

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS  
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E  
NUCLEARES

**MEDIDAS E MODELAGEM DA ILUMINÂNCIA PARA  
DIVERSAS CONDIÇÕES DE CÉU NO NORDESTE DO BRASIL**

SÉRGIO DA SILVA LEAL

**RECIFE – PERNAMBUCO – BRASIL  
ABRIL - 2006**

**MEDIDAS E MODELAGEM DA ILUMINÂNCIA PARA  
DIVERSAS CONDIÇÕES DE CÉU NO NORDESTE DO BRASIL**

SERGIO DA SILVA LEAL

**MEDIDAS E MODELAGEM DA ILUMINÂNCIA PARA  
DIVERSAS CONDIÇÕES DE CÉU NO NORDESTE DO BRASIL**

Dissertação submetida ao Programa  
de Pós-Graduação em Tecnologias  
Energéticas e Nucleares do  
Departamento de Energia Nuclear da  
Universidade Federal de Pernambuco  
para a obtenção do título de Mestre.

ORIENTADOR: PROF. DR. CHIGUERU TIBA

RECIFE – PERNAMBUCO - BRASIL

MARÇO - 2006

Leal, Sérgio da Silva

Medidas e modelagem da iluminância para diversas condições de céu no Nordeste do Brasil / Sérgio da Silva Leal. – Recife : O Autor, 2006.  
x, 82 folhas : il., fig., tab.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CCEN. Energia Nuclear, 2006.

Inclui bibliografiae anexos.

1. Energia solar – Iluminância. 2. Espectro solar visível – Aplicação em ambientes internos – Redução do uso da iluminação artificial. 3. Luz natural (solar) – Avaliação da eficiência, Região Nordeste, Pernambuco. 4. Modelagem da eficiência luminosa – Dados experimentais locais. I. Título.

620.92  
621.042

CDU (2.ed.)  
CDD (22.ed.)

UFPE  
BC2006-299

**MEDIDAS E MODELAGEM DA ILUMINÂNCIA PARA DIVERSAS  
CONDIÇÕES DO CÉU NO NORDESTE DO BRASIL**

**Sérgio da Silva Leal**

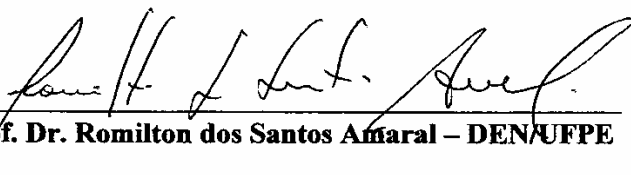
**APROVADO EM: 04.04.2006**

**ORIENTADOR : Prof. Dr. Chigueru Tiba**

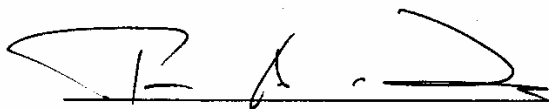
**COMISSÃO EXAMINADORA:**



**Prof. Dr. Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira – DEN/UFPE**



**Prof. Dr. Romilton dos Santos Amaral – DEN/UFPE**



**Prof. Dr. Pedro André Carvalho Rosas – DEE/UFPE**

**Visto e permitida a impressão**



**Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE**

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Chigueru Tiba, pela orientação, confiança e oportunidade de poder realizar este trabalho.

Aos Professores Romilton dos Santos Amaral, Rômulo Simões Cezar Menezes, Elielza M. de S. Barbosa, Carlos Alberto Brayner de Oliveira Lira e Pedro André Carvalho Rosas pelas importantes e oportunas sugestões.

Aos companheiros e colegas de sala de aula Adalberto, Silvia, Tito, Gilmário, Carlos, Bráulio, Bione, Milton, Rinaldo pelos gestos de incentivo.

Ao Diretor José Djair A. de Souza, por permitir espontaneamente a instalação da estação de medição e sua operacionalização em uma das salas do CEFET – Pesqueira.

Aos meus familiares que direta ou indiretamente possibilitaram a conclusão deste trabalho.

A todos os integrantes do grupo FAE pelo estímulo e amizade.

## SUMÁRIO

|                                                                                         |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| LISTA DE FIGURAS .....                                                                  | i   |
| LISTA DE TABELAS .....                                                                  | iv  |
| LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....                                                  | v   |
| SÍMBOLOS GREGOS .....                                                                   | vi  |
| RESUMO .....                                                                            | vii |
| ABSTRACT .....                                                                          | ix  |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                                                     | 1   |
| 1.1 Justificativas .....                                                                | 1   |
| 1.2 Objetivos .....                                                                     | 3   |
| 1.2.1 Objetivo geral .....                                                              | 3   |
| 1.2.2 Objetivos específicos .....                                                       | 3   |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA .....                                                          | 4   |
| 2.1 Iluminância .....                                                                   | 4   |
| 2.2 Consumo de energia elétrica em edificações comerciais .....                         | 7   |
| 2.3 Cálculo da contribuição da iluminação natural .....                                 | 8   |
| 2.4 Modelagem da iluminância .....                                                      | 11  |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS .....                                                            | 17  |
| 3.1 Sistema de medição e coleta de dados .....                                          | 17  |
| 3.2 Influência da água precipitável contida na atmosfera sobre a irradiação solar ..... | 21  |
| 3.3 Modelos aplicados na modelagem da eficiência luminosa .....                         | 23  |
| 3.3.1 Modelo de Robledo .....                                                           | 23  |
| 3.3.2 Modelo de Perez .....                                                             | 24  |
| 3.3.3 Modelo de Alados .....                                                            | 28  |
| 3.3.4 Avaliação dos modelos .....                                                       | 29  |
| 4. RESULTADOS E COMENTÁRIOS .....                                                       | 31  |
| 4.1 Avaliação das medidas de iluminância .....                                          | 31  |
| 4.1.1 Descrição das medidas de iluminância e irradiação solar luminosa .....            | 32  |
| 4.1.2 Descrição das medidas de fator de eficiência luminosa .....                       | 35  |

|                                                                                                    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.1.3 Distribuição acumulada da iluminância global horária e do fator de eficiência luminosa ..... | 40 |
| 4.1.4 Descrição das medidas diárias e mensais de iluminância e irradiação solar .....              | 44 |
| 4.2 Modelagem da eficiência luminosa.....                                                          | 52 |
| 4.2.1 Modelo de Robledo .....                                                                      | 53 |
| 4.2.2 Modelo de Perez.....                                                                         | 56 |
| 4.2.2.1 Modelo de Perez Original .....                                                             | 56 |
| 4.2.2.2 Modelo de Perez local .....                                                                | 58 |
| 4.2.3 Modelo de Alados .....                                                                       | 61 |
| 5. CONCLUSÕES .....                                                                                | 64 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                                | 65 |
| ANEXO I.....                                                                                       | 67 |
| ANEXO II .....                                                                                     | 71 |
| ANEXO III .....                                                                                    | 75 |
| ANEXO IV .....                                                                                     | 79 |

## LISTA DE FIGURAS

|            |                                                                                                                                                         |    |
|------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.1 | Correlação entre o pico da demanda elétrica e a relação área da janela e área da parede.....                                                            | 2  |
| Figura 2.1 | Espectro eletromagnético solar. ....                                                                                                                    | 4  |
| Figura 2.2 | Sensibilidade média do olho humano para diferentes comprimentos de onda .....                                                                           | 5  |
| Figura 2.3 | Representação gráfica do lúmen. ....                                                                                                                    | 6  |
| Figura 2.4 | Consumo médio anual de eletricidade em edifícios comerciais em Hong Kong: principais usos finais. ....                                                  | 7  |
| Figura 2.5 | Componentes da iluminação natural: CC – Componente do céu, CRE – Componente refletida externa e CRI – Componente refletida interna. ....                | 9  |
| Figura 2.6 | Eficiência global e direta para a cidade de Hong Kong .....                                                                                             | 14 |
| Figura 3.1 | Mapa de Pernambuco e as respectivas estações de medição .....                                                                                           | 17 |
| Figura 3.2 | Piranômetro espectral de precisão Eppley (PSP).....                                                                                                     | 19 |
| Figura 3.3 | Visão detalhada do piranômetro modelo LI-200SA para medição da irradiação solar, instalado no telhado do CEFET-Pesqueira.....                           | 19 |
| Figura 3.4 | Datalogger modelo CR10X.....                                                                                                                            | 21 |
| Figura 3.5 | Absorção da irradiação solar na atmosfera .....                                                                                                         | 22 |
| Figura 4.1 | Irradiação solar global horária em função do ângulo de elevação para Recife. ....                                                                       | 32 |
| Figura 4.2 | Iluminância solar global horária em função do ângulo de elevação para Recife. ....                                                                      | 33 |
| Figura 4.3 | Irradiação solar global horária em função do ângulo de elevação para Pesqueira. ....                                                                    | 33 |
| Figura 4.4 | Iluminância solar global horária em função do ângulo de elevação para Pesqueira. ....                                                                   | 34 |
| Figura 4.5 | Fator de eficiência luminosa global, em função da altitude solar, para a condição de céu claro, para Recife ( $k_t > 0,65$ ). ....                      | 37 |
| Figura 4.6 | Fator de eficiência luminosa global, em função da altitude solar, para a condição de céu parcialmente nublado, para Recife ( $0,3 < k_t < 0,65$ ). .... | 37 |

|             |                                                                                                                                                            |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.7  | Fator de eficiência luminosa global, em função da altitude solar, para a condição de céu nublado, para Recife ( $k_t < 0,3$ ). ....                        | 38 |
| Figura 4.8  | Fator de eficiência luminosa global, em função da altitude solar, para a condição de céu claro, para Pesqueira ( $k_t > 0,65$ ). ....                      | 38 |
| Figura 4.9  | Fator de eficiência luminosa global, em função da altitude solar, para a condição de céu parcialmente nublado, para Pesqueira ( $0,3 < k_t < 0,65$ ). .... | 39 |
| Figura 4.10 | Fator de eficiência luminosa global, em função da altitude solar, para a condição de céu nublado, para Pesqueira ( $k_t < 0,3$ ). ....                     | 39 |
| Figura 4.11 | Distribuição acumulada mensal e anual da iluminância global horária para a cidade de Recife.....                                                           | 41 |
| Figura 4.12 | Distribuição acumulada mensal e anual da iluminância global horária para a cidade de Pesqueira .....                                                       | 42 |
| Figura 4.13 | Distribuição acumulada anual da eficiência luminosa global horária para a cidade de Recife.....                                                            | 43 |
| Figura 4.14 | Distribuição acumulada anual da eficiência luminosa global horária para a cidade de Pesqueira .....                                                        | 44 |
| Figura 4.15 | Irradiação solar global média diária para a cidade de Recife.....                                                                                          | 45 |
| Figura 4.16 | Iluminância global média diária para a cidade de Recife .....                                                                                              | 45 |
| Figura 4.17 | Eficiência luminosa média diária para a cidade de Recife.....                                                                                              | 46 |
| Figura 4.18 | Irradiação solar global média diária para a cidade de Pesqueira .....                                                                                      | 46 |
| Figura 4.19 | Iluminância global média diária para a cidade de Pesqueira .....                                                                                           | 47 |
| Figura 4.20 | Eficiência luminosa média diária para a cidade de Pesqueira.....                                                                                           | 47 |
| Figura 4.21 | Irradiação solar global média mensal para a cidade de Recife .....                                                                                         | 49 |
| Figura 4.22 | Iluminância global média mensal para a cidade de Recife .....                                                                                              | 49 |
| Figura 4.23 | Eficiência luminosa média mensal para a cidade de Recife .....                                                                                             | 50 |
| Figura 4.24 | Irradiação solar global média mensal para a cidade de Pesqueira .....                                                                                      | 50 |
| Figura 4.25 | Iluminância global média mensal para a cidade de Pesqueira .....                                                                                           | 51 |
| Figura 4.26 | Eficiência luminosa média mensal para a cidade de Pesqueira .....                                                                                          | 51 |
| Figura 4.27 | Eficiência luminosa global horária em função do ângulo de elevação para Recife, Modelo de Robledo.....                                                     | 55 |

|             |                                                                                                           |    |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 4.28 | Eficiência luminosa global horária em função do ângulo de elevação para Pesqueira, Modelo de Robledo..... | 55 |
| Figura 4.29 | Eficiência luminosa prevista pelo modelo de Perez original para Recife.....                               | 57 |
| Figura 4.30 | Eficiência luminosa prevista pelo modelo de Perez original para Pesqueira.....                            | 58 |
| Figura 4.31 | Eficiência luminosa prevista pelo modelo de Perez local para Recife.....                                  | 59 |
| Figura 4.32 | Eficiência luminosa prevista pelo modelo de Perez local para Pesqueira.....                               | 60 |
| Figura 4.33 | Eficiência luminosa prevista pelo modelo de Alados para Recife.....                                       | 62 |
| Figura 4.34 | Eficiência luminosa prevista pelo modelo de Alados para Pesqueira.....                                    | 62 |

## LISTA DE TABELAS

|          |                                                                                                                                  |    |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 | Coordenadas geográficas das estações de medidas da iluminância e da irradiação solar.....                                        | 18 |
| Tabela 2 | Modelagem do fator eficiência luminosa .....                                                                                     | 26 |
| Tabela 3 | Estações onde foram feitas as medidas de iluminância e irradiação solar global, em escala de minuto, e o período de medidas..... | 31 |
| Tabela 4 | Dados experimentais utilizados para a modelagem e para a validação, bem como o modelo aplicado .....                             | 52 |
| Tabela 5 | Erro médio e médio quadrático, conforme localização e modelo aplicado .....                                                      | 63 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

|                   |                                                                    |
|-------------------|--------------------------------------------------------------------|
| CC                | Componente do céu                                                  |
| CRE               | Componente refletida externa                                       |
| CRI               | Componente refletida interna                                       |
| CIN               | Contribuição da iluminação natural                                 |
| DM                | Desvio médio                                                       |
| DMQ               | Desvio médio quadrático                                            |
| E                 | Iluminância (lux)                                                  |
| $E_b$             | Iluminância solar direta para qualquer condição de céu             |
| $E_d$             | Iluminância solar difusa para qualquer condição de céu             |
| $E_g$             | Iluminância solar global para qualquer condição de céu             |
| $E_{\text{HEXT}}$ | Iluminância num plano horizontal externo                           |
| $E_P$             | Iluminância num plano horizontal interno                           |
| I                 | Irradiação solar horária ( $\text{W/m}^2$ )                        |
| $I_{eb}$          | Irradiação solar direta normal                                     |
| $I_\lambda$       | Irradiação eletromagnética para um determinado comprimento de onda |
| $I_0$             | Irradiação solar extraterrestre horária                            |
| $I_b$             | Irradiação solar direta para qualquer condição de céu              |
| $I_d$             | Irradiação solar difusa para qualquer condição de céu              |
| $I_g$             | Irradiação solar global para qualquer condição de céu              |
| $K_C$             | Fator caixilho                                                     |
| $K_M$             | Fator manutenção                                                   |

|             |                                        |
|-------------|----------------------------------------|
| $K_T$       | Fator de transmissividade do vidro     |
| $k_t$       | Índice de transmitância horária        |
| lm          | Lúmens                                 |
| m           | Massa de ar óptica                     |
| PAR         | Radiação fotossinteticamente ativa     |
| Q           | Irradiação PAR horária                 |
| RH          | Umidade relativa do ar (%)             |
| T           | Temperatura ambiente                   |
| $T_d$       | Temperatura de orvalho (°C)            |
| $V_\lambda$ | Sensibilidade espectral do olho humano |
| W           | Quantidade de água precipitável (cm)   |
| z           | Ângulo zenital (graus)                 |

### SÍMBOLOS GREGOS

|               |                                                          |
|---------------|----------------------------------------------------------|
| $\Delta$      | Índice de brilho ou opacidade do céu                     |
| $\alpha$      | Ângulo de elevação ou altitude solar                     |
| $\varepsilon$ | Índice de claridade de Perez ou limpidez do céu          |
| $\eta_L$      | Eficiência luminosa                                      |
| $\eta_{Lb}$   | Eficiência luminosa direta para qualquer condição de céu |
| $\eta_{Ld}$   | Eficiência luminosa difusa para qualquer condição de céu |
| $\eta_{Lg0}$  | Eficiência luminosa global para condição de céu nublado  |

$\lambda$ 

Comprimento de onda

## **MEDIDAS E MODELAGEM DA ILUMINÂNCIA PARA DIVERSAS CONDIÇÕES DE CÉU NO NORDESTE DO BRASIL**

Autor: Sérgio da Silva Leal

Orientador: Prof. Dr. Chigueru Tiba

### **RESUMO**

No Brasil, particularmente em sua região Nordeste, as medidas de iluminância não fazem parte da rotina de medidas nas estações meteorológicas, portanto, a disponibilidade de informações sobre a iluminância são mais raras do que as medidas efetuadas sobre irradiação solar. Neste contexto, duas estações de medição de iluminância e irradiação solar foram instaladas em Pernambuco: uma em Recife (clima tropical marítimo), em abril de 2003, e outra em Pesqueira (semi-árido), em setembro de 2004 com objetivo de realizar medidas simultâneas da irradiação solar diária e iluminância, de tal forma a permitir a modelagem e a validação estatística da relação entre estes dois parâmetros e, com isto, possibilitar a estimativa da iluminância onde existam somente informações sobre irradiação solar.

A avaliação dos registros das medidas de iluminância e irradiação solar confirmou o ótimo potencial da utilização da iluminação natural em Pernambuco. Os valores de iluminância são suficientemente altos, de maneira que poderiam suprir sozinhos a necessidade de iluminação diurna de um escritório comercial durante 80% das horas anuais de seu funcionamento (8 – 17 horas).

A comparação entre os modelos de eficiência luminosa mostraram que os modelos de Perez local e de Alados são os melhores para as localidades de Recife e Pesqueira, produzindo respectivamente, desvios médios quadráticos de 10% e 3% e

com viés da ordem de 3% e 1%. Adicionalmente, cabe considerar que as estimativas estão dentro dos erros experimentais, desde que os sensores de iluminância e de irradiação solar que foram utilizados possuem um erro de calibração máximo de 5% e uma deriva anual máxima de 2% e que, portanto, as medidas experimentais das eficiências luminosas estariam com um erro associado da ordem de 10 a 12%, após um ano de medidas.

Palavras chaves: Iluminância, eficiência luminosa, modelagem e medidas

## **MODELLING AND MEASUREMENTS OF ILLUMINANCE FOR DIVERSE ATMOSPHERIC CONDITIONS IN THE NORTHEAST OF BRAZIL**

### **ABSTRACT**

In Brazil, and particularly in the Northeast region, illuminance measurements are not a part of the routine measurements in meteorological stations. Therefore, the availability of information on illuminance is rarer than the measurements carried out on solar irradiation. In this context, two stations for measuring illuminance and solar irradiation were installed in Pernambuco: one in Recife (tropical maritime climate), in April, 2003, and the other in Pesqueira (semi-arid), in September, 2004, with the aim of carrying out simultaneous measurements of daily solar irradiation and illuminance, in such a way as to permit the modeling and statistic validation of the relationship between these two parameters and to make possible the estimation of the illuminance where up to now there only exist information on solar irradiation.

An evaluation of the solar irradiation registry and illuminance measurements confirmed the large potential of the utilization of natural illuminance in Pernambuco. The illuminance values are high enough to supply, on their own, the daily illumination necessity of a commercial office during 80% of the annual working hours (8 a.m. to 5 p.m. o'clock).

A comparison between the luminous efficiency models shows that the Perez local and Alados models are the best for localities in Recife and Pesqueira, which produce, respectively, mean quadratic deviations of 10% and 3% and a bias in the order of the 3% and 1%. Additionally, it must be considered that these estimations are inside experimental error since the illuminance and solar irradiation sensors that were used have a maximum calibration error of 5% and maximum annual drift of 2% and, therefore, the experimental measurements of luminous

efficiency would have an associated error in the order of 10% to 12%, after a year of measuring.

Palavras chaves: illuminance, luminous efficiency, modelling and measurements

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Justificativas

O rápido crescimento econômico e o aumento da população mundial exigem, cada vez mais, um maior consumo de energia elétrica. Uma parte importante do fornecimento desta energia, principalmente em grandes centros urbanos, é demandada pelo setor comercial e, particularmente, pelos escritórios empresariais, que são normalmente dotados de sistemas de refrigeração central e de muitos pontos de iluminação. Dados recentes mostram que 20 a 30% do consumo de energia elétrica nestes prédios são decorrentes da iluminação, enquanto 40 a 60% provêm do sistema de ar condicionado (LAM e LI.,1999).

O consumo elétrico dos sistemas de ar condicionado está relacionado principalmente a dois fatores: o primeiro refere-se à intensidade da radiação solar luminosa que penetra no prédio através das janelas e que, por sua vez, contribui para elevação da temperatura ambiente, enquanto o segundo corresponde à dissipação térmica de lâmpadas, de equipamentos utilizados em escritórios, tais como computador e fax, além do calor humano proveniente dos ocupantes.

Existem estudos que mostram que é possível se obter uma significativa redução no consumo de energia elétrica, através de projetos arquitetônicos que maximizam o uso da iluminação natural, otimizando assim, o sistema de iluminação artificial e, paralelamente, o sistema de refrigeração (NE'EMAN,1998; LAM e LI.,1999; CHIRARATTANANON, 2001).

Para se atingir este objetivo, porém, faz-se necessário o conhecimento da iluminância local e, com base nestes dados, procurar otimizar o sistema de iluminação

predial, através do posicionamento e dimensionamento correto das janelas, de modo a atingir um ponto ótimo entre o sistema de refrigeração e iluminação artificial.

A Figura 1.1 mostra o comportamento da demanda elétrica em relação à variação da dimensão da janela para uma determinada iluminância. Observa-se, então, um valor mínimo do mesmo quando a relação entre a área da janela e a área da parede atinge um valor aproximado de 0,13, ou seja, como a iluminação natural é considerada uma iluminação eficiente, o seu uso implica em uma menor dissipação de calor em relação a iluminação artificial, otimizando desta forma o sistema de refrigeração.

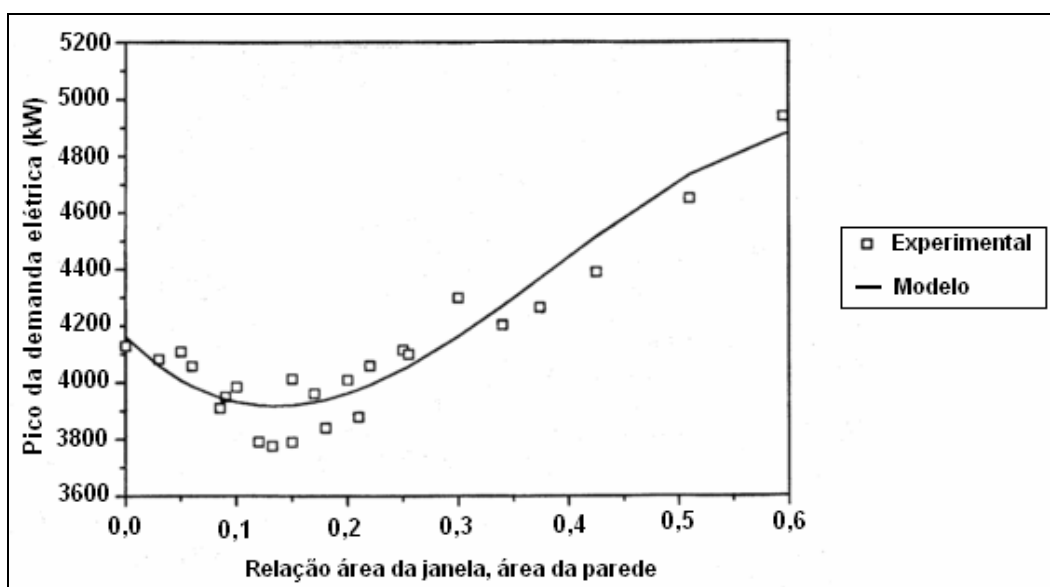


Figura 1.1 - Correlação entre o pico da demanda elétrica e a relação área da janela e área da parede.

Pesquisas recentes mostram, porém, que as informações referentes à radiação solar no Brasil (espectro total) são escassas e com baixa cobertura espacial e temporal, e que as informações sobre a iluminância são ainda mais raras, com o agravante desta última não fazer parte da rotina observacional das estações meteorológicas (TIBA, et al., 2004).

Pelo que antecede, o presente trabalho propõe a medição e modelagem da iluminância em regiões de Pernambuco com características climáticas diferenciadas, tais como, agreste (tropical equatorial semi-árido) e litoral-continental (tropical equatorial úmido) e, com isto, disponibilizar uma base de dados para um estudo mais aprofundado e preciso sobre o aproveitamento da iluminação natural em edificações comerciais e residenciais.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

Estudar o comportamento temporal e espacial da iluminância em Recife e Pesqueira.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Medir a iluminância em Recife e Pesqueira;
- Analisar o comportamento estatístico da iluminância em Recife e Pesqueira;
- Modelar o fator de eficiência luminosa para Recife e Pesqueira.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Iluminância

A luz pode ser definida como a radiação eletromagnética capaz de produzir uma sensação visual ao olho humano. A faixa de radiações das ondas eletromagnéticas detectadas pelo olho humano se situa entre 380 e 780 nanômetros, correspondendo o menor valor ao limite superior da radiação ultravioleta e o maior ao limite inferior do espectro infravermelho, como pode ser visto na Figura 2.1.

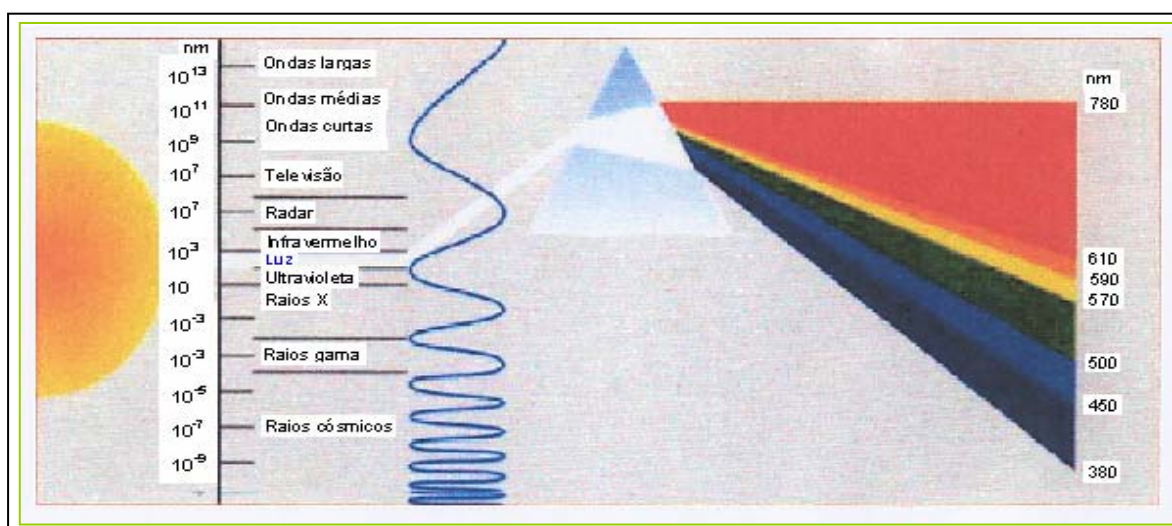


Figura 2.1 - Espectro eletromagnético solar.

Como o olho humano é apenas capaz de perceber o espectro eletromagnético em um intervalo de comprimento de onda entre 380 e 780 nanômetros, considera-se então, este intervalo, como a região do espectro visível ao olho humano. A sensibilidade espectral do olho humano ( $V_\lambda$ ) varia em função dos comprimentos de onda, atingindo um valor máximo para comprimentos em torno de 555nm. Na Figura 2.2 pode ser vista a sensibilidade média do olho humano aos diversos comprimentos de onda, tanto para altos níveis de iluminância

(visão fotópica), representada pela curva cheia, quanto para baixos níveis de iluminância (visão escotópica), indicada pela curva pontilhada.

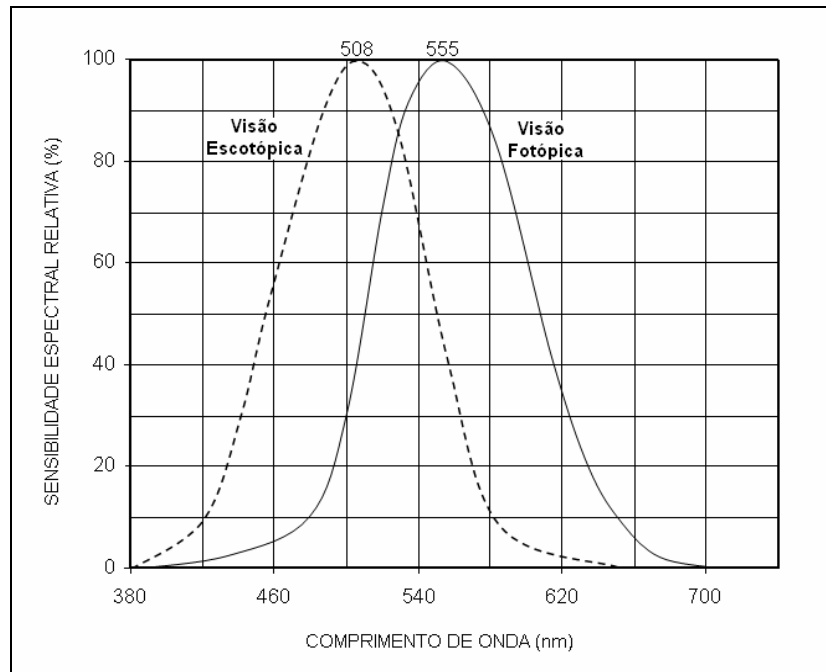


Figura 2.2 - Sensibilidade média do olho humano para diferentes comprimentos de onda.

A relação entre o fluxo luminoso, que é a potência luminosa total irradiada por uma fonte de luz, e a superfície sobre a qual este fluxo incide denomina-se de iluminância ou iluminamento e pode ser expressa pela equação:

$$E = 683 \int_{380}^{780} V_{\lambda} \cdot I_{\lambda} \cdot d\lambda, \quad (1)$$

onde  $V_{\lambda}$  é a sensibilidade espectral do olho humano e  $I_{\lambda}$  corresponde à irradiação para um intervalo de comprimento de onda compreendido entre 380 e 780 nanômetros.  $I_{\lambda}$  representa a taxa de energia incidente sobre uma determinada área, podendo ser expressa

em  $\text{J/m}^2\text{s}$  ou simplesmente  $\text{W/m}^2$ . O valor 683 é um fator de normalização e é resultante de um fluxo radiante de  $1\text{W}$  para o comprimento de onda  $555\text{nm}$ .

A unidade da iluminância é o lux ( $\text{lx}$ ), definido como a relação de um fluxo luminoso de  $1\text{lm}$ , gerado por uma fonte puntiforme, incidindo em uma superfície de  $1\text{m}^2$  na direção normal. Por consequência, a unidade da iluminância pode ser também expressa em lúmens por metro quadrado ( $\text{lm/m}^2$ ). O lúmen é o fluxo luminoso emitido, segundo um ângulo sólido de um esterradiano, por uma fonte puntiforme de intensidade luminosa igual a  $1\text{cd}$ , que equivale a  $1/683\text{W}$  por esterradiano. O esterradiano é o ângulo sólido que, tendo seu vértice no centro da esfera, intercepta sobre a superfície desta esfera uma área igual à de um quadrado que tem por lado o raio da esfera. Então, considerando uma esfera de raio unitário, apresentando, em sua superfície, uma área unitária e contendo, no seu centro, uma fonte que irradie a intensidade luminosa de  $1\text{cd}$ , cada metro quadrado da esfera receberá um fluxo luminoso de  $1\text{lm}$ , conforme Figura 2.3.

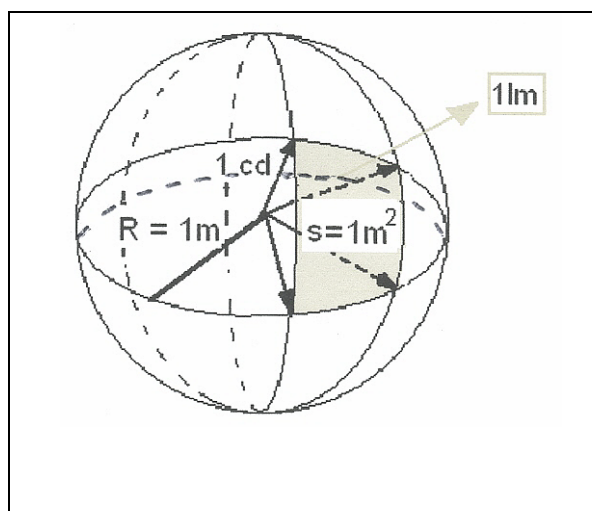


Figura 2.3 - Representação gráfica do lúmen.

## 2.2 Consumo de energia elétrica em edificações comerciais

Da energia solar que chega à superfície terrestre, cerca de 47% corresponde ao espectro visível ao olho humano, o que torna possível o seu uso como uma fonte de luz para iluminação interna de edificações comerciais e residenciais. Com aproveitamento da iluminação natural é possível otimizar o sistema de iluminação artificial e refrigeração, e assim, obter uma significativa economia de energia elétrica, uma vez que estes dois itens respondem pela maior parte da demanda de consumo em prédios comerciais. A Figura 2.4 mostra o consumo médio anual de eletricidade em relação aos principais usos finais da eletricidade em um prédio comercial em Hong Kong (LAM e LI.,1999).

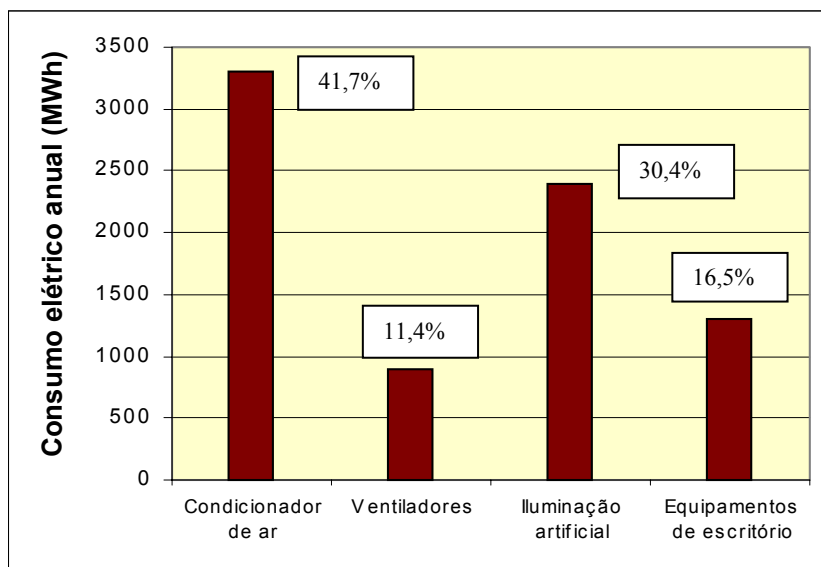


Figura 2.4 - Consumo médio anual de eletricidade em edifícios comerciais em Hong Kong: principais usos finais.

Percebe-se facilmente que a iluminação artificial e o sistema de refrigeração são os maiores responsáveis pelo consumo de energia elétrica, sendo o responsável por cerca de 72% do consumo total de eletricidade.

No Brasil, o setor comercial e público é responsável por 14,4% do consumo da matriz energética brasileira. Isto corresponde ao consumo de 22,3% do consumo final de eletricidade no ano de 2004 (BEN, 2005). Devido à inexistência de informações sobre o consumo médio anual de energia elétrica em edifícios comerciais em relação aos principais usos finais para o Brasil, supõe-se neste trabalho que este consumo tenha um comportamento semelhante ao de Hong Kong, ou seja, o sistema de refrigeração e iluminação artificial respondem por sua maior parcela. Hong Kong possui um clima subtropical, onde o verão é longo quente e úmido sendo desta forma, semelhante ao clima dos grandes centros comerciais do Brasil. Cabe mais uma vez ressaltar o potencial do uso da iluminação natural como um agente mitigador do consumo elétrico no Brasil, uma vez que o uso adequado da iluminação natural proporcionará uma redução do consumo elétrico da iluminação artificial, redução no aquecimento interno devido a energia térmica dissipada pelas lâmpadas e seus acessórios e por consequência, redução da carga térmica sobre o sistema de refrigeração.

## 2.3 Cálculo da contribuição da iluminação natural

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT-1990) disponibiliza tabelas e procedimentos de cálculos através da NBR.5413, para garantir níveis de iluminância adequados para os mais diversos ambientes. Na prática observa-se, porém, que a maioria

dos projetistas e arquitetos obtêm os níveis de iluminância propostos pela ABNT através da iluminação artificial, não levando em consideração a contribuição da iluminação natural.

Em 1999 o Comitê Brasileiro de Construção Civil (ABNT-CB02, 1999) disponibilizou um procedimento de cálculo para o aproveitamento da iluminação natural. Normalmente o projeto de iluminação natural inicia-se com uma estimativa da iluminação interna natural. Considera-se, então, basicamente três contribuições através das quais a luz natural pode alcançar um ponto no interior de uma edificação, como mostra a Figura 2.6:

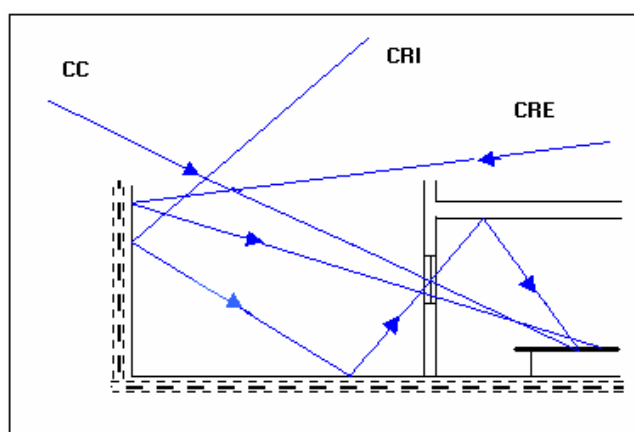


Figura 2.5 - Componentes da iluminação natural:  
CC – Componente do céu, CRE – Componente refletida externa e CRI – Componente refletida interna.

CC – Componente do Céu: Luz que alcança um ponto do ambiente interno proveniente diretamente do céu;

CRE – Componente Refletida Externa: Luz que alcança um ponto do ambiente interno após ter refletido em uma superfície externa;

CRI – Componente Refletida Interna: Luz que alcança um ponto do ambiente interno somente após ter sofrido uma ou mais reflexões nas superfícies internas.

A determinação destas três componentes é feita através de uma carta de trajetórias solares aparentes, diagrama de obstrução e as tabelas de distribuição de iluminâncias. A soma destas três componentes, corrigidas por fatores relativos aos efeitos redutores, tais como, transmissividade do vidro da janela ( $K_T$ ), fator de manutenção ( $K_M$ ), que está relacionado com a poeira depositada sobre a superfície do vidro, e fator de caixilho ( $K_C$ ), que é a relação entre a área envidraçada de uma janela pela área total da mesma, permite calcular a contribuição de iluminação natural (CIN) em um ponto localizado em um plano horizontal no ambiente interno, conforme expressão (2).

$$CIN = (CC + CRE + CRI) \cdot K_T \cdot K_M \cdot K_C \quad (2)$$

A iluminância natural interna será então calculada em função da iluminância externa, conforme expressão (3):

$$E_p = CIN \cdot E_{Hext}, \quad (3)$$

onde:

$E_p$  é a iluminância natural num plano horizontal, no ponto P do ambiente interno, em lux;

$E_{Hext}$  é a iluminância produzida por toda a abóbada celeste num plano horizontal externo livre de obstruções, excluída a iluminação direta do sol, em lux.

Combinando as equações (2) e (3), a iluminância em um ambiente interno, devido à iluminação, pode ser representada como:

$$E_p = (CC + CRE + CRI) \cdot K_T \cdot K_M \cdot K_C \cdot E_{Hext} \quad (4)$$

Assim, fica explícita pela equação (4) a necessidade da medição da iluminância externa no plano horizontal ou, quando não ela não existir, a necessidade da sua modelagem.

É válido salientar novamente que os institutos meteorológicos instalados no Brasil e no mundo não são dotados de instrumentos capazes de medir a iluminância na superfície terrestre e, assim, as observações sobre iluminância são ainda mais escassas do que as informações sobre irradiação solar no espectro total.

## 2.4 Modelagem da iluminância

Informações sobre irradiação solar podem ser utilizadas para estimativas da iluminância desde que sejam conhecidos os fatores definidos como eficácia luminosa ou eficiência luminosa.

A eficiência luminosa da radiação solar é definida como a relação entre a iluminância solar ( $\text{lm/m}^2$ ) e a irradiação solar ( $\text{W/m}^2$ ) e é expressa pela seguinte equação (CHANDRA, 1996):

$$\eta_L = \frac{683 \int_{380}^{780} V_\lambda \cdot I_\lambda \cdot d\lambda}{\int_0^\infty I_\lambda \cdot d\lambda} = \frac{E}{I}, \quad (5)$$

onde  $\eta_L$  é a eficiência luminosa,  $I_\lambda$  é a irradiação solar espectral e  $V_\lambda$  é a sensibilidade espectral do olho humano, como foi definido anteriormente.

O conhecimento da eficiência luminosa da radiação solar, definida pela equação (5), é importante para estimar a iluminância em lugares onde não existam dados sobre a mesma, embora existam dados sobre irradiação solar. Nestes casos, a iluminância poderá ser facilmente calculada através da seguinte expressão:

$$E = \eta_L \cdot I, \quad (6)$$

onde  $\eta_L$  é a eficiência luminosa e E e I são, respectivamente, a iluminância e a irradiação solar horária global.

Existem numerosos trabalhos em nível internacional com modelos empíricos sobre a eficiência luminosa (PEREZ et al, 1990; LAM, 1995; CHANDRA, 1996; ROBLEDO e SOLER, 2000) e, mais recentemente, em Florianópolis, Brasil (SOUZA e ROBLEDO, 2004).

Perez et al (1990) desenvolveram um modelo para a determinação da eficiência luminosa horária a partir do ângulo zenital, precipitação da água e opacidade do céu ou espessura das nuvens. Os dados experimentais foram obtidos a partir de treze localidades diferentes pertencentes aos Estados Unidos, França e Suíça.

Lam (1995) realizou uma pesquisa experimental sobre a eficiência luminosa para diferentes condições de céu para a cidade de Hong Kong. Utilizando as medidas da irradiação global horária e sua relação com a irradiação solar no topo da atmosfera terrestre, foram calculados os índices de transmitância horária,  $k_t$ .

$$k_t = \frac{I}{I_o} \quad (7)$$

onde,

$I$  é a irradiação horária global sobre a superfície terrestre;

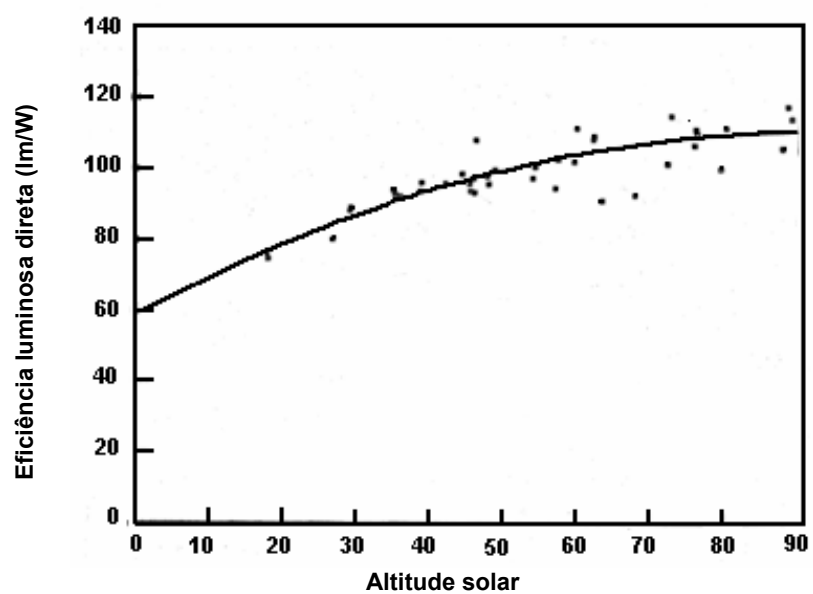
$I_0$  é a irradiação extraterrestre horária.

Os índices de  $k_t$  foram agrupados e categorizados como:

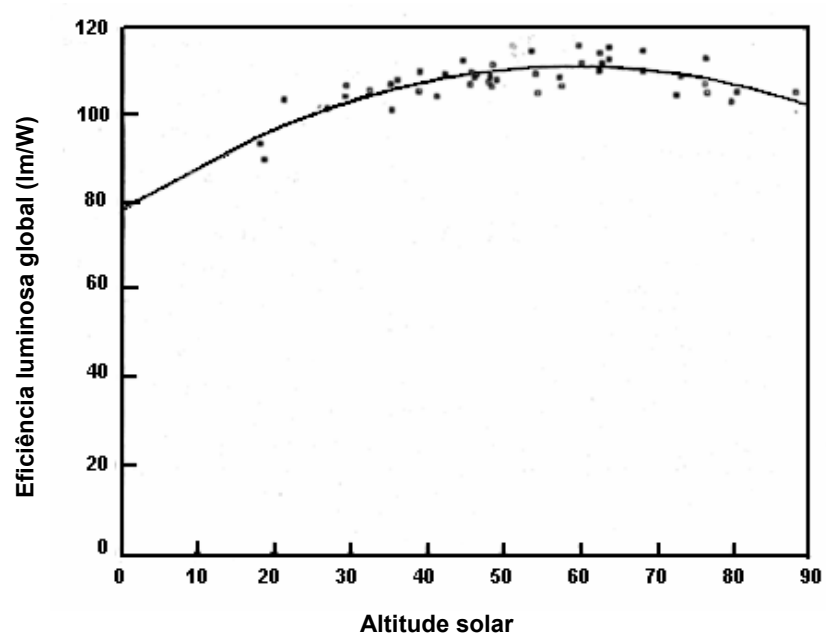
- a) Céu claro,  $k_t > 0,65$ ;
- b) Céu parcialmente nublado,  $0,3 < k_t \leq 0,65$ ;
- c) Céu nublado,  $0 < k_t \leq 0,30$ .

A partir destes parâmetros, tornou-se possível detalhar a eficiência luminosa classificando-a respectivamente, como a eficiência luminosa direta, difusa e global para condição de céu claro, ou seja, para uma irradiação global  $k_t > 0,65$ . Similarmente, se tem para céu nublado e para um céu parcialmente nublado a eficiência luminosa difusa e global.

Todas as medições referentes à eficiência luminosa foram realizadas em função do ângulo de elevação, que é definido pelo raio do Sol e o plano horizontal. Os modelos propostos por Lam resultaram em expressões polinomiais do ângulo de elevação solar para a eficiência luminosa global e direta, conforme pode ser visto na Figura 2.7.



(a)



(b)

Figura 2.6 - Eficiência global e direta para a cidade de Hong Kong.

Chandra (1996) determinou experimentalmente a eficiência luminosa direta ( $\eta_{Lb}$ ) e a difusa ( $\eta_{Ld}$ ), utilizando-se das seguintes equações:

$$\eta_{Lb} = \frac{E_b}{I_b} \quad (8)$$

$$\eta_{Ld} = \frac{E_d}{I_d} \quad (9)$$

$I_b$  e  $E_b$  são, respectivamente, a irradiação direta solar e a iluminância, enquanto  $E_d$  e  $I_d$  correspondem à irradiação solar difusa e a iluminância sobre um plano horizontal. As medições foram obtidas a partir de sensores instalados no Laboratório Central de Física no Instituto de Pesquisa Roorkee, Índia. No caso da irradiação solar difusa e iluminância, utilizou-se um disco circular escuro com diâmetro apropriado para o sombreamento dos sensores.

Robledo e Soler (2000) desenvolveram um modelo não polinomial com medidas feitas para Madri. A expressão geral deste modelo para o fator de eficiência luminosa direta ( $\eta_{Lb}$ ) para todas as condições de céu é dado por:

$$\eta_{Lb} = A \cdot (\sin \alpha)^B \cdot e^{-C \cdot \alpha} \cdot \Delta^D \quad (10)$$

onde,

A, B, C e D são coeficientes locais;

$\alpha$  é a altitude solar;

$\Delta$  é o índice de brilho solar ( $\Delta = m \cdot I_d / I_0$ );

m é a massa de ar ótica;

$I_d$  é a irradiação difusa;

$I_0$  é a irradiação solar extraterrestre.

O modelo desenvolvido por Robledo e Soler tem um desempenho estatístico semelhante aos modelos citados anteriormente.

Souza e Robledo (2004) e Souza et al. (2004) estudaram os diversos modelos desenvolvidos aplicando-os ao caso de Florianópolis, Brasil. Tratou-se basicamente da determinação de coeficientes locais para o modelo anteriormente desenvolvido por Robledo e Soler. O modelo com melhor ajuste para a eficiência luminosa direta ( $\eta_{Lb}$ ) para todas as condições de céu para Florianópolis foi:

$$\eta_{Lb} = 143,14 \cdot (\sin \alpha)^{0,241} \cdot e^{-0,0031 \cdot \alpha} \cdot \Delta^{0,023} \quad (11)$$

Finalmente, Alados et al. (1995) desenvolveram, para cidade de Almeria na Espanha, um modelo empírico da eficiência luminosa para o espectro PAR, considerando uma regressão múltipla da temperatura de orvalho, da opacidade do céu, do índice de brilho do céu e do ângulo de elevação. A menção do referido trabalho deve-se ao fato de que tanto a radiação solar PAR como a iluminância descrevem o mesmo espectro parcial e são influenciadas pelos mesmos parâmetros físicos.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Sistema de medição e coleta de dados

Com o objetivo de se obter informações sobre o comportamento da iluminância e da radiação solar na região Nordeste, sensores de irradiação solar e de iluminância acoplados a um sistema de aquisição de dados foram instalados em Recife e em Pesqueira, que são duas regiões de características climáticas distintas no Nordeste do Brasil, cujas localizações estão indicadas na Figura 3.1.



Figura 3.1 - Mapa de Pernambuco e as respectivas estações de medição

A cidade de Recife, capital do estado de Pernambuco, possui um clima tropical úmido, com temperatura média anual de 25,5 °C, umidade relativa do ar de 79,8%, precipitação pluviométrica anual média de 2458 mm/ano e evaporação total 1390mm/ano (INMET, 1961 – 1990).

A cidade de Pesqueira fica a 214km de Recife, possui um clima tropical semi-árido, pertencendo, assim, à zona do Agreste. A temperatura média anual é de 22,9 °C, umidade

relativa de 69,6%, precipitação pluviométrica anual de 694mm/ano e evaporação total de 1828mm/ano. As coordenadas geográficas das estações instaladas podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 - Coordenadas geográficas das estações de medidas da iluminância e da irradiação solar

| Estação       | Coordenadas geográficas |           |              | Precipitação pluviométrica anual (mm) |
|---------------|-------------------------|-----------|--------------|---------------------------------------|
|               | Latitude                | Longitude | Altitude (m) |                                       |
| Recife-PE     | 8°30'                   | 34°55'    | 7            | 2458                                  |
| Pesqueira -PE | 8°24'                   | 36°46'    | 639          | 694                                   |

Para se obter os dados de iluminância e irradiação global em cada estação, foram utilizados, respectivamente, sensores fotométricos do tipo LI-210SA e piranômetros fotovoltaicos do tipo LI-200SA, com exceção da estação Recife, que utilizou, para medições da irradiação global e difusa, piranômetros Eppley (piranômetro espectral de precisão), conforme indica a Figura 3.2.

A Figura 3.3 mostra o aspecto físico de um piranômetro do tipo LI-200SA, que foi instalado no telhado de um dos blocos do CEFET unidade Pesqueira, e que se assemelha ao sensor fotométrico LI-210SA. Este piranômetro do tipo fotovoltaico ou termoeletrico possui, como parte sensitiva, uma célula fotovoltaica cujos terminais são conectados a um Shunt. Todo este conjunto está encapsulado em um invólucro plástico resistente a intempéries. Neste tipo de sensor, o erro de calibração do instrumento assume valores típicos da ordem de  $\pm 3\%$ , quando comparado a um instrumento padrão do tipo PSP. Os sensores da LICOR sofrem uma deriva com tempo estimado em no máximo 2% ao ano.



Figura 3.2 - Piranômetro espectral de precisão Eppley (PSP)



Figura 3.3 - Visão detalhada do piranômetro modelo LI-200SA para medição da irradiação solar, instalado no telhado do CEFET-Pesqueira

Para leitura e coleta dos dados medidos pelos sensores, foi escolhido o equipamento datalogger modelo CR10X, da Campbell Scientific, Figura 3.4, que disponibiliza um total de seis canais para leituras analógicas de sinais de tensão limitados a valores de  $\pm 2,5$  volts por canal. Este instrumento foi programado para realizar leituras instantâneas a cada segundo totalizando 60 leituras por minuto. Posteriormente, calcula-se a média aritmética de cada conjunto composto de 60 leituras e os respectivos valores médios são armazenados em seu sistema de memória.

Desta forma, para cada dia de medição, tem-se um total de 1440 valores armazenados em tempo real, correspondentes às médias aritméticas de cada uma das variáveis, no intervalo de 1 minuto. Toda a monitoração é feita pelo computador através do software que acompanha o datalogger, com interface gráfica própria, padrão Windows, com até 222 instruções, destinadas à configuração de sensores, controle de processos, processamento das medidas e outros. Este instrumento possui um sistema de memória capaz de armazenar 1.000.000 de registros, além de baterias recarregáveis de tensão 12 volts, para o caso de falta temporária no fornecimento de energia elétrica.



Figura 3.4 - Datalogger modelo CR10X

### 3.2 Influência da água precipitável contida na atmosfera sobre a irradiação solar

Estudos mostram que uma parte importante da radiação infravermelha do espectro solar que chega à superfície terrestre é absorvida pelos vapores de água existentes na atmosfera. A Figura 3.5 mostra os principais elementos na atmosfera responsáveis pela atenuação da radiação solar que chega à superfície terrestre.

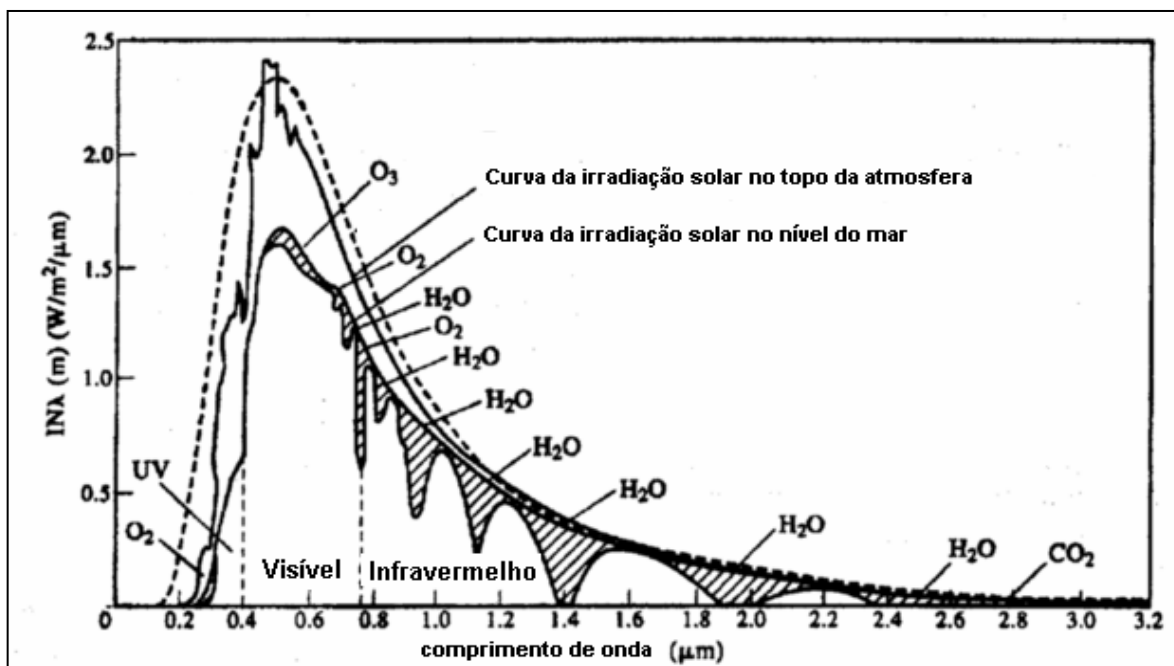


Figura 3.5 - Absorção da irradiação solar na atmosfera

Observa-se, então, que a maior parte da absorção da irradiação solar para o espectro infravermelho é devido à presença de vapor na atmosfera. Diante deste fato, muitos modelos utilizados para o estudo da iluminância levam em consideração a água precipitável existente na atmosfera, a qual pode ser calculada a partir da temperatura de orvalho, que é a temperatura que um volume de ar deve atingir para tornar-se saturado a uma mesma pressão, ou seja, a temperatura de condensação. A quantidade de água precipitável pode ser estimada conforme ParoScientific (2004) mediante a expressão:

$$W = \exp[0,07T_d - 0,075] \quad (12)$$

onde,

$W$  = Quantidade de água precipitável (cm);

$T_d$  = Temperatura de orvalho ( $^{\circ}\text{C}$ ).

A temperatura de orvalho por sua vez, pode ser calculada segundo ParoScientific (2004), através da expressão:

$$T_d = \frac{b \cdot \beta(T, RH)}{a - \beta(T, RH)} \quad (13)$$

$$\beta(T, RH) = \frac{a \cdot T}{(b + T)} + \ln(RH)$$

onde,

$$a = 17,27;$$

$$b = 237,7;$$

RH = Umidade relativa do ar;

T = Temperatura ambiente.

A umidade relativa e a temperatura ambiente são parâmetros facilmente obtidos e normalmente medidos em estações meteorológicas.

### 3.3 Modelos aplicados na modelagem da eficiência luminosa

#### 3.3.1 Modelo de Robledo

Robledo e Soler (2000) desenvolveram um modelo simplificado de eficiência luminosa para todas as condições de céu (claro, parcialmente nublado e nublado). A modelagem tanto para a iluminância como para a irradiação é expressa por:

$$E = A_1 \cdot (\text{sen}\alpha)^{B1} \quad (14)$$

$$I = A_2 \cdot (\text{sen}\alpha)^{B2} \quad (15)$$

onde E e I são, respectivamente, a iluminância e a irradiação horária,  $\alpha$  é o ângulo de elevação e  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$  e  $B_2$  são constantes empíricas.

Para se obter as constantes empíricas da iluminância e da irradiação, ambas as equações foram linearizadas. A eficiência luminosa foi então obtida como:

$$\eta_L = \frac{A_1}{A_2} \cdot (\sin \alpha)^{B_1 - B_2} \quad (16)$$

### 3.3.2 Modelo de Perez

O modelo de Perez é expresso por uma equação do tipo:

$$\frac{E}{I} = a + b \cdot W + c \cdot \cos(z) + d \cdot \ln(\Delta) \quad (17)$$

onde,

$\frac{E}{I}$  é a eficiência luminosa;

W é a água precipitável;

z é o ângulo zenital ( $90^\circ$  – ângulo de elevação);

$\Delta$  é a opacidade do céu ou índice de brilho;

a, b, c e d são coeficientes resultantes de uma regressão múltipla com base no índice de claridade ou limpidez do céu.

Este modelo leva em consideração o conteúdo de água precipitável na atmosfera devido à sua influência na atenuação da irradiação solar no espectro infravermelho. Para se calcular os valores horários da precipitação da água, foram utilizados dados experimentais

da temperatura e umidade relativa da região em foco, os quais foram aplicados nas expressões da temperatura de orvalho e precipitação da água na atmosfera, citados anteriormente.

A modelagem proposta por Perez et al (1990) consiste em oito equações parametrizadas de acordo com o índice de claridade de Perez ou limpidez do céu ( $\varepsilon$ ), definida como:

$$\varepsilon = \frac{\frac{(I_d + I_{eb})}{I_d} + K \cdot z^3}{(1 + K \cdot z^3)} \quad (18)$$

onde,

$I_d$  é a irradiação solar horária difusa;

$I_{eb}$  é a irradiação solar horária direta normal;

$z$  é o ângulo zenital ( $90^\circ$ –ângulo de elevação);

$K$  é uma constante igual a 1,041.

A irradiação solar direta normal pode ser facilmente calculada a partir da irradiação solar horária, da irradiação horária difusa e do ângulo de elevação.

$$I_{eb} = \frac{I - I_d}{\text{sen}\alpha} \quad (19)$$

onde,

$\alpha$  é o ângulo de elevação;

$I$  é a irradiação solar global horária.

A opacidade do céu,  $\Delta$ , está relacionada com as características das nuvens e pode ser calculada levando-se em consideração a massa de ar, a irradiação solar difusa horária e a irradiação solar direta normal extraterrestre horária.

$$\Delta = \frac{I_d \cdot m}{I_o} \quad (20)$$

onde,

$m$  é a massa de ar relativa ( $m = 1/\sin\alpha$ );

$I_o$  é a irradiação solar extraterrestre horária.

A equação (17) foi parametrizada para oito valores do índice de claridade  $\varepsilon$ , resultando em oito equações para o cálculo da eficiência luminosa, vistas na Tabela 2.

Tabela 2 - Modelagem do fator eficiência luminosa

| $\varepsilon$ | Eficiência luminosa                                                                 |
|---------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 1             | $\frac{E}{I} = 96,63 - 0,47 \cdot W + 11,5 \cdot \cos(z) - 9,16 \cdot \ln(\Delta)$  |
| 2             | $\frac{E}{I} = 107,54 + 0,79 \cdot W + 1,79 \cdot \cos(z) - 1,19 \cdot \ln(\Delta)$ |
| 3             | $\frac{E}{I} = 98,73 + 0,70 \cdot W + 4,40 \cdot \cos(z) - 6,95 \cdot \ln(\Delta)$  |
| 4             | $\frac{E}{I} = 92,72 + 0,56 \cdot W + 8,36 \cdot \cos(z) - 8,31 \cdot \ln(\Delta)$  |
| 5             | $\frac{E}{I} = 86,73 + 0,98 \cdot W + 7,10 \cdot \cos(z) - 10,94 \cdot \ln(\Delta)$ |
| 6             | $\frac{E}{I} = 88,34 + 1,39 \cdot W + 6,06 \cdot \cos(z) - 7,60 \cdot \ln(\Delta)$  |
| 7             | $\frac{E}{I} = 78,63 + 1,47 \cdot W + 4,93 \cdot \cos(z) - 11,37 \cdot \ln(\Delta)$ |
| 8             | $\frac{E}{I} = 99,65 + 1,86 \cdot W - 4,46 \cdot \cos(z) - 3,15 \cdot \ln(\Delta)$  |

Este modelo construído e testado com valores de locais dos Estados Unidos foi aplicado para as cidades de Recife e Pesqueira. Para Recife, foram utilizados os dados experimentais horários da irradiação solar global, da irradiação solar difusa e da iluminância global, os quais foram todos corrigidos para hora solar e utilizados para determinar os índices de opacidade do céu e de claridade.

A água precipitável foi calculada a partir de dados de temperatura ambiente e umidade relativa local, conforme a metodologia descrita no item 3.2. Normalmente, as estações meteorológicas disponibilizam estes dados em intervalos de três horas, necessitando assim que os mesmos sofressem interpolações para a obtenção dos valores horários. A interpolação foi feita pelo método de spline cúbico (CurveExpert Version 1.38).

Para a cidade de Pesqueira, foram coletados dados experimentais locais horários da irradiação solar e da iluminância global. Para se obter os valores horários da irradiação solar difusa, foi necessário o uso da correlação de Erbs (ERBS et al., 1982), que relaciona a irradiação solar difusa e a global conforme as expressões:

$$\frac{I_d}{I} = 1,0 - 0,09 \cdot k \quad \text{para } k \leq 0,22 \quad (21)$$

$$\frac{I_d}{I} = 0,9511 - 0,1604 \cdot k + 4,388 \cdot k^2 - 16,638 \cdot k^3 + 12,336 \cdot k^4 \quad \text{para } 0,22 < k \leq 0,8 \quad (22)$$

$$\frac{I_d}{I} = 0,165 \quad \text{para } k > 0,8 \quad (23)$$

onde,

$k$  é a relação entre a irradiação solar horária na superfície horizontal terrestre pela irradiação extraterrestre horizontal;

$I_d$  é a irradiação solar horária difusa;

$I$  é a irradiação solar global horária.

Para o cálculo da água precipitável, foram utilizados dados experimentais da umidade relativa e da temperatura da cidade de Arcoverde (latitude  $8^{\circ}26'$ , longitude  $37^{\circ}03'$  e altitude 665m), localizada a uma distância de 45 km de Pesqueira (latitude  $8^{\circ}24'$ , longitude  $36^{\circ}46'$  e altitude 639m), uma vez que ambos os municípios situam-se na mesma micro-região e possuem climas semelhantes. O processamento de dados seguiu o mesmo procedimento de cálculo que foi adotado para a cidade de Recife.

### 3.3.3 Modelo de Alados

Alados et al. (1995) usaram um modelo empírico de eficiência luminosa para a radiação PAR (Radiação Fotossinteticamente Ativa), dependente da temperatura de orvalho, da opacidade do céu, do índice de brilho do céu e do ângulo de elevação. A expressão foi validada para Valência, Espanha, é a seguinte:

$$\frac{Q}{I} = 1,786 - 0,192 \cdot \ln(\varepsilon) - 0,202 \cdot \ln(\Delta) + 0,005 \cdot T_d + 0,032 \cdot \sin^2(\alpha) \quad (24)$$

onde,

$Q$  é a radiação PAR horária;

$I$  é a irradiação solar global horária;

$\varepsilon$  é o índice de claridade de Perez;

$\Delta$  é a opacidade do céu ou índice de brilho;

$T_d$  é a temperatura de orvalho;

$\alpha$  é o ângulo de elevação.

Embora este modelo tenha sido desenvolvido especificamente para a Espanha para a radiação PAR, o mesmo foi adaptado à modelagem da eficiência luminosa, uma vez que o intervalo do espectro eletromagnético da irradiação PAR é praticamente o mesmo da iluminância solar.

O modelo será aplicado fazendo-se uma regressão múltipla dos dados experimentais locais e calculando-se os coeficientes locais da equação geral:

$$\frac{E}{I} = A + B \cdot \ln \varepsilon + C \cdot \ln \Delta + D \cdot T_d + E \cdot \sin^2 \alpha \quad (25)$$

onde,

$\frac{E}{I}$  é a eficiência luminosa;

$\varepsilon$  é o índice de claridade de Perez;

$T_d$  é a temperatura de orvalho;

$\Delta$  é a opacidade do céu ou índice de brilho;

$\alpha$  é o ângulo de elevação solar;

A, B, C, D e E são coeficientes locais.

### 3.3.4 Avaliação dos modelos

As precisões dos modelos propostos neste trabalho foram avaliadas através de indicadores estatísticos, como o desvio médio (DM) e o desvio médio quadrático (DMQ), definidos abaixo:

$$DM = \frac{\sum (y - x)}{N} \quad (26)$$

$$DMQ = \left[ \frac{\sum (y - x)^2}{N} \right]^{1/2} \quad (27)$$

onde,

y é o valor estimado (modelado);

x é o valor medido (experimental).

## 4. RESULTADOS E COMENTÁRIOS

### 4.1 Avaliação das medidas de iluminância

A disponibilidade de dados medidos de iluminância, em conjunto com uma análise das suas principais características estatísticas, são imprescindíveis para estimular e aumentar o uso da luz natural e, assim, reduzir o consumo de eletricidade utilizada tanto para fins de iluminação artificial como também para refrigeração.

Os resultados principais das medidas realizadas dentro deste trabalho são produtos da aquisição de dados da iluminância e irradiação solar global (plano horizontal), realizados minuto a minuto, feita sistematicamente nas estações descritas na Tabela 3, durante os últimos 3 anos.

Tabela 3 - Estações onde foram feitas as medidas de iluminância e irradiação solar global, em escala de minuto, e o período de medidas.

| Estação       | Coordenadas |           |          | Período de medidas            |
|---------------|-------------|-----------|----------|-------------------------------|
|               | Lat. (S)    | Long. (O) | Alt. (m) |                               |
| Recife-PE     | 8°30'       | 34°55'    | 7        | abril 2003 / março 2005       |
| Pesqueira -PE | 8°24'       | 36°46'    | 639      | setembro 2004 / setembro 2005 |

A análise detalhada desses dados permitiu conhecer: a) as características básicas de iluminância e irradiação solar em escala horária nesses locais; b) as condições médias de iluminância em bases diárias e mensais; c) a probabilidade acumulada em bases mensais ou anuais de que um dado valor de iluminância horária seja excedido e, finalmente, d) mediante modelagem, a interferência da iluminância onde só existem dados de irradiação solar.

#### 4.1.1 Descrição das medidas de iluminância e irradiação solar luminosa

Os dados medidos em escala de minuto resultaram em um valor médio em torno de uma dada hora solar, considerando os 30 minutos anteriores e posteriores à mesma. Ao valor médio deste conjunto foi atribuída a iluminância ou irradiação solar horária correspondente à citada hora solar. As Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 mostram o comportamento da irradiação solar global horária e iluminância global horária, respectivamente para as localidades de Recife e Pesqueira.

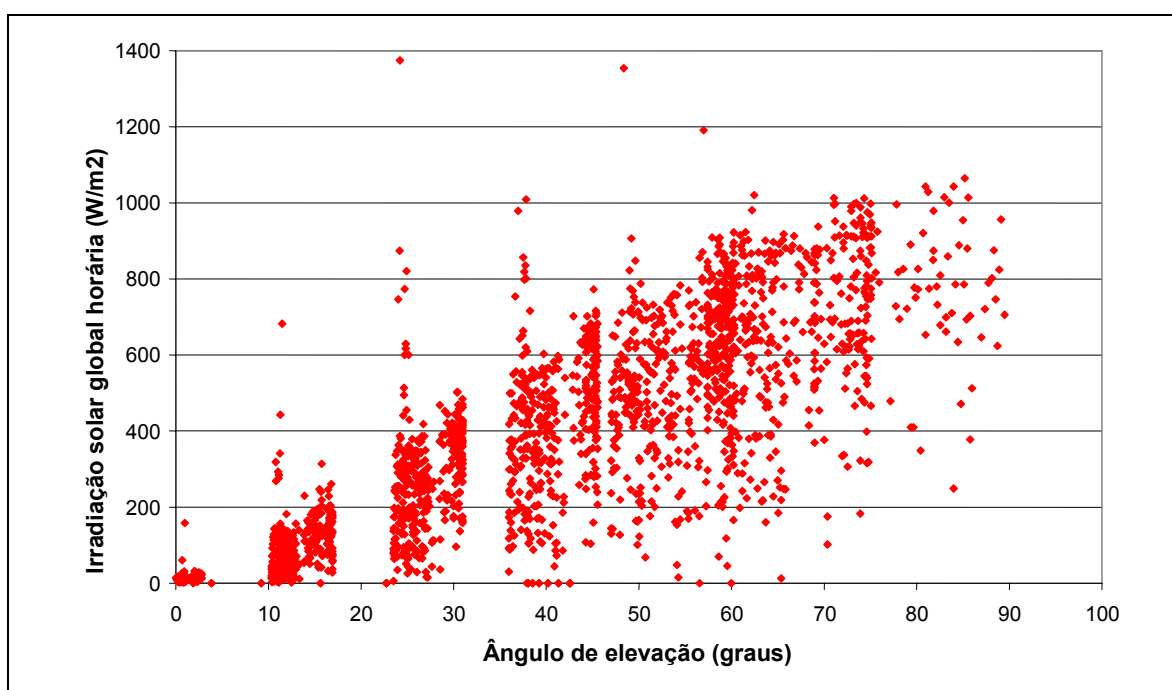


Figura 4.1 - Irradiação solar global horária em função do ângulo de elevação para Recife.

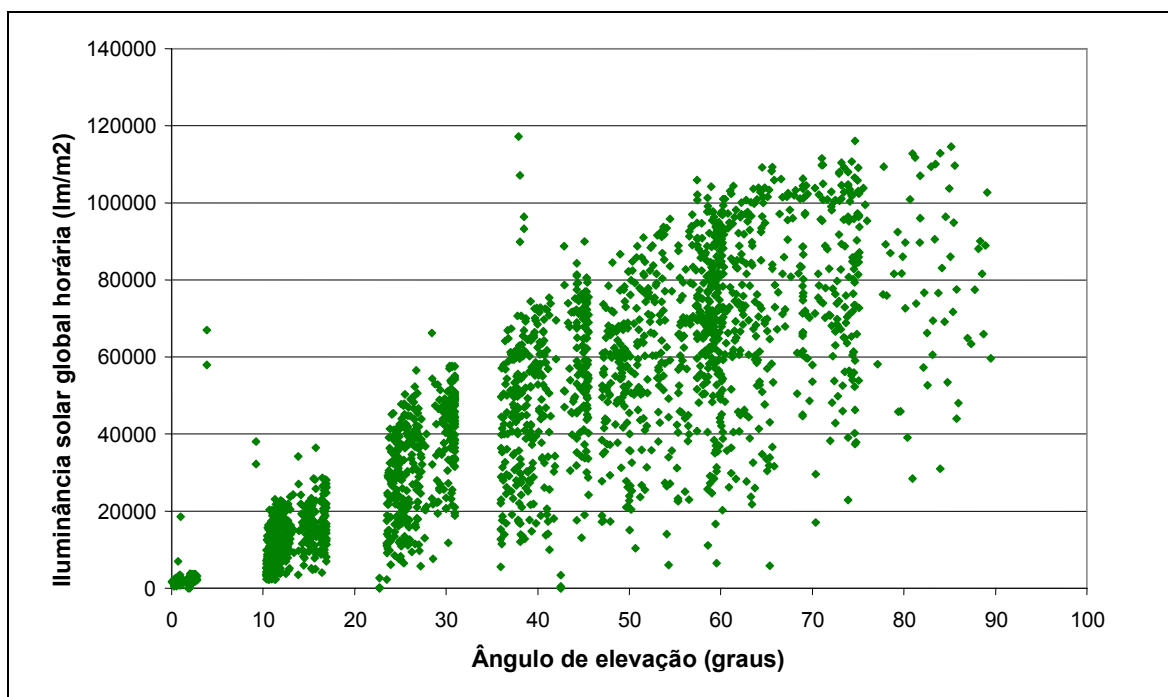


Figura 4.2 - Iluminância solar global horária em função do ângulo de elevação para Recife.

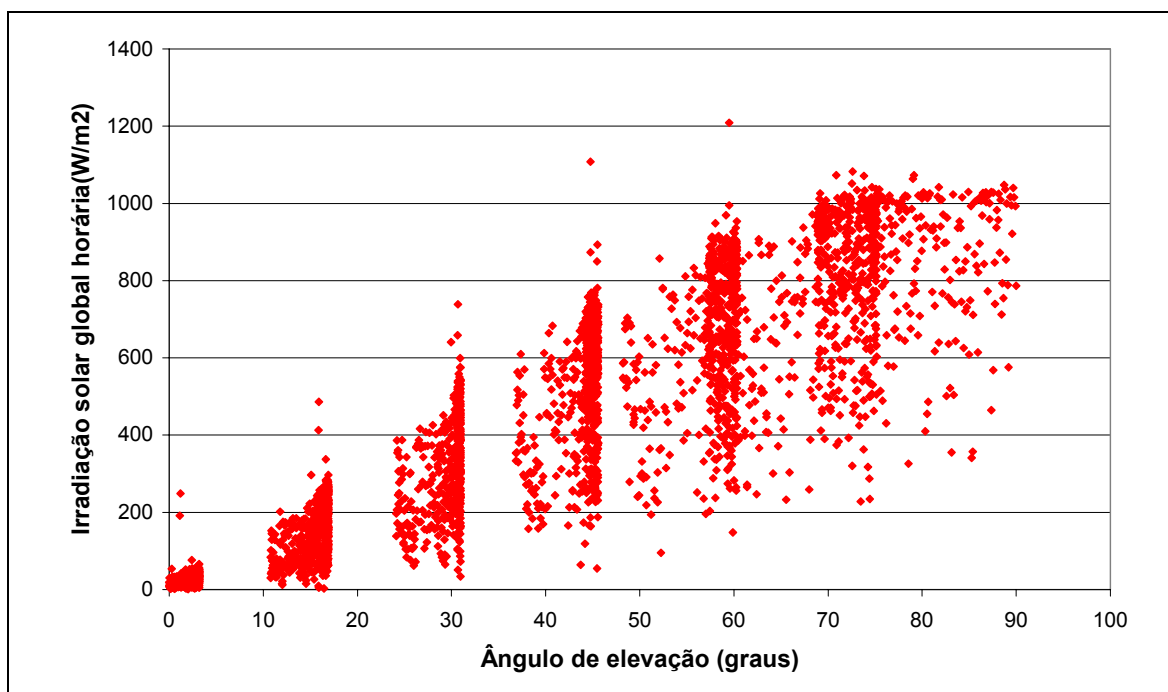


Figura 4.3 - Irradiação solar global horária em função do ângulo de elevação para Pesqueira.

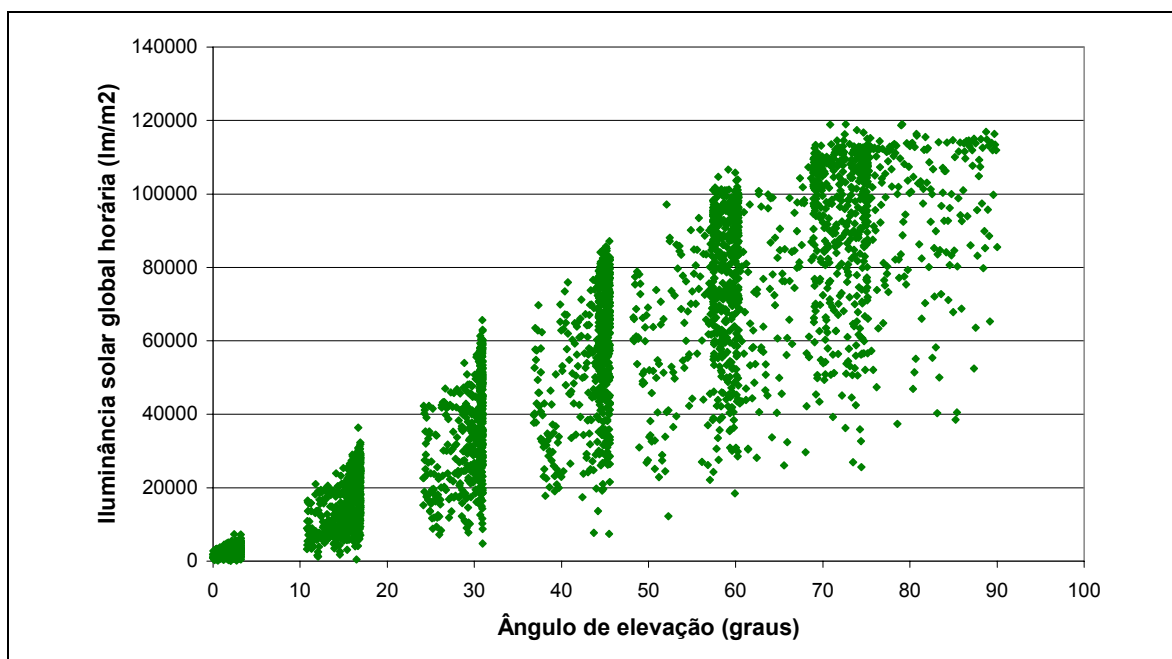


Figura 4.4 - Iluminância solar global horária em função do ângulo de elevação para Pesqueira.

A análise das Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 permite as seguintes conclusões:

- O comportamento da irradiação solar global horária e iluminância global horária em função da altitude solar são bastante semelhantes;
- Para um mesmo ângulo de elevação existe uma dispersão muito grande de pontos, indicando a grande diversidade da condição horária do céu;
- A iluminância horária global atinge valores máximos próximos de  $115.000 \text{ lm/m}^2$  para Recife e próximo de  $120.000 \text{ lm/m}^2$  para Pesqueira. Este valor ligeiramente superior para Pesqueira reflete a menor turbidez da atmosfera nesta cidade (menor quantidade de água precipitável ao longo do ano);

- Para ângulos de elevação solar maiores ou iguais a  $40^\circ$ , a iluminância horária global em Pesqueira apresenta uma dispersão muito menor que em Recife, mostrando novamente o efeito da menor turbidez da atmosfera em Pesqueira (menor quantidade de água precipitável ao longo do ano).

#### 4.1.2 Descrição das medidas de fator de eficiência luminosa

Os dados experimentais de Recife e Pesqueira foram agrupados em escala horária e classificados em três categorias de índice de transmitância atmosférica (condição de céu claro, parcialmente nublado e nublado), conforme proposto por LAM e LI, (1996):

- céu claro,  $k_t > 0,65$ ;
- parcialmente nublado,  $0,3 < k_t < 0,65$ ;
- nublado,  $k_t < 0,3$ .

Uma categorização mais detalhada e precisa da condição do céu pode ser vista em (PEREZ, et al., 1993) e no item 3.3.2, porém, não foi aqui utilizada aqui por uma questão de simplicidade.

Nas Figuras 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 podem ser vistos os fatores de eficiência luminosa global para a condição de céu claro (a), parcialmente nublado (b) e nublado (c) em função da altitude solar, para Recife e Pesqueira, respectivamente. A análise destas ilustrações permitiu as seguintes conclusões:

- A eficiência luminosa do sol para Recife situa-se próxima a 120 lm/W na condição de céu claro, 140 lm/W na condição de céu parcialmente nublado e 150lm/W na condição de céu nublado;
- A eficiência luminosa do sol para Pesqueira situa-se próxima a 110 lm/W na condição de céu claro, 115 lm/W na condição de céu parcialmente nublado e 125 lm/W na condição de céu nublado;
- A diferença de comportamento entre Recife e Pesqueira é esperada e pode ser explicada considerando a menor quantidade de água precipitável existente na atmosfera de Pesqueira ao longo do ano. Tal fato provoca uma menor absorção da irradiação solar, principalmente no espectro infravermelho;
- Finalmente, cabe constatar a elevada eficiência luminosa do sol quando comparada com lâmpadas artificiais, como as fluorescentes, cujas eficiências luminosas situam-se entre 50-80 lm/W.

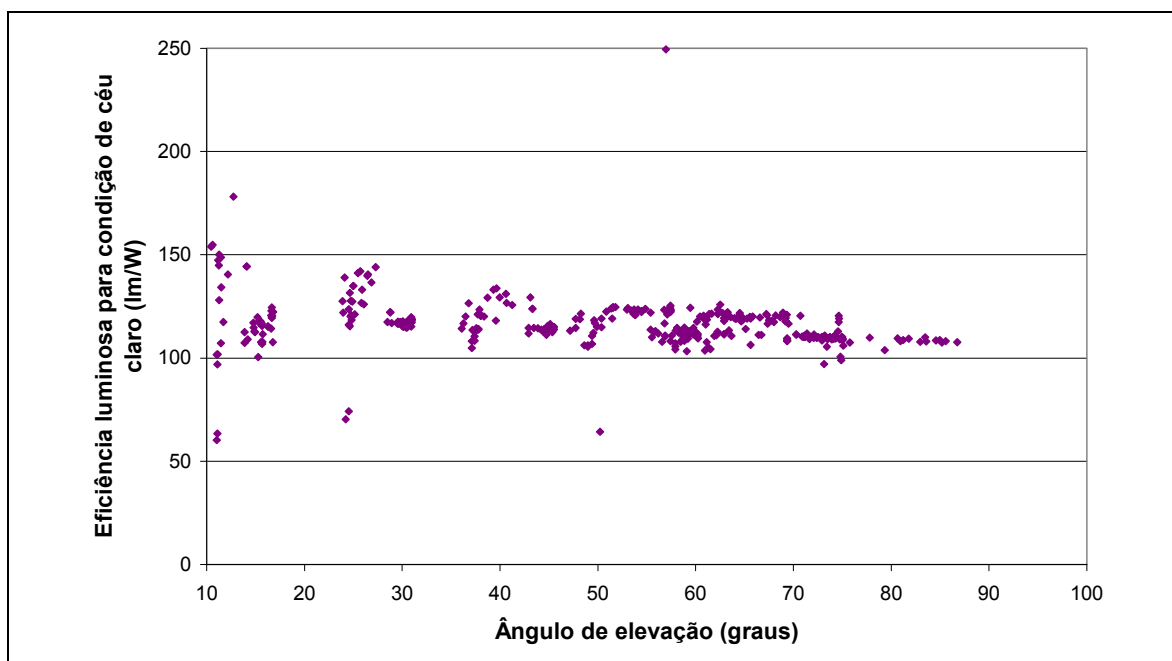


Figura 4.5 - Fator de eficiência luminosa global, em função da altitude solar, para a condição de céu claro, para Recife ( $k_t > 0,65$ ).

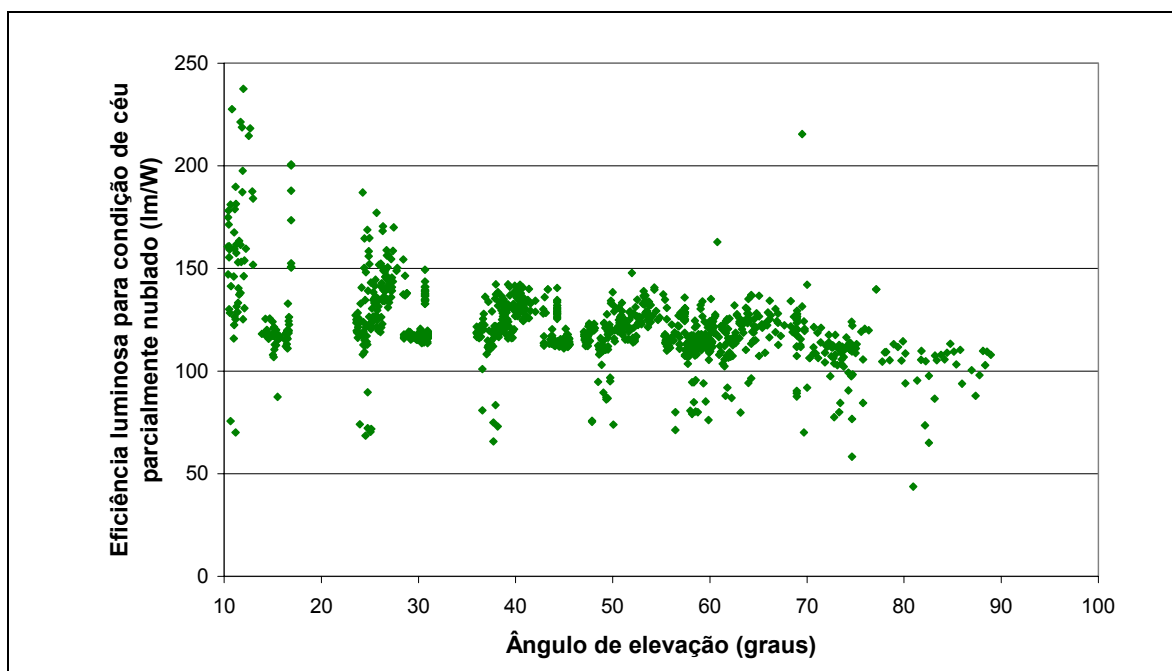


Figura 4.6 - Fator de eficiência luminosa global, em função da altitude solar, para a condição de céu parcialmente nublado, para Recife ( $0,3 < k_t < 0,65$ ).

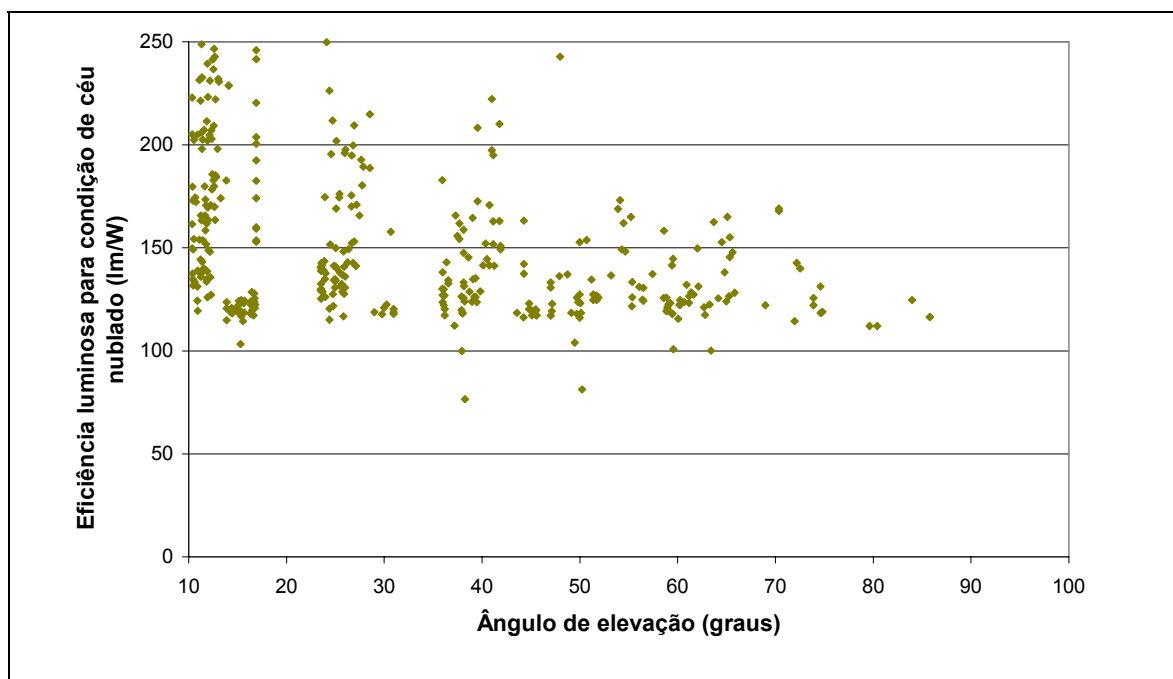


Figura 4.7 - Fator de eficiência luminosa global, em função da altitude solar, para a condição de céu nublado, para Recife ( $k_t < 0,3$ ).

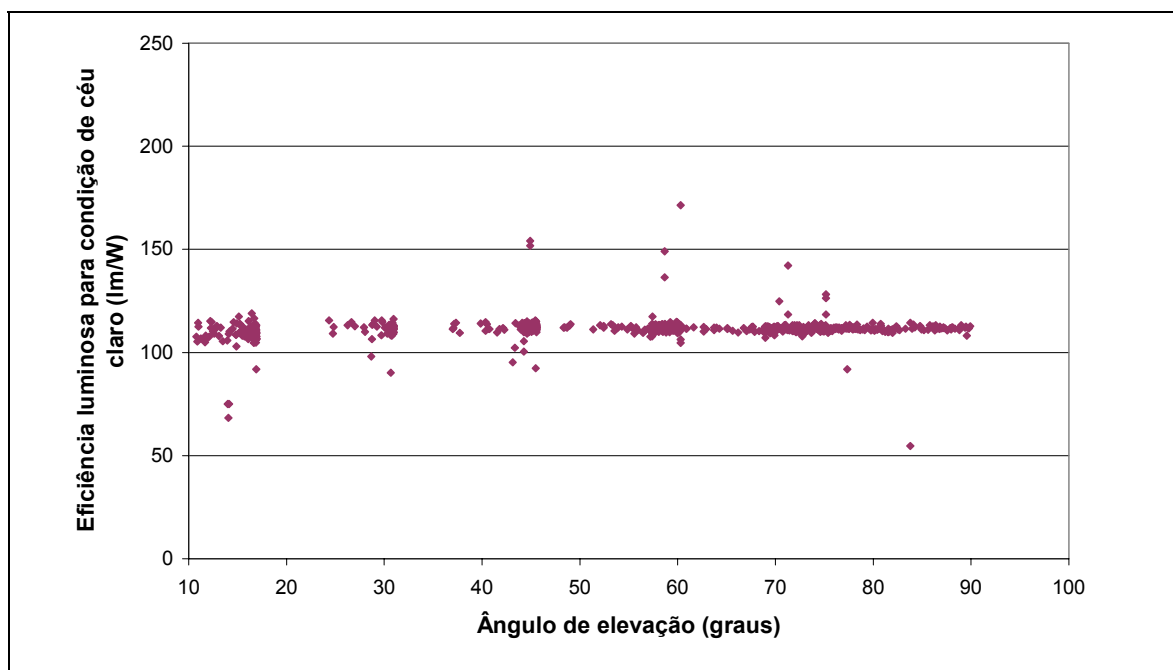


Figura 4.8 - Fator de eficiência luminosa global, em função da altitude solar, para a condição de céu claro, para Pesqueira ( $k_t > 0,65$ ).

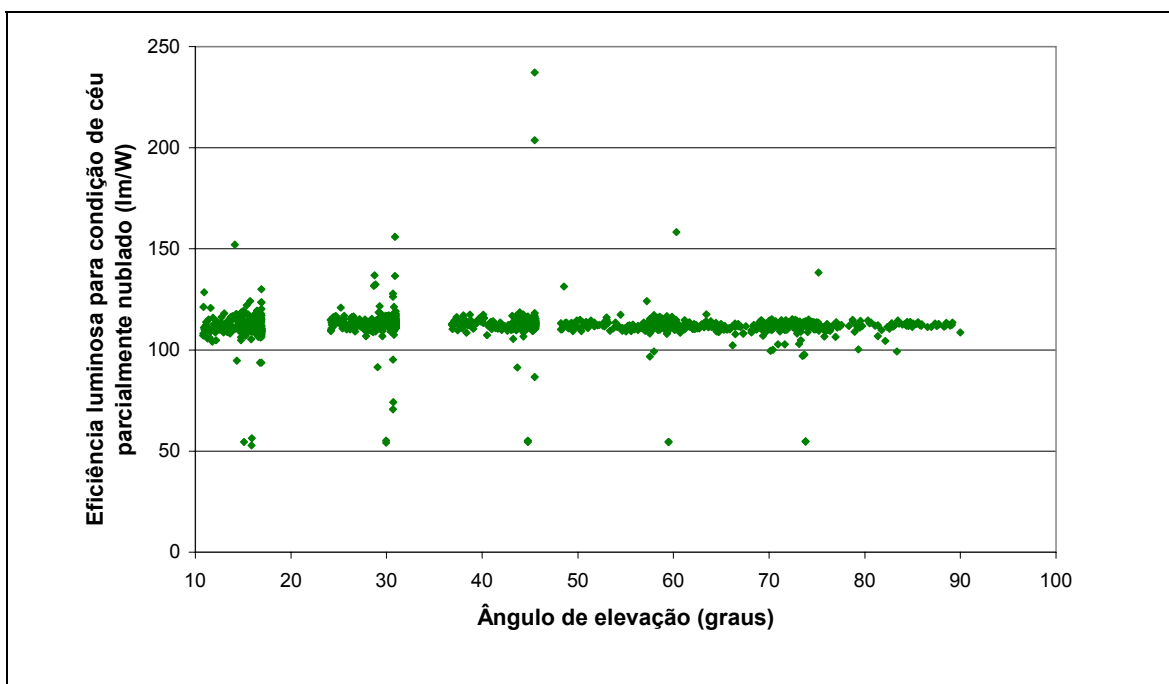


Figura 4.9 - Fator de eficiência luminosa global, em função da altitude solar, para a condição de céu parcialmente nublado, para Pesqueira ( $0,3 < k_t < 0,65$ ).

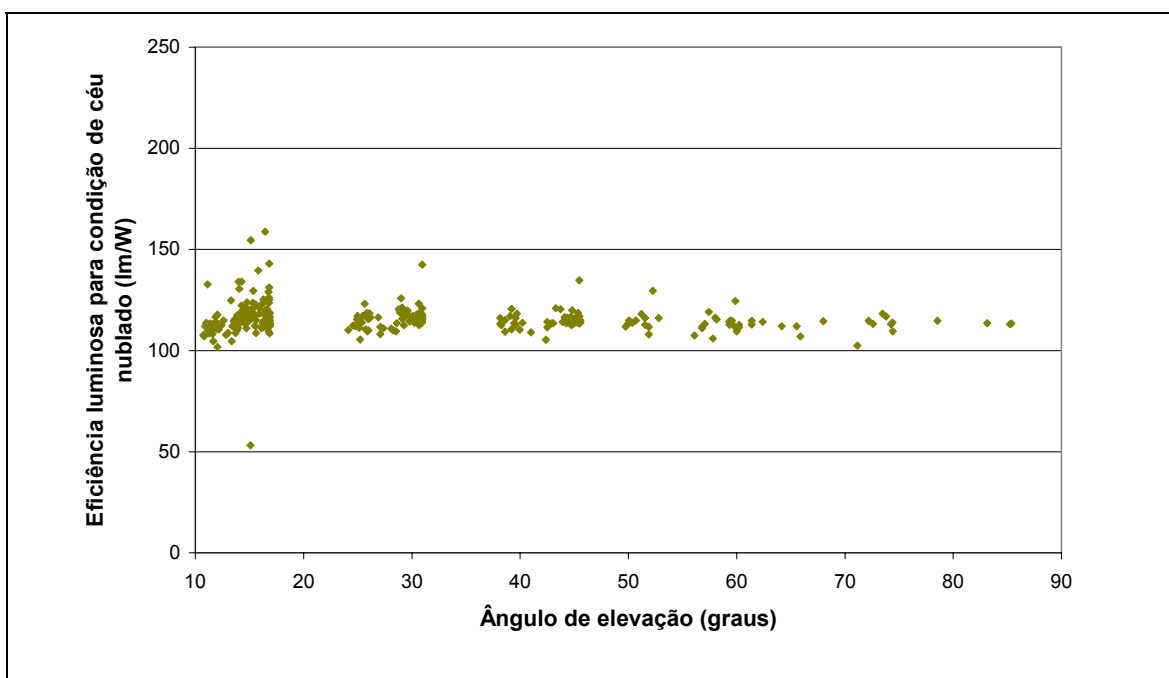


Figura 4.10 - Fator de eficiência luminosa global, em função da altitude solar, para a condição de céu nublado, para Pesqueira ( $k_t < 0,3$ ).

### 4.1.3 Distribuição acumulada da iluminância global horária e do fator de eficiência luminosa

Os valores da distribuição acumulada da iluminância global horária indicam qual o percentual desta iluminância que excede um valor limite durante um mês ou durante o ano. As figuras 4.5 e 4.6 mostram graficamente tais distribuições, em bases anuais, para Recife e Pesqueira, respectivamente. A função distribuição acumulada é útil por que permite realizar estimativas da economia mensal ou anual de energia elétrica no caso da utilização da luz natural para fins de iluminação em edificações. Assim, por exemplo, considerando a necessidade de iluminação de uma mesa de trabalho em um escritório comercial igual a 500lux, uma janela com fator de iluminação natural igual a 2,5% necessitará de uma iluminância externa horizontal de, no mínimo, 20 klm/m<sup>2</sup>. Conforme pode ser visto nas Figuras 4.11 e 4.12, tais situações ocorrerão em 80% das horas diurnas anuais, ou seja, a iluminação do escritório poderia ocorrer somente com luz natural em 80% das horas anuais diurnas em Recife e Pesqueira.

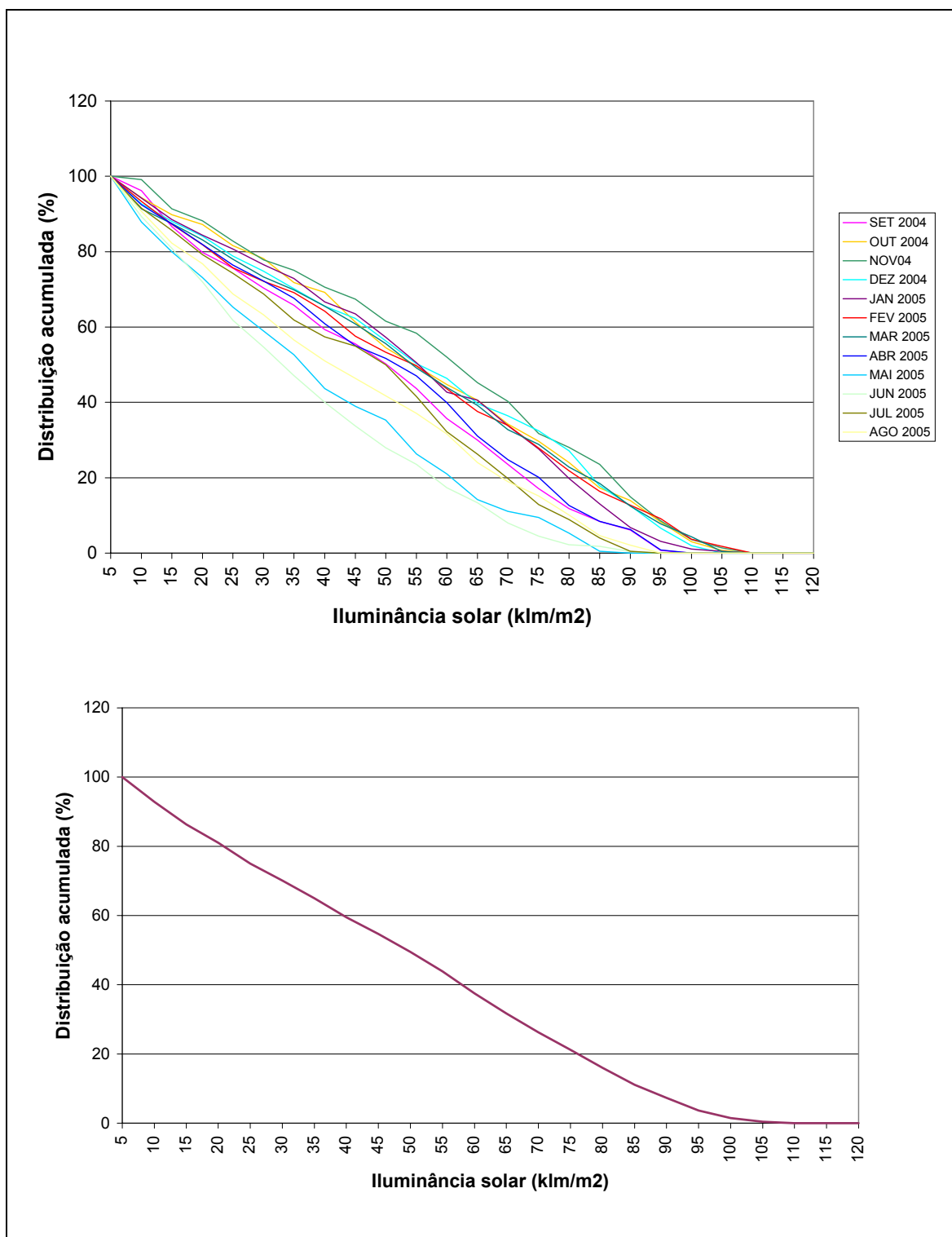


Figura 4.11 - Distribuição acumulada mensal e anual da iluminância global horária para a cidade de Recife

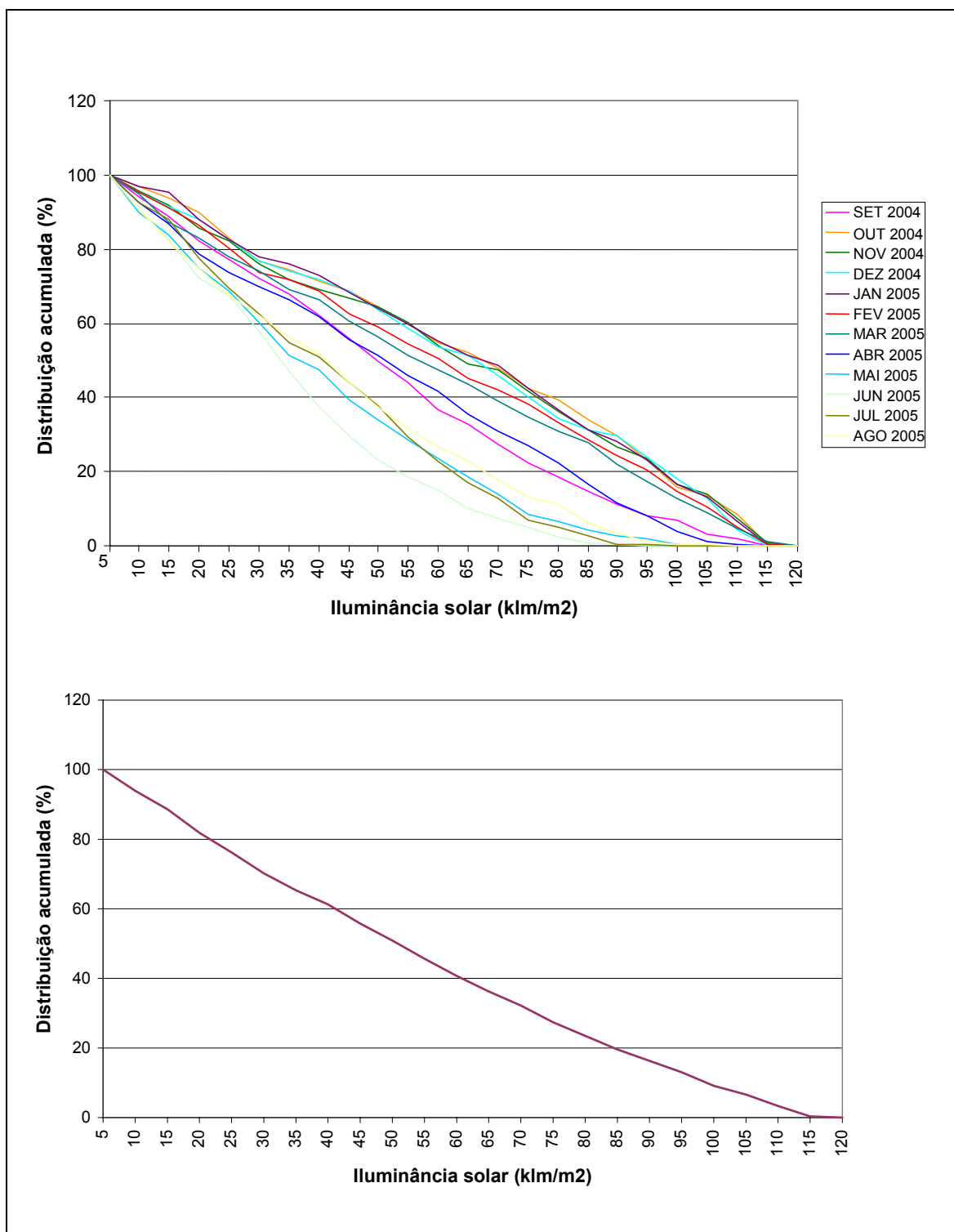


Figura 4.12 - Distribuição acumulada mensal e anual da iluminância global horária para a cidade de Pesqueira

Também pode ser observado nas Figuras 4.11 e 4.12 que as variabilidades mensais são pequenas (pouca dispersão) e, portanto, a disponibilidade de iluminância é bastante regular durante o ano (pequena sazonalidade anual). Tais características poderão agregar uma vantagem econômica significativa para sistemas que usam a iluminação natural, quando comparados com aqueles em locais que mostram grandes sazonalidades anuais (loais longe do equador). Nos anexos I a IV encontram-se, de forma detalhada, as distribuições mensais e acumuladas horárias para as localidades de Recife e Pesqueira.

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram as curvas experimentais das distribuições acumuladas do fator de eficiência luminosa global horária para Recife e Pesqueira. O percentual acumulado cai rapidamente de 125 lm/W para 100 lm/W e permanece a maior parte do tempo (96%) nesse intervalo.

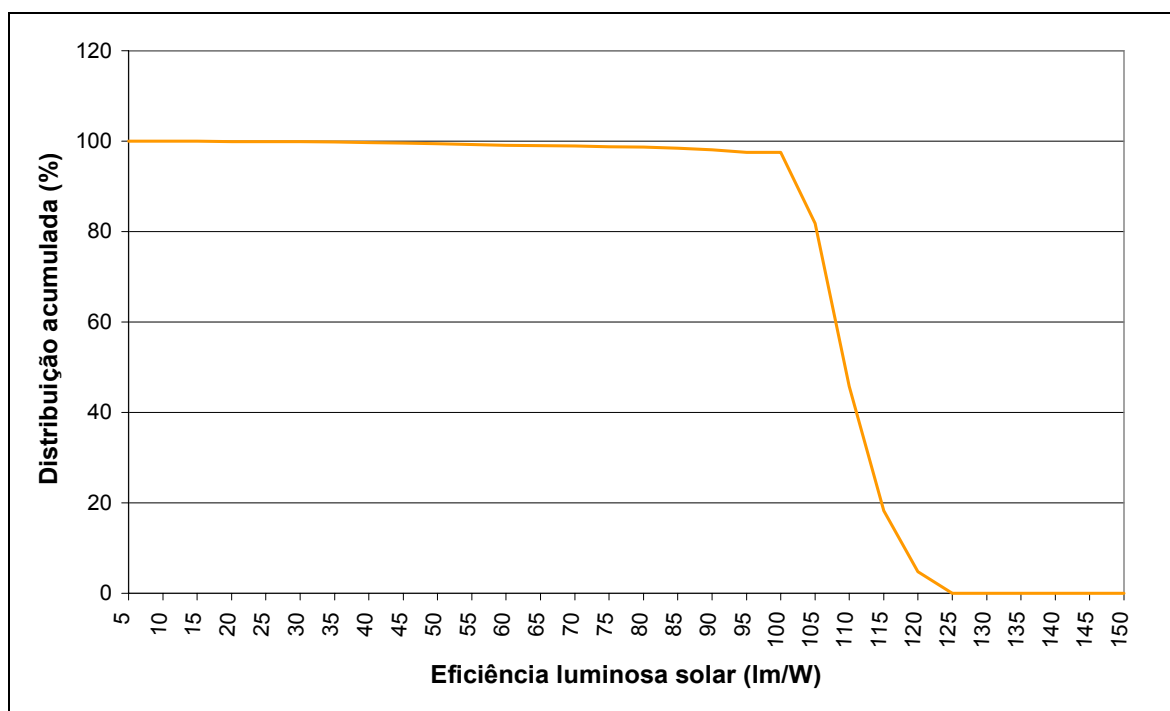


Figura 4.13 - Distribuição acumulada anual da eficiência luminosa global horária para a cidade de Recife

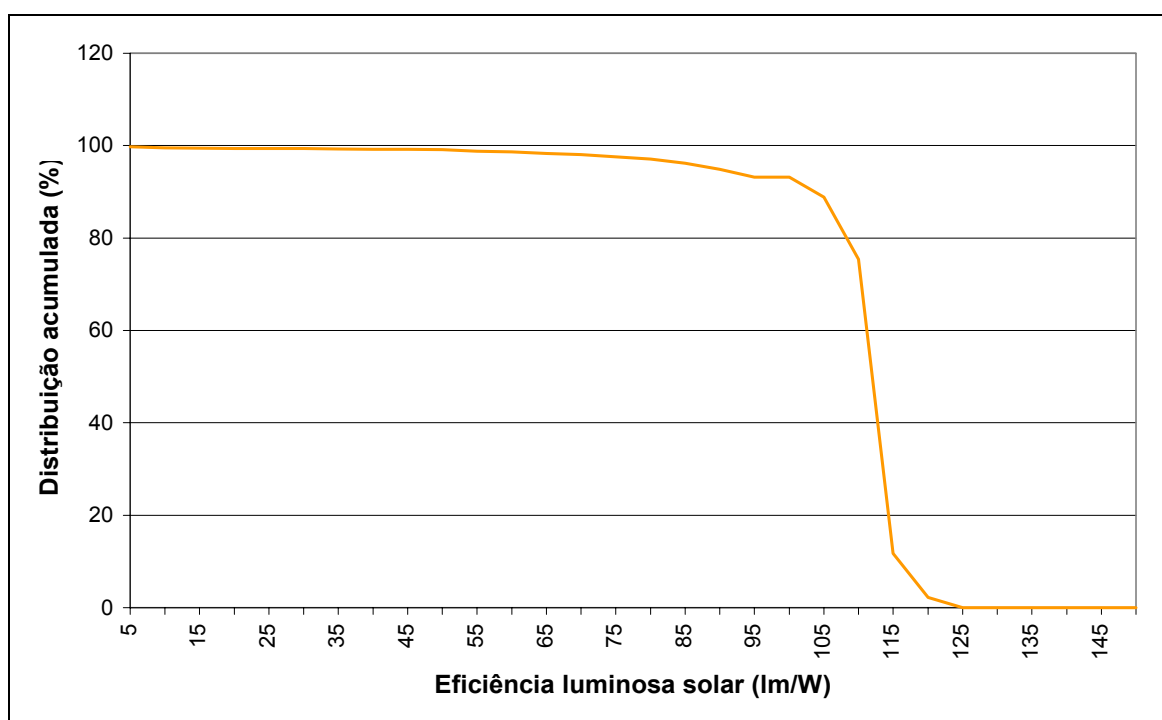


Figura 4.14 - Distribuição acumulada anual da eficiência luminosa global horária para a cidade de Pesqueira

#### 4.1.4 Descrição das medidas diárias e mensais de iluminância e irradiação solar

As Figuras 4.15, 4.16, 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20 mostram a irradiação solar global média diária, a iluminância global média diária e a eficiência luminosa média diária para a cidade de Recife e Pesqueira em função do dia juliano. As médias diárias foram calculadas somente com valores horários positivos, ou seja, durante o período diurno de cada dia. O período mostrado nas figuras estende-se de setembro de 2004 a setembro de 2005.

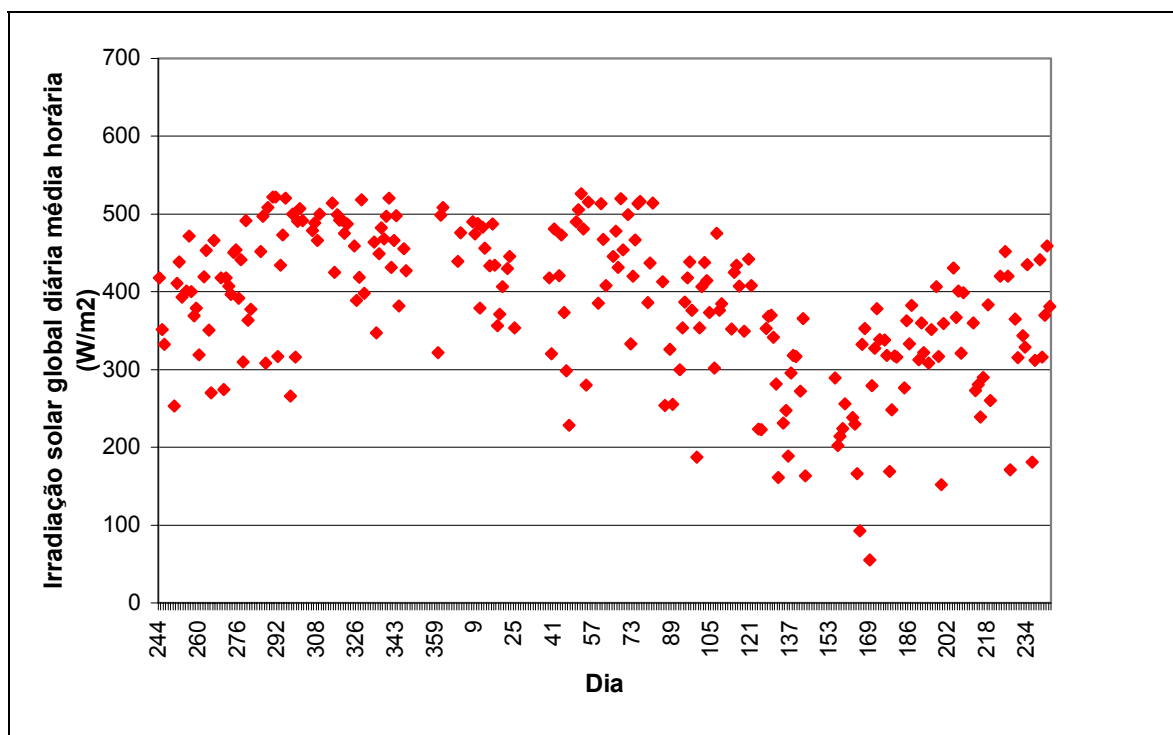


Figura 4.15 - Irradiação solar global média diária para a cidade de Recife

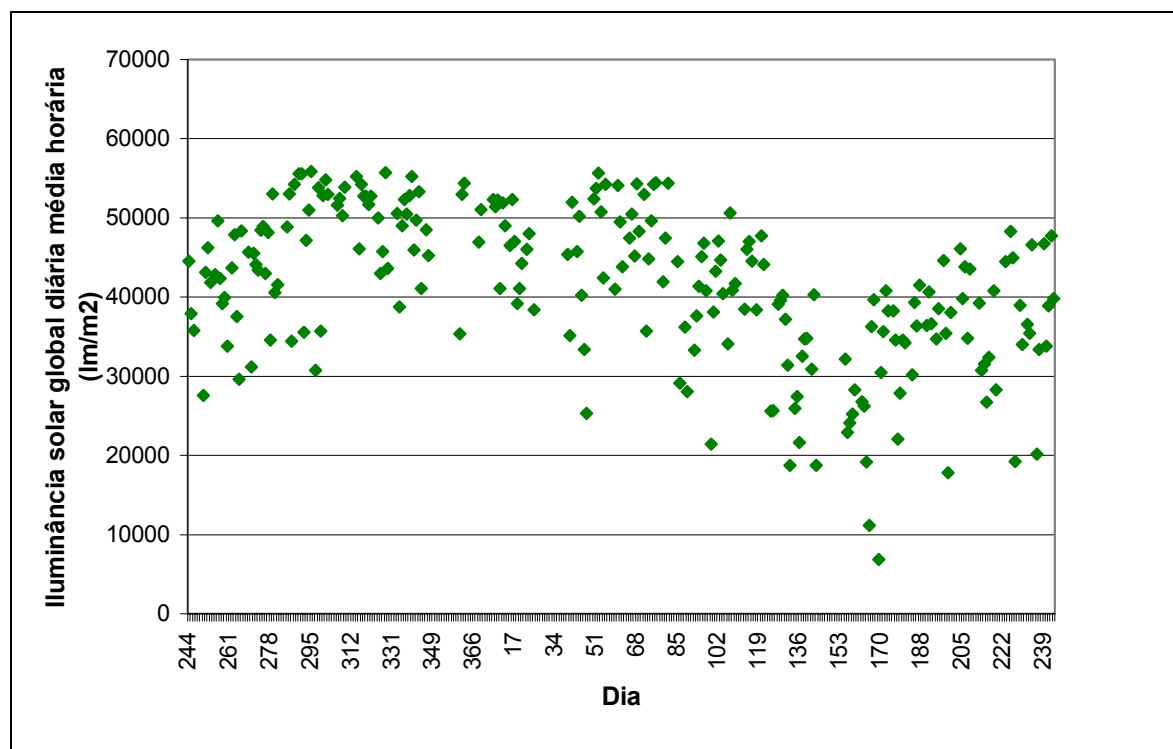


Figura 4.16 - Iluminância global média diária para a cidade de Recife

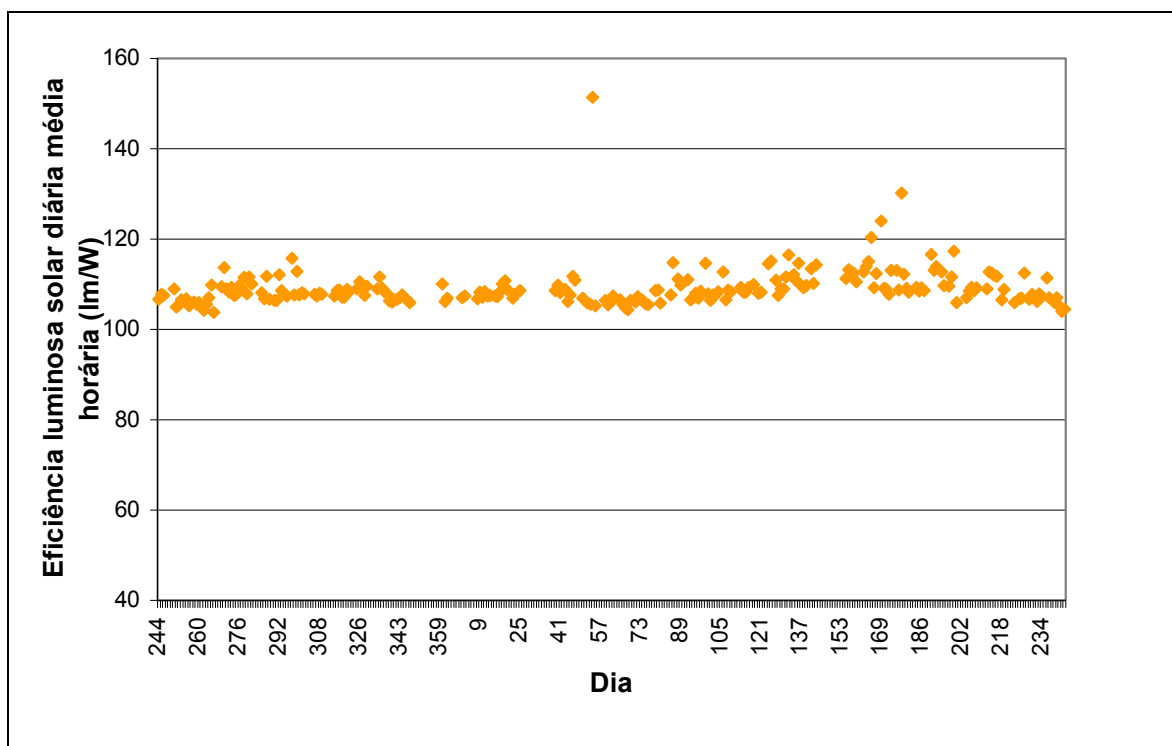


Figura 4.17 - Eficiência luminosa média diária para a cidade de Recife

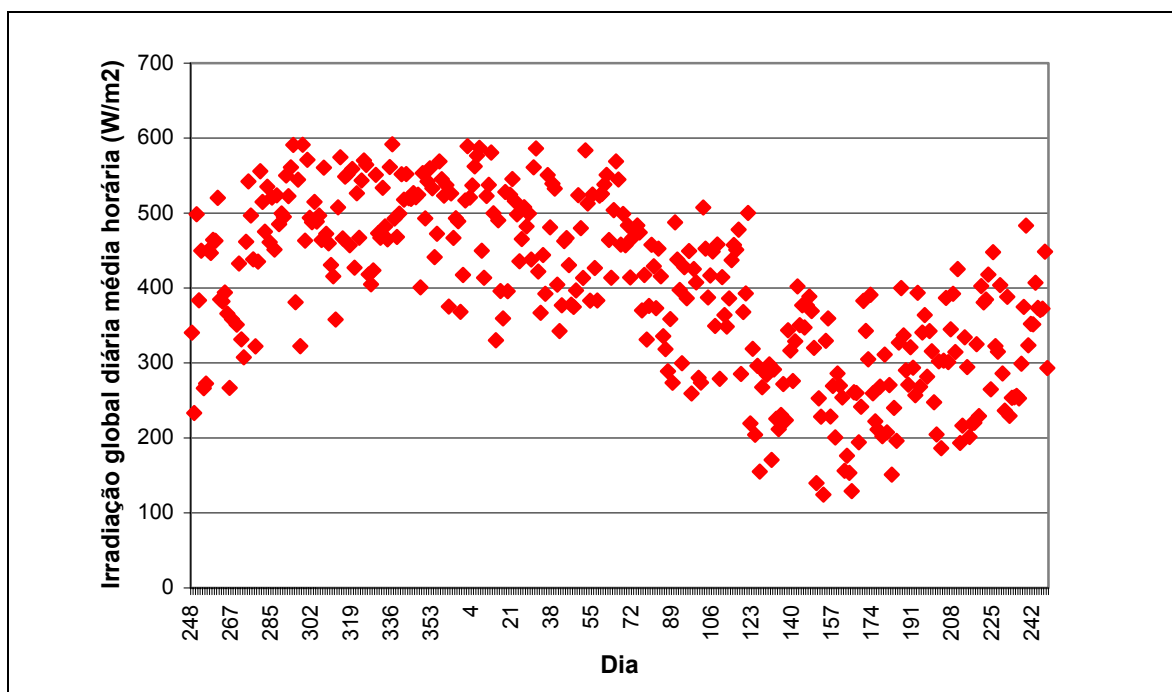


Figura 4.18 - Irradiação solar global média diária para a cidade de Pesqueira

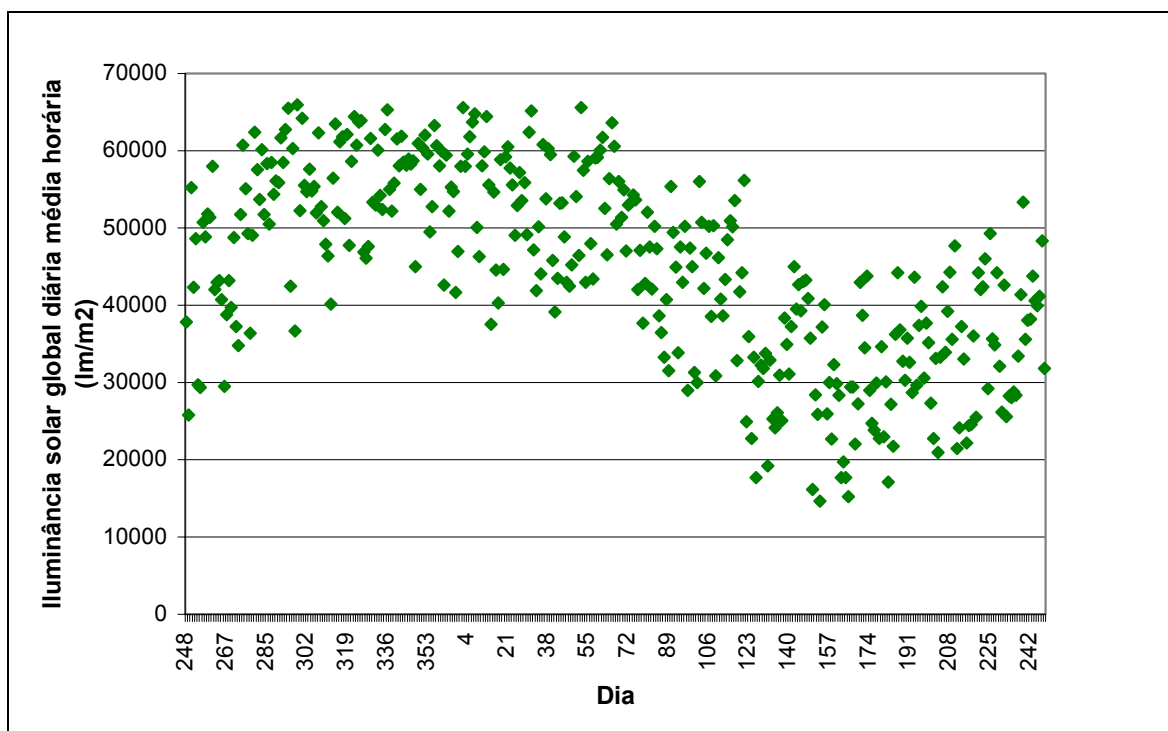


Figura 4.19 - Iluminância global média diária para a cidade de Pesqueira

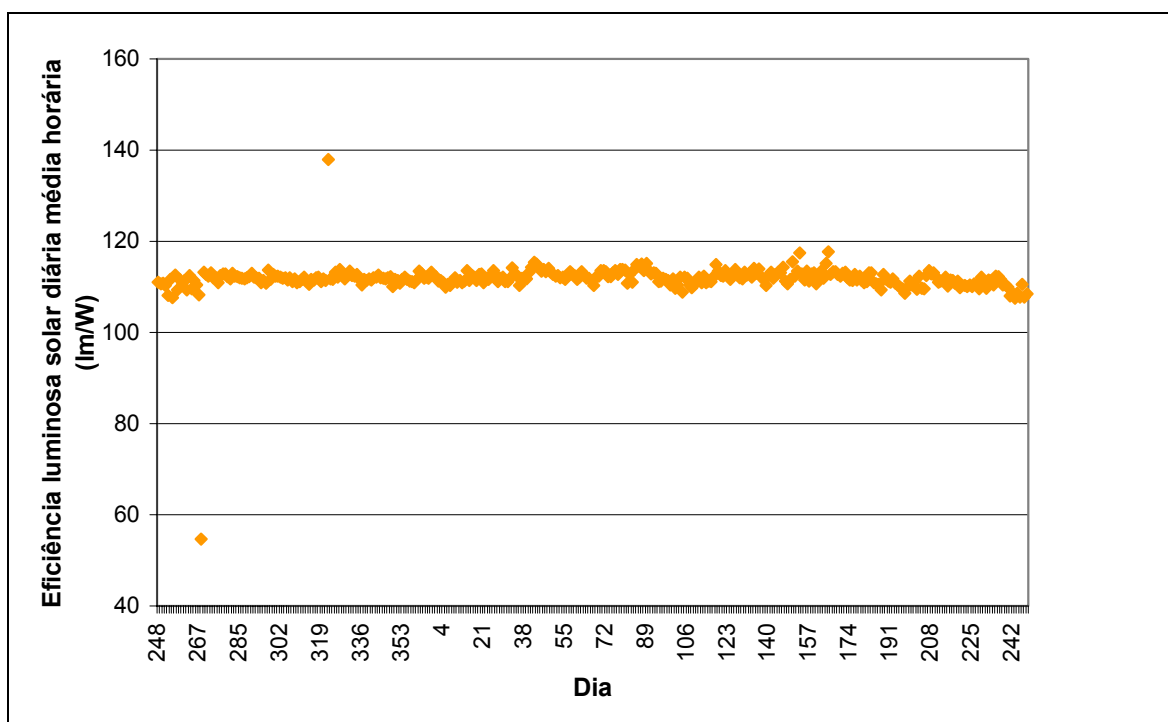


Figura 4.20 - Eficiência luminosa média diária para a cidade de Pesqueira

A irradiação solar global média diária tanto para Recife como para Pesqueira mostra o comportamento sazonal típico da região Nordeste do Brasil: valores máximos no verão (período sem chuva: setembro a fevereiro) e mínimo no inverno (período de chuva: março a agosto). A iluminância global diária média segue o mesmo padrão de comportamento, atingindo valores máximos no trimestre de outubro a dezembro e um mínimo no trimestre de maio a julho.

A eficiência luminosa média diária mostra um comportamento bastante regular durante o ano tanto para Recife como para Pesqueira, com um valor médio próximo de 115 lm/W. Em ambos os casos também é possível observar que a eficiência luminosa é levemente maior nas estações de chuva (trimestre de maio a julho).

Todos os comentários anteriores podem ser melhor visualizados nas Figuras 4.21, 4.22, 4.23, 4.24, 4.25 e 4.26, onde estão representadas a irradiação solar global, a iluminância global e a eficiência luminosa, todas médias mensais, para as cidades de Recife e Pesqueira.

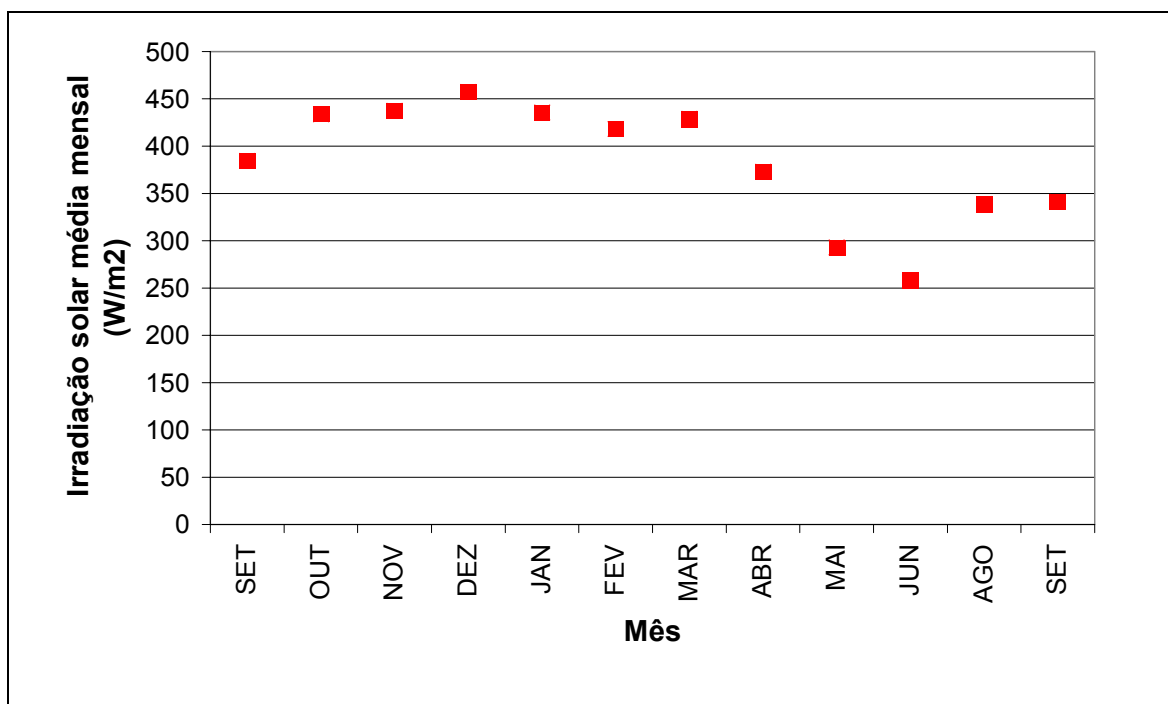


Figura 4.21 - Irradiação solar global média mensal para a cidade de Recife

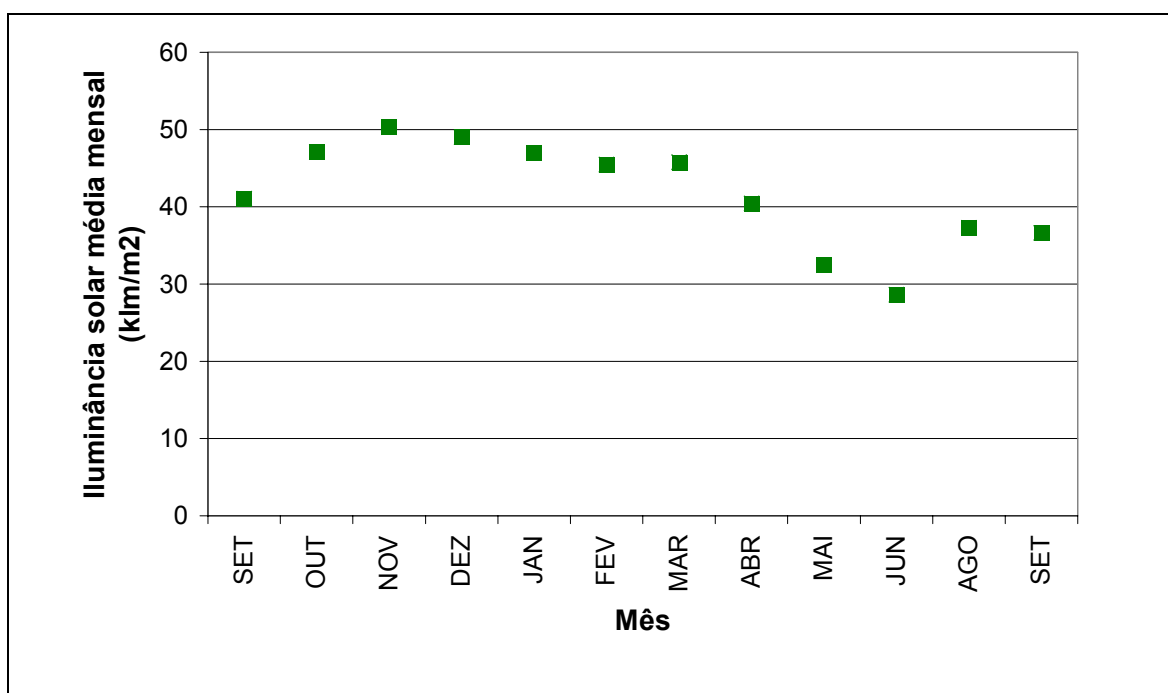


Figura 4.22 - Iluminância global média mensal para a cidade de Recife

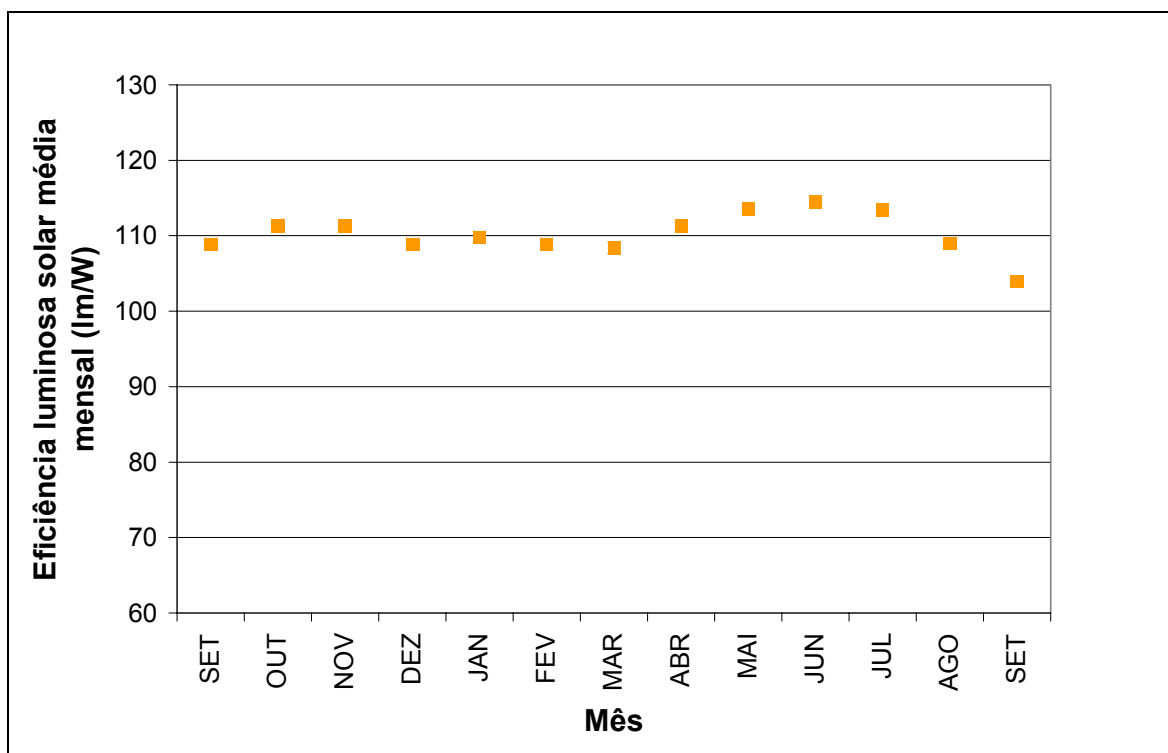


Figura 4.23 - Eficiência luminosa média mensal para a cidade de Recife

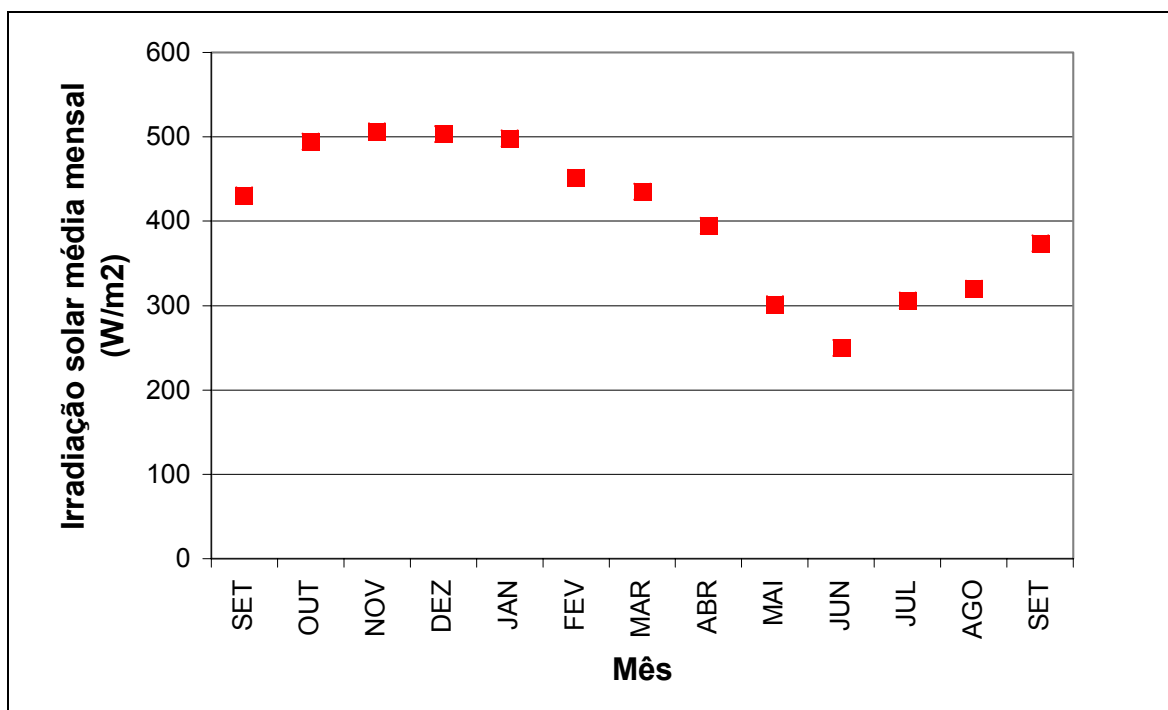


Figura 4.24 - Irradiação solar global média mensal para a cidade de Pesqueira

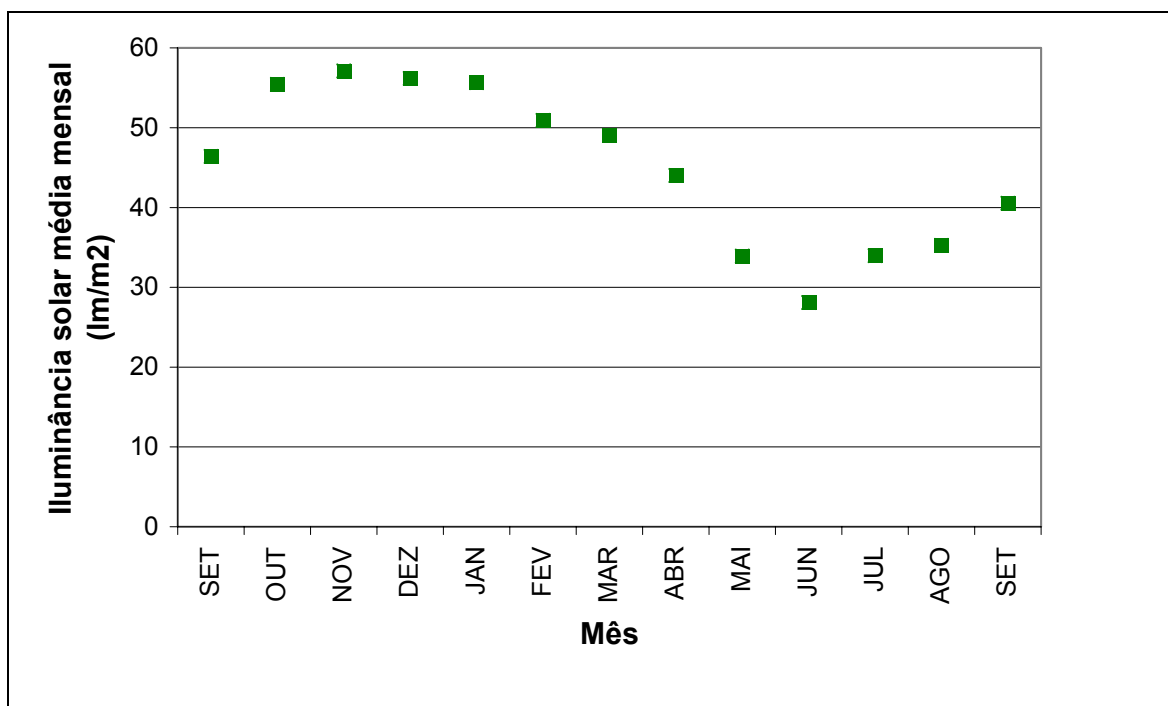


Figura 4.25 - Iluminância global média mensal para a cidade de Pesqueira

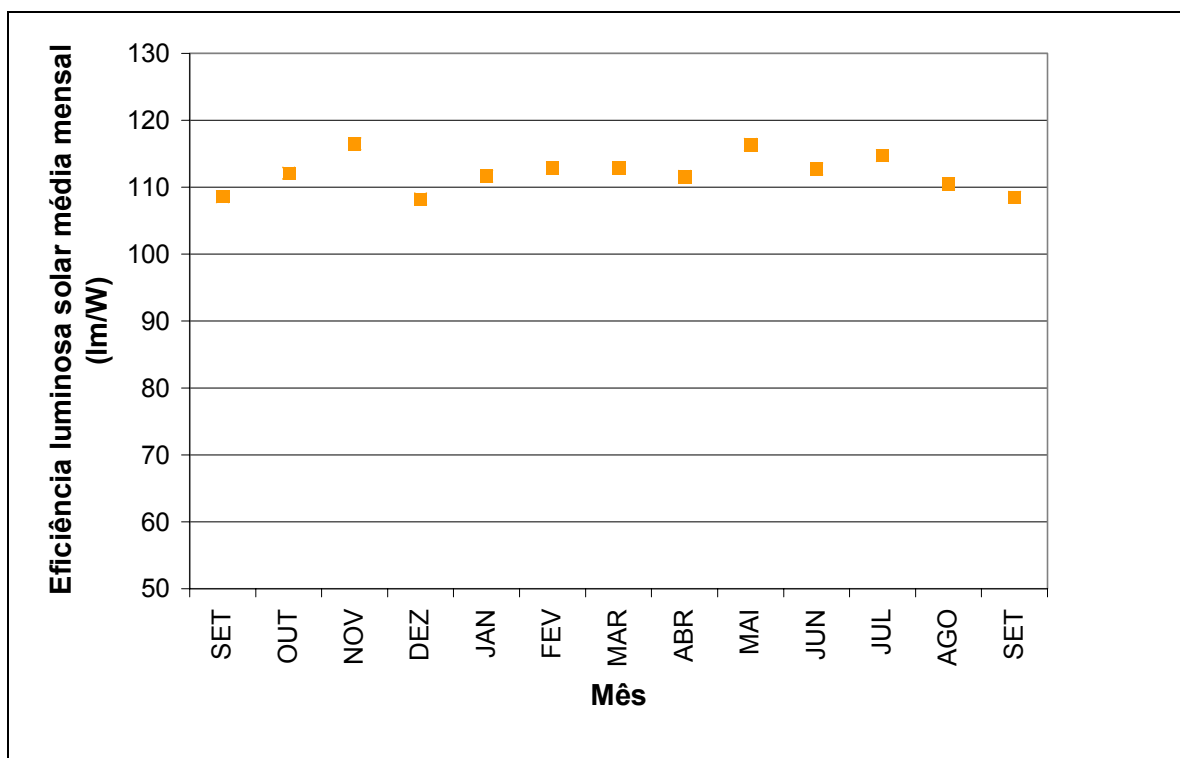


Figura 4.26 - Eficiência luminosa média mensal para a cidade de Pesqueira

## 4.2 Modelagem da eficiência luminosa

Os dados experimentais obtidos para Recife e Pesqueira foram divididos em dois blocos com períodos distintos de medição. O primeiro bloco foi utilizado para fazer a modelagem da eficiência luminosa e o segundo para testar estatisticamente o modelo. A Tabela 4 mostra, para as localidades de Recife e Pesqueira, os períodos considerados para a modelagem e para a validação, bem como o modelo aplicado.

Tabela 4 - Dados experimentais utilizados para a modelagem e para a validação, bem como o modelo aplicado

| <b>Modelo</b> | <b>Local</b> | <b>Dados para modelagem<br/>Período</b> | <b>Dados para validação<br/>Período</b> |
|---------------|--------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|
| Robledo       | Recife       | abr/03 - jun/04                         | jul/04 - mar/05                         |
|               | Pesqueira    | set/04 - abr/05                         | mai/05 - set/05                         |
| Perez         | Recife       | -                                       | abr/03 - abr/05                         |
|               | Pesqueira    | -                                       | set/04 - mai/05                         |
| Perez local   | Recife       | mar/03 - jun/04                         | jul/04 - mar/05                         |
|               | Pesqueira    | set/04 - dez/04                         | jan/05 - mai/05                         |
| Alados        | Recife       | mar/03 - jun/04                         | jul/04 - mar/05                         |
|               | Pesqueira    | set/04 - dez/04                         | jan/05 - mai/05                         |

As validações dos modelos foram feitas com indicadores estatísticos clássicos, tais como o desvio médio e o desvio médio quadrático.

### 4.2.1 Modelo de Robledo

Os dados experimentais em escala de minutos foram convenientemente transformados em dados horários de iluminância e irradiação solar globais e modelados conforme as expressões citadas no item 3.3.1:

$$E = A_1 \cdot (\text{sen}\alpha)^{B_1} \quad (28)$$

$$I = A_2 \cdot (\text{sen}\alpha)^{B_2} \quad (29)$$

As equações do tipo (28) e (29) podem ser linearizadas tomando-se o logaritmo de ambos os membros e fazendo-se a regressão linear de  $\ln(E)$  ou  $\ln(I)$  sobre o  $\ln(\text{sen}\alpha)$ . Utilizando os dados experimentais descritos na terceira coluna da tabela 4 as constantes empíricas  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$  e  $B_2$  foram determinadas, resultando nas expressões que se seguem, as quais resumem a modelagem da iluminância global horária, da irradiação solar global horária e da eficiência luminosa para Recife e Pesqueira.

#### **Recife:**

$$E = 70756,5 \cdot (\text{sen}\alpha)^{0,889} \quad R^2 = 0,78 \quad (30)$$

$$I = 663,6 \cdot (\text{sen}\alpha)^{1,018} \quad R^2 = 0,73 \quad (31)$$

$$\eta_L = 112,5 \cdot (\text{sen}\alpha)^{-0,149} \quad (32)$$

**Pesqueira:**

$$E = 77963,8 \cdot (\text{sen}\alpha)^{1,003}, \quad R^2 = 0,83 \quad (33)$$

$$I = 688,1 \cdot (\text{sen}\alpha)^{0,981}, \quad R^2 = 0,82 \quad (34)$$

$$\eta_L = 113,3 \cdot (\text{sen}\alpha)^{-0,022} \quad (35)$$

As Figuras 4.27 e 4.28 mostram o comportamento preditivo do modelo da eficiência luminosa de Robledo para Recife e Pesqueira. Os dados experimentais plotados nestas ilustrações correspondem a um período posterior àqueles utilizados para geração dos modelos. Conforme a Tabela 4, para Recife, os dados experimentais plotados correspondem ao período de julho de 2004 a março de 2005 e o modelo matemático da eficiência luminosa foi gerado a partir de dados experimentais no período de abril 2003 a junho de 2004. No caso da estação Pesqueira, os dados experimentais plotados correspondem ao período de maio a junho de 2005, sendo o modelo gerado com dados correspondentes ao período de setembro de 2004 a abril de 2005.

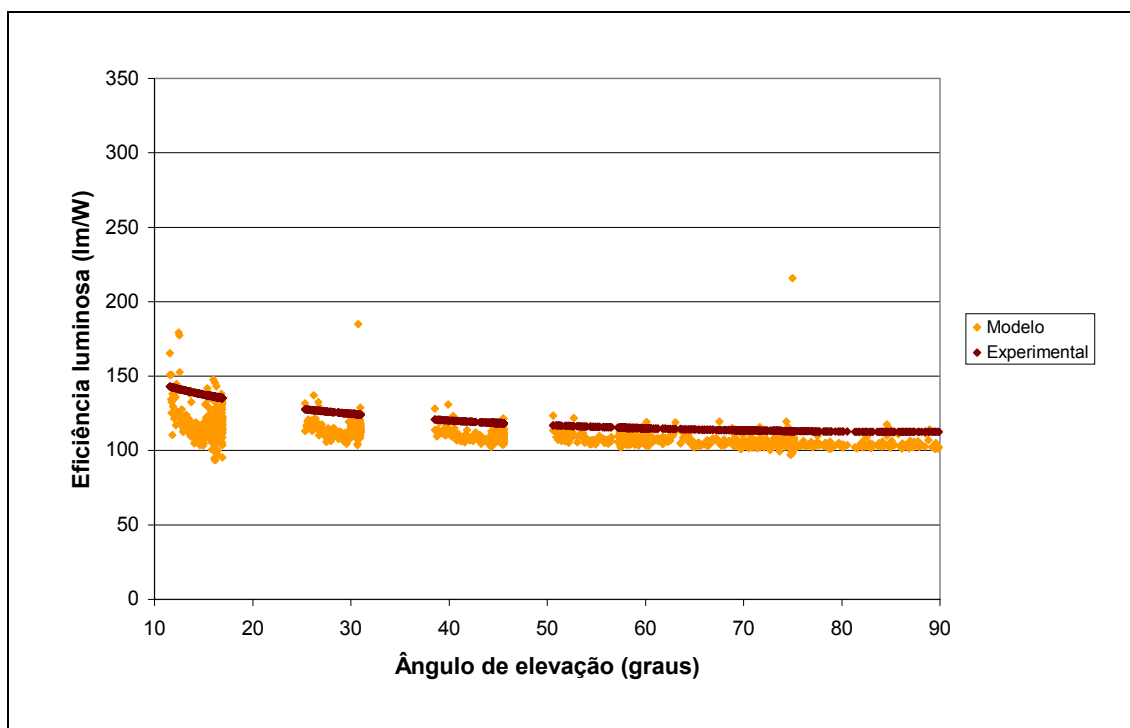


Figura 4.27 - Eficiência luminosa global horária em função do ângulo de elevação para Recife, Modelo de Robledo.

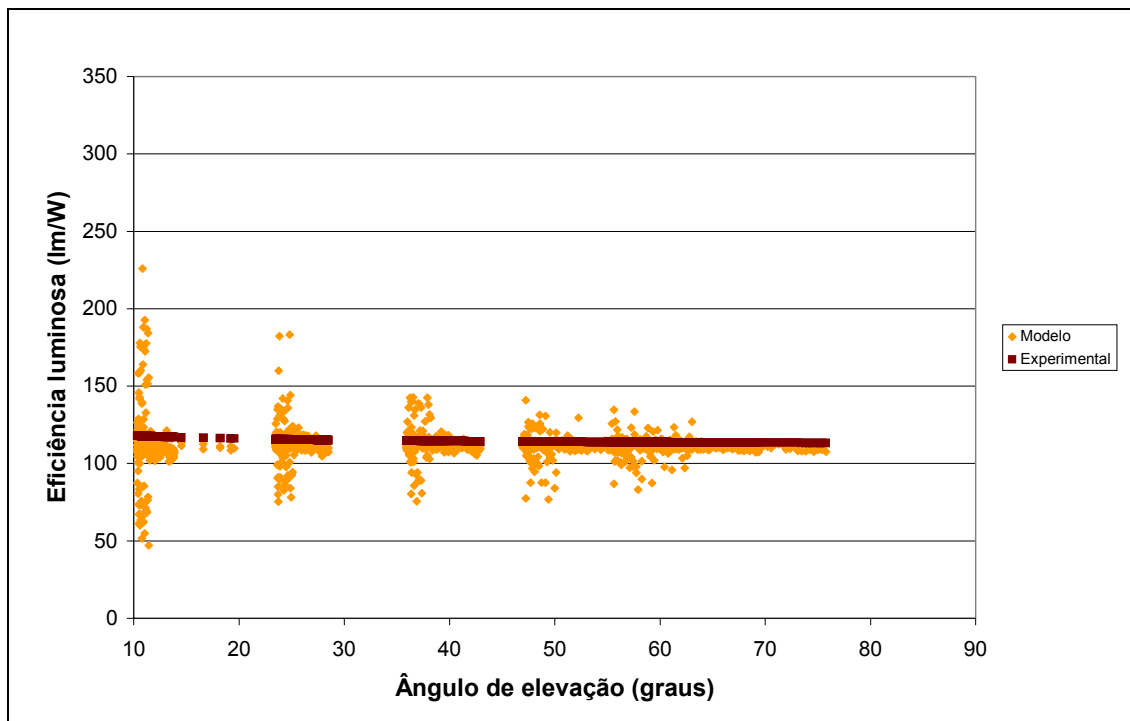


Figura 4.28 - Eficiência luminosa global horária em função do ângulo de elevação para Pesqueira, Modelo de Robledo.

## 4.2.2 Modelo de Perez

### 4.2.2.1 Modelo de Perez Original

O modelo de Perez, expresso pelas equações reunidas na Tabela 2, desenvolvido e testado com valores de locais dos Estados Unidos, foi aplicado para as cidades de Recife e Pesqueira. Para Recife, os dados experimentais horários da irradiação solar global, irradiação solar difusa e iluminância global foram utilizados para determinar os índices de opacidade e de claridade do céu. A água precipitável foi calculada a partir de dados de temperatura ambiente e umidade relativa local, conforme metodologia apresentada no item 3.2. Normalmente, as estações meteorológicas disponibilizam estes dados em intervalos de três horas, necessitando, assim, que os mesmos sofressem interpolações para a obtenção dos valores horários. A interpolação foi feita pelo método de spline cúbico.

Para a cidade de Pesqueira, foram coletados dados experimentais locais horários da irradiação solar global e iluminância global. Para se obter os valores horários da irradiação solar difusa, foi necessário o uso da correlação de Erbs, mostrado anteriormente nas equações (21) a (23). Para o cálculo da água precipitável foram utilizados dados experimentais da umidade relativa e da temperatura da cidade de Arcoverde, conforme descrito anteriormente no item 3.2. O restante do processamento de dados seguiu o mesmo procedimento adotado para Recife.

A Figura 4.29 mostra o comportamento da eficiência luminosa em Recife no período de abril de 2003 a abril de 2005, prevista pelo modelo. Os desvios médio e médio quadrático para este caso foram, respectivamente, -1% e 16,3%.

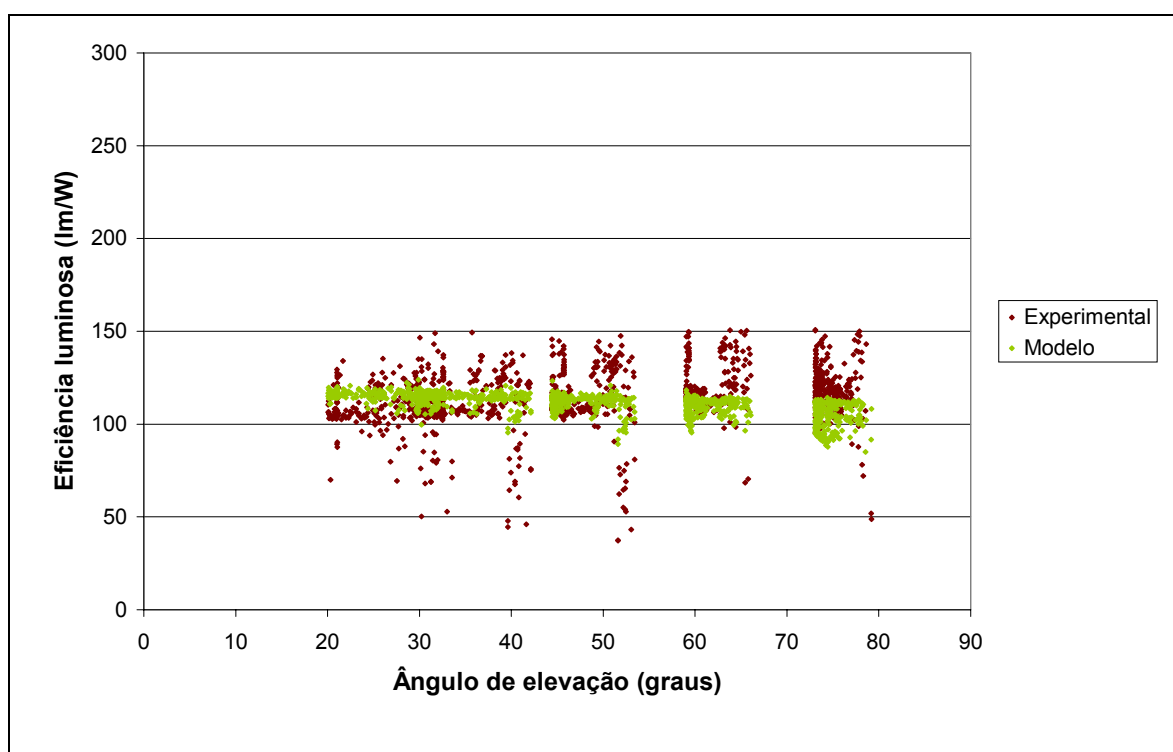


Figura 4.29 - Eficiência luminosa prevista pelo modelo de Perez original para Recife

A Figura 4.30 mostra o comportamento da eficiência luminosa em Pesqueira no período de setembro de 2004 a setembro de 2005, prevista pelo modelo. O desvio médio e o desvio médio quadrático para este caso foram respectivamente 3% e 9,7%.

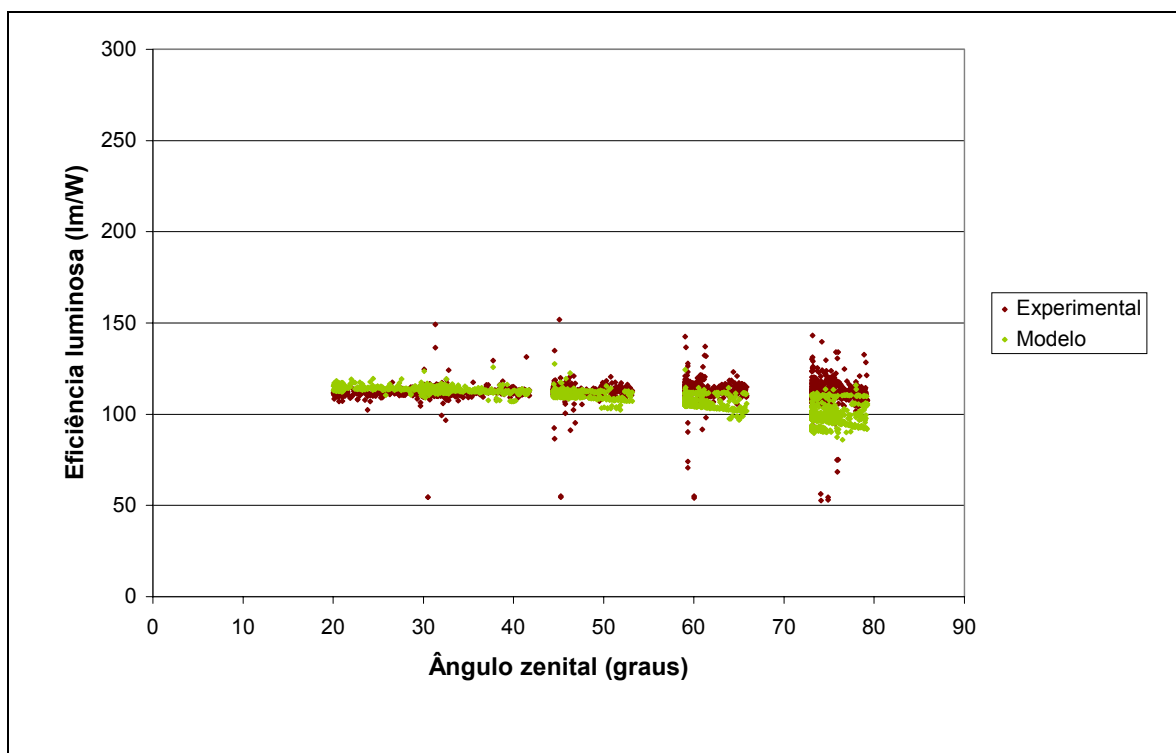


Figura 4.30 - Eficiência luminosa prevista pelo modelo de Perez original para Pesqueira

#### 4.2.2.2 Modelo de Perez local

Para aperfeiçoar o modelo de Perez original e torná-lo mais representado para o local, foi realizada uma regressão múltipla da eficiência luminosa sobre a quantidade de água precipitável  $W$ , o cosseno do ângulo zenital  $z$  e o logaritmo da opacidade  $\Delta$ .

A regressão múltipla para a cidade de Recife resultou na seguinte expressão:

$$\frac{E}{I} = 119,4 - 0,95 \cdot W - 16,99 \cdot \cos(z) - 9,53 \cdot \ln(\Delta) \quad (36)$$

O modelo foi gerado a partir de dados experimentais compreendidos entre março de 2003 a junho de 2004. A Figura 4.31 mostra a eficiência luminosa em Recife em função do ângulo elevação prevista pelo modelo (em verde) e os pontos experimentais de julho de 2004 a março de 2005 (em marrom). O desvio médio e o desvio médio quadrático referente a este período foram, respectivamente, 5,2% e 11,4%.

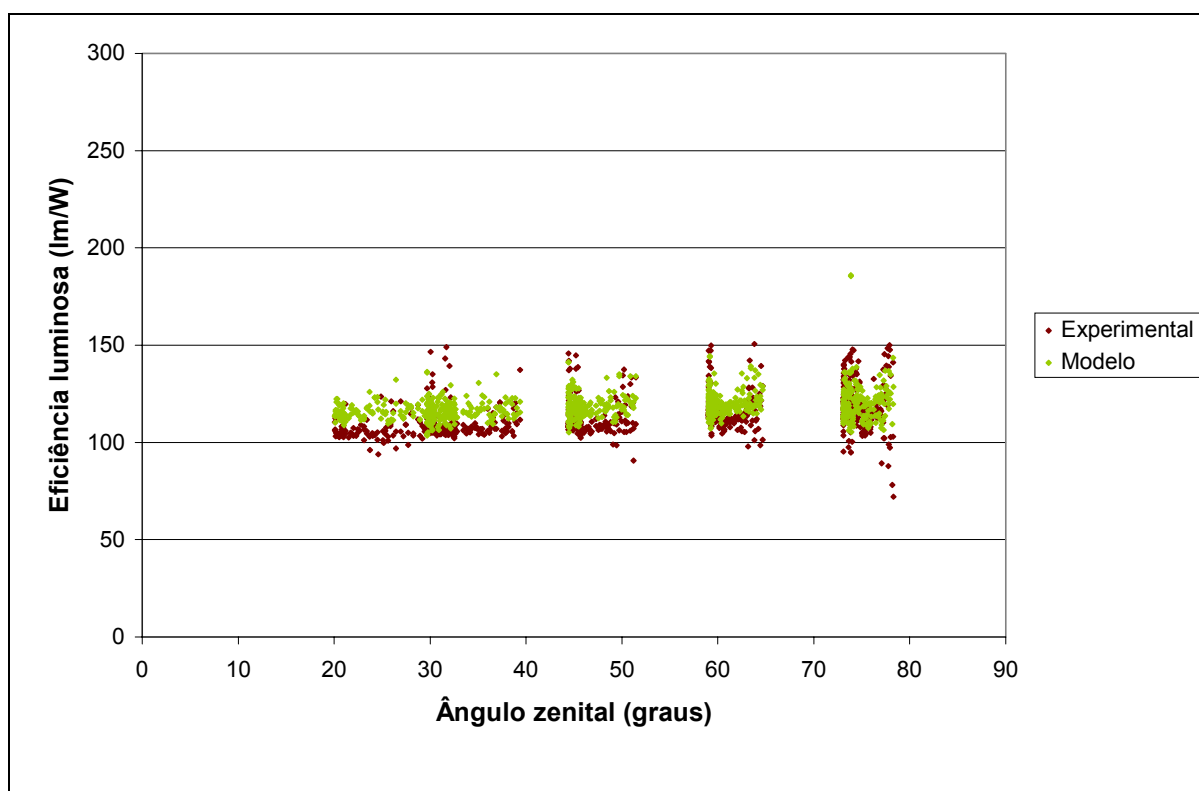


Figura 4.31 - Eficiência luminosa prevista pelo modelo de Perez local para Recife

A regressão múltipla para a cidade de Pesqueira resultou na seguinte expressão:

$$\frac{E}{I} = 111,53 + 0,25 \cdot W + 2,11 \cdot \cos(z) + 1,30 \cdot \ln(\Delta) \quad (37)$$

O modelo foi gerado a partir de dados experimentais compreendidos entre setembro de 2004 a dezembro de 2004. A Figura 4.32 mostra a eficiência luminosa em função do ângulo elevação prevista pelo modelo (em verde) e os pontos experimentais de janeiro de 2005 a maio de 2005 (em marrom), em Pesqueira. O desvio médio e o desvio médio quadrático referente a este período foram, respectivamente, 0,1% e 3%.

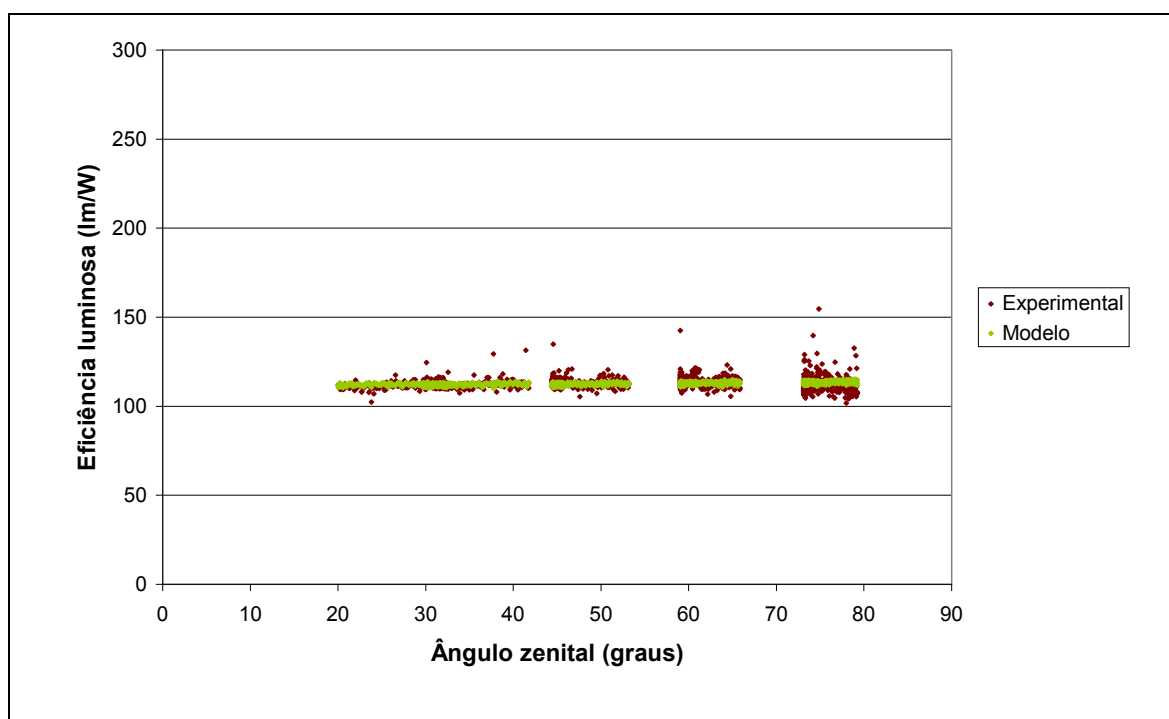


Figura 4.32 - Eficiência luminosa prevista pelo modelo de Perez local para Pesqueira

### 4.2.3 Modelo de Alados

Foi feita uma regressão múltipla da eficiência luminosa,  $E/I$ , sobre os parâmetros da equação citada no item 4.2.3:

$$\frac{E}{I} = A + B \cdot \ln(\varepsilon) + C \cdot \ln(\Delta) + D \cdot T_d + E \cdot \sin^2(\alpha) \quad (38)$$

Para as cidades de Recife e Pesqueira, os modelos resultantes foram aqueles representados pelas equações (39) e (40), respectivamente:

$$\frac{E}{I} = 124,73 - 11,47 \cdot \ln(\varepsilon) - 20,46 \cdot \ln(\Delta) - 0,48 \cdot T_d - 26,7 \cdot \sin^2(\alpha) \quad (39)$$

$$\frac{E}{I} = 116,63 - 5,21 \cdot \ln(\varepsilon) - 7,41 \cdot \ln(\Delta) - 0,2 \cdot T_d - 9,17 \cdot \sin^2(\alpha) \quad (40)$$

As Figuras 4.33 e 4.34 mostram o comportamento dos modelos em relação aos dados experimentais de Recife e Pesqueira, respectivamente. Os períodos considerados foram os mesmos utilizados para o modelo de Perez local. Os desvios médios e médios quadráticos da eficiência luminosa foram 3,4% e 10,4% para Recife e 0,8% e 3,1% para Pesqueira.

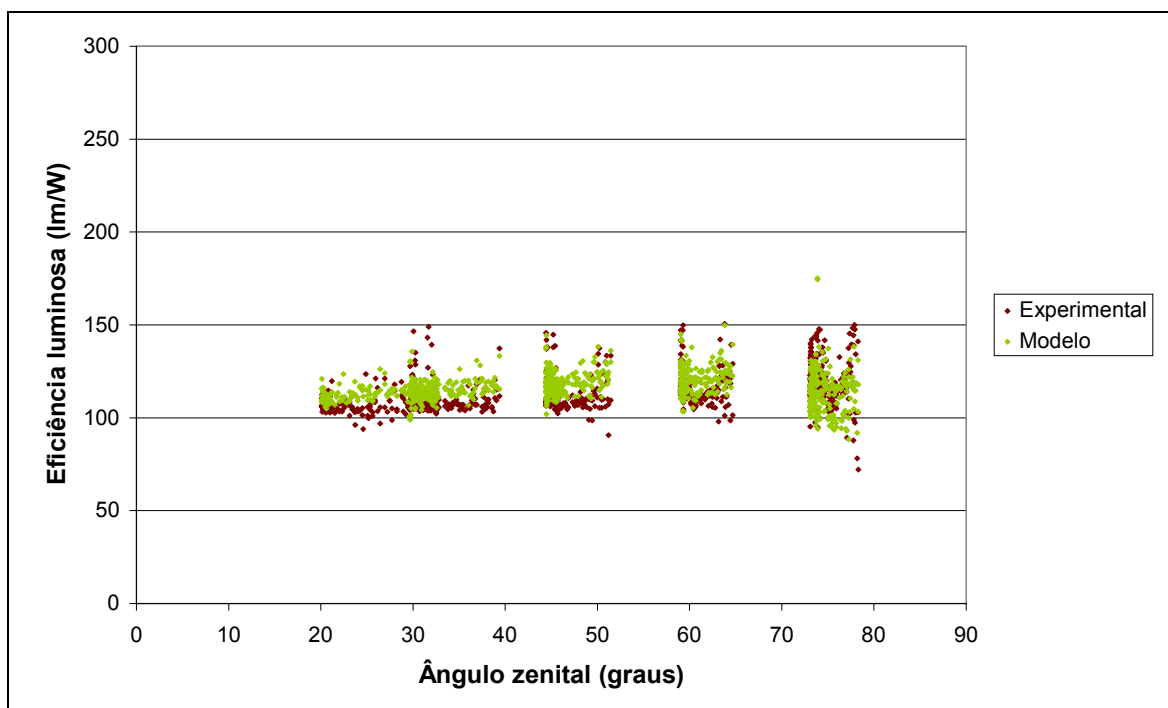


Figura 4.33 - Eficiência luminosa prevista pelo modelo de Alados para Recife

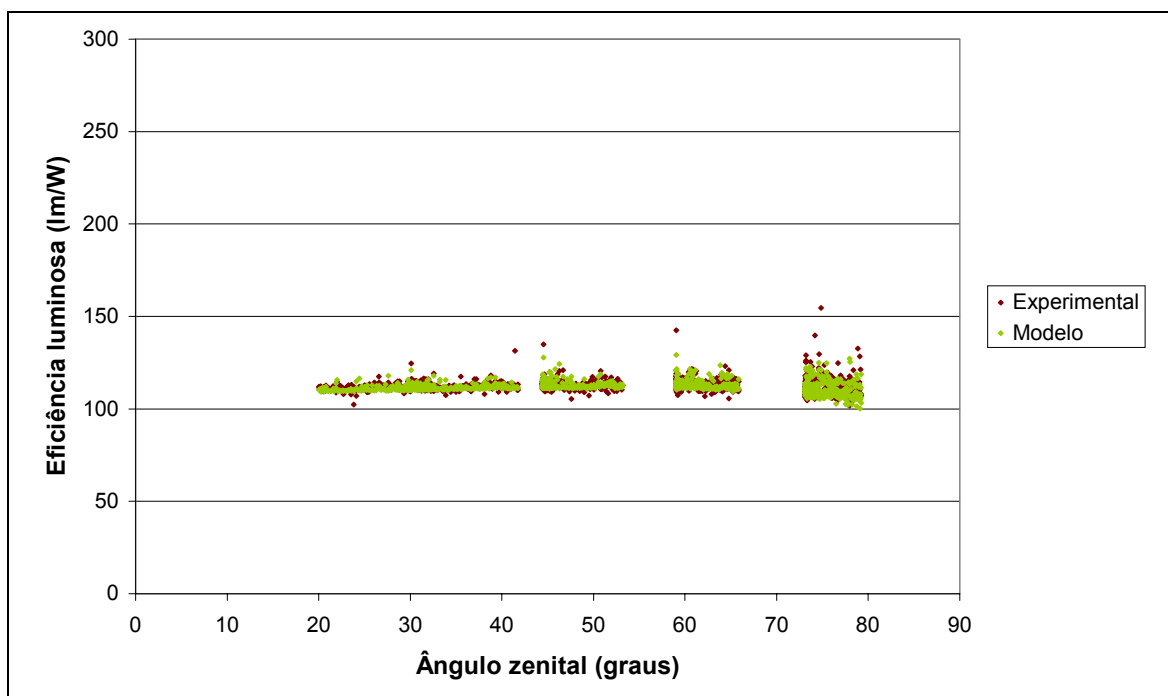


Figura 4.34 - Eficiência luminosa prevista pelo modelo de Alados para Pesqueira

Finalmente, a Tabela 5 apresenta, de forma resumida e comparativa, todos os modelos aplicados, as localidades em estudo e seus respectivos erros. A partir da análise de tais informações, pode-se concluir que os melhores modelos para a estimação da eficiência luminosa foram os de Alados e Perez local.

Tabela 5 - Erro médio e médio quadrático, conforme localização e modelo aplicado

| <b>Modelo</b>  | <b>Recife</b> |            | <b>Pesqueira</b> |            |
|----------------|---------------|------------|------------------|------------|
|                | <b>DM</b>     | <b>DMQ</b> | <b>DM</b>        | <b>DMQ</b> |
| Perez original | -1%           | 16%        | 3%               | 10%        |
| Perez local    | 5%            | 11%        | 0%               | 3%         |
| Alados         | 3%            | 10%        | 1%               | 3%         |
| Robledo        | -7%           | 16%        | 4%               | 14%        |

## 5. CONCLUSÕES

O resultado da avaliação dos registros das medidas de iluminância e irradiação solar confirma o ótimo potencial da utilização da iluminação natural em Pernambuco. Os valores de iluminância são suficientemente altos, de maneira que poderiam suprir sozinhos a necessidade de iluminação diurna de um escritório comercial durante 80% das horas anuais de seu funcionamento.

A comparação dos modelos de eficiência luminosa mostrou que os modelos de Perez local e de Alados são os melhores para as localidades de Recife e Pesqueira. Além disto, cabe considerar que estas estimativas estão dentro dos erros experimentais, na medida em que os sensores de iluminância e de irradiação solar que foram utilizados possuem um erro de calibração de 5% e uma deriva anual máxima de 2% e que, portanto, as medidas experimentais das eficiências luminosas estariam com um erro associado da ordem de 10 a 12% .

A modelagem e a validação dos modelos abordados neste trabalho permitem sua utilização imediata na geração de dados de iluminância para outros 19 locais do estado de Pernambuco, onde existam dados de irradiação solar.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALADOS, I.; FOYO-MORENO, I.; ALADOS-ARBOLETAS, L. (1995) Photosynthetically active radiation: measurements and modelling, *Agricultural and Forest Meteorology*, N°. 78, pp121 - 131.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT – CB03). Iluminância de interiores; projeto 03:340.02-001, Rio de Janeiro, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT – CB02). Iluminação natural; projeto 02:135.02-001, Rio de Janeiro, 1999.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 2005. Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2005. 188p.

CHANDRA, M., (1996) Luminous efficacy of solar radiation and evaluation of natural illumination – A Review, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol. 37, No. 11, pp. 1623-1634.

CHIRARATTANANON SURAPENG, (2001) Daylight Availability for Bangkok, A Technical Report, ISBN 974-8208-31-1, Asian Institute of Technology, Thailand.

ERBS, D.; KLEIN, S.; DUFFIE, J. (1982) Estimation of the diffuse radiation fraction for hourly, daily and monthly-average global radiation, *Solar Energy*, Vol. 28, pp. 293 – 302.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Fontes normais climatológicas (1961-1990); Ministério da Agricultura e Reforma Agrária, Departamento Nacional de Meteorologia, 1992

LAM, J. C. and LI, D. H., (1999) An analysis of daylighting and solar heat for cooling dominated office buildings, *Solar Energy*, Vol. 64, No. 4, pp. 251-262.

LAM, J. C. (1995) Luminous efficacy of daylight under different sky conditions, *Energy Convers. Mgmt.*, Vol.37, No. 12, pp 1703 – 1711.

NE'EMAN ELIYAHA, (1998) Daylight availability database for energy efficient integration with electric light, *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Summer 59.

PAROSCIENTIFIC, Inc. (2004). Met3A calculation of dew point, [www.paroscientific.com/dewpoint.htm](http://www.paroscientific.com/dewpoint.htm) (Acessado 14/10/05).

PEREZ, R.; SEALS, R.; MICHALSKY, J. (1993) All-weather model for sky luminance distribution-preliminary configuration and validation, *Solar Energy*, Vol. 50, No. 3, pp. 235 - 245.

ROBLEDO, L. and SOLER, A. (2001) Luminous efficacy of direct solar radiation for all sky types, *Energy* Vol.26, pp.669 – 677.

ROBLEDO, L. and SOLER, A. (2000) Luminous efficacy of direct solar radiation for all sky types, *Energy* Vol.25, pp.689 – 701.

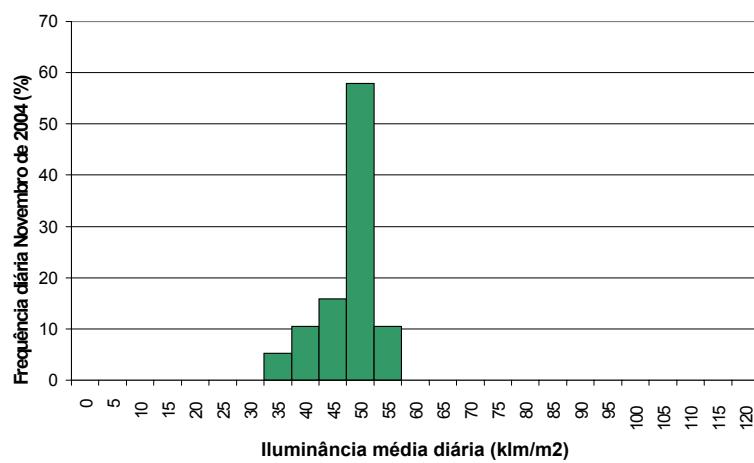
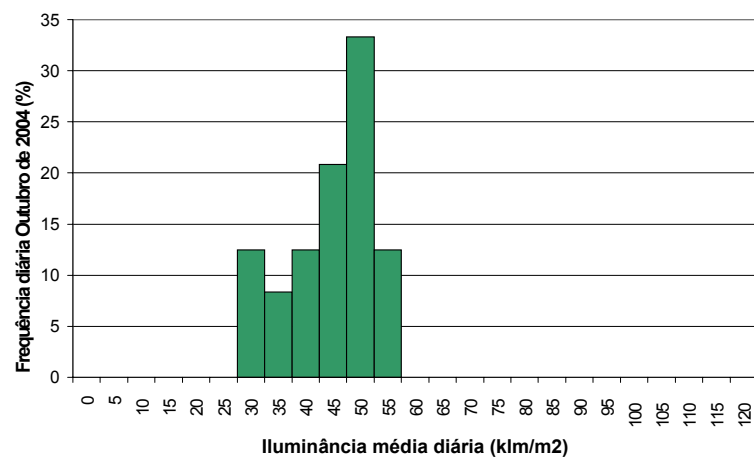
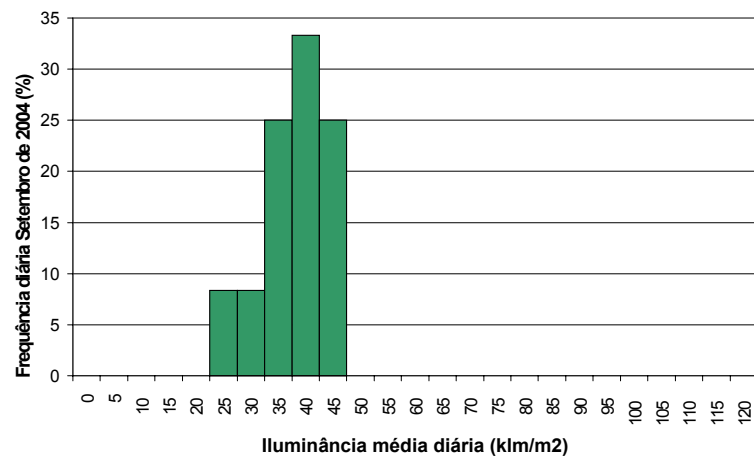
SOUZA, R; ROBLEDO, L; SOLER, A; PEREIRA, F. (2004) Clear sky and all sky direct luminous efficacies for Florianópolis, Brasil, *Energy* Vol 46, N° 3, pp.361 – 371.

TIBA, C.; FRAINDENRAICH, N.; GROSSI, H.; LYRA, F. (2001) *Atlas Solarimétrico do Brasil*, Editora Universitária da UFPE, ISBN 8573151420.

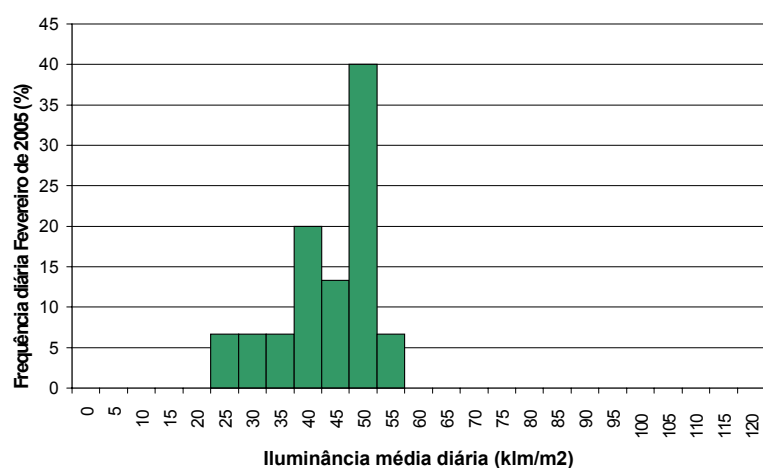
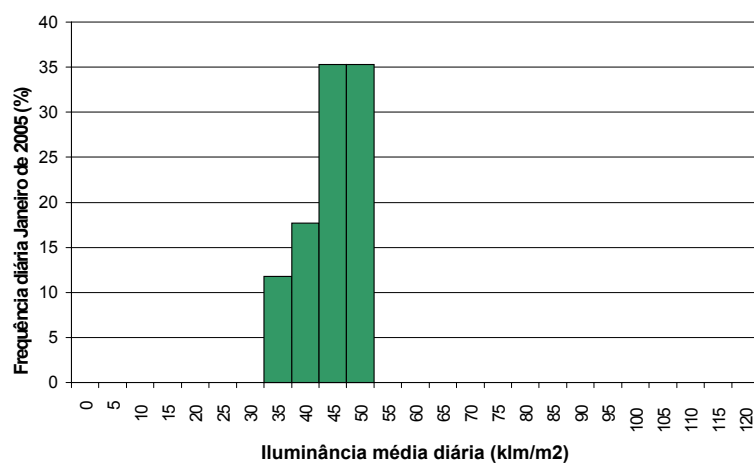
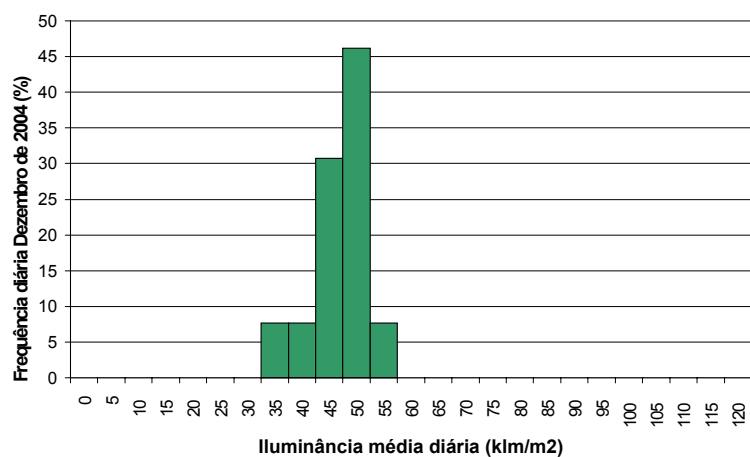
TIBA, C.; LEAL, S.; BARBOSA, E.; MELO, R. (2004) Luminous efficacy of solar radiation for the northeast of Brazil, *World Renewable Energy Congress VIII*. Denver.

## ANEXO I

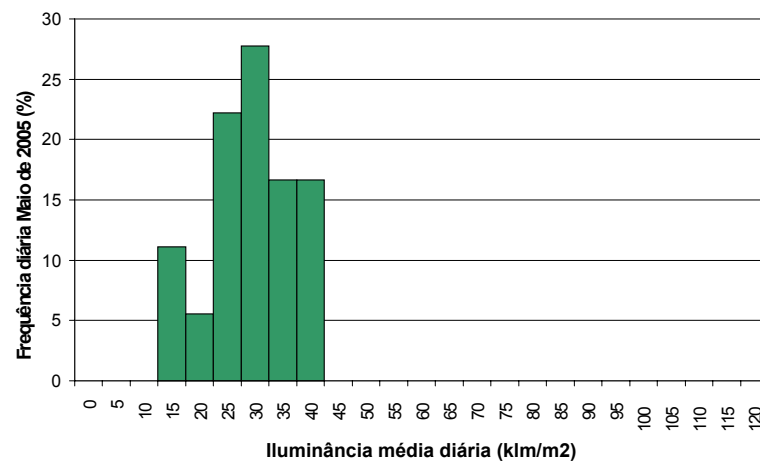
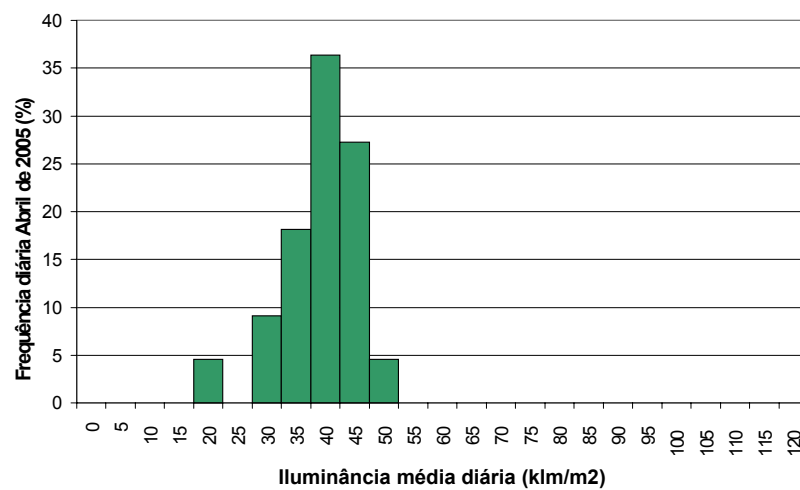
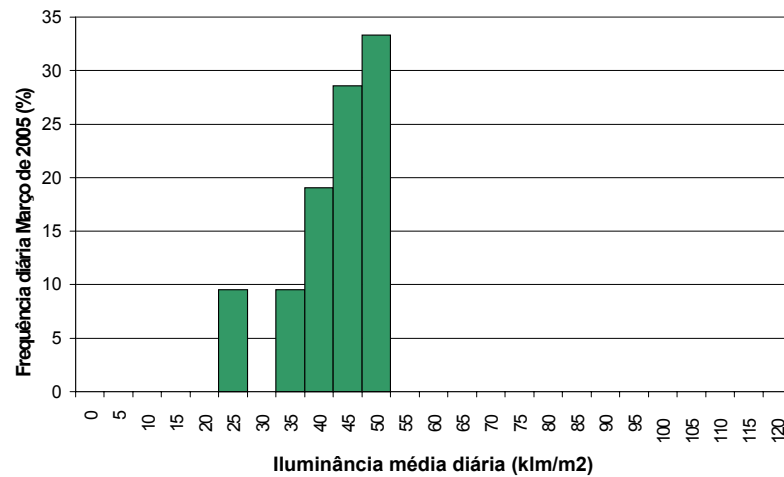
Gráficos da frequência para a iluminância média diária para cidade de Recife, de setembro 2004 a novembro de 2004



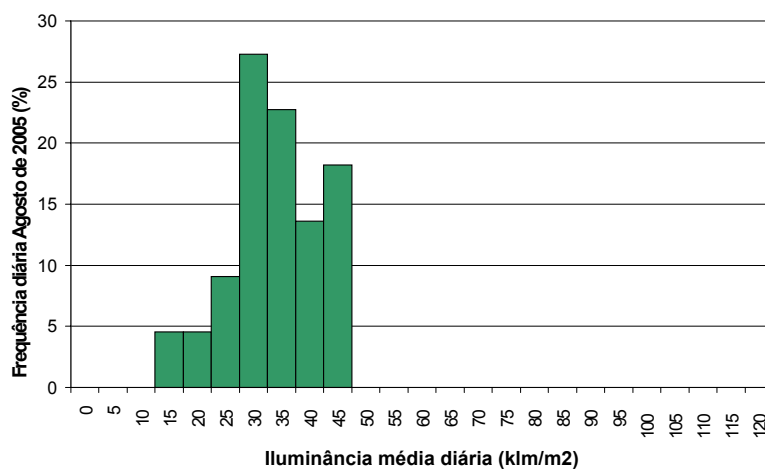
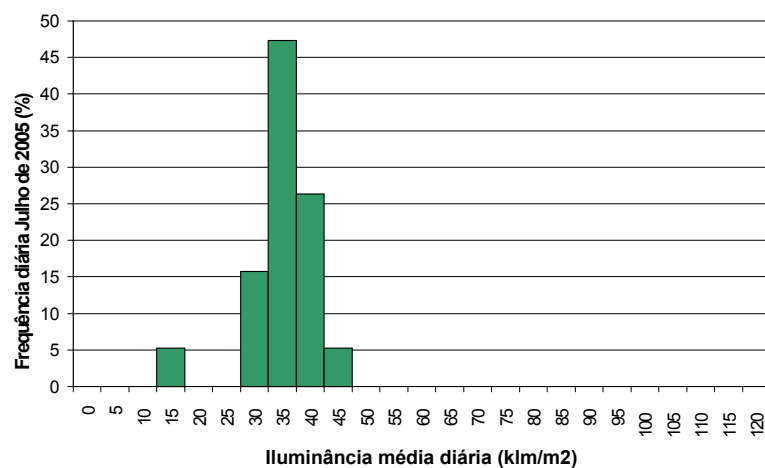
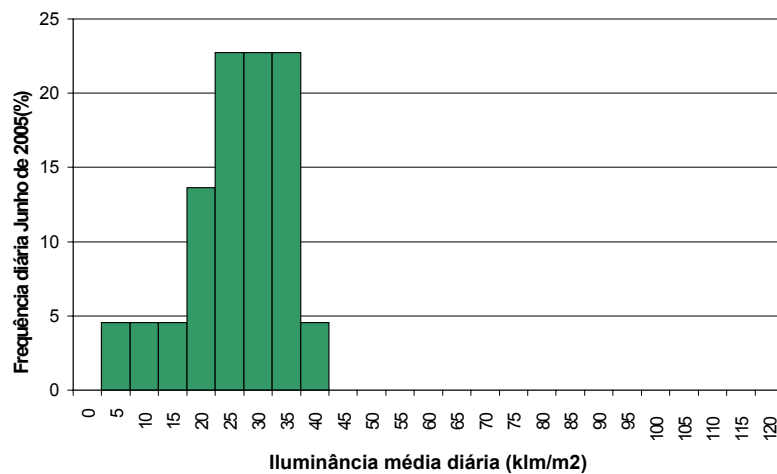
Gráficos da frequência para a iluminância média diária para cidade de Recife, de dezembro de 2004 a fevereiro de 2005



Gráficos da frequência para a iluminância média diária para cidade de Recife, de março 2005 a maio de 2005

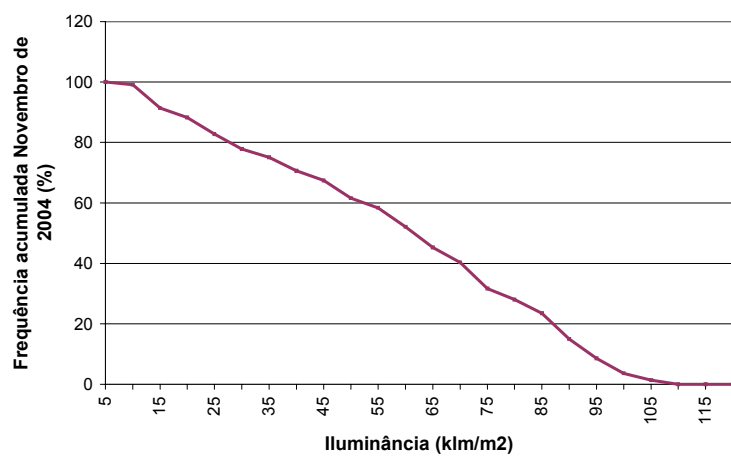
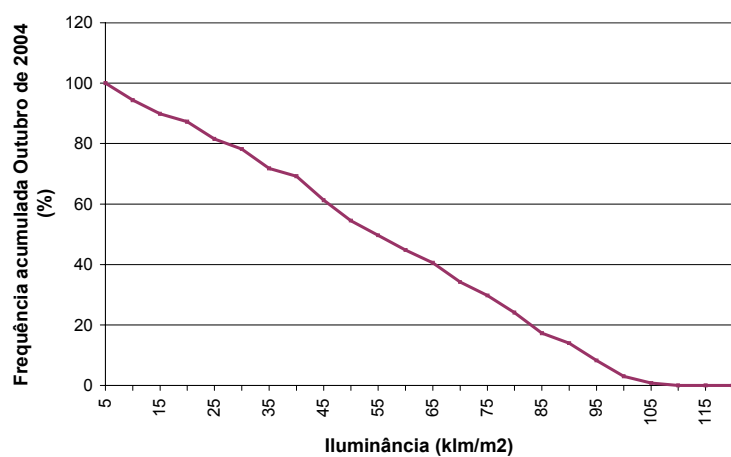
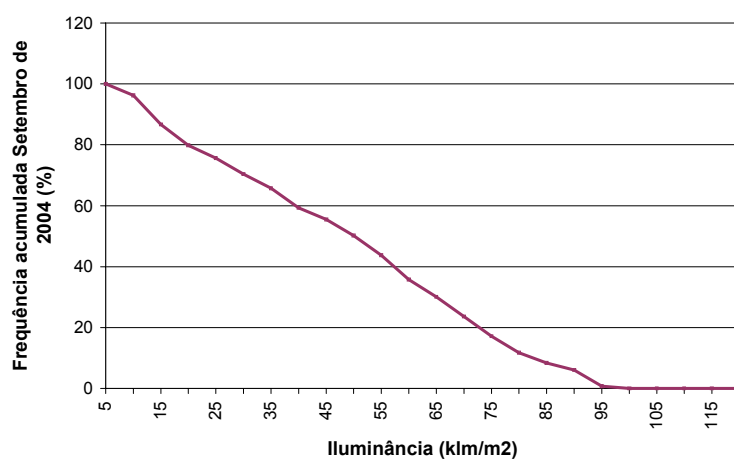


Gráficos da frequência para a iluminância média diária para cidade de Recife, de junho 2005 a agosto de 2005

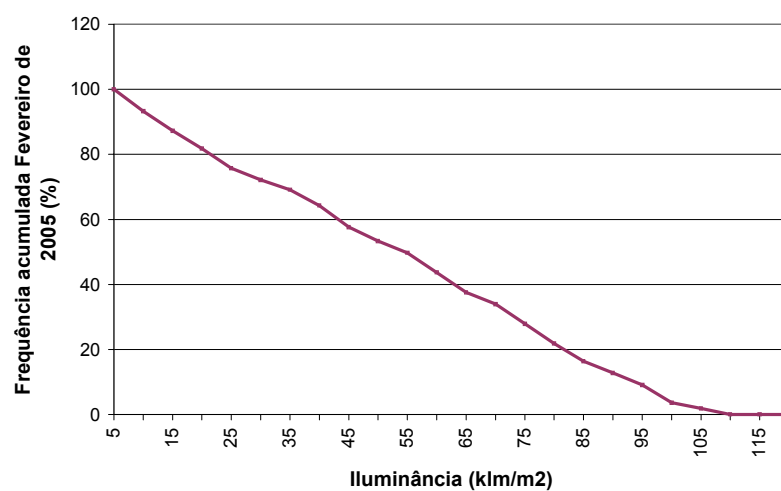
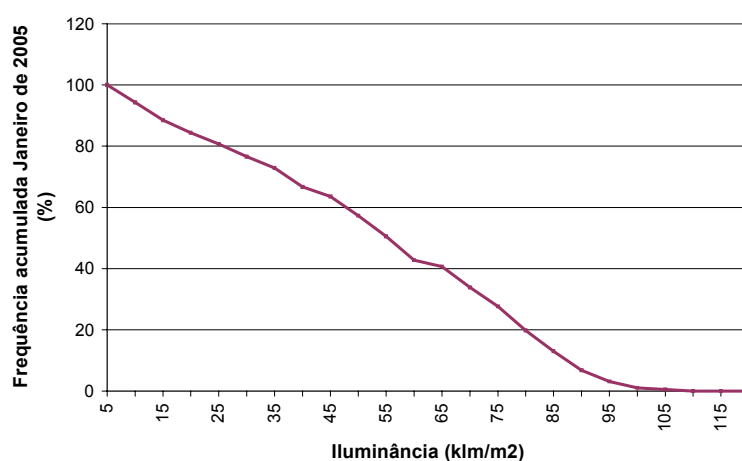
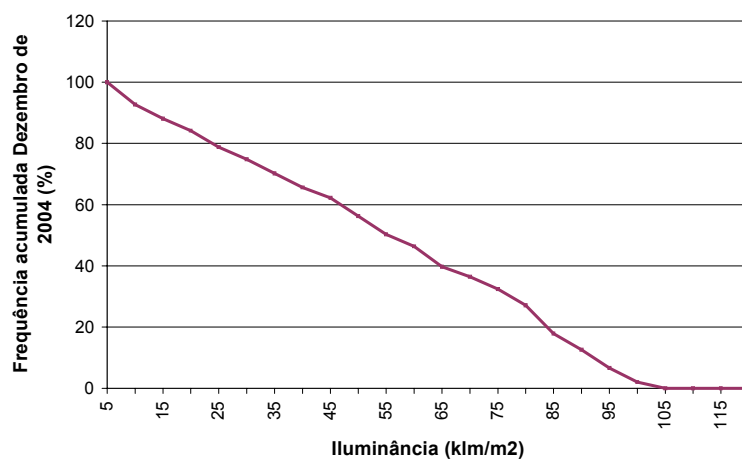


## ANEXO II

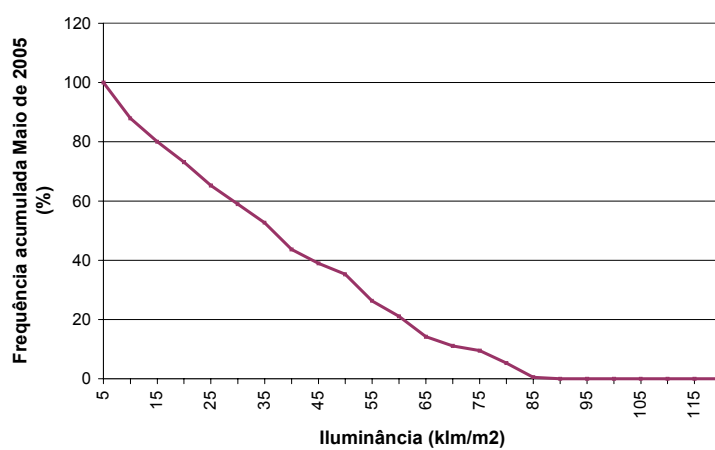
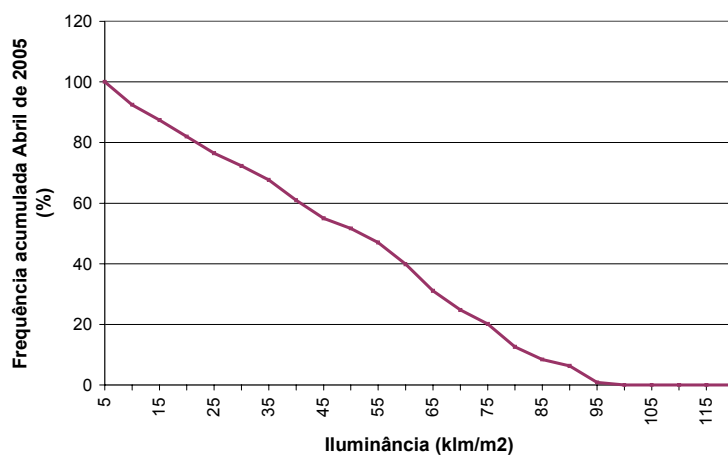
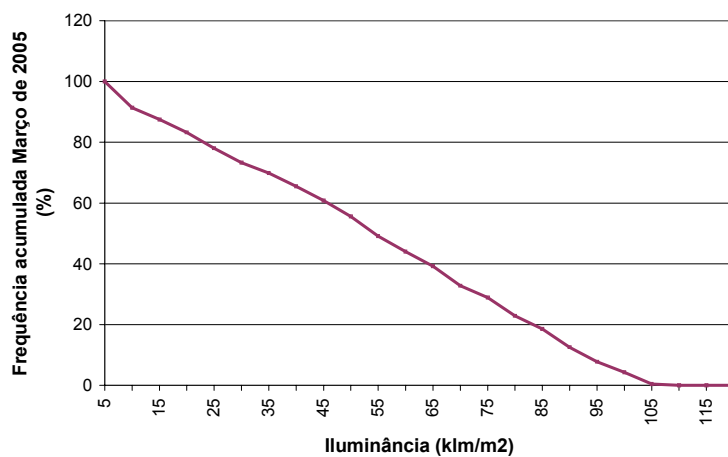
Gráficos da distribuição acumulada para a iluminância média horária para cidade de Recife, de setembro 2004 a novembro de 2004



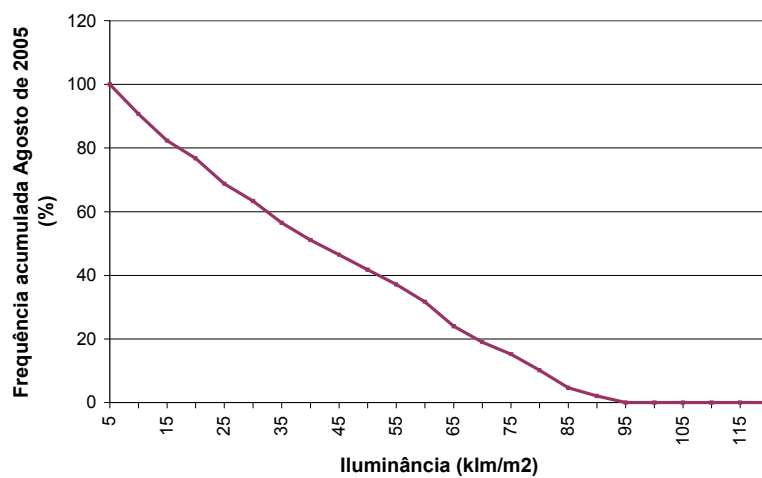
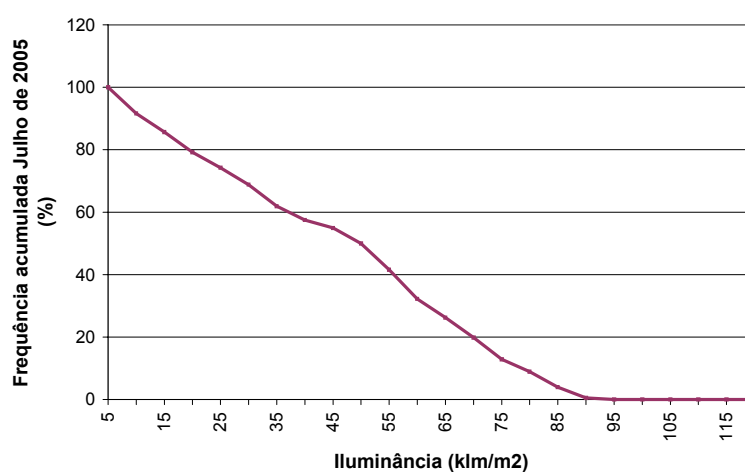
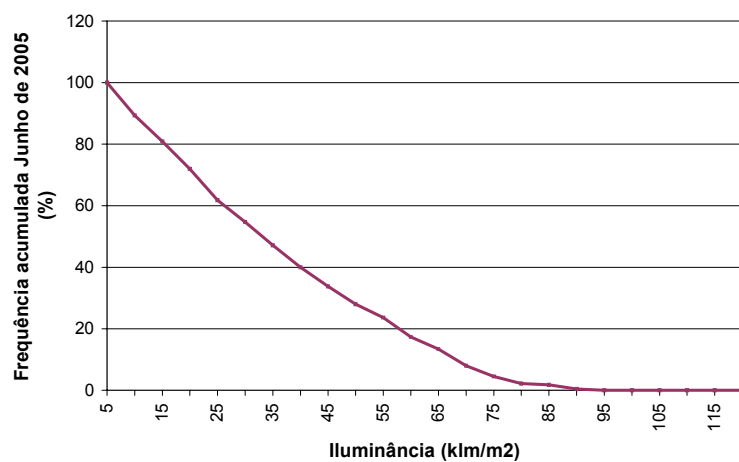
Gráficos da distribuição acumulada para a iluminância média horária para cidade de Recife, de dezembro 2004 a fevereiro de 2005



Gráficos da distribuição acumulada para a iluminância média horária para cidade de Recife, de março 2005 a maio de 2005

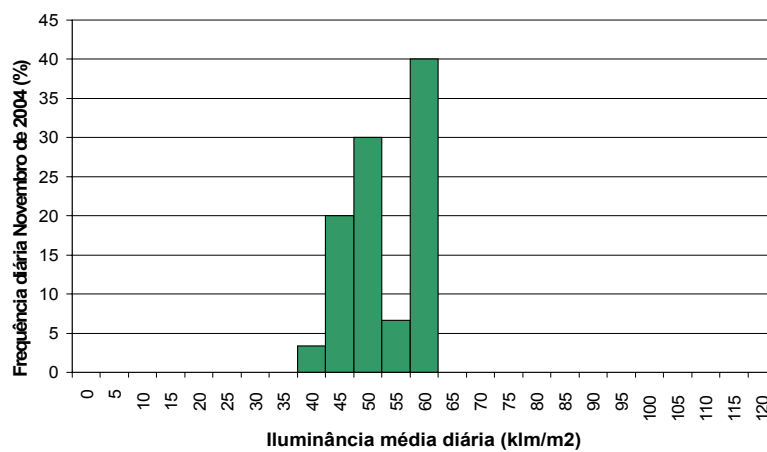
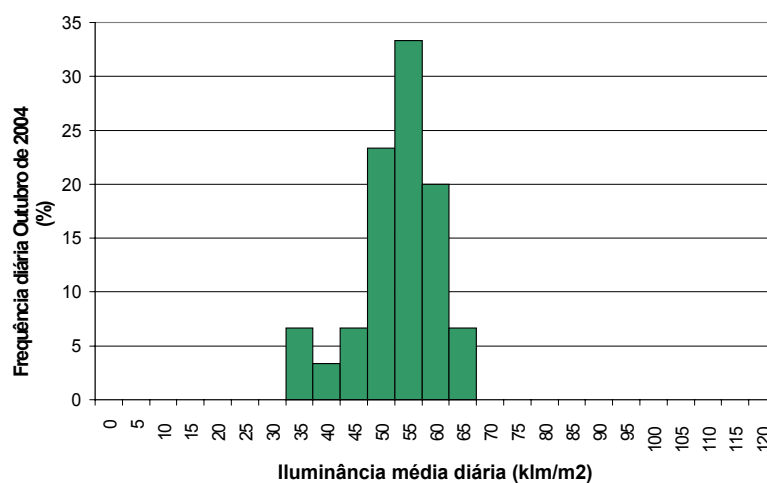
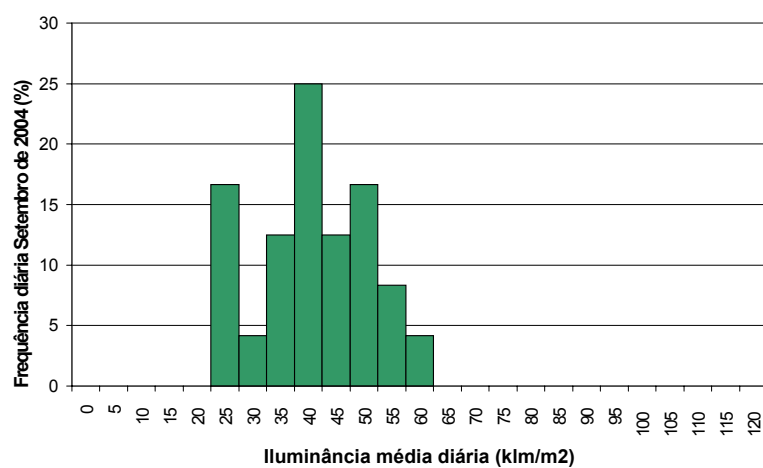


Gráficos da distribuição acumulada para a iluminância média horária para cidade de Recife, de junho 2005 a agosto de 2005

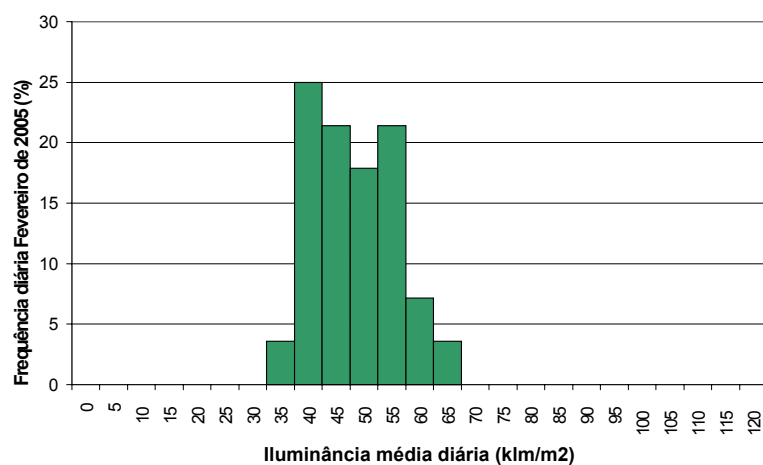
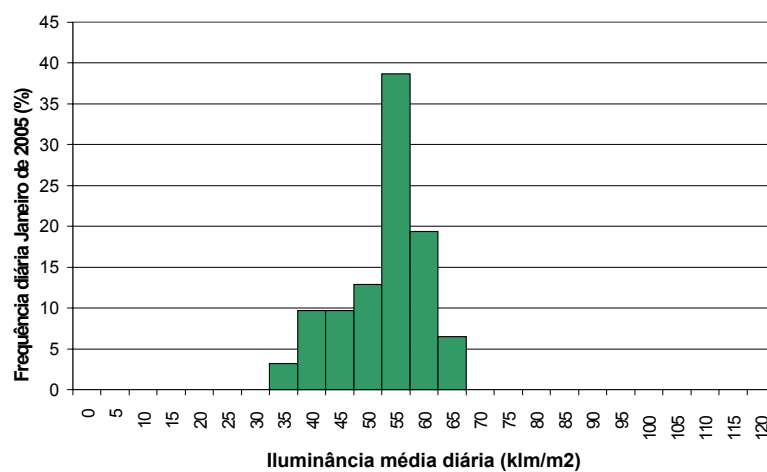
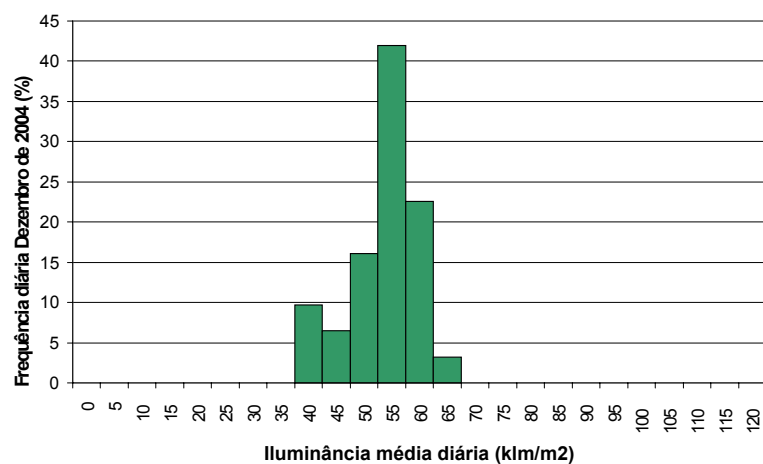


### ANEXO III

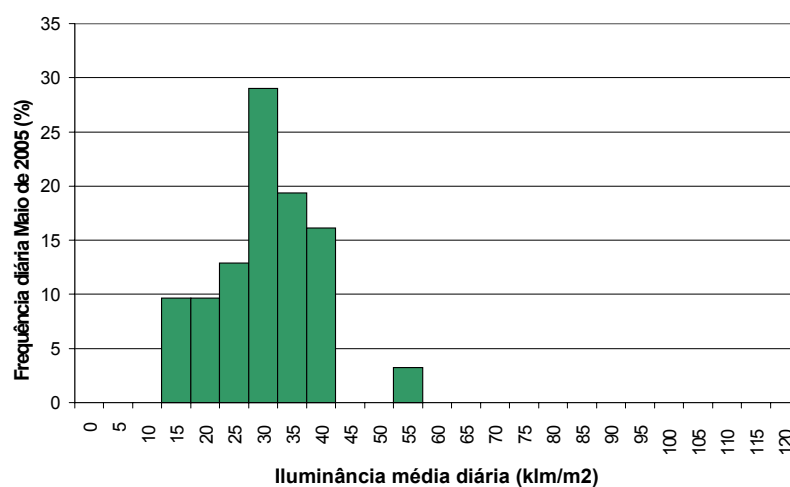
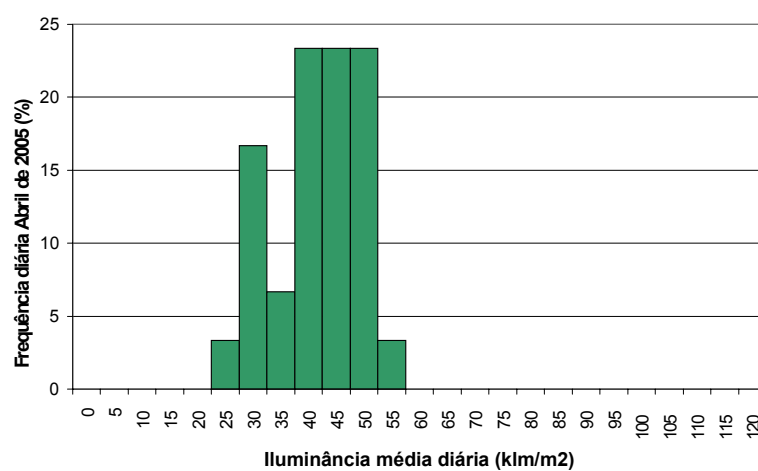
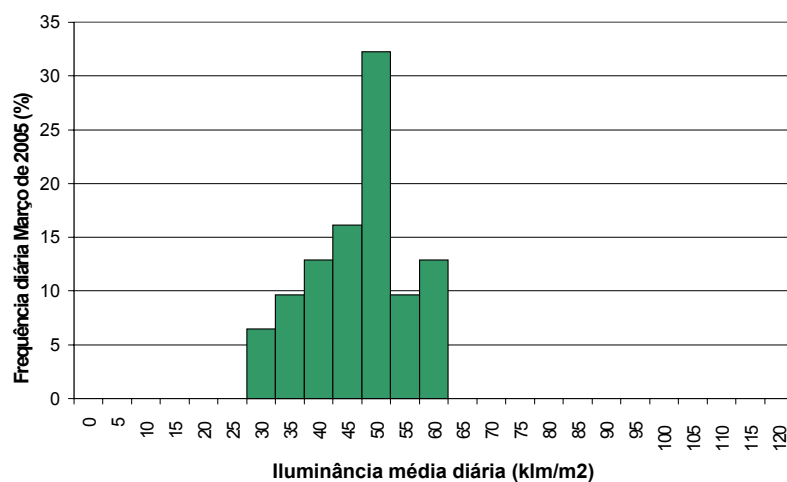
Gráficos da frequência para a iluminância média diária para cidade de Pesqueira, de setembro 2004 a novembro de 2004



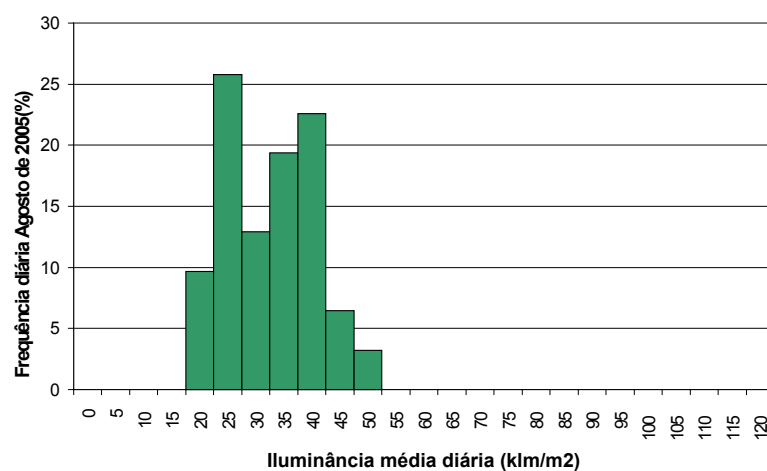
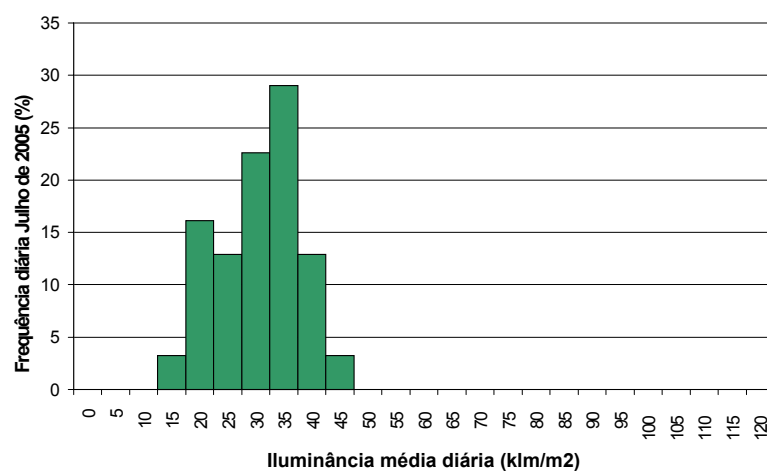
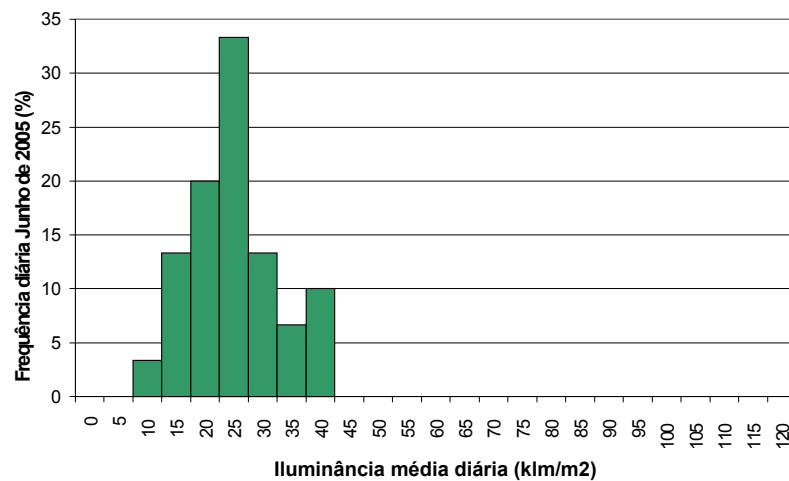
Gráficos da frequência para a iluminância média diária para cidade de Pesqueira, de dezembro 2004 a fevereiro de 2005



Gráficos da frequência para a iluminância média diária para cidade de Pesqueira, de março de 2005 a agosto de 2005

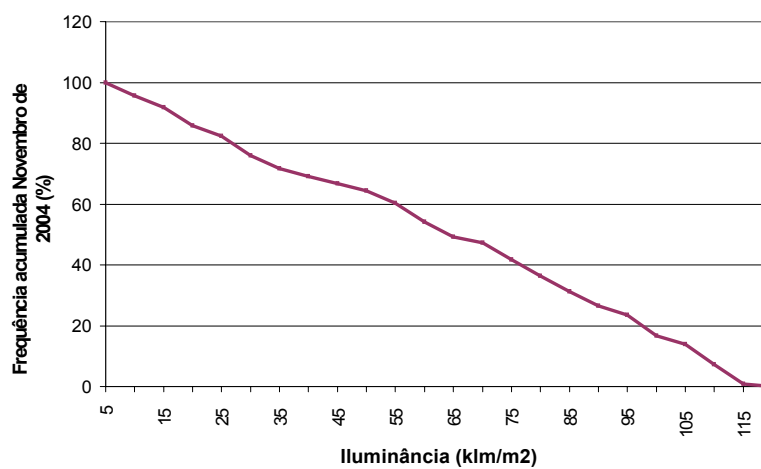
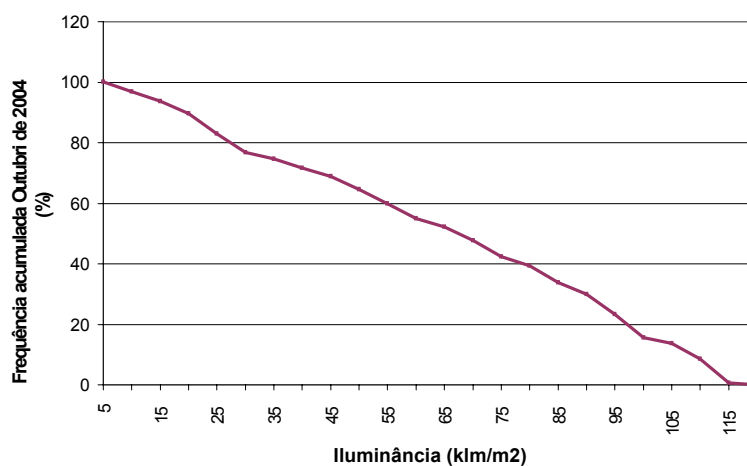
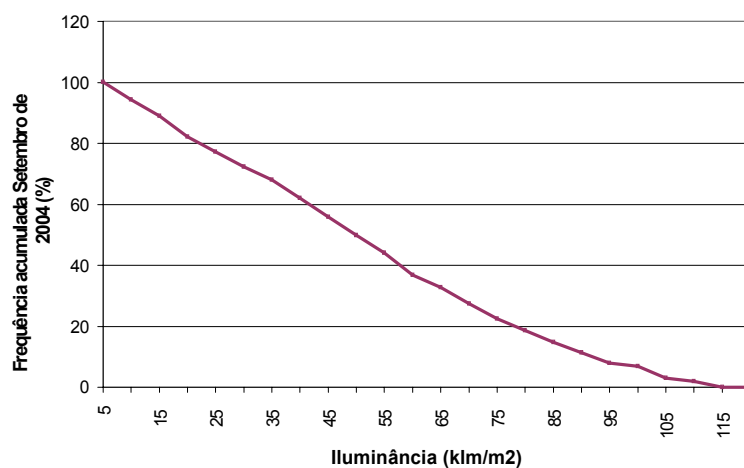


Gráficos da frequência para a iluminância média diária para cidade de Pesqueira, de junho de 2005 a agosto de 2005

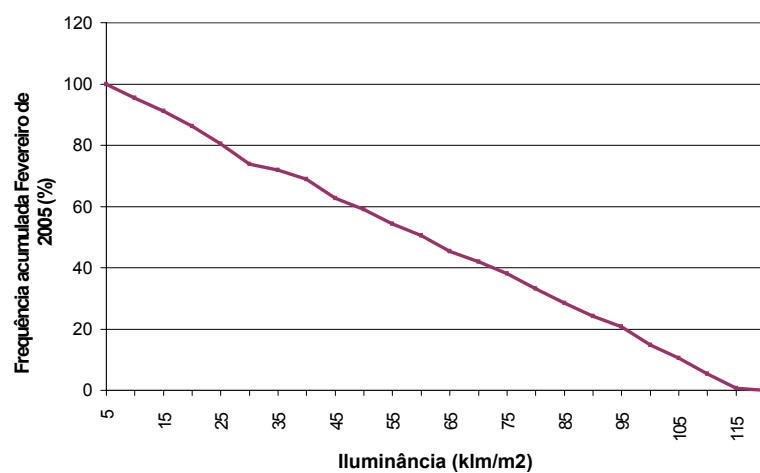
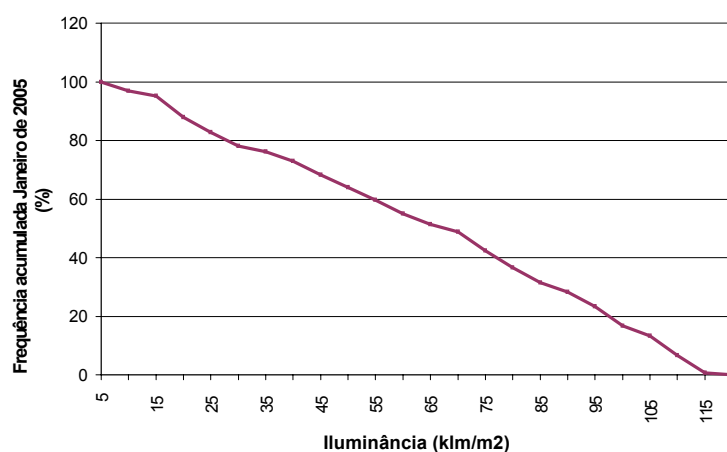
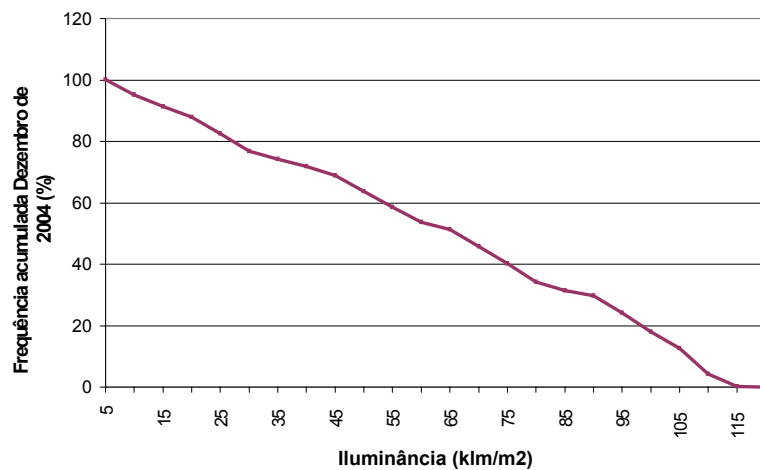


## ANEXO IV

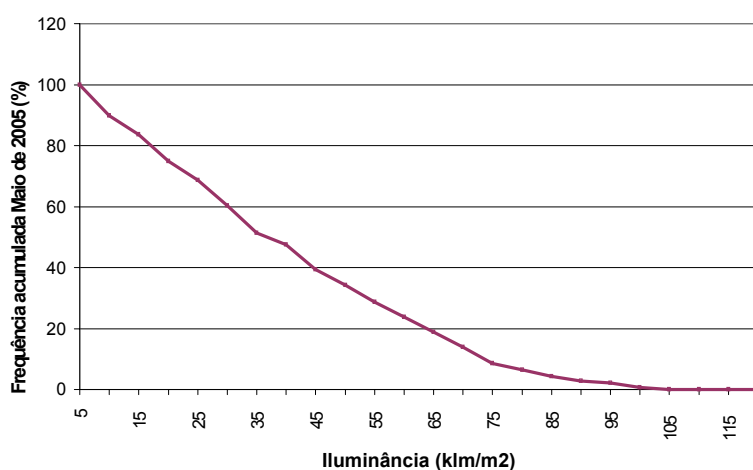
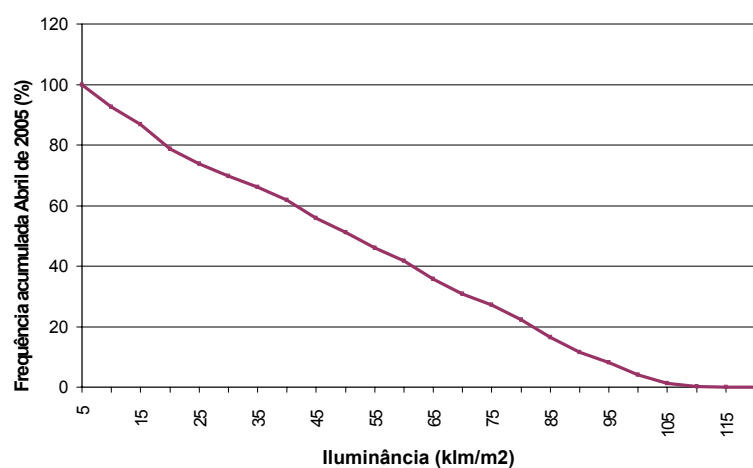
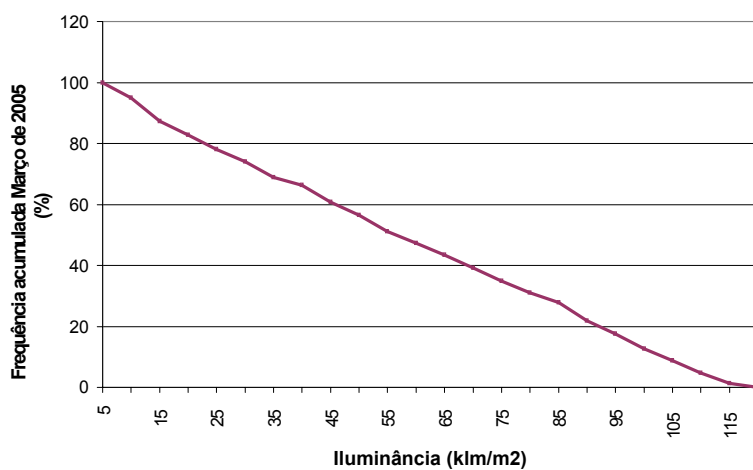
Gráficos da distribuição acumulada para a iluminância média horária para cidade de Pesqueira, de setembro 2004 a novembro de 2004



Gráficos da distribuição acumulada para a iluminância média horária para cidade de Pesqueira, de dezembro 2004 a fevereiro de 2005



Gráficos da distribuição acumulada para a iluminância média horária para cidade de Pesqueira, de março de 2005 a maio de 2005



Gráficos da distribuição acumulada para a iluminância média horária para cidade de Pesqueira, de junho de 2005 a agosto de 2005

