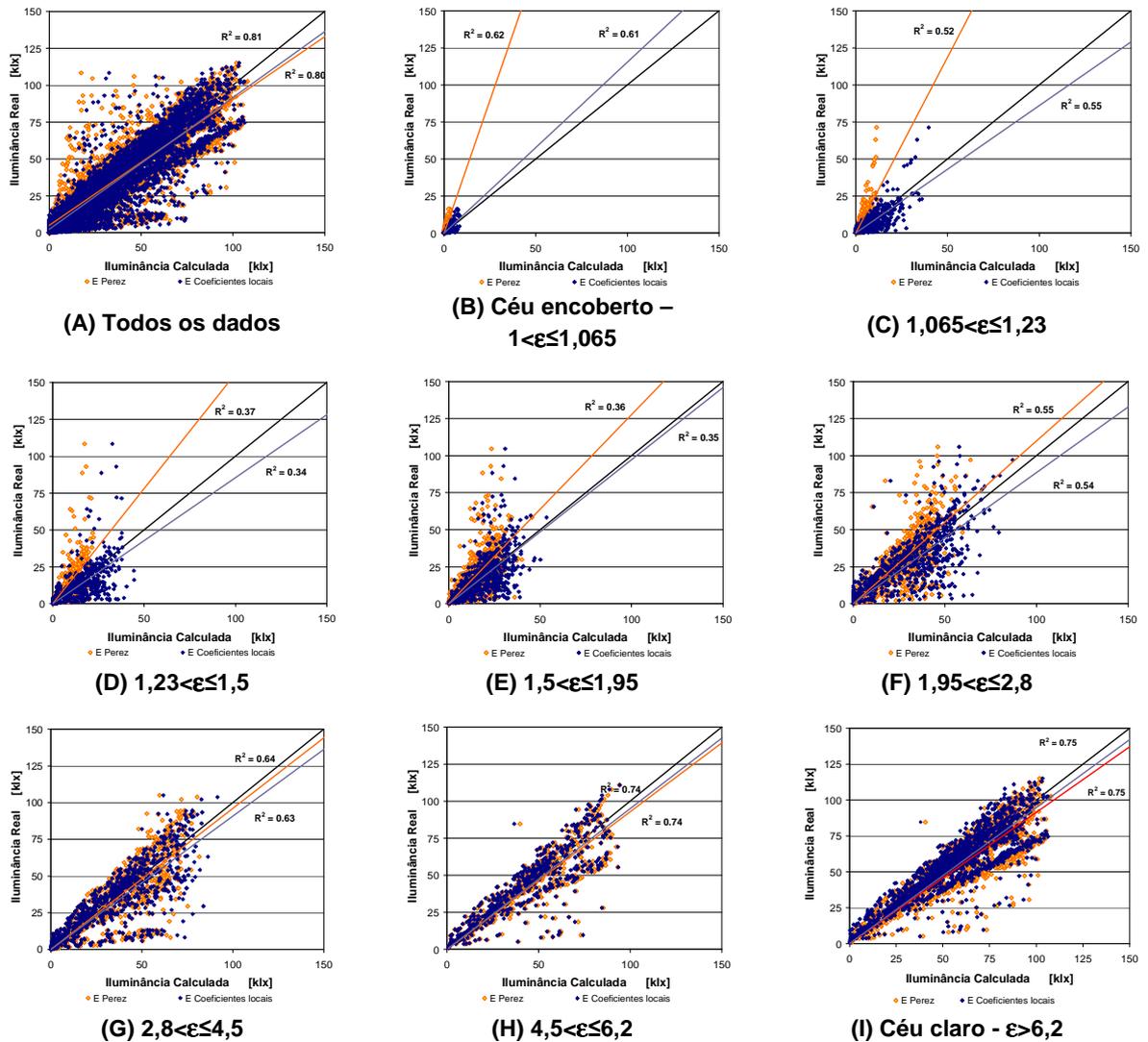


Figura 4.26. Correlação entre as iluminâncias diretas medidas e as calculadas através dos coeficientes originais e os locais, para 2003 e 2005.

A avaliação destes coeficientes, realizada através do viésM e do EQM, está apresentada na Tabela 4.7, onde verifica-se que apenas as três classes de céu mais claro apresentaram melhoria no EQM. A maior redução ocorreu para o céu claro, passando de 51,27% para 48,36%.

Tabela 4.7. Avaliação dos coeficientes locais para o cálculo da iluminâncias diretas.

ε	Iluminância Medida Média [klx]	ViésM [%]		EQM [%]	
		Local	Perez	Local	Perez
Todos	32,02	31,79	6,98	148,08	101,10
1 - encoberto	2,17	70,95	-62,43	234,95	81,64
2	8,36	73,49	-20,10	258,70	117,10
3	13,68	62,31	2,01	205,06	134,37
4	19,45	47,62	7,55	157,56	113,81
5	27,41	27,83	20,27	149,72	125,48
6	34,35	29,05	29,45	125,63	124,84
7	42,91	5,34	8,46	47,87	49,25
8 - claro	53,98	5,17	11,95	48,36	51,27

Apesar do cálculo dos coeficientes a partir dos dados de Florianópolis, pouca ou nenhuma melhora foi encontrada para o cálculo das iluminâncias. Para o cálculo das iluminâncias direta, o EQM aumentou para as classes de céu referentes ao céu encoberto, em relação aos coeficientes do Perez, e com uma queda pouco expressiva para as categorias de céu claro.

A partir destas análises verificou-se a necessidade de ajustes na equação de Perez et al. (1990) para as condições de céu de Florianópolis; uma vez que os coeficientes locais não apresentaram a melhoria necessária para tornar as iluminâncias calculadas através deste método próximas às medidas.

5. Conclusão

Este capítulo refere-se às conclusões extraídas das análises realizadas a partir dos resultados obtidos descritos no capítulo de Resultados e Discussão desta dissertação, juntamente com suas limitações e propostas para trabalhos futuros.

A partir da revisão da literatura e das questões apresentadas na justificativa, percebe-se a importância da iluminação natural para o conforto dos usuários em ambientes de permanência e da sua influência no consumo de energia. Programas de simulação como Energyplus procuram prever o consumo de energia, e permitem o controle da iluminação artificial através do nível de iluminação natural na zona em estudo. Para esta avaliação é importante que a previsão das iluminâncias realizadas pelo programa esteja de acordo com as condições climáticas utilizadas no restante da análise do programa e condizentes com as condições reais. Desta forma, o programa é baseado no modelo dinâmico de céu desenvolvido por Perez et al. (1990), também utilizado pelo programa Daysim/Radiance. Como o programa Energyplus vem sendo cada vez mais utilizado na análise do desempenho termo-energético das edificações, este trabalho avaliou o cálculo das iluminâncias efetuado por este programa, a partir do modelo de céu desenvolvido por Perez. A avaliação foi realizada através das comparações entre os programas Daysim/Radiance e TropLux, assim como, das iluminâncias externas medidas e das calculadas pelo modelo de Perez et al. (1990).

5.1 Análise do cálculo da iluminância interna

A partir da metodologia apresentada no capítulo 3 as simulações foram realizadas através dos programas Energyplus, Daysim/Radiance e TropLux. Os programas Daysim/Radiance e TropLux possuem métodos de cálculos semelhantes, mas com base em modelos de céu diferentes. Os programas Energyplus e Daysim/Radiance possuem métodos de cálculo diferentes, mas com base no mesmo modelo de céu.

A primeira análise efetuada avaliou a distribuição da luz natural em uma sala, através da Iluminância Útil da Luz Natural (IULN), onde fica evidente que o modelo de céu usado em cada programa influencia no resultado da distribuição da luz no ambiente. Nesta análise percebe-se que, a partir das simulações realizadas com o Energyplus e com o Daysim/Radiance as iluminâncias encontradas são mais

freqüentes na faixa de iluminâncias excessivas; enquanto para o TropLux as iluminâncias ocorrem mais na faixa de iluminâncias de substituição da iluminação artificial pela natural. Isso mostra que grande parte da diferença encontrada nas iluminâncias pode ser em função do modelo de céu utilizado, e não apenas do método de cálculo. As simulações em função da geometria e do tamanho da abertura enfatizam a diferença entre os resultados obtidos através dos dois modelos de céu. Para as salas de refletância alta, a diferença entre estes programas é em média de 60%.

A diferença entre o método de cálculo dos programas Energyplus e Daysim/Radiance aparece ao se comparar as iluminâncias para um modelo que não apresenta reflexão interna. Neste modelo, os resultados entre estes dois programas, que para a sala clara apresentavam resultados semelhantes, possuem uma diferença de até 1,2klx, próximo à abertura. Como explicado no item 2.3.1, o programa Energyplus resolve a reflexão interna de modo simplificado, através do método do fluxo dividido, o que acaba superestimando a iluminância nos pontos em que a parcela da luz refletida tem maior influencia na iluminância.

A análise do Fator de Luz Diurna (FLD) deixa mais clara a diferença encontrada nas iluminâncias, tanto devido ao modelo de céu, quanto à dificuldade que o Energyplus tem em resolver a refletância interna. Ao comparar o FLD próximo à abertura tem-se um valor próximo entre os programas Energyplus e TropLux; no entanto, existe uma grande diferença entre as iluminâncias destes programas. Sabendo que o programa Energyplus resolve a iluminância interna a partir do cálculo do FLD e da iluminância externa, e que neste ponto o FLD encontrado entre os programas é próximo enquanto a iluminância não; então o valor da iluminância externa deve ser a causa das iluminâncias elevadas encontradas pelo Energyplus. Para as salas profundas, o programa Energyplus apresenta um FLD constante a partir do meio da sala, o que mostra a deficiência deste programa na resolução da refletância interna, uma vez que para estes pontos a iluminância é resultante, principalmente, da parcela de luz refletida no ambiente.

Através destas análises verifica-se que o programa Energyplus apresenta restrições ao cálculo da iluminância. Esta deficiência irá influenciar principalmente as análises realizadas quanto ao consumo de energia pelo uso da iluminação natural, para sistemas de iluminação artificial controlados pelo nível de iluminação interna, para a parte da sala que se afasta da abertura.

Além disso, verifica-se que a maior diferença entre as iluminâncias resultantes das simulações dos três programas encontra-se na diferença do modelo de céu utilizado pelo programa simulador. O modelo de céu dinâmico apresenta resultados com iluminâncias superiores ao modelo de céu estático.

Sabendo que o modelo de céu dinâmico desenvolvido por Perez foi baseado em dados coletados em locais com latitudes entre 40° e 46°, também analisou-se a iluminância para diferentes cidades. Este fato fica mais claro ao observar que a diferença entre as iluminâncias calculadas pelos programas Daysim/Radiance e TropLux diminuem em cerca de 20%, quando comparados os resultados para Belém e Genebra.

5.2 Análise do modelo dinâmico de céu

Uma vez que os dois modelos com maior iluminância realizam os cálculos utilizando o arquivo climático e têm base no modelo de céu dinâmico desenvolvido por Perez et al. (1990), estes dois aspectos foram analisados de acordo com a metodologia apresentada no capítulo três.

Ao analisar o arquivo climático TRY da cidade de Florianópolis, as maiores diferenças encontradas estavam relacionadas à radiação direta e difusa. Estas duas variáveis, no arquivo climático, são calculadas a partir da nebulosidade do céu. Entre elas, a maior diferença ocorre para a radiação direta, que ao se analisar a correlação com os dados medidos, não apresenta relação com os dados medidos. Como as radiações de Florianópolis, entre 2003 e 2005, são maiores que as encontradas no arquivo climático, referente ao ano de 1963, estas não são a causa das diferenças encontradas nas iluminâncias.

Para a análise do modelo do Perez comparou-se as iluminâncias medidas com as calculadas a partir de parâmetros coletados juntamente com as iluminâncias. Nestas comparações percebeu-se que os valores calculados superestimam as iluminâncias e, quanto mais claro o céu melhor a correlação entre as duas grandezas e menor o erro encontrado. Ou seja, as classes de céu em que a iluminação difusa é mais presente, apresentam os maiores erros. Para as iluminâncias diretas, os maiores erros também ocorrem para as condições de céu encoberto, com um menor erro e dispersão dos pontos para as condições de céu claro.

A partir das análises dos resíduos percebe-se que há a necessidade de transformações nas equações desenvolvidas por Perez et al. (1990), com a

necessidade da inclusão de um ou mais termos. Nota-se também, que estas alterações são necessárias principalmente para a melhoria dos resultados referentes às condições de céu encoberto. Como estas alterações exigem um estudo mais aprofundado, realizou-se o cálculo dos coeficientes desta equação a partir dos dados locais, procurando, ao menos, diminuir o erro existente.

A partir do uso dos coeficientes locais ocorre uma diminuição do erro em relação à iluminância difusa real, e uma pequena diminuição na dispersão dos pontos para as classes de céu encoberto, outra alteração ocorre na tendência em subestimar os valores. O uso dos coeficientes locais para o cálculo da iluminação direta em geral aumentou o erro quadrático médio. Assim, os novos coeficientes são mais adequados para o cálculo da iluminação difusa, enquanto para o cálculo da iluminação direta os coeficientes de Perez são mais aconselhados.

Em resumo, as comparações entre as iluminâncias externas medidas e as calculadas, mostram a necessidade da busca de modelos de previsão de iluminâncias que respondam de forma mais adequada às condições de céu encontradas na região estudada.

5.3 Considerações

A partir das análises apresentadas neste trabalho e das conclusões acima referidas, percebe-se que o uso do programa Energyplus para o cálculo das iluminâncias internas, ou da economia de energia elétrica pelo uso da iluminação natural não é aconselhável para o clima analisado, pois resulta em valores bem maiores que os medidos. Os valores de iluminância elevados estão relacionados principalmente ao método simplificado de resolução da reflexão interna e aos altos valores das iluminâncias externas, calculadas através do modelo de Perez et al. (1990).

Desta forma, verifica-se a necessidade do uso de um método mais completo para o cálculo da reflexão interna; além do desenvolvimento de um modelo de cálculo da iluminância externa mais adequado ao clima estudado.

5.4 Limitações do trabalho

As principais limitações deste trabalho são:

- A metodologia para a análise da iluminância interna é baseada apenas em simulações computacionais. Assim, não é possível identificar quais dos resultados se aproximam mais dos medidos.
- O programa Energyplus exigiu muita dedicação para o estudo de seus manuais e algoritmos utilizados para o cálculo da iluminação natural, material correlato, disponibilizando de mais tempo que o previsto para cumprir essa etapa do trabalho.
- A simulação dos programas que trabalham apenas com a iluminação natural são mais completos e demorados, o que diminuiu a possibilidade da análise para outras orientações e geometrias.
- Necessidade de um estudo mais detalhado do modelo desenvolvido por Perez et al. (1990), impossibilitando o estudo mais aprofundado das características do céu da região analisada, em relação aos parâmetros utilizados pelo modelo.

5.5 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros em relação a simulação da iluminação natural, podem ser investigados:

- Comparações da iluminância interna entre modelos com céu dinâmico e valores medidos;
- Maior caracterização do céu da região em função de parâmetros de fácil acesso, como os utilizado pelo modelo de Perez et al. (1990);
- Desenvolvimento de um modelo para o cálculo da iluminância natural, ou da eficácia luminosa, mais adequado ao comportamento do céu encontrado na região.

Referências Bibliográficas

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5413**. Iluminância de Interiores. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 13p.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR15215-3/2004**. Iluminação natural – Parte 3: Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 33p.

AMARAL, Vanine B.; CABÚS, Ricardo C.. Iluminando a Igreja Matriz do Pilar - AL In: XI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2006, Florianópolis, **Anais...** Florianópolis, ENTAC 2006. CD-ROM.

ATIF, Morad R.; GLSIU, Anca D.. Energy of daylight-linked automatic lighting control systems in large atrium spaces: report on two field-monitored case studies. **Energy and Buildings**, v. 35, n^o 5, p 441-461, jun. 2003.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética . **Balanco Energético Nacional 2007: Ano base 2006**. Rio de Janeiro, EPE, 2007.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética . **Balanco Energético Nacional 2006: Ano base 2005**. Rio de Janeiro, EPE, 2006.

CABÚS, Ricardo C.. TropLux: um sotaque tropical na simulação da luz natural em edificações. In: IV Encontro Latino-Americano e VIII Encontro Nacional Sobre Conforto no Ambiente Construído, Maceió, 2005, **Anais...** Maceió, ENCAC-ELAC 2005a. CD-ROM.

CABÚS, Ricardo C.. Validação do programa TropLux. In: IV Encontro Latino-Americano e VIII Encontro Nacional Sobre Conforto no Ambiente Construído, Maceió, 2005 b. **Anais...** Maceió, ENCAC-ELAC 2005b. CD-ROM.

CABÚS, Ricardo C.. **TropLux, versão 3.02**: Cabús, Ricardo, 2007.

CÂNDIDO, Christina M.; TORRES, Simone C.; CABÚS, Ricardo C.. Análise da utilização de prateleiras de luz em edifício de pesquisa da UFAL. In: IV Encontro Latino-Americano e VIII Encontro Nacional Sobre Conforto no Ambiente Construído, Maceió, 2005. **Anais...** Maceió, ENCAC-ELAC 2005. CD-ROM.

CARLO, J. C.. AET N^o 02/04 Elaboração de regulamentação e classificação de edificações eficientes. **Processamento de arquivos climáticos para simulação de desempenho energético de edificações**. Florianópolis, UFSC 2005.28 p.

CARLSON, William L.; THORNE, Betty. **Applied statistical methods**. Nova Jersey, Prentice Hall, 1997.

CORREIA, Paulo. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil: Pesquisa na Classe Comercial – AT**. Ecoluz, 2007a. Disponível em: <http://www.eletronbras.com/pci/main.asp> (acessado em abril de 2007).

CORREIA, Paulo. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil: Pesquisa na Classe de Prédios Públicos**. Ecoluz, 2007b. Disponível em: <http://www.eletronbras.com/pci/main.asp> (acessado em abril de 2007).

CORREIA, Paulo. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil: Pesquisa na Classe Industrial – AT**. Ecoluz, 2007c. Disponível em: <http://www.eletronbras.com/pci/main.asp> (acessado em abril de 2007).

CORREIA, Paulo. **Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil: Pesquisa na Classe Residencial**. Ecoluz, 2007d. Disponível em: <http://www.eletronbras.com/pci/main.asp> (acessado em abril de 2007).

CRAWLEY, D. B.; PEDERSEN, C. O.; LIESEN, R. J.; FISHER, D. E.; STRAND, R. K.; TAYLOR, R. D.; LAWRIE, L. K.; WINKELMANN, F. C.; BUHL, W. F.; ERDEM, A. E.; HUANG, Y. J.. Energyplus, A New-Generation Building Energy Simulation Program. Building simulation 99, Sixth International IBPSA Conference, Kyoto, Japão. **Anais ... BS 99**, CD-ROM.

CUCUMO, M.; ROSA, A. de, FERRARO, V.; KALIAKATSOS, D.; MARINELLI, V.. Correlations of direct solar luminous efficacy for all sky, clear and intermediate sky conditions and comparisons with experimental data of five localities. **Renewable Energy**, *In Press, Corrected Proof*, disponível online mar. 2008.

DUMORTIER, D. Evaluation of luminous efficacy models according to sky types and atmospheric conditions. In: Lux Europa Conference. **Anais....** 1997.

Energy Efficiency and Renewable Energy. Building Technologies Program - **Weather Data**. Disponível em www.eere.energy.gov/buildings/Energyplus, acessado em maio, 2007.

ENERGYPLUS. Getting Started With Energyplus: Everything You Need to Know About Running Energyplus. Energyplus, set., 2007a.

ENERGYPLUS. Energyplus Engineering Reference. The Reference to Energyplus Calculations. Energyplus, set., 2007b.

FRANZETTI, Christelle; FRAISSE, Gilles; ACHARD, Gilbert. Influence of the coupling between daylight and artificial lighting on thermal loads in office buildings. **Energy and Buildings**, v. 36, nº 2, p 117-126, fev. 2004.

GALASIU, Anca D.; VEITCH, Jennifer A.. Occupant preferences and satisfaction with luminous environment and control systems in daylight offices: a literature review. **Energy and Building**, v. 38, nº 7, p 728-742, jul. 2006.

GELLER, Howard Steven. **Revolução energética: Políticas para um futuro sustentável**. Rio de Janeiro, Relume Dumará, 2003.

GHISI, Eneidir; GOSCH, Samuel; LAMBERTS, Roberto. Electricity end-uses residential sector of Brazil. **Energy Policy**, v. 35, nº 8, p 4107-4120, ago. 2007.

GHISI, Eneidir; TINKER, John A.. An ideal window area concept for energy efficient integration of daylight and artificial light in buildings. **Building and Environment**, v. 40, nº 1, p 51-60, jan. 2005.

GOULART, S.. **Dados climáticos para a avaliação e desempenho térmico de edificações em Florianópolis**. Florianópolis, SC, 1993. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

HONG, Tianzhen; CHOU, S.K.; BONG, T. Y.. Building simulation: an overview of developments and information sources. **Building and Environment**, v. 35, nº 4, p 347-361, mai. 2000.

JOHNSON, Richard A.; WICHERN, Dean W.. **Applied multivariate statistical analysis**. Nova Jersey, Prentice Hall, 4ªEd., 1998.

Laboratório de eficiência energética em Edificações. **Arquivos Climáticos**. Disponível em www.labeee.ufsc.br, acessado em set. 2006.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R.. **Eficiência energética na arquitetura**. São Paulo, ProLivros, 2ªEd., 2004.

LI, D. H. V.; WONG, S. L.; TSANG, C. L.; CHEUNG, H. W.. A study of the daylighting performance and energy use in heavily obstructed residential buildings via computer simulation techniques. **Energy and Buildings**, v. 38, nº 11, p 1343-1348, nov. 2006.

LOUTZENHISER, Peter G.; MAXWELL, Gregory M.; MANZ, Heinrich. An empirical validation of the daylighting algorithms and associated interactions in building energy simulation programs using various shading devices and windows. **Energy**, v. 32, nº 10, p 1855-1870, out. 2007.

NABIL, Azza; MARDALJEVIC, John. Useful daylight illuminances: a new paradigm for assessing daylight in building. **Lighting Research and Technology**, v. 37, nº 1, p 41-59, 2005.

NABIL, Azza; MARDALJEVIC, John. Useful daylight illuminances: a replacement for daylight factors. **Energy and Buildings**, v. 38, nº 7, p 905-913, jul. 2006.

PEREZ, Richard; PIERRE, Ineichen; SEALS, Robert; MICHALSKY, Joseph; STEWART, Ronald. Modeling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. **Solar Energy**, v. 44, nº 5, p 271-289, 1990.

PEREZ, Richard; WEBSTER, Ken; SEALS, Robert; STEWART, Ronald; BARRON, James. Variations of the luminous efficacy of global and diffuse radiation and zenith luminance with weather conditions – descriptions of a potential method to generate key daylight availability data from existing solar radiation data bases. **Solar Energy**, v. 38, nº 1, p 33-44, 1987.

POHLEN, S.; RUCK, B., BITTAR, A.. Evaluation of the Perez luminous efficacy models for a southern hemisphere site (New Zealand - 41°S, 175°E). **Solar Energy**, v. 57, nº 4, p 307-315, out. 1996.

RAMOS, Greici. **Estudo da distribuição das iluminâncias calculadas pelo programa Energyplus**. Trabalho realizado para a disciplina de Análise Térmica de Edificações. Florianópolis, 2006. Trabalho não publicado.

REINHART, Christoph F.. Tutorial on the use of Daysim Simulations for Sustainable Design. Institute for Research in Construction, National Research Council Canadá, Ottawa, Canadá, ago. 2006.

REINHART, Christoph; JONES, Christopher. Electric lighting energy savings for a photocell controlled dimmer - a comparative simulation study using DOE.2 and Lightswitch Wizard, Proceedings of the ESIM 2004 Conference (Vancouver, June 10, 2004), pp. 183-189, June 01, 2004.

REINHART, Christoph F.; WALKENHORST, Oliver. Validation of dynamic RADIANCE-based daylight simulations for a test office with external blinds. **Energy and Buildings**, v. 33, nº 7, p 683-697, set. 2001.

ROBLEDO, Luis; SOLER, Alfonso. Luminous efficacy of direct solar radiation for all sky types. **Energy**, v. 26, nº 7, p 669-677, jul. 2001a.

ROBLEDO, Luis; SOLER, Alfonso. On the luminous efficacy of diffuse solar radiation. **Energy Conversion and Management**, v. 42, nº 10, p 1181-1190, jul. 2001b.

SOUZA, Roberta V. G. de; PEREIRA, Fernando O. R.. Primeira estação de medição de iluminação natural em território brasileiro: análise dos dados dos dois primeiros anos de funcionamento. **Ambiente Construído**, v.4, nº 3, p. 79-94, Porto Alegre, jul.-set., 2004.

SOUZA, Roberta; ROBLEDO, Luis. Testing diffuse luminous efficacy models for Florianópolis, Brazil. **Building and Environment**, v.39, nº.3, p. 317-325, mar., 2004.

SOUZA, Roberta G. de; ROBLEDO, Luis; SOLER, Alfonso; PEREIRA, Fernando O. R.. Clear Sky and all sky direct luminous efficacies for Florianópolis, Brazil. **Energy Conversion & Management**, v.46, nº.3, p. 361-371, fev. 2005.

VARTIAINEN, Eero. A comparison of luminous efficacy models with illuminance and irradiance measurements. **Renewable Energy**, v.20, nº 3, p. 265-277, jul. 2000.

U.S. Department of Energy. **Energyplus, versão 2.0**. U.S. Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, 2007.

WINKELMANN, Frederick C.; SELKOWITZ, Stephen. Daylighting Simulation in the DOE-2 Building energy Analysis Program. **Energy and Buildings**, v. 8, nº 4, p. 271-286, dez. 1985.

WITTE, MICHAEL J.; HENNINGER, ROBERT H.; GLAZER, JASON; CRAWLEY, DRURY B.. Testing and Validation of a New Building Energy Simulation Program. Building simulation 2001, Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brasil. **Anais ... BS 2001**, CD-ROM.

WRIGHT, J.; PEREZ, R.; MICHALSKY, J. J.. Luminous efficacy of direct irradiance variations with insolation and moisture conditions. **Solar Energy**, v. 42, nº 5, p 387-394, 1989.

Em estudo preliminar, realizado para treinamento do programa Energyplus através do BESTEST, também avaliou-se a ferramenta diante da possibilidade de usá-la para a análise da iluminação.

Para uma maior avaliação do programa Energyplus e das possibilidades de análise que ele permite, verificou-se a distribuição da luz em um caso base, para as quatro orientações e seis percentuais de janela (10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 100%), considerando o uso de luz natural como uma alternativa para economia de energia. Neste apêndice são apresentados apenas alguns casos representativos.

Neste estudo, a intenção era verificar a relação entre o tamanho da abertura e o consumo de energia em edifícios de escritórios, sendo que o ganho de calor pela abertura aumenta a carga na sala e a contribuição da iluminação natural favorece a economia de energia na sala.

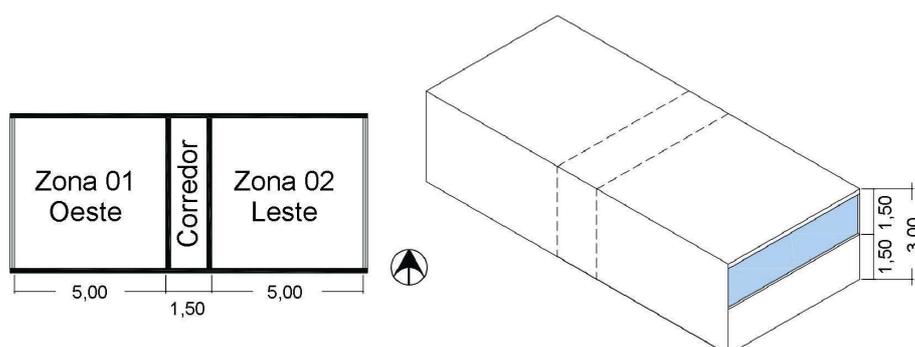


Figura A. 1. Modelo Base

O *modelo base* foi desenvolvido baseado em atividades e cargas presentes em edifícios de escritórios. O modelo possui um pavimento com duas salas de 5 m x 5m, com pé-direito de 3 m, separadas por um corredor de 1,5 m x 5 m x 3 m, com a maior fachada com orientação norte e com abertura em 50% das fachadas leste e oeste. No modelo, as características são: as paredes têm 15 cm e refletância de 60%; a cobertura de 25 cm com refletância externa de 25% e interna de 70%; e o piso com refletância de 30%.

Para a elaboração do modelo foi considerado, que em cada uma das salas trabalhariam duas pessoas com uma atividade de 1,2 met ($10,08 \text{ w/m}^2$ de área). Considerou-se que estas pessoas estariam desempenhando suas atividades nos seguintes horários: das 8:00 às 12:00, e das 14:00 às 18:00. No período entre as 12 e 14 horas, apenas metade das pessoas permaneceria no local. Completando as cargas internas existem 8W/m^2 de área em iluminação (200W em cada sala) e 12W/m^2 de área em equipamentos (300W em cada sala), no modelo base são considerados ligados no mesmo período e proporção que as pessoas. Para o corredor não são consideradas nenhum tipo de carga. E em todos os ambientes, considerou-se apenas uma troca de ar, com 0,0208 m.

Com a intenção de verificar o potencial de economia pelo uso da iluminação natural estabeleceram-se dois pontos de referência, em cada sala, que irão controlar o acionamento ou não da iluminação artificial. Para o modelo foi estabelecido um sistema de iluminação artificial com controle dimmer/off, e com controle de ofuscamento, estabeleceu-se que o usuário estaria de frente para a janela.

Na primeira fase de análise foram utilizados os dois métodos disponibilizados pelo programa, o *Daylighting Detailed* e o *Mapa de Iluminâncias*. No primeiro método, através de dois pontos de referência, é possível obter-se a iluminância, e controle do sistema de iluminação artificial; onde, o primeiro ponto de referência controla a iluminação artificial da metade da sala próxima à janela, enquanto o segundo ponto controla o fundo da sala. O segundo método, fornece dados para a elaboração de mapas de iluminância, possibilitando a verificação da distribuição da luz no ambiente.

A partir dos resultados obtidos através dos *Mapas de iluminâncias*, verificou-se que em alguns horários e locais, os níveis de iluminância encontram-se muito acima do esperado, de acordo com a Figura A. 2.

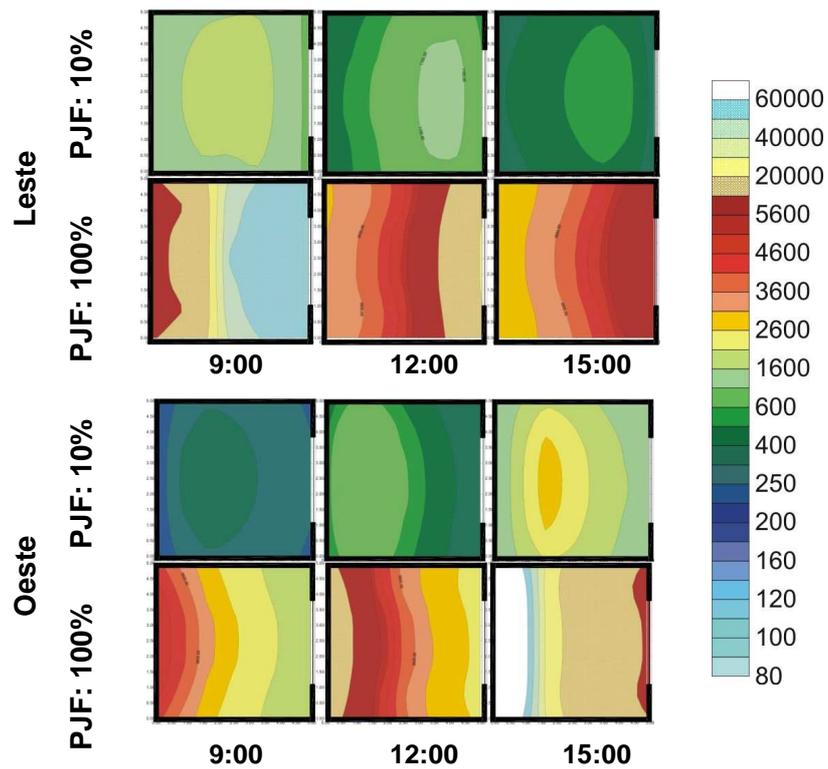


Figura A. 2. Mapa das Iluminâncias para as duas zonas, com dois tamanhos de abertura

A partir da verificação da existência de uma tendência a valores elevados, foram realizados alguns testes para a verificação das possíveis causas dos altos níveis de iluminação. Primeiro foram verificados os dados do arquivo climático de Florianópolis. Para este teste foram comparados os resultados das simulações realizadas para Florianópolis (27°5'S, 48°25'W) e para Tampa (local com latitude similar, 27°58'N, 82°31'W), ambas as simulações foram feitas com o mesmo modelo. Para tornar possível a comparação, considerou-se, para ambas as cidades, um dia de inverno e com céu encoberto. A partir dos resultados mostrados na Figura A1. 3, pode-se perceber que os níveis de iluminância são elevados em Florianópolis, e ainda mais altos para Tampa. Uma sala com estas tais características não possuiria pontos de iluminação com 500 lx às cinco da tarde, no inverno, longe da abertura.

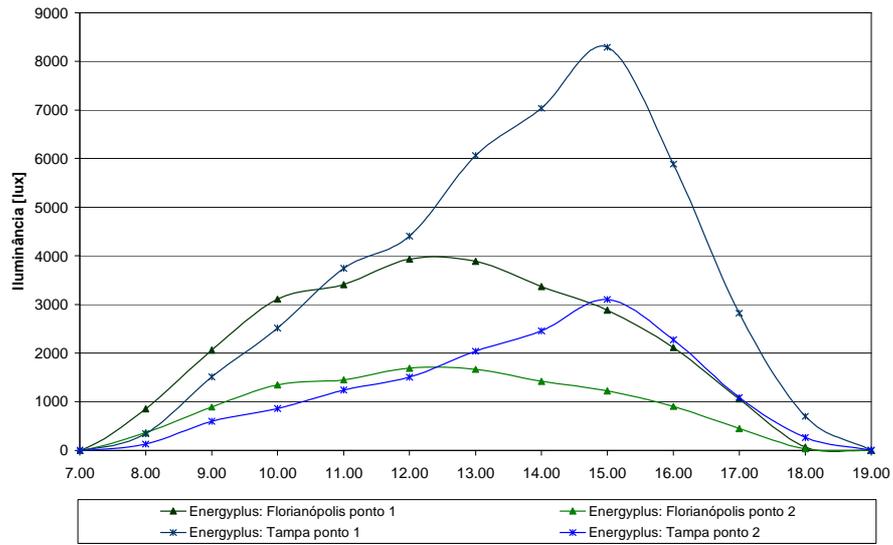


Figura A1. 3. Comparação das iluminâncias para o clima de Florianópolis e Tampa.

A seguir, foi avaliada a influência da luz refletida na iluminância total, assim, foram simulados dois modelos, um com refletância de 85% e outro de 1%. A Figura A. 4 mostra os resultados, onde uma diferença maior que 1000lx é encontrada nos dois pontos de referência.

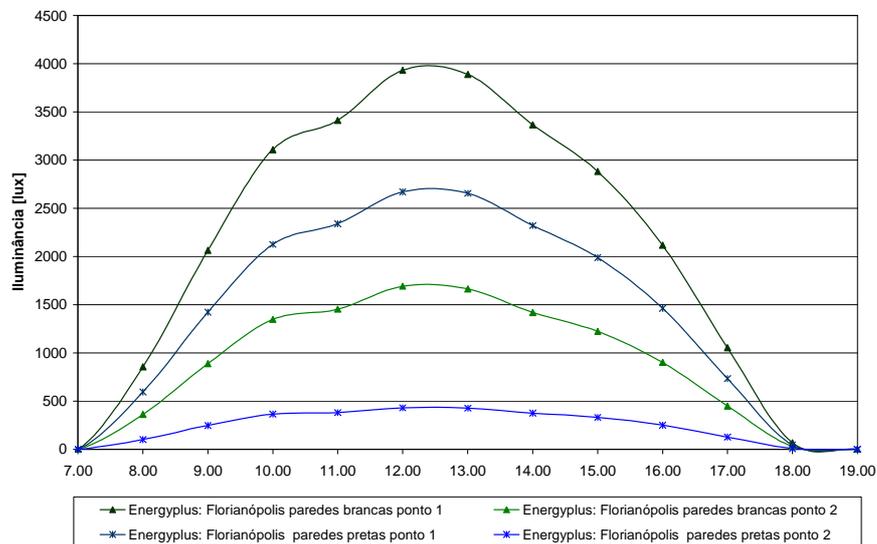


Figura A. 4. Comparação das iluminâncias para o mesmo modelo com paredes brancas e pretas, para o clima de Florianópolis.

Posteriormente, comparou-se os resultados do Energyplus com os dados obtidos com o programa Lightscape. Os modelos analisados foram simulados sob as mesmas condições (mesmo período, com céu encoberto e paredes com refletância igual a 85%). Na Figura A. 5, se observa que a iluminância máxima obtida através do

Energyplus corresponde ao dobro da encontrada pelo Lightscape (para o ponto de referência próximo a janela). Para o outro ponto de referência, a iluminância máximo encontrada pelo Energyplus é aproximadamente 50% maior que às do Lightscape.

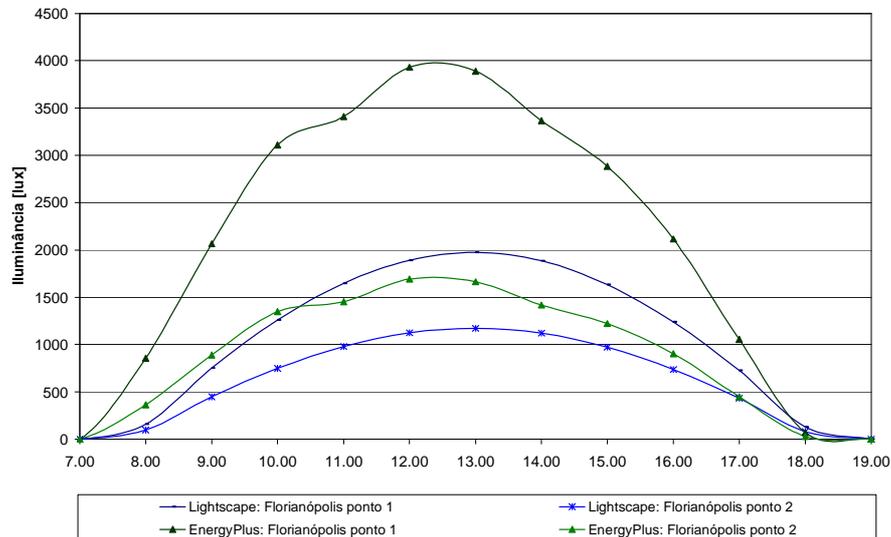


Figura A. 5. Comparação das iluminâncias para o clima de Florianópolis, obtidas através do Energyplus e Lightscape.

Através destes testes percebe-se que o método utilizado pelo programa Energyplus para a estimativa das iluminância internas não é apropriado para a pesquisa a ser desenvolvida neste trabalho, uma vez que o resultados são, em grande parte, superestimadas. Desta forma, escolheu-se outro programa para a realização das simulações referentes a distribuição da iluminação natural no ambiente interno.

A2.1 Iluminâncias do Modelo de proporção 2:1

Para a sala de proporção 2:1, onde a abertura está na maior fachada, a semelhança entre os resultados do Energyplus e Daysim continua, representada na Figura A1. 1, mas com um pequeno aumento na diferença entre as iluminâncias para o ponto um, enquanto a diferença entre os resultados destes e do TropiLux aumentam. Os valores obtidos através do programa Daysim são em média 65% do valor das iluminâncias obtidas pelo TropiLux; enquanto as iluminâncias encontradas pelo TropiLux chegam a ser 85% menores que as definidas pelo Energyplus.

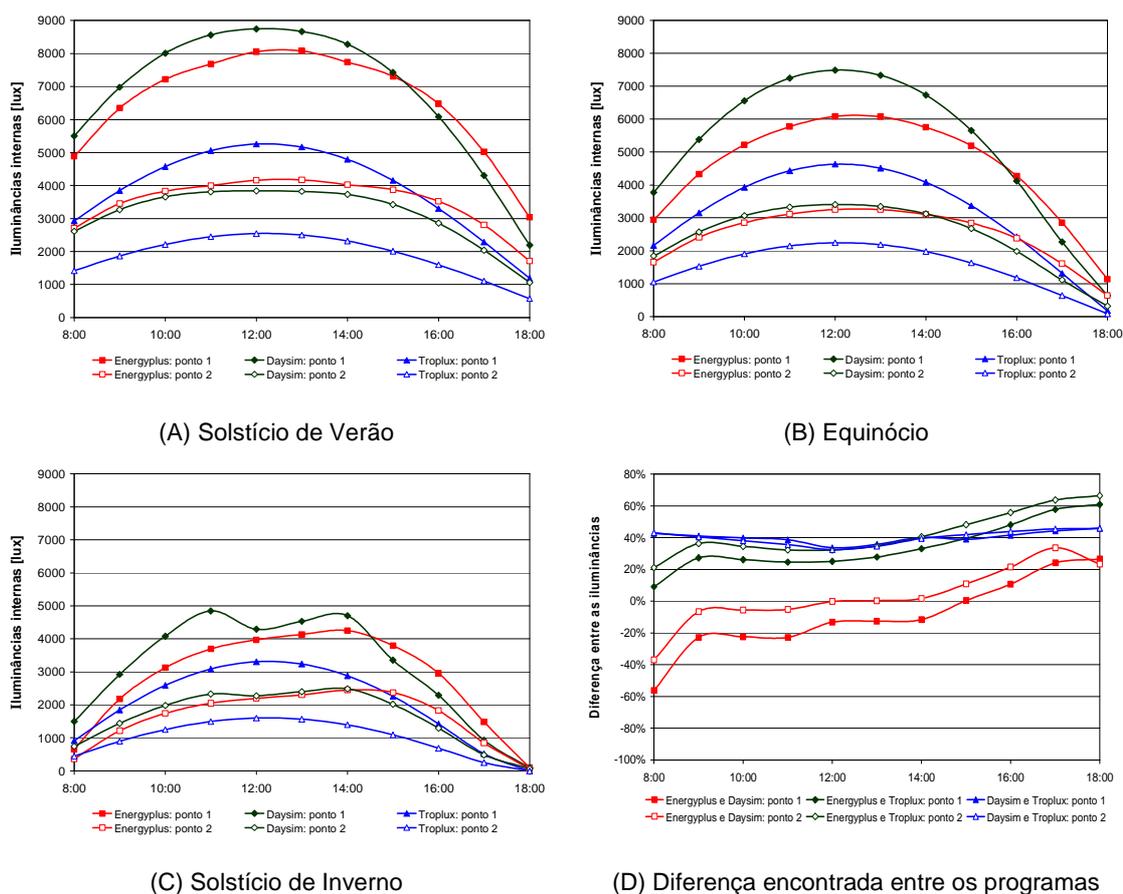


Figura A1. 1. Valores da iluminância interna para o modelo de proporção 2:1 (A), e diferença entre as iluminâncias (B).

A2.2 Fator de Luz Diurna do Modelo de proporção 2:1

Os resultados obtidos para o modelo com proporção 2:1 (10m x 5m x 3m) são apresentados nas figuras de A2.2 a A2.5. Este modelo apresenta o mesmo comportamento do fator de luz diurna em relação à distribuição do mesmo ao longo da sala, mas com valores maiores do FLD, uma vez que a abertura está localizada na maior fachada.

A partir das figuras de A2.2 a A2.5, observa-se que os valores obtidos para o Daysim/Radiance são sempre maiores que os resultantes das simulações nos outros programas, embora se aproxime dos valores do Energyplus na metade da sala mais afastada da abertura. Já a relação entre os programas Energyplus e TropLux é melhor na metade da sala próxima a abertura. Este fato fica evidente na Figura A2.5, onde verifica-se uma diferença máxima de 16% entre os programas TropLux e Energyplus, na frente da sala; e uma diferença média de 4% entre o Energyplus e Daysim/Radiance, para os últimos dois metros da sala.

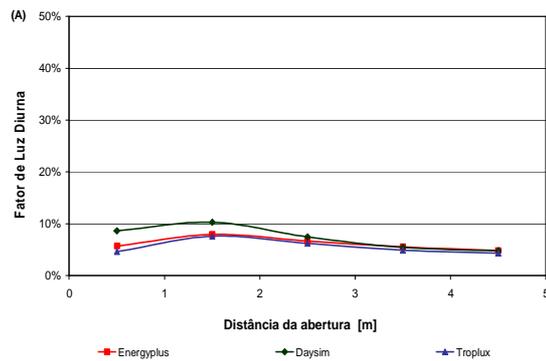


Figura A1. 2. Fator de luz diurna (FLD) para sala com proporção 2:1, com PJJ de 25%.

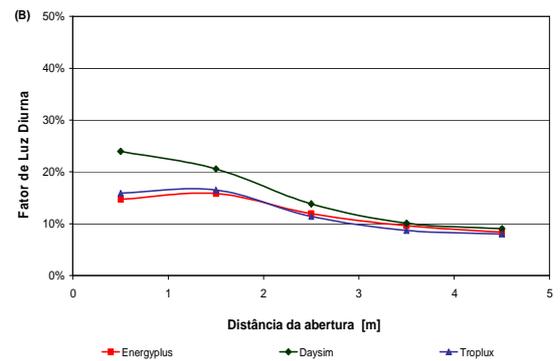


Figura A1. 3. Fator de luz diurna (FLD) para sala com proporção 2:1, com PJJ de 50%.

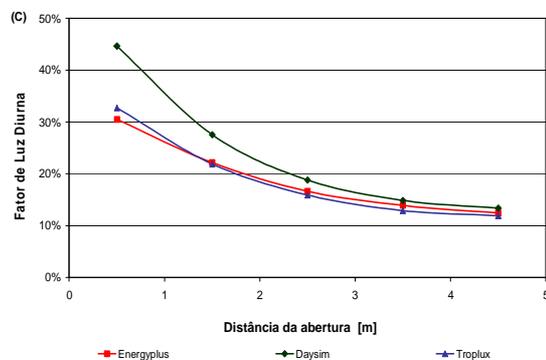


Figura A1. 4. Fator de luz diurna (FLD) para sala com proporção 2:1, com PJJ de 100%.

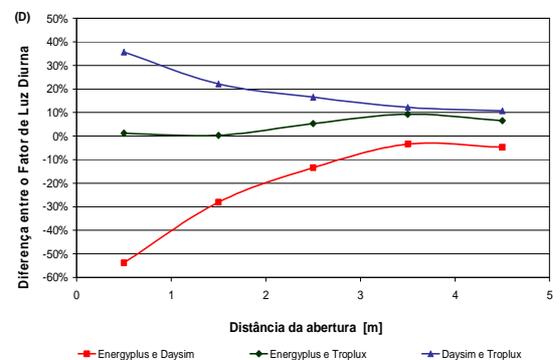


Figura A1. 5. Erro médio encontrado para o modelo com proporção 2:1.

Apêndice 2

Exemplo de valores de iluminâncias calculadas e medidas

Tabela A3.1 Dados de Florianópolis utilizados para o cálculo da iluminância difusa.

Data	Radiação Difusa	Z [°]	W [cm]	ϵ	Δ	Iluminância Calc. [klx]	Iluminância Medida [klx]
4/24/04	87,58	59,78	2,80	1,000	0,127	10,54	8,62
7/16/04	45,16	66,27	3,00	1,000	0,082	5,55	5,29
9/6/04	26,08	76,49	2,94	1,000	0,082	3,16	2,69
1/31/05	42,07	81,73	4,83	1,000	0,214	4,65	4,84
3/19/05	19,97	77,10	4,12	1,000	0,065	2,44	3,22
3/23/05	77,15	65,09	4,28	1,000	0,134	9,12	12,43
12/18/04	475,44	6,56	3,85	1,065	0,259	55,90	45,69
3/21/03	391,02	65,18	3,67	1,070	0,368	45,22	19,41
7/21/03	228,42	50,61	3,65	1,071	0,233	26,85	25,58
10/4/03	44,16	85,63	4,22	1,109	0,396	5,11	5,15
12/30/04	268,37	43,22	4,25	1,229	0,354	31,30	27,45
3/5/03	366,61	50,03	5,25	1,229	0,326	43,28	37,39
6/13/03	190,60	58,23	4,74	1,229	0,269	22,52	24,27
11/13/03	163,71	58,44	3,16	1,231	0,361	19,71	7,06
12/3/04	181,16	49,02	3,86	1,258	0,231	22,76	24,50
9/9/04	457,03	34,69	3,57	1,258	0,453	53,90	54,31
8/26/04	281,38	49,24	3,62	1,374	0,259	34,87	16,55
12/2/04	55,71	84,43	2,77	1,409	0,359	6,77	3,62
9/20/03	127,47	65,76	3,01	1,499	0,348	15,40	13,28
9/20/04	406,32	30,37	3,55	1,500	0,377	48,45	59,31
12/3/04	126,82	62,14	3,80	1,503	0,263	17,21	16,36
8/12/04	313,47	46,90	3,03	1,613	0,177	41,97	14,73
6/13/05	189,00	60,33	3,26	1,614	0,204	25,66	18,62
4/8/05	144,73	65,03	3,39	1,615	0,290	19,20	14,56
2/11/04	337,17	16,90	3,72	1,897	0,264	43,27	27,68
6/1/05	51,00	79,34	3,52	1,948	0,316	6,91	5,48
12/20/04	426,33	17,67	4,07	1,950	0,207	59,92	41,06
12/19/04	187,55	57,39	4,14	1,950	0,198	28,42	18,07
12/25/03	205,89	40,83	3,11	2,235	0,282	27,19	20,71
1/11/05	124,41	65,84	4,23	2,346	0,246	18,64	13,61
12/27/04	339,82	6,20	4,82	2,618	0,269	46,86	31,87
5/12/03	212,44	47,31	3,93	2,722	0,224	30,63	26,07
4/6/04	231,86	33,92	4,07	2,797	0,264	31,91	19,68
3/6/03	117,86	63,21	4,72	2,967	0,210	18,05	12,60
3/5/03	232,23	33,22	3,74	3,265	0,202	31,72	25,70
2/28/03	60,46	75,73	4,94	3,469	0,164	10,19	7,71
3/4/03	241,45	26,77	4,63	3,598	0,176	34,26	25,48
3/1/03	56,36	75,86	4,52	3,823	0,141	9,66	7,14
3/2/03	85,40	62,69	4,68	4,167	0,143	13,99	9,07
2/28/03	80,55	62,43	3,40	4,640	0,144	12,16	9,78
2/24/03	44,95	69,34	3,99	4,647	0,143	7,10	7,00
2/24/03	162,10	35,98	4,53	4,655	0,126	22,12	17,53
2/26/03	45,65	75,48	4,55	5,263	0,129	7,58	5,42
2/27/03	65,45	62,30	2,84	5,823	0,120	9,96	7,83
2/24/03	70,39	56,05	3,58	5,914	0,108	10,57	9,53
2/25/03	130,47	30,96	4,16	5,922	0,104	17,73	16,12
2/25/03	143,93	24,93	3,46	6,320	0,104	18,78	18,63
2/25/03	125,93	18,26	2,61	7,403	0,105	16,14	16,52
2/24/03	94,86	30,71	3,78	8,298	0,080	12,78	12,62
2/24/03	101,06	24,67	3,76	8,670	0,089	13,31	11,72
2/24/03	98,76	20,79	4,41	8,856	0,088	12,93	12,85

Tabela A3.1 Dados de Florianópolis utilizados para o cálculo da iluminância direta.

Data	Radiação Direta	Z [°]	W [cm]	ε	Δ	Iluminância Calc. [klx]	Iluminância Medida [klx]
2/21/03	1,14	50,68	3,12	1,005	0,223	0,08	0,34
2/25/03	1,12	68,51	3,53	1,007	0,321	0,07	0,18
3/26/03	9,58	16,49	6,32	1,025	0,300	0,61	3,05
2/20/03	13,80	52,34	4,38	1,039	0,384	1,08	4,39
3/7/03	20,72	25,66	3,28	1,041	0,414	1,87	1,99
2/21/03	4,03	79,21	3,75	1,080	0,279	0,27	1,55
4/4/03	30,94	50,38	2,40	1,090	0,364	2,91	5,10
4/4/03	57,17	36,17	5,42	1,142	0,358	4,82	3,42
4/4/03	38,48	57,32	3,33	1,149	0,316	3,42	6,22
4/18/03	53,85	58,63	2,91	1,178	0,385	4,89	13,21
2/22/03	79,91	49,97	4,39	1,216	0,388	6,98	13,02
3/4/03	124,94	30,20	3,26	1,291	0,365	11,30	27,08
3/5/03	104,92	56,85	4,59	1,322	0,395	8,44	13,59
3/7/03	197,37	15,15	2,46	1,365	0,417	18,56	33,99
3/4/03	88,60	60,32	4,77	1,386	0,309	6,99	17,08
3/7/03	5,33	69,93	4,04	1,388	0,029	0,41	0,65
3/3/03	77,13	65,66	6,02	1,446	0,290	5,37	4,44
2/20/03	116,85	61,07	3,26	1,504	0,321	9,79	10,56
2/21/03	32,56	79,46	2,68	1,641	0,294	1,81	4,48
2/20/03	198,81	14,54	4,19	1,704	0,217	16,86	1,79
2/20/03	246,75	31,96	2,61	1,811	0,262	23,09	11,31
2/21/03	203,14	51,76	3,40	1,841	0,261	17,66	8,32
2/20/03	102,57	75,35	3,17	1,938	0,371	6,67	17,97
2/23/03	298,04	53,47	2,99	2,064	0,313	26,85	25,54
2/21/03	327,32	43,12	3,82	2,359	0,229	29,10	45,61
2/23/03	141,64	72,04	4,79	2,365	0,260	9,90	12,75
2/21/03	159,24	68,86	4,72	2,398	0,228	11,89	18,80
2/21/03	535,62	7,77	2,51	2,428	0,279	50,69	30,87
2/22/03	55,40	79,14	4,31	2,589	0,192	3,09	3,69
2/21/03	608,94	24,67	3,45	2,866	0,267	58,23	74,60
2/24/03	325,37	60,20	4,30	3,729	0,160	30,38	36,01
2/23/03	131,99	76,25	2,89	3,830	0,175	10,30	16,77
2/23/03	495,66	44,53	3,41	3,921	0,164	48,41	47,48
2/23/03	487,57	46,34	2,63	3,963	0,163	48,03	45,50
2/23/03	268,62	63,53	3,09	4,178	0,129	25,26	26,70
2/23/03	435,69	57,45	5,07	5,950	0,109	44,99	46,96
2/23/03	268,73	67,07	3,10	4,601	0,135	25,95	34,80
2/24/03	703,27	15,71	3,43	4,691	0,147	72,63	76,29
3/1/03	443,22	55,73	2,83	5,081	0,128	44,89	32,11
3/4/03	146,57	77,22	1,82	5,518	0,137	12,21	18,56
3/21/03	703,54	29,97	4,17	5,339	0,138	73,20	84,24
2/23/03	406,53	59,76	4,03	6,376	0,100	42,20	41,93
2/26/03	665,68	26,89	5,24	6,900	0,094	72,28	73,04
2/25/03	696,85	39,27	3,97	7,236	0,102	74,02	74,90
2/21/03	567,11	47,07	4,67	7,534	0,087	60,69	56,96
2/28/03	716,59	42,39	1,47	12,921	0,057	73,46	68,41
2/27/03	770,25	37,09	3,11	14,559	0,051	81,16	79,57