PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES
PROTEN - DEN / UFPE

Nº 58
TESE DE
DOUTORADO

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM TELHADOS - APLICAÇÃO AO CAMPUS DA UFPE

AUTOR: **Elielza Moura de Souza Barbosa**

RECIFE-PERNAMBUCO-BRASIL
ABRIL-2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
Av. Prof. Luiz Freire, 1000 - Cidade Universitária
CEP 50740-540 - Recife - PE - Brasil

Editora Universitária UFPE

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS-CTG
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR – DEN

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES - PROTEN

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM TELHADOS - APLICAÇÃO AO CAMPUS DA UFPE

ELIELZA MOURA DE SOUZA BARBOSA

RECIFE-PERNAMBUCO-BRASIL
ABRIL-2009

ELIELZA MOURA DE SOUZA BARBOSA

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM TELHADOS - APLICAÇÃO AO CAMPUS DA UFPE

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, do Departamento de Energia Nuclear, da Universidade Federal de Pernambuco, para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Fontes Renováveis de Energia

ORIENTADOR: PROF. DR. FERNANDO ROBERTO DE ANDRADE LIMA

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. OSVALDO SOLIANO PEREIRA

RECIFE - ABRIL – 2009

B238m Barbosa, Elielza Moura de Souza.

Metodologia de avaliação do potencial de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em telhados: aplicação ao campus da UFPE / Elielza Moura de Souza Barbosa. - Recife: O Autor, 2009.

108 folhas., il., gráfs., tabs.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, 2009.

Inclui referências e anexos.

1.Fontes Renováveis de Energia. 2.Sistemas Fotovoltaicos. 3. Redes de Energia - Telhados. I. Título.

UFPE

621.042 CDD (22. ed.) BCTG/2009-238

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM TELHADOS – APLICAÇÃO AO CAMPUS DA UFPE

Elielza Moura de Souza Barbosa

APROVADA EM: 02.04.2009

ORIENTADOR: Prof. Dr. Fernando Roberto de Andrade Lima
CO-ORIENTADOR: Prof. Dr. Osvaldo Soliano Pereira

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Fernando Roberto de Andrade Lima – CRCN-NE/CNEN

Prof. Dr. Chigueru Tiba – DEN/UFPE

Prof. Dr. Rajendra Narain – DEN/UFPE

Profa. Dra. Ana Lúcia Bezerra Candeias – DECART/UFPE

Prof. Dr. Alcides Codeceira Neto – UPE e CHESF

Visto e permitida a impressão

Coordenador do PROTEN/DEN/UFPE

Jader e Elza, Igor e Luiza.

Caminhos de continuação

Expressões da minha natureza

Dedico

"O valor das coisas não está no tempo que elas duram,
mas na intensidade com que acontecem.
Por isso, existem momentos inesquecíveis,
coisas inexplicáveis e pessoas incomparáveis. "
Fernando Pessoa.

No decorrer dessa caminhada encontrei com muitas pessoas incomparáveis: Fernando Andrade Lima, amigo e professor orientador, ambiente de acolhida e apoio fundamental; Osvaldo Soliano companheiro das energias renováveis e professor co-orientador; Ana Lucia, Brayner e Tiba, comitê de acompanhamento sempre com críticas e sugestões proveitosas; Naum, mestre na ampliação dos meus horizontes do nuclear ao solar, Olga, Jane, Marcelo, Rinaldo, Aguiar e Eric, colegas de trabalho e amigos do Grupo FAE, possibilidades de troca de idéias nem sempre concordantes, mas sempre enriquecedoras; Luiz e Diego representantes dos meus alunos/amigos, inigualáveis no atendimento às demandas na montagem dos experimentos; Meus irmãos de pai e mãe e de vida, minha família expandida, núcleo permanente de construção; Maria do Carmo e Rosinha, orientações especiais no trilhar dos caminhos de transformação dos meus rabiscos em arte final.

Meu Muito Obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

NOMENCLATURA

RESUMO

ABSTRACT

Capítulo 1 INTRODUÇÃO. **1**

Capítulo 2 MARCOS DE REFERÊNCIA-TÉCNICOS E INTERDISCIPLINARES **8**

2.1 Concepção da aplicação tecnológica de geração fotovoltaica interligada à rede..... 9

2.2 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil..... 14

2.3 Aspectos relacionados à tecnologia das células solares..... 18

2.4 Aspectos relacionados á emissão de gases de efeito estufa..... 19

2.5 Aspectos relacionados ao mercado fotovoltaico..... 21

2.6 Aspectos relacionados à avaliação de desempenho de SFCR.. 28

2.7 Aspectos relacionados à avaliação de potenciais de SFCR..... 30

Capítulo 3 DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA. **32**

3.1 Ambiente Físico..... 33

3.2 Ambiente Técnico..... 35

3.2.1 Procedimentos de avaliação técnica de SFCR..... 35

3.2.2 Estudo Experimental-Desempenho técnico do sistema-teste SFCR UFPE III.....

3.2.2-1 Descrição e operação do SFCRUFPE III..... 40

3.2.2-2 Resultados experimentais do SFCR-UFPE III..... 44

3.3 Ambiente Geográfico..... 52

3.3.1 Procedimentos de referências para estimativas de área de telhados para SFCR..... 53

3.3.2 Procedimento proposto para estimativa do NLC e área útil de cobertura..... 56

3.4 Ambiente Econômico..... 63

3.5 Ambiente Analítico..... 68

3.5.1 O SIG em fontes renováveis..... 68

Capítulo 4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA O CAMPUS DA UFPE. 71

4.1 Caracterização da UFPE..... 71

4.2 Estimativa da área útil de telhados do Campus UFPE para SFCR..... 74

4.2.1 Campus UFPE-Estimativas dos Fatores de: Disponibilidade (F_d), Ocupação (F_o), Posição (F_p) e Sombras (F_s)..... 75

4.3 Avaliação da produção de energia elétrica..... 87

4.4 Considerações sobre o ambiente econômico..... 91

4.5 Resultados dentro do Ambiente Analítico..... 95

4.6 Resultados: SIG-UFPE/SFCR..... 98

Capítulo 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES 101

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 104

APÊNDICE -A1 - DADOS DE ENTRADA PARA O SIG/UFPE/SFCR A1

Tabela Tab-SIG/UFPE/SFCR e ilustrações por setor de edificações analisadas.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1	Esquema ilustrativo da metodologia desenvolvida.....	4
Figura 2	Esquema ilustrativo da aplicação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.....	9
Figura 3	Ilustração de central fotovoltaica: Central de Serpa-Portugal.....	11
Figura 4	Ilustrações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.....	13
Figura 5	Vistas de SFCR instalados e em operação pelo Grupo FAE/UFPE	17
Figura 6	Evolução do preço de módulos fotovoltaicos em função das vendas acumuladas a partir do ano 1975.....	22
Figura 7	Evolução do mercado fotovoltaico por segmento de aplicação.....	23
Figura 8	Evolução da aplicação de FV conectado à rede: a) Capacidade mundial de 1995 a 2007. Valores existentes acumulados; b) Evolução por ano das vendas direcionadas a FV conectados à rede.	22
Figura 9	Composição de custos de sistemas fotovoltaicos conectados à rede -Programa FV em Edificações da Florida.....	25
Figura 10	Custos de eletricidade solar nos Estados Unidos-Índices norteadores.....	28
Figura 11	Diagrama de bloco: Metodologia de avaliação do potencial de telhados solares.....	34
Figura 12	SFCR-UFPE III: a)Vista do sistema; b) configuração do arranjo FV; c) diagrama de fluxo.....	42
Figura 13	SFCR UFPE III: a)Energias: radiação incidente no plano FV, gerada, produzida e consumida; Eficiências do gerador, do inversor e do sistema, valores como médias diárias mensais e anuais; b) Frequências normalizadas dos valores das médias diárias das energias incidente, gerada e produzida.....	45
Figura 14	SFCR UFPE III: Efeito da irradiação na temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos.....	46
Figura 15	SFCR UFPE III: Balanço energético para o mês de janeiro /2008...	48
Figura 16	SFRC UFPE III: Freqüência normalizada dos valores médios diários a) Produtividades de referência, do arranjo e final do sistema; b) (PR) - Fator de Desempenho.....	50
Figura 17	Exemplos ilustrativos do Fator Visão do Céu e da relação área/volume para alguns sítios na Grécia e na Itália.....	55
Figura 18	a) Valor do Fator K para o cálculo da distância (d) necessária à situação de não-sombras entre fileiras de módulos FV; b) Perda na radiação coletada por não alinhamento ao Norte Geográfico.....	58

Figura 19	Tarifa de Energia Elétrica no Brasil - Comparação Mundial.....	65
Figura 20	Campus UFPE: a) Vista geral; b) Mapa de ocupação.....	72
Figura 21	Campus UFPE: a) Evolução do consumo de energia elétrica.....	74
Figura 22	Campus UFPE-Mapa de ocupação por divisão em setores.....	75
Figura 23	Campus UFPE: Radiação incidente em função do ângulo de inclinação do plano coletor.....	75
Figura 24	Imagens de áreas de cobertura de telhados: tonalidades diversificadas e homogêneas.....	
Figura 25	Campus UFPE: Ilustrações de áreas de telhados com indicação dos valores dos Fatores de Ocupação, Posição e Sombra.....	74
Figura 26	Campus UFPE: Ilustrações de sombras pela dinâmica do crescimento urbano. Região da Biblioteca Central em diferentes épocas.....	82
Figura 27	Campus UFPE: Mapa de ocupação por classificação das alturas das edificações.....	83
Figura 28	Campus UFPE: Ocorrência de sombreamento por proximidade entre edificações (F_s<1).....	84
Figura 29	Campus UFPE/Recife: Radiação incidente em um plano inclinado de 23^0 faceando o Norte: Base de Dados: Atlas do Brasil, INMET e NASA.	89
Figura 30	Balanço de energias e energia específica para o SFCR-Padrão.....	90
Figura 31	Campus UFPE: Mapa demonstrativo das edificações com telhados não aplicáveis à instalação de SFCR no Campus da UFPE.....	99
Figura 32	Campus UFPE: Mapa de classificação das edificações pelo Nível de Luz do Céu de seus telhados.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil.....	16
Tabela 2	Propriedades das células comerciais.	19
Tabela 3	Preços de equipamento de SFCR no mercado a varejo: EU, EUA e Brasil.....	26
Tabela 4	Expressões para a determinação dos parâmetros de desempenho de SFCR.	39
Tabela 5	SFCR-UFPE III: Composição e características técnicas do sistema; Parâmetros e/ou grandezas monitorados e unidades de medição.	43
Tabela 6	SFCR UFPE III: Balanço anual: energias e índices operacionais..	52
Tabela 7	Valores para o Fator de Sombras: Hemisfério Sul (?=10^0).....	58
Tabela 8	Classificação do Fator Nível de Luz de Céu.....	61
Tabela 9	Características físicas de módulos fotovoltaicos.....	62
Tabela 10	Tarifa de Energia Elétrica - Comparação Mundial.....	64
Tabela 11	Campus UFPE/Recife. Fator Nível de Luz do Céu de edificações-exemplo.....	85
Tabela 12	Campus UFPE/Recife. Área total do telhado e Área Útil para SFCR de edificações-exemplo.....	87
Tabela 13	Campus UFPE/Recife. Radiação no plano horizontal (?=-8,03)...	88
Tabela 14	Campus UFPE/Recife Energia produzida e área útil para SFCR em telhados de edificações-exemplo.....	91
Tabela 15	Composição de custos de um SFCR de 10 m^2, 1,3 kWp (p-Si), instalado a 23^0N na Cidade do Recife ($8,03^0$S) e NLC=1.....	92
Tabela 16	Resultados consolidados por Setor da Tab-SIG/UFPE/SFCR. Dados de entrada para o SIG-UFPE/SFGR.....	97

NOMENCLATURA

A	Área [m^2].
A_a	Área do arranjo fotovoltaico/gerador fotovoltaico [m^2].
A_d	Área disponível [m^2].
A_t	Área total da cobertura/telhado da edificação [m^2].
A_u	Área útil, livre para o arranjo fotovoltaico [m^2].
E	Energia [kWh].
E_a	Energia total solar produzida pelo sistema [kWh].
$\overline{E}_{a,h}$	Energia total solar produzida pelo sistema, média horária [kWh/h].
$\overline{E}_{a,d}$	Energia total solar produzida pelo sistema, média horária diária [kWh/d].
$\overline{E}_{a,m}$	Energia total solar produzida pelo sistema, média horária diária mensal [kWh/m].
$\overline{E}_{a,a}$	Energia total solar produzida pelo sistema, média horária diária mensal anual [kWh/a].
$\overline{E}_{col,d}$	Energia solar coletada pelo gerador fotovoltaico, média horária diária [kWh/d].
$\overline{E}_{col,d}$	Energia solar coletada pelo gerador fotovoltaico, média horária diária mensal [kWh/d].
$\overline{E}_{col,d}$	Energia solar coletada pelo gerador fotovoltaico, média horária diária mensal anual [kWh/d].
$\overline{E}_{fv,d}$	Energia solar gerada pelo gerador média horária diária [kWh/d].
$\overline{E}_{fv,m}$	Energia solar gerada pelo gerador média horária diária mensal [kWh/d].
$\overline{E}_{fv,a}$	Energia solar gerada pelo gerador média horária diária mensal anual [kWh/d].
$\overline{E}_{c,d}$	Energia elétrica total consumida pela demanda, média horária diária [kWh/d].
$\overline{E}_{c,m}$	Energia elétrica total consumida pela demanda, média horária mensal [kWh/d].
$\overline{E}_{c,a}$	Energia elétrica total consumida pela demanda, média horária anual [kWh/d].
$\overline{E}_{csol,d}$	Energia elétrica solar consumida pela demanda, média horária diária [kWh/d].
$\overline{E}_{csol,m}$	Energia elétrica solar consumida pela demanda, média horária mensal [kWh/d].
$\overline{E}_{csol,a}$	Energia elétrica solar consumida pela demanda, média horária anual [kWh/d].
$\overline{E}_{csed,d}$	Energia elétrica consumida da rede pela demanda, média horária diária [kWh/d].
$\overline{E}_{cred,m}$	Energia elétrica consumida da rede pela demanda, média horária diária mensal [kWh/d].
$\overline{E}_{cred,a}$	Energia elétrica consumida da rede pela demanda, média horária diária mensal anual [kWh/d].
$\overline{E}_{inj,d}$	Energia elétrica solar injetada na rede, média horária diária [kWh/d].
$\overline{E}_{inj,m}$	Energia elétrica solar injetada na rede, média horária diária mensal [kWh/d].
$\overline{E}_{inj,a}$	Energia elétrica solar injetada na rede, média horária diária mensal anual [kWh/d].
EE	Energia Específica [kWh/m^2].
F_d	Fator de Disponibilidade.
F_o	Fator de Ocupação.
F_p	Fator de Posição.
F_s	Fator de Sombra.
FV	Fotovoltaico
h_h	Irradiação no plano horizontal

h_{fv}	Irradiação no plano do gerador fotovoltaico.
H_{stc}	Radiação solar em condições stand de testes [1 kW/m^2].
H_o	Radiação solar total diária em um plano horizontal [kWhd/m^2].
$H_{fv,d}$	Radiação solar total diária no plano do arranjo fotovoltaico [kWhd/m^2].
I_{fv}	Irradiação solar instantânea no plano do arranjo fotovoltaico [kW/m^2].
L	Perda elétrica [kWh/kW.d].
$L_{s,a}$	Perda elétrica anual no sistema [kWh/kW.d]..
$L_{c,a}$	Perda de energia anual na captação da radiação [kWh/kW.d].
P	Potência elétrica [kW].
$P_{o,fv}$	Potência nominal do arranjo fotovoltaico [kWp].
$P_{o,inv}$	Potência nominal do inversor [kVA].
P_{max}	Potência do arranjo fotovoltaico no ponto de máxima potência [kWp].
PMP	Ponto de Máxima Potência
PR	Rendimento global do sistema (*Peformance Ratio*).
$\overline{PR}_d$	Rendimento global do sistema, médio diário.
$\overline{PR}_m$	Rendimento global do sistema, médio mensal.
$\overline{PR}_a$	Rendimento global do sistema, médio anual.
T	Temperatura [^{0}C].
T_{amb}	Temperatura ambiente [^{0}C].
T_{fv}	Temperatura de operação no gerador fotovoltaico [^{0}C]
$\overline{h}_{fv,d}$	Eficiência do gerador fotovoltaico, média diária [%].
$\overline{h}_{fv,m}$	Eficiência do gerador fotovoltaico, média horária diária mensal [%].
$\overline{h}_{fv,a}$	Eficiência do gerador fotovoltaico, média diária mensal anual [%].
$\overline{h}_{inv,d}$	Eficiência do inversor, média horária diária [%].
$\overline{h}_{inv,m}$	Eficiência do inversor, média horária diária mensal [%].
$\overline{h}_{inv,a}$	Eficiência do inversor, média horária diária mensal anual [%].
$\overline{h}_{s,d}$	Eficiência do sistema, média horária diária [%].
$\overline{h}_{s,m}$	Eficiência do sistema, média horária diária mensal [%].
$\overline{h}_{s,a}$	Eficiência do sistema, média horária diária mensal anual [%].
$\overline{Y}_{r,d}$	Produtividade de referência, media horária diária [kWh/kWd ou h/d].
$\overline{Y}_{r,m}$	Produtividade de referência, media horária diária mensal [kWh/kWd ou h/d].
$\overline{Y}_{r,a}$	Produtividade de referência, media horária diária mensal anual [kWh/kWd ou h/d].
$\overline{Y}_{a,d}$	Produtividade do arranjo FV, media horária diária [kWh/kWd ou h/d].
$\overline{Y}_{a,m}$	Produtividade do arranjo FV, media horária diária mensal [kWh/kWd ou h/d].
$\overline{Y}_{a,a}$	Produtividade do arranjo FV, media horária diária mensal anual [kWh/kWd ou h/d].
$\overline{Y}_{f,d}$	Produtividade final do sistema, media horária diária [kWh/kWd ou h/d].
$\overline{Y}_{f,m}$	Produtividade final do sistema, media horária diária mensal [kWh/kWd ou h/d]
$\overline{Y}_{f,a}$	Produtividade final do sistema, media horária diária mensal anual [kWh/kWd ou h/d]

ABREVIAÇÕES E SIGLAS

AA	Ambiente Analítico.
AE	Ambiente Econômico.
AF	Ambiente Físico.
AG	Ambiente Geográfico.
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica.
AT	Ambiente Técnico.
BOS	Refere-se a despesas de manutenção (*BALANCE OF SYSTEM*).
CA	Corrente Contínua
CC	Corrente Alternada.
CTG	Centro de Tecnologia e Geociências.
DML	Desenvolvimento de Mecanismos Limpos.
EFCR	Edificações Fotovoltaicas Conectadas à Rede.
EPA	Associação Fotovoltaica Européia. (*European Photovoltaic Association*)
FDI	Fator de Dimensionamento do Inversor.
FVC	Fator de Visão do Céu.
GEE	Gases de Efeito Estufa.
GIS	Sistema de Informação Geográfica (*Geographic Information System*)
GWP	Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potential*)
HC	Hospital das Clínicas.
IEA	Agencia Internacional de Energia (*International Energy Agency*)
LDN	Laboratório de Dispositivos e Nano-estruturas.
NLC	Nível de Luz do Céu.
NTI	Núcleo de Tecnologia da Informação.
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento.
PROINFA	Programa de Incentivo as Fontes Alternativas.
PV-GIS	*Photovoltaic Geographic Information System.*
RE	Energias Renováveis.
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede.
SFCR-B	Sistema Fotovoltaico com Bateria Conectado à Rede.
SIG	Sistema de Informação Geográfica (*Geographical Information System*).
STC	Condições Stand de Testes.
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco.

ÍNDICES E SÍMBOLOS

amb.	Ambiente.
fv	Gerador fotovoltaico.
inv.	Inversor.
s	Sistema.
a	Ano / anual.
d	Dia / diária.
h	Hora/ horária.
m	Mês / mensal.
?	Eficiência
Y	Produtividade
ß	Ângulo de Inclinação do Plano do arranjo fotovoltaico
?	Latitude

METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE EM TELHADOS - APLICAÇÃO AO CAMPUS DA UFPE

Autora: Elielza Moura de Souza Barbosa

Orientador: Prof. Dr. Fernando Roberto de Andrade Lima
Co-orientador: Prof. Dr. Osvaldo Soliano Pereira

RESUMO

O estabelecimento de políticas que possam fomentar o desenvolvimento da geração elétrica não centralizada em meios urbanos, mais especificamente, mediante a tecnologia de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), depende fortemente da avaliação do seu potencial efetivo e de seus factíveis limites econômicos. Muito embora o conhecimento do potencial do recurso solar seja determinante, a avaliação deve ser acompanhada por estimativas da disponibilidade de superfície para as instalações, de informações relativas ao desempenho técnico do sistema e aos encargos e dividendos envolvidos em função da redução no consumo de energia da rede convencional. Dentro desse contexto, apresenta-se o desenvolvimento de uma metodologia de avaliação do potencial de geração elétrica por SFCR em telhados de espaços urbanos. A proposta metodológica tem como base norteadora a experiência adquirida em projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D), normalmente, direcionados para os aspectos técnicos envolvidos no desempenho global de sistemas fotovoltaicos. Os resultados experimentais obtidos, nesses estudos, têm respondido às expectativas e mostram, tecnicamente, que a tecnologia de SFCR apresenta-se como uma aplicação viável para a geração elétrica não centralizada em áreas urbanas, particularmente no Nordeste do Brasil. A metodologia fundamenta-se em avaliações referentes a três potenciais: o potencial físico representado pela quantidade

total de energia captada por determinada área em observação; o potencial geográfico traduzido no dimensionamento da área de captação da energia incidente e o potencial técnico relacionado à tecnologia de geração de energia fotovoltaica, desempenho e características técnicas dos equipamentos. Os procedimentos e ferramentas metodológicos utilizados foram agrupados em cinco ambientes em função dos produtos/resultados que podem ser gerados: o ***Ambiente Físico*** envolve informações climatológicas e meteorológicas e apresenta como produto, os índices de radiação incidente e de temperatura ambiente; o ***Ambiente Geográfico,*** cujas ferramentas utilizadas permitem a determinação das dimensões, dos posicionamentos e do fator *Nível de Luz do Sol* dos telhados das edificações. Fator indicativo da quantidade e qualidade da energia radiante incidente no plano do telhado; o ***Ambiente Técnico*** baseado em dados experimentais resultantes do monitorado por doze meses do SFCR UFPE III de 1,28 kWp instalado na UFPE; o ***Ambiente Econômico,*** proposto como gerador do tempo de retorno do investimento realizado e fonte de informações econômico-financeiras e o ***Ambiente Analítico,*** onde as informações são agrupadas, traduzidas em possibilidades de intervenções e apresentadas de forma mais acessível e espacialmente visíveis através de um sistema de informação geográfica (SIG) incorporado. O estudo enfoca especificamente, como universo de estudo, a área do Campus da Universidade Federal de Pernambuco-Brasil. No entanto, sua utilização não é restrita ao Campus UFPE, podendo ser utilizada para outros espaços desde que alguns parâmetros e condições, inerentes a cada ambiente proposto, sejam ajustados ou redefinidos em função das características e disponibilidade de dados sobre a localidade alvo. A metodologia, quando aplicada ao Campus da UFPE, apresenta como resultado global, cerca de 111 mil m^2 de área de telhados disponíveis à instalação de SFCR. 75% dessa área, 83,6 mil m^2, apresenta valores do Nível de Luz do Céu classificados como Muito bom, (0,8= NLC = 1,0) e energia específica de 156 kWh/m^2. Ou seja, a possibilidade de instalação em torno de 11 MWp de fotovoltaicos e produção estimada de 13 GWh/ano de energia disponível para ser injetada na rede da concessionária. Energia elétrica equivalente a seis meses do atual consumo da UFPE.

Palavras-chave: Sistema fotovoltaico conectado à rede; Avaliação do potencial de telhados fotovoltaicos; Desempenho global de sistemas fotovoltaicos; Fator de performance-PR; Nível de Luz do Céu e Fator de Visão do Céu.

METHODOLOGY FOR POTENTIAL EVALUATIONS OF THE GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM ON THE ROOF - UFPE APLICATION

Author: Elielza Moura de Souza Barbosa

Adviser: Prof. Dr. Fernando Roberto de Andrade Lima

Co adviser: Prof. Dr. Osvaldo Soliano Pereira

ABSTRACT

The establishment of policies that can allow the growth of decentralized electrical generation development in urban areas through Grid Connected Photovoltaic System (GCPVS) strongly depends on the evaluation of its potential efficacy and economic viability. Although knowing the potential areas is the determining factor, the evaluation should be accompanied by estimates of the available surface for installations, information relative to the system's technical performance and to the profits and losses involved in the reduction of energy consumption of conventional grid. Within this context arises the development of a methodology to evaluate the potential for GCPVS electrical generation on the roofs of urban spaces. The methodological proposal is based on the experience acquired in the development of research projects (R&D) focused on technical aspects involved in the global performance of PV systems. The experimental results obtained in these studies have matched the expectations and technically, showed that the technology of GCPS has become a viable decentralized electrical generation in urban areas, particularly in the northeast of Brazil. The methodology is based on evaluations regarding three potentials: the physical potential, represented by the total energy collected by the determined area under observation; the geographical potential, which translates into

the dimensions of this area; and the technical potential, related to the photovoltaic energy generation technology, performance and technical characteristics of the equipment. The procedures and methodological tools used were grouped into five environments as functions of the products/results that may be produced: ***Physical Environment*** involves climatic and meteorological information and illustrates the radiation and environmental temperature indices; ***Geographical Environment*** involves the obtaining of the dimensions, positions and *Sunlight Level* Factor of the buildings' roofs, which indicates the quantity and quality of the incident radiation on the rooftops; ***Technical Environment*** based on experimental data which resulted from twelve months of monitoring the GCPVS UFPE III at 1.28 kWp; ***Economic Environment***, in which the turnaround time for the return on investment is produced; and ***Analytical Environment***, where the information was grouped, translated into intervention possibilities and presented in a more accessible and spatially visible form using an incorporated geographical information system (GIS). The case study focuses specifically on the area of the Federal University of Pernambuco-Brazil. However, its use is not restricted to the UFPE Campus. The developed methodology could be used in other areas if certain parameters and conditions, inherent to each proposed environment, were adjusted or redefined in terms of the characteristics and availability of data about the target location. The methodology when applied to the UFPE Campus shows: 111,000 m^2 of the roof are available area for the installation of GCPS; 75% of this area, 83,600 m^2, shows a high values of the *Sunlight Level* factor, (0,8= SL = 1,0), indicating a specific energy of 156kWh/m^2. It allows the installation of 11MWp with an estimated production around 13 GWh/year. The electrical energy production is equivalent to six months of electrical consumption of the University Campus.

Key words: Grid connected photovoltaic system; Potential estimation of photovoltaic roofs; Global performance evaluation of grid connected system; Performance Ratio-PR, *Sunlight Level* Factor, Sky View Factor.

CAPÍTULO 1
INTRODUÇÃO

No Brasil, as iniciativas e estudos utilizando o conceito de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) de abastecimento elétrico datam do ano de 1980. No entanto, só no final da década de 90, ocorreu uma fase de aceleração dessa tecnologia com a implantação de diversos projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) nas universidades e centros de pesquisas nacionais. As iniciativas, quase todas de pequeno porte, apresentam diversificações relacionadas ao tipo da célula fotovoltaica, às capacidades nominais, às configurações gerador/inversor e às modalidades de conexões com a rede elétrica convencional.

Dados do final de 2007 acusam a existência de não mais que 100 kWp de SFCR com capacidades nominais entre 0,85 a 11 kWp instalados e em funcionamento no Brasil. Uma capacidade instalada bastante reduzida quando comparada às ocorrências mundiais, principalmente nos países desenvolvidos como a Alemanha e o Japão, com cerca de 2.800 e 1.540 MW de fotovoltaicos conectados à rede em 2007, (RENEWABLES GLOBAL STATUS REPORT-REN21, 2007 em www.ren21.net).

No entanto, diferentemente do Brasil, que tem na sua matriz energética uma geração de eletricidade fortemente renovável, de cerca de 89%, (BEN, 2007), a grande maioria dos países apresenta matrizes energéticas baseadas em combustíveis não renováveis, sobretudo o petróleo e o carvão, o que obriga a busca por soluções energéticas mais limpas. O custo financeiro da geração renovável pode ser mais alto, porém, o custo ambiental tem se mostrado compensador.

As iniciativas brasileiras, mesmo com sistemas de pequeno porte, têm sido extremamente importantes. Diversos projetos de P&D vêm sendo realizados por vários grupos de pesquisadores e os resultados divulgados expandem o conhecimento dessa aplicação tecnológica que vem apresentando mundialmente um crescimento exponencial, notadamente desde o final da década de 90, com um crescimento médio anual de 30 a 40 % desde 2001, MAYCOCK (2005).

A grande maioria desses projetos de P&D realizados ou em realização tem como objetivo estudos vinculados aos aspectos técnicos do desempenho global dos SFCR. Nos últimos anos alguns estudos da potencialidade da tecnologia de SFCR vêm sendo realizados. Normalmente, essas realizações têm como foco sempre a demanda elétrica de uma determinada localidade visando à redução do consumo de energia ou melhoria na qualidade do serviço elétrico fornecido pelas companhias elétricas.

Dentro desse contexto, o Grupo de Pesquisa em Fontes Alternativas de Energia do Departamento de Energia Nuclear-Universidade Federal de Pernambuco (Grupo FAE/UFPE) iniciou seus estudos em SFCR no ano 2000. Os projetos foram direcionados para os aspectos técnicos envolvidos no desempenho global dos sistemas em função de suas configurações, tipo de tecnologia dos módulos fotovoltaicos e dos climas das regiões.

Atualmente, o Grupo FAE conta com três sistemas de diferentes configurações instalados em regiões com características climatológicas diferenciadas: *Sistema São Lucas* localizado na Ilha de Fernando de Noronha/Mar Atlântico de clima tropical úmido, *Sistema Lampião* na Região Xingó, semi-árido do Nordeste de clima tropical seco e o *Sistema UFPE*, localizado na área de testes do Grupo FAE, na cidade do Recife com clima tropical úmido.

Concordante com vários estudos realizados por outros grupos de pesquisas nacionais, os resultados que vêm sendo obtidos tem respondido às expectativas e mostram que tecnicamente a tecnologia de SFCR apresenta-se como uma aplicação viável para a geração elétrica não centralizada em áreas urbanas no Brasil.

No entanto, há um vazio relacionado a estudos mais aprofundados sobre o potencial de geração de energia por SFCR em espaços urbanísticos. Ou seja, uma ausência

de metodologias de avaliação desse potencial levando em consideração o desenvolvimento da massa urbana e que possam subsidiar programas de planejamento elétrico com energias renováveis.

O estabelecimento de políticas que possam fomentar o desenvolvimento da geração elétrica não centralizada em meios urbanos, mediante sistemas fotovoltaicos conectados à rede depende fortemente da avaliação do seu potencial efetivo e de seus factíveis limites econômicos.

Com o objetivo de desenvolver uma metodologia de avaliação do potencial de geração elétrica por SFCR em coberturas de edificações urbanas, aplicação denominada de Telhados Solares ou Telhados Fotovoltaicos em Espaços Urbanos, apresenta-se a presente proposta.

De forma praticamente obrigatória, metodologias de avaliação de potencial de energia renovavam (RE) consideram três níveis hieráticos de avaliações: a existência da fonte do recurso energético, a disponibilidade e possibilidade de sua captação e os meios técnicos existentes para transformar o recurso em energia útil.

Mesmo na geração solar, essa avaliação não se limita ao conhecimento do potencial do recurso solar. Muito embora esse seja determinante, deve ser acompanhado por estimativas da disponibilidade de superfície para as instalações, de informações técnicas relativas ao desempenho de SFCR, dos custos envolvidos e de possíveis créditos de Carbono (CO_2 evitado) em função da redução no consumo da energia da rede convencional pela utilização da energia limpa gerada.

A metodologia desenvolvida, nesse trabalho, tem como base avaliações referentes a três potenciais: o potencial físico, representado pela quantidade total de energia captada pela área em observação; o potencial geográfico, traduzido no dimensionamento da área de captação da energia incidente e o potencial técnico relacionado à tecnologia de geração de energia FV, desempenho e características técnicas dos equipamentos. As interações desses potenciais resultam em estimativas das possibilidades da geração elétrica FV no espaço foco selecionado.

Os procedimentos e ferramentas metodológicos utilizados nas avaliações desses potenciais e na obtenção de informações econômico-financeiras foram agrupados em cinco ambientes em função dos produtos/resultados que podem ser gerados como ilustrado na Figura1.

1 O ***Ambiente Físico*** envolve informações climatológicas e meteorológicas da região, provenientes de mapas, Atlas e base de dados de estações climatológicas. Apresenta, como produto, os índices de radiação incidente no local.

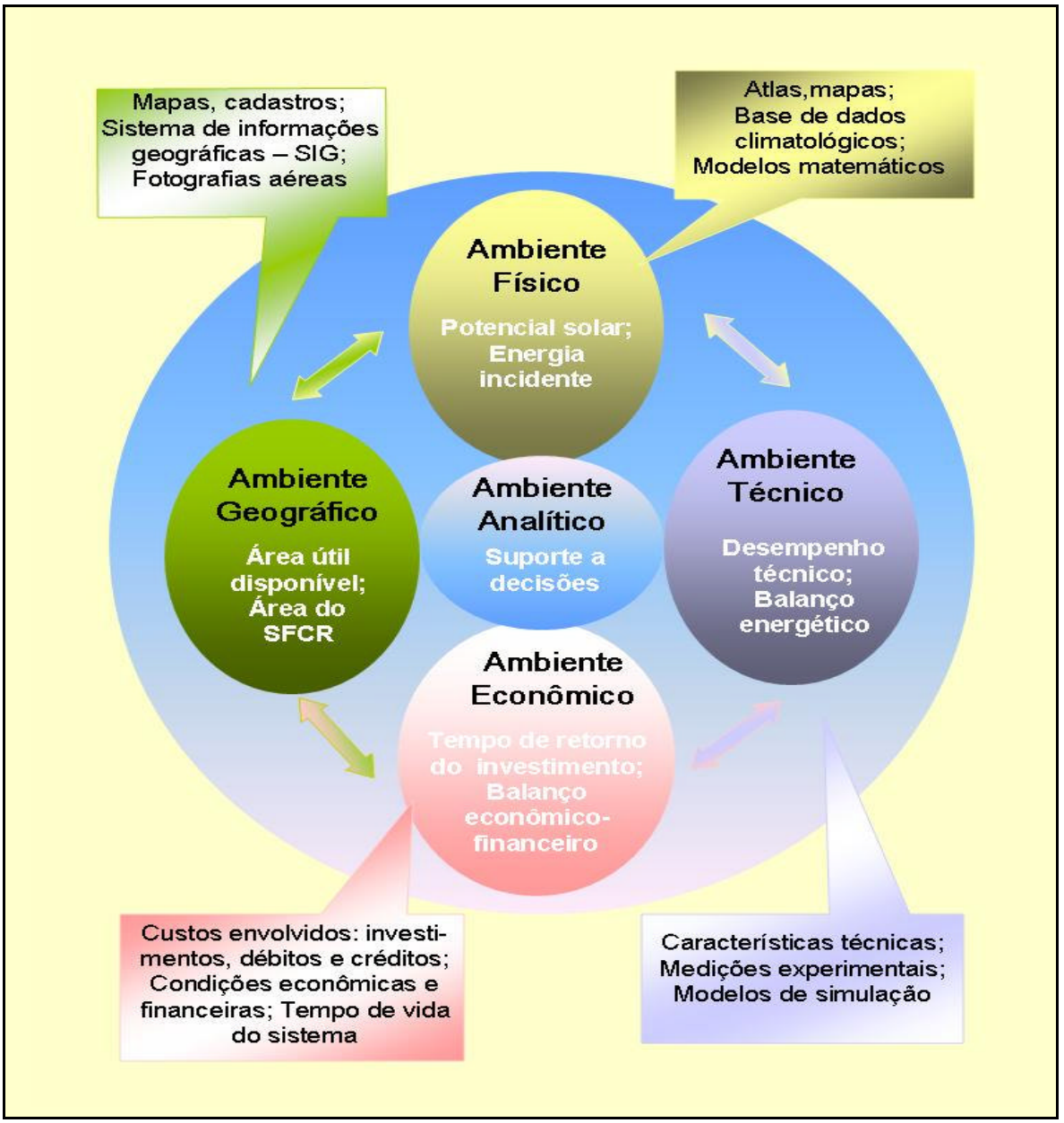


Figura 1- Esquema ilustrativo da metodologia desenvolvida.

2. O ***Ambiente Geográfico*** utiliza ferramentas e dados relativos à disponibilidade da área útil para a instalação do sistema: mapas, plantas, imagens e/ou fotografias via satélites das áreas georeferenciadas, bases de dados demográficos, sociais e urbanistas. Apresenta como produto: o fator Nível de Luz do Céu (NLC), indicativo da quantidade e qualidade de visão de céu da localidade foco e estimativas das áreas de telhados úteis e disponíveis a instalação de SFCR.

3. O ***Ambiente Técnico*** tem como base fundamental informações técnicas do sistema e de seus componentes provenientes de catálogos dos fabricantes ou de avaliações técnicas de sistemas protótipos. A análise técnica baseada em dados experimentais permite que os parâmetros de desempenho do sistema: eficiências do sistema e de seus componentes, produtividades e coeficiente global de desempenho sejam determinados em reais condições de operação. Como produto final, apresenta a produção total de energia, o coeficiente global de desempenho (PR) do sistema e o valor da densidade de potência específica para a região em estudo.

4. O ***Ambiente Econômico*** caracteriza e discrimina os a composição dos custos envolvidos na instalação de um SFCR. Gera como produtos, para um determinado SFCR: o tempo de retorno do investimento realizado e o crédito de carbono proveniente da redução no consumo de energia elétrica. Para esse balanço, propõe-se, como ferramenta básica, programas de fluxo de caixa direcionados à análise de projetos de energias renováveis.

5. O ***Ambiente Analítico*** é responsável pela apresentação dos resultados e informações disponíveis de forma mais acessível e espacialmente visíveis. Recebe como dados de entrada os produtos dos demais ambientes. Agrega todas as informações traduzindo-as em possibilidades de intervenção. O agrupamento das informações é realizado utilizando-se como ferramenta a metodologia de Sistema de Informação Geográfica- SIG, (*Geographical Information Sistem-GIS*).

A metodologia desenvolvida é especificamente aplicada no estudo-caso Campus da Universidade Federal de Pernambuco-Brasil. Nesse caso, o ambiente técnico conta com uma forte base experimental cujos resultados são provenientes da avaliação técnica do

desempenho de um sistema fotovoltaico conectado à rede instalado na Área de Testes do Grupo FAE/UFPE.

No entanto, sua utilização não é restrita ao Campus UFPE, podendo ser utilizada para outros espaços desde que alguns parâmetros e condições sejam ajustados ou redefinidos em função da disponibilidade de dados sobre a localidade.

O trabalho encontra-se apresentado em cinco capítulos: No Capítulo 2, é apresentada uma revisão bibliográfica sob a forma de marcos referenciais da tecnologia fotovoltaica e de temas interdisciplinares pertinentes ao desenvolvimento da metodologia proposta.

O Capítulo 3 apresenta o produto deste trabalho. composto pelo desenvolvimento da metodologia proposta. Aborda os cinco ambientes esquematizados, estabelecendo os critérios e ferramentas e gerando os procedimentos necessários ao desenvolvimento da metodologia para a avaliação do potencial de SFCR em telhados de edificações urbanas. As áreas são classificadas segundo o Nível Luz do Céu que Como suporte ao **Ambiente Técnico,** apresenta o desenvolvimento, a monitoração e a avaliação técnica de um sistema teste, o SFCR-UFPE III de 1,28 kWp de módulos fotovoltaicos de Silício policristalino, instalado na Área de Testes do Grupo FAE.

Os resultados da avaliação técnica sobre a base de dados experimentais de um ano de ocorrências no SFCR-UFPE III mostram que 1,6 MWh são produzidos por ano. O Fator de Desempenho Global, resultante da base experimental, é utilizado em um modelo de simulação para calcular a energia produzida por um SFCR padrão de 10m^2 de área fotovoltaica. Os resultados da simulação indicam uma energia específica de 156 kWh/m^2 para um SFCR instalado em coberturas de edificações, bem posicionados e livres de sombras.

No Capítulo 4, como resultado, a metodologia é aplicada ao Campus da UFPE e uma avaliação do potencial de geração de energia por SFCR nos telhados da UFPE é apresentada. As informações são agregadas em forma de tabelas, associadas e representadas espacialmente pelo SIG- SFCR/UFPE. Os mapas resultantes mostram as potencialidades dos telhados em termos de área útil disponível, do Nível de Luz do Céu e

de produção de energia. Diversas possibilidades podem ser representadas como os melhores e/ou menos favoráveis telhados classificados pelo Nível de Luz do Céu, energia produzida e grau de não alinhamento da posição em relação à captação da radiação solar, por exemplo.

Como resultado global, cerca de 111 mil m^2 de área de telhados encontram-se disponível para a instalação de SFCR no Campus UFPE. 75% dessa área, 83,6 mil m^2, apresenta Nível de Luz do Céu muito bom, indicativo da possibilidade de produção de 156 kWh/m^2 de energia. Ou seja, da possibilidade de instalação em torno de 11 MWp de fotovoltaicos e produção estimada de 13 GWh/ano de energia elétrica disponível para ser injetada na rede da concessionária.

Dentro desse contexto, como sugestão e recomendação, propõe-se a instalação de um SFCR no Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE. Três opções de telhados são indicadas: o do prédio de Graduação, o do Auditório Central e o do Laboratório de Dispositivos e Nano-estruturas. Esses espaços apresentam valores do fator Nível de Luz de Céu igual a um, disponibilidades de área útil compatíveis com cerca de 300 kWp, 60 kWp e 40 kWp, capazes de produzir aproximadamente 360, 72 e 47 MWh/ano de energia, respectivamente.

As possibilidades de pesquisa, desenvolvimento de produtos, intercâmbio de pesquisadores, convênios com empresas envolvendo as mais diversas áreas de conhecimento seriam enormes. Grupos de pesquisa e alunos, nas áreas de eletrônica, elétrica, civil, mecânica e também de outros ramos como arquitetura e economia, por exemplo, poderiam contar com o sistema como um verdadeiro laboratório e a UFPE despontar como inovadora no uso da tecnologia de telhados solares.

A metodologia desenvolvida apresenta-se como um mecanismo disponível, versátil e rápida para estimativas do potencial de sistemas solares em telhados e áreas similares. Especificadamente o procedimento de avaliação da área útil do telhado pode ser utilizado para outro objetivo, por exemplo, como estimativa do potencial de captação de água de chuva e do potencial de aquecimento de água por coletores solares.

CAPÍTULO 2
MARCOS DE REFERÊNCIA
TÉCNICOS E INTERDISCIPLINARES

Atualmente, outras razões não estritamente econômico-financeiras como a pesquisa, a preocupação com racionamento de energia, a busca por diferentes e complementares fontes de energia, a necessidade de redução de emissões contaminantes e pela preservação do meio ambiente têm dado origem a numerosos programas de incentivo ao Desenvolvimento de Mecanismos Limpos (DML).

Dentro desse enfoque, destaca-se a aplicação da geração de energia elétrica solar, mais especificamente da produção de eletricidade por Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR).

A utilização da tecnologia de SFCR tem apresentado níveis de crescimento da ordem de 30 a 40% ao ano. Representava, no início da década de 90, apenas 3% do mercado fotovoltaico chegando ao ano de 2007 detentora de 90%, cerca de 2.763 MW, da produção fotovoltaica mundial, (MINTS, 2008).

Apresenta-se a seguir uma revisão bibliográfica abordando diversos aspectos da tecnologia fotovoltaica, mais diretamente relacionados a marcos referenciais da geração de energia elétrica via SFCR e a temas correlacionados a tecnologia solar. Referências mais pertinentes aos procedimentos de estimativas do potencial de SFCR em centros urbanos serão abordadas no decorrer do desenvolvimento deste trabalho.

2.1 Concepção da aplicação tecnológica de geração FV interligada à rede

Basicamente um sistema fotovoltaico conectado à rede é composto por dois equipamentos principais: o gerador, constituído pelo conjunto de módulos fotovoltaico (FV), chamado arranjo FV, responsável pela coleta da irradiação solar incidente no seu plano e geração da energia elétrica com tensão de corrente contínua (CC); e o inversor que transforma e inverte a energia produzida na tensão de operação da rede elétrica convencional, corrente alternada (CA). A energia útil produzida pode ser injetada na rede da concessionária de energia elétrica para ser distribuída aos consumidores ou pode ser direcionada diretamente para o consumidor. Nesse caso, quando há saldo entre a produção e o consumo do usuário, esse pode ser injetado na rede e, no caso contrário, a rede complementa o déficit demandado pelo usuário, como mostra o esquema da Figura 2.

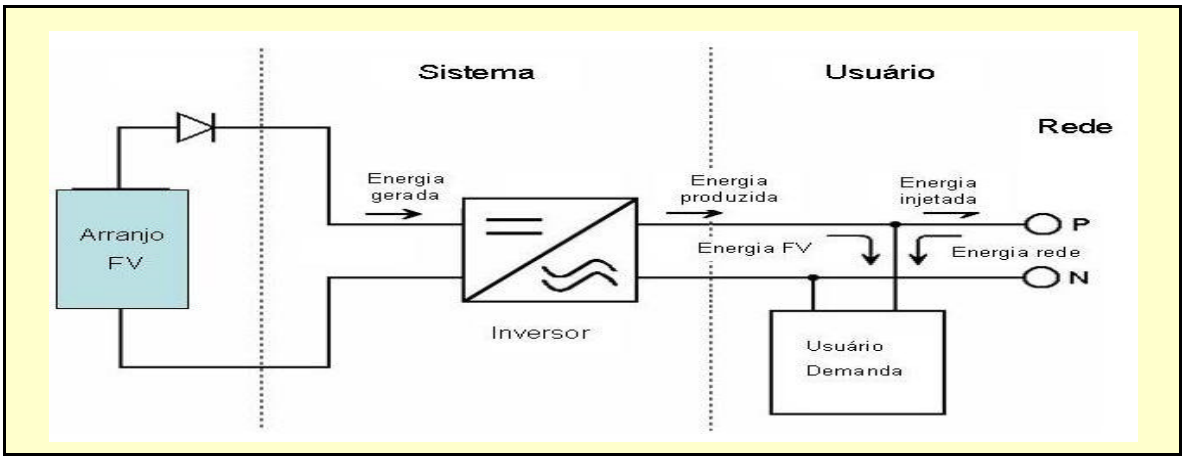


Figura 2- Esquema ilustrativo da aplicação de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

Cabe distinguir dois tipos de filosofia, bem diferenciadas, da aplicação de sistemas fotovoltaicos interligados à rede:

1. Sistemas que injetam energia na rede convencional de companhias de abastecimento de energia elétrica: Centrais Fotovoltaicas ou Sistemas Interligados de Grande Porte com capacidade nominal maior que 100 kWp[1];

[1] [kWp] Potência do gerador fotovoltaico no ponto de máxima eficiência; ponto de máxima potência (P_{max}) em Condições Stands de Testes STC (Massa de ar, 1,5; Temperatura ambiente, 25^0C; Irradiância 1000 W/m^2)

2. Sistemas que trocam energia com a rede convencional: Minicentrais ou Sistemas Conectados à Rede com capacidades nominais da ordem de unidades a dezenas de kWp, (valor típico residencial <10 kWp).

Para sistemas com altas potências e com potências menores que 100kWp, as diferenças de filosofia de concepção reportam-se mais ao critério da injeção da energia (com ou sem a participação do usuário) na rede do que com a capacidade nominal do sistema.

Dentro do primeiro grupo, geralmente, os sistemas são operados por companhias de energia elétrica e seu funcionamento está regido pelas normas de injetar na rede toda a potência que, em qualquer instante, seja capaz de produzir. Normalmente, as tensões de operação são elevadas, por exemplo, 400 Vcc é uma configuração muito frequente. Apresentam boa confiabilidade e necessitam pouco tempo para construção (<1 ano), (LORENZO et al., 1994).

Como exemplo histórico dessa aplicação pode-se citar as seguintes centrais, (LORENZO et al., 1994; FRAIDENRAICH e LYRA, 1995):

- Central de Carrisa: 6 MWp, (Califórnia/Estados Unidos da América - 1983) por muito tempo a maior já construída;
- Central de San Agustín de Guadalix: 100 kWp, (Madrid/Espanha - 1985);
- Central de Toledo: 1 MWp (Castrejón, Espanha - 1993).

Atualmente, registram-se em operação algo em torno de 1000 centrais com capacidades de 1 MW a 60 MW, (www.pvresouces.com,). Como por exemplo:

- Na Espanha as centrais: de Junqueira com 1,5 MWp (2007), com estimativa de geração de 3,2 milhões de kWh/ano e redução de 2.300 ton/ano de CO_2**, (www. re-focus.net** em 18/04/07); a Central de Olmedilla com 60 MW e a Central de Puertollano com 50 MW, ambas instaladas em 2008, (www.pvresources.com).
- Em Portugal as centrais: de Moura com 46 MW (2008) e Central de Serpa com 11 MW (2007). Para a Central de Serpa, ilustrada na Figura 3, a previsão de produção é de 20 GWh/ano (suprimento para cerca de

8.000 habitações) e de redução de 30.000 ton/ano de gases de efeito estufa, (RAULSTON, J.C.em www.pvresouces.com em 09 de junho de 2007).

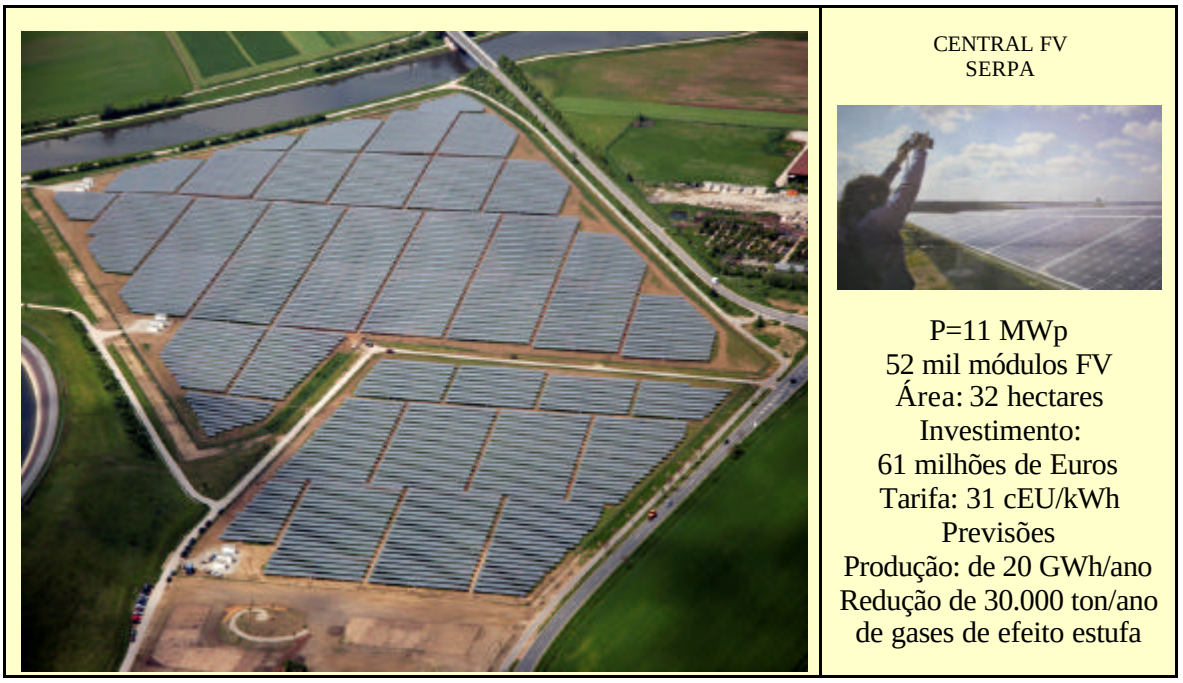


Figura 3 - Ilustração de central fotovoltaica: Central de Serpa-Portugal.

A segunda concepção importa em consumidores (residenciais e/ou comerciais) de energia da rede concessionária que incluem, em sua instalação elétrica, um sistema fotovoltaico conectado à rede. Estabelece-se um sistema de troca de energia e não somente de venda. Há uma associação consumidor-gerador que pode trocar energia com a rede: decidir injetar (vender) energia à rede nos momentos em que a geração FV é superior ao seu consumo, e extrair (comprar) energia da rede em caso contrário. Ou seja, a energia gerada não necessita atender toda a demanda do consumidor, pois, em situação de déficit, a oferta é complementada pela rede e, em caso de excesso, este é repassado à concessionária, gerando crédito para o proprietário-usuário, (RÜTHER, 2000; LORENZO, 1994).

Em algumas situações, podem ser incorporados, ao fluxograma do processo, acumuladores de energia. Nesses casos, o sistema é denominado Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede com Baterias (SFCR-B). Essa alternativa, geralmente, é utilizada em localidades onde o abastecimento de energia pela rede não apresenta boa qualidade como

consequência da pouca capacidade da linha de transmissão em relação ao consumo. A energia é injetada no ponto problemático da rede. A energia é proveniente do gerador durante o dia, e do banco de baterias à noite ou na hora de maior consumo. A recarga da bateria pode ser realizada via o gerador fotovoltaico ou através da própria rede, nas horas de menor consumo. Desse modo, o sistema permite diminuir a carga aparente da rede nos momentos de maior consumo.

Como consequência, a qualidade do abastecimento pela rede de energia elétrica melhora afetando positivamente a economia do sistema. No entanto, em relação à opção sem baterias o custo, nesse caso, com a manutenção é bem maior, além da geração de lixo tóxico com a troca dos acumuladores de energia.

Na aplicação de SFCR, quando, além de conectado à rede o sistema apresenta os módulos fotovoltaicos integrados à edificação, são denominados de Edificações Fotovoltaicas Conectadas à Rede (EFCR). Opção que requer prudência rigorosa com a segurança e que apresenta grande possibilidade de inserir o arranjo FV à arquitetura do edifício como elementos da própria construção física do espaço (telhados, fachadas). Por esse motivo, chamada Aplicação de Zero Ocupação de Área.

As experiências até então existentes apresentam resultados muito positivos. Como exemplos históricos, podem-se citar várias iniciativas isoladas ou programas institucionais e privados, alguns deles ilustrados na Figura 4.

- Centro de Informação Solar-Alemanha, (Gelsenkirchen-1966);
- Colégio Novo Horizonte de Las Rozas; 54 kWp (Madri, 1976/77);
- Biblioteca de Marató: 33,5 kWp (Madri-1976/77);
- Universidade do Texas, Arlington, 1978: 1ª residência conectada à rede;
- Programas dos Estados Unidos da América, como o Califórnia PV que até o ano 2000 já contabilizava 3.000 MWp;
- Programa do Japão-Teto Solar, iniciado nos idos de 1960. No período de 1994 a 2004 com cerca de 70.000 instalações em tetos de residências (3 a 4 kWp/casa) foram realizadas;
- Programa da Alemanha -100.000 Telhados Solares, 1999. Com cerca de 300 MWp até 2004.

a) Biblioteca em Maloro-Espanha

b) Estacionamento da BP SOLAR

c) Centro de Informação Solar
Gelsenkirchen-Alemanha

d)Edificação em Meckenhein -Alemanha

e) Residências do Programa Alemão

f) Ed. da Siemens Solar/HQ
Munique- Alemanha

Figura 4 - Ilustrações de sistemas fotovoltaicos conectados à rede.

2.2 Sistemas fotovoltaicos conectados à rede no Brasil

Atualmente, no Brasil, há diversas iniciativas e estudos utilizando o conceito de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR) de abastecimento elétrico. No entanto, diferentemente da aplicação fotovoltaica com sistemas autônomos, hoje, incorporada como mais uma forma viável de estender o atendimento elétrico a várias regiões do país[2], as realizações em SFCR situam-se no âmbito de projetos de pesquisa e desenvolvimento (P&D) nas universidades e centros de pesquisas.

Uma estimativa promissora, considerando novos pequenos sistemas ou a ampliação de sistemas já existentes, resulta que não há mais que 100 kWp de SFCR instalados e em operação no Brasil. Ressalta-se a dificuldade de mapear e quantificar o total existente. Provavelmente, informações sobre várias instalações não são divulgadas ou os sistemas são instalados durante um curto período como experimentos, e depois são desativados.

Na Tabela 1, consta uma relação de sistemas instalados até meados de 2007, seguida de ilustrações de alguns desses sistemas na Figura 5.

As iniciativas e estudos utilizando o conceito de sistemas interligados à rede foram iniciadas em meados da década de 80 com um sistema híbrido Solar/Eólico/Diesel de 11 kWp direcionado à Ilha de Fernando de Noronha. Foi instalado pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) na cidade de Natal e desativado em 1991, (ZILLES et al., 1998).

Lamentavelmente, só seis anos depois, em 1997, as experiências com essa alternativa tecnológica foram retomadas com a instalação de um SFCR pelo Grupo do Laboratório Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLAR/UFSC). Primeiro SFCR a utilizar a tecnologia de Silício amorfo (a-Si) e de módulos integrados à

[2] Durante os anos de 1999 a 2005, foram instalados no Brasil cerca de 5 MWp de sistemas fotovoltaicos direcionados ao meio rural pelo Ministério de Minas e Energia através do Programa de Desenvolvimento dos Estados e Municípios (PRODEEM-MME).Com a Universalização da Energia a eletrificação fotovoltaica continua sendo realizada pelas companhias de energia elétrica com subsídios do Governo Federal, a exemplo do que ocorre nos Estados de Bahia e Minas Gerais.

edificação. Esse sistema é composto por 68 painéis de (a-Si) totalizando 2,08 kWp de potência e integrado em 40 m^2 de área na fachada do laboratório, (RÜTHER, 2000).

Tabela 1 - Sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica no Brasil- 2007.

Ano de Instalação	Sistema (kWp)	Instalação Local
1981	11,0	CHESF-Natal-RN
1997	2,08	Labsolar/UFSC-SC
1998	0,75	LSFIEE/USP-SP
1999	0,85	COPPE/ UFRJ-RJ
2000	2,5	FAE/UFPE-PE: Na Escola Pública de Fernando de Noronha/PE Sistema Arquipélago (desativado)
2000	1,15	Labsolar/UFSC-SC
2001	6,3 / 11,3	LSF/IEE/USP-SP. Configurado para 11,3 kWp em 2005
2002	10,0	Labsolar/UFSC-SC
2002	16,0	CEPEL-RJ
2002	3,3	Rio de Janeiro-RJ
2002	2,5	FAE/UFPE-PE: No Hospital Público de F. de Noronha. Sistema com baterias (SFCR-B). Sistema São Lucas (Fig. 2a)
2003	4,2	CELESC-SC
2003	6,0	LSF-IEE/USP-SP
2004	4,8	UFRGS-RS
2004	3,0	CEMIG-MG
2004	0,85	Escola Técnica de. Pelotas-RS
2004	3,0	LSF/IEE/USP-SP
2005	1,6 / 1,3	FAE/UFPE-PE: Na Área de Testes FAE-Recife/PE. Recomfigurado em 2006 para 1,3 kWp Sistema UFPE III (Fig. 2b)
2006 a 2007	44,4 3,0 4,0	CENPES-ES UFRGS CEMIG-MG
2007	1,5	IX-FAE/UFPE-PE: Em Piranhas/AL- Rio São Francisco Sistema Lampião (Fig. 2c)

Logo em seguida, em 1998, foi instalado um sistema de 0,75 kWp no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos do Instituto de Energia Elétrica da Universidade de São Paulo (LSF/IEE/USP). Os resultados promissores apresentados por esses dois sistemas, em conjunto com as excelentes perspectivas apresentadas mundialmente, induziram e incentivaram novas iniciativas no Brasil.

O quarto sistema foi instalado em 1999 na Universidade Federal do Rio de Janeiro com 0,85 kWp de módulos de Silício monocristalino.

Em setembro de 2000, foi instalado o primeiro sistema na Ilha de Fernando de Noronha, na Escola Pública Arquipélago, com 2,5 kWp e desativado em 2004 (BARBOSA et al., 2004). Ainda no ano de 2000, foi instalado o segundo sistema da UFSC com 1,1 kW e, posteriormente, um de 6,3 kWp no (LSF/IEE/USP).

Entre os anos 2001 e 2002, mais quatro sistemas foram implantados: de 10 kWp instalado pelo LABSOLAR/UFSC, 16 kWp no Centro de Pesquisas de Energia Elétricas da Eletrobrás (CEPEL), 3,3 kWp no HR, hospital no Rio de Janeiro e o segundo sistema de 2,5 kWp no hospital público da Ilha de Fernando de Noronha pelo FAE/UFPE. Esse sistema foi projetado para operar associado a um banco de baterias e, durante o período de monitoramento, até meados de 2006, gerava cerca de 8,5 kWh/dia, Figura 5a, (BARBOSA, et al., 2004).

Mais 23,5 kWp fora instalados entre 2003 e meados de 2005: 4,2 kWp pela Centrais Elétrica de Santa Catarina (CELESC), 6,0 kWp e 3,0 kWp no LSF/IEE/USP, 4,8 kWp na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), 3,0 kWp na Companhia Elétrica de Minas Gerais (CEMIG), 0,83 kWp numa Escola Técnica da cidade de Pelotas e o primeiro sistema instalado na UFPE com 1,66 kWp pelo FAE/UFPE. Esse sistema passou por várias configurações e, em 2006, foi reformulado para 1,3 kWp, Figura 5b, (BARBOSA, et al., 2006).

Entre o final do ano de 2006 e 2007, cerca de 50 kWp estavam previstos ou sendo instalados: 44,0 kWp no Centro de Pesquisa da PETROBRÁS (CENPES), mais 3,0 kWp na UFRGS e 4,0 kWp na CEMIG.

Em junho de 2007, foi instalado o terceiro sistema pelo grupo FAE/UFPE em colaboração com o Instituto Xingó (IX), no Restaurante Angicos, localizado no Rio São Francisco, o primeiro sistema instalado em um espaço comercial, Figura 5c. Foi projetado para reduzir em 50% o consumo de energia do estabelecimento, o quê vem se verificando, (BARBOSA et al., 2008).

a) SFCR São Lucas na Ilha de Fernando de Noronha/PE.

b) SFCR- UFPE III na Área de Testes FAE -UFPE- Recife/PE.

c) SFCR-Lampião no Rio São Francisco Região de Xingó/AL.

Figura 5 – Vistas de SFCR instalados e em operação pelo Grupo FAE/UFPE.

2.3 Aspectos relacionados à tecnologia das células solares

Na produção comercial de células solares, destacam-se dois tipos de tecnologia, segundo a natureza da composição química e dois tipos de processos de produção:

Tipos de tecnologias:

- Tecnologia do Silício cristalino (c-Si) ou amorfo (a-Si). O (c-Si) por sua vez pode assumir a forma de mono ou, policristalino, (m-Si e p-Si) - Elemento básico, o Silício é o segundo elemento mais abundante na crosta da Terra;
- Tecnologia do Telureto de Cádmio (CdTe) e do Disseleneto de Cobre e Índio (CIS) ou Cobre, Índio e Gálio. Elementos básicos pouco abundantes (Ga, Te, Se, In, Cd) na natureza e altamente tóxicos (Cd, Se, Te).

Tipos de processo de produção:

- Tecnologia de lâminas cristalinas: as células fotovoltaicas são produzidas pela laminação de tarugos de Silício, apresentado, geralmente, em formas circulares de diâmetro de 0-15 cm ou quadradas de 10 cm^2, com espessuras de 300-400·µm e eficiências de conversão da ordem de 15,3 a 17,5% e 13,5 a 15% e 5,0 a 7,0% para células monocristalina, policristalina e amorfo respectivamente. As eficiências dos correspondentes módulos são bem menores, decorrentes das perdas no processo de produção, na faixa de 13 a 16% para módulos de Silício cristalino e 6 a 8% par o silício amorfo.
- Tecnologia de filmes finos: as células são produzidas por deposição do material semicondutor num substrato com espessuras em torno de 1,0µm e eficiências de 9 a 11%. Os módulos comerciais apresentam eficiências na faixa de 8 a10%.

Segundo Maycock (2005), aproximadamente, 85% (1.011 MW) da produção mundial de fotovoltaicos (células e módulos), no ano de 2004, foram baseadas na tecnologia do (c-Si). Apesar da expansão da tecnologia de filmes finos, apenas 47 MW (3,9%) correspondeu à tecnologia de células de (a-Si). No mesmo período, foram produzidos cerca de 3 MW de células fotovoltaicas com a tecnologia (CIS) e 13 MW com a tecnologia (CdTe).

Diversos programas ou projetos têm utilizado módulos com a tecnologia de (p-Si) justificado pelo seu custo mais razoável que (m-Si), mesmo apresentando uma necessidade maior de área. As tecnologias de Silício amorfo e de filme fino requerem maiores áreas em função de apresentarem eficiências mais baixas. O filme fino constituído de material flexível pode ser utilizado em superfícies curvas e trabalha melhor com a luz difusa que o Silício mono ou policristalino.

Para as três tecnologias atualmente mais comerciais apresenta-se, na Tabela 2, um resumo com as principais características de seus respectivos módulos, (LORENZO, 1994; FRAIDENRAICH e LYRA, 1995; FRAIDENRAICH et al., 2003).

Tabela 2 - Propriedades dos principais tipos de módulo fotovoltaicas comerciais (SFCR).

Tipo de Célula	Eficiência	Durabilidade	Comentários
Monocristalino	13 a 15%	= 30 anos	Tecnologia mais tradicional, líder de mercado. Maior eficiência e confiabilidade; requer menor área, custo mais elevado; alto consumo de energia no processo de produção, (alto tempo de retorno energético=3 anos).
Policristalino	10 a 13%	= 25 anos	Comumente utilizada, boa eficiência e custos mais razoáveis. A diferença no custo final ($/Wp) entre o (m-Si) e o (p-Si) é pouco significativa.
Amorfo Filme Fino	5 a 8% 8 a 10%	= 25 anos	Baixas eficiências; requer grandes áreas. De material flexível pode ser utilizada em superfícies curvas. Trabalha melhor com luz difusa e apresenta custo/ m^2 menor que o mono e policristalino (c-Si). Retorno energético de cerca de 1 ano. Grandes atrativos para o setor de arquitetura.

2.4 Aspectos relacionados à emissão de gases de efeito estufa.

A emissão de Gases de Efeito Estufa, (GEE), cada vez mais se torna importante argumento como justificativa para a implantação de sistemas com tecnologias de energias renováveis, também conhecidas como tecnologias de zero emissão.

A metodologia de cálculo da quantidade de GEE, evitada pela aplicação de energias renováveis, deve levar em consideração a fonte de energia substituída, a energia útil produzida, além do tipo de tecnologia e capacidade do sistema de tecnologia renovável adotado. A estimativa das emissões de GEE, decorrentes do uso de energia que foi consumida na fabricação e transporte do sistema, também deve ser considerada.

A quantidade total de Gases de Efeito Estufa (GEE) é expressa em toneladas equivalentes do gás Dióxido de Carbono, (ton CO_2). O resultado é calculado considerando-se o Potencial de Aquecimento Global (GWP- *Global Warming Potential*)[3] de cada gás em relação ao GWP do CO_2, (GWP_{CO2}=1). Por exemplo, o GWP do NO_2 é igual a 310 significando que 1 tonelada do gás NO_2 tem o poder de causar 310 vezes mais o aquecimento global que 1 tonelada de CO_2, (www.retscreen.net em 7 julho 2007).

Considerando a tecnologia fotovoltaica, segundo Pereira et al. (2003), 80 kg de CO_2 devem ser contabilizados, decorrentes do processo de fabricação do módulo, para a obtenção dos créditos de carbono. Os autores adotaram como referência, um sistema fotovoltaico autônomo de 50 Wp, gerando 0,2 kWh/dia, e o valor de *defaut* de 115,43 kgCO_2/ano (com base em energia a carvão), considerado o mais representativo como cenário de referência para o cálculo das emissões evitadas para a implantação de projetos de eletrificação rural no Estado da Bahia.

Ramiro et al. (2004) afirma que as emissões de CO_2 e SO_2, evitadas graças à energia gerada (160,8 MWh/ano) por um sistema fotovoltaico de 96,6 kW interligado à rede frente à produção por uma central térmica de gás, são de 77.575 kg/ano e 64 kg/ano respectivamente.

Estimativas da redução de 48 toneladas de CO_2 são noticiadas como beneficio ambiental do moderno SFCR recentemente instalado no *Count Council-owned Optioma Innovation Center* na Inglaterra com 105 kWp e estimativa de 68.700 kWh/ano de energia produzida, (SOLAR NEWS/RE-FOCCOUS, maio/junho 2005).

[3] Guidelines for Greenhouse Gás Inventories, 1996. Revised Intergovernmental Panel on Chance (IPCC)

Chirani et al., (2006), afirma que, segundo a *European Photovoltaic Association (*EPA), um sistema fotovoltaico de 1 kW previne que 1,136 kg de poluentes sejam injetados no ambiente, incluindo: CO_2, 3,63 kg de NO_x e 3,63 kg de SO_x. Baseado nessa informação, o autor afirma que cerca de 76.538,77 kg CO_x , 117,34 kg SOx e 150,42 kg de NO_x foram evitados com a injeção na rede de 75 MWh, produzidos em dois anos de operação de um SFCR de 30 kWp, instalado na cidade de Tehran-Iran, que apresenta um nível de radiação de 4,5 kWh/m^2 dia.

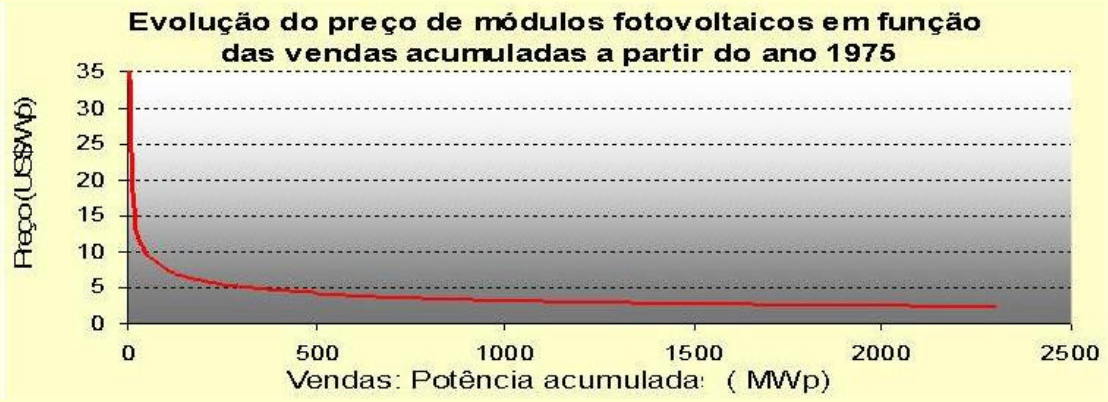
Resumindo as informações, 0,5 a 2,3 kg CO_2/Wp ou 0,7 a 1,6 Kg CO_2/KWh são evitados em função da tecnologia solar aplicada, da capacidade do sistema e da energia útil produzida em confronto com o tipo da fonte de energia convencional (gás, carvão...). Em termos de média mundial, utiliza-se uma taxa de 1,0 kg de CO_2/kWh quando o diesel é o combustível confrontado. No caso de matriz energética mista e fortemente hídrica, como a do Brasil, utiliza-se 0,09 a 1,1 kg de CO_2/kWh, (Programa RETScreen-www.retscreen.net)

2.5 Aspectos relacionados ao mercado fotovoltaico

Desde a época da criação da moderna célula solar de Silício, em 1954, a meta da indústria fotovoltaica tem sido tornar a tecnologia fotovoltaica economicamente competitiva. O desenvolvimento de equipamentos e materiais (células, módulos, inversores...) mais eficientes e processos de fabricação mais produtivos têm provocado quedas significativas principalmente no preço do módulo FV (US$/Wp) e consequentemente no custo da energia produzida (US$/kWh).

Um dos fatores que contribuíram fortemente para a redução no preço do produto foi o crescimento exponencial na produção de fotovoltaicos: de 60 U$/Wp em 1976, para cerca de 5 a 7 U$/Wp no início da atual década, (RIVER, 2001). A representação dessa ocorrência que pode ser observada na Figura 6, que mostra a evolução do preço de módulos fotovoltaicos em função das vendas acumuladas a partir do ano 1975, (MAYCOCK, 2002).

Ainda, segundo Maycock, (2005), nos últimos anos, o custo de módulos (m-Si e p-Si) alcançou valores um pouco abaixo de 2,6 U$/Wp instalado, em decorrência do aquecimento da demanda. Informações atuais do mercado do International Energy Outlook/ Energy Information Administration-IEO-2005/ AER-2005I, (2005), registram custos de 2 a 3 U$/Wp para as células e de 3 a 5 U$/Wp para os módulos fotovoltaicos e custos de operação na faixa de 7-9 US$/Wp (CA).



Elaborado de Maycock (2002)

Figura 6 - Evolução do preço de módulos fotovoltaicos em função das vendas acumuladas a partir do ano 1975.

A evolução quase exponencial no decréscimo dos custos tornou a opção fotovoltaica viável economicamente para uma ampla gama de aplicações, entre elas, a de SFCR, que notadamente decolou a partir de uma política de incentivos principalmente no Japão, na Alemanha (1^0 lugar mundial em aplicações fotovoltaicas) e nos Estados Unidos da América.

Em 1998, existiam apenas 36 MW de SFCR e as estimativas apontavam para 3.000 MW para o ano de 2010, vinculadas a programas de incentivo à aplicação dessa tecnologia, (MAYCOCK, 2001, 2002, 2004, 2005). Projeção alcançada em 2007, (MINTS, 2008)

Segundo, o Relatório Estado Global das Energias Renováveis de 2007, que reuni informações sobre mercado, investimentos e políticas das energias renováveis, publicado pela Renewable Energy Policy Network for the 21st Century, (REN21), a tecnologia com o

maior índice de crescimento no mundo é de SFCR com taxa média de 50% ao ano e uma capacidade instalada, até 2007, de cerca de 7,7 GW. Traduzido em 1,5 milhões de residências com telhados solares, (RENEWABLES GLOBAL STATUS REPORT - REN21, 2007).

O avanço da aplicação de fotovoltaico conectado à rede é ilustrado nas figuras seguintes. A evolução desse mercado por segmentos de aplicação, comparativamente para os anos de 1996, 1999, 2002 e 2004 pode ser visualizada na Figura 7. O segmento de Sistemas Autônomos (*off-grid*) envolve as duas categorias, industrial e rural. A primeira inclui aplicações de: telecomunicação, proteção catódica, transporte de sinais e instrumentação. A categoria rural inclui aplicações em: habitação, bombeamento de água e iluminação. O segmento de produtos comerciais envolve os fotovoltaicos utilizados em outras aplicações tipo utensílios de *camping*, brinquedos e produtos de categoria similar. O segmento Sistemas Conectados (*grid-connect*) inclui todos os sistemas interligados à rede: minicentrais ou SFCR (<100 kWp) e centrais (< 100 kWp) como já definido anteriormente. Com 8% do mercado em 1996, a aplicação fotovoltaico conectado à rede, atingiu 64% em 2004, (MAYCOCK, 2004; 2005).

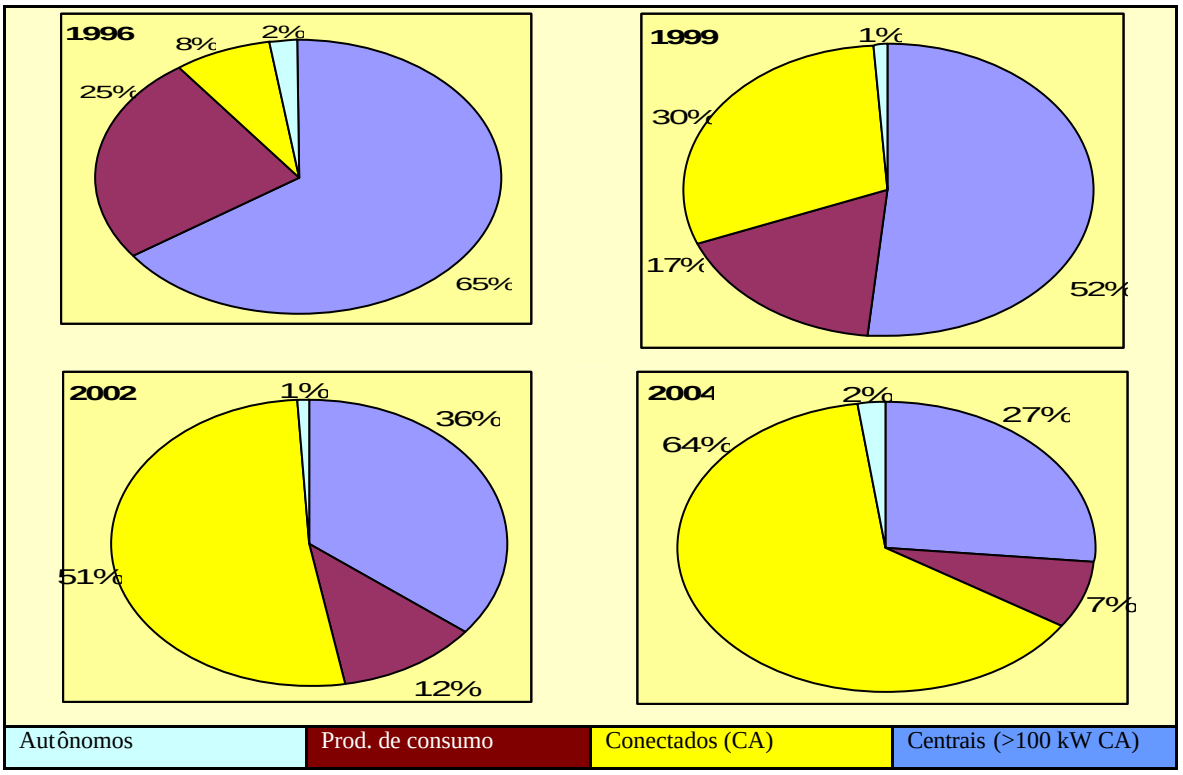


Figura 7 - Evolução do mercado fotovoltaico por segmento de aplicação.

Os dados de 2005 mostram ainda que 610 MW (CA), cerca de 64% do mercado mundial total de fotovoltaicos (955 MW), no ano de 2004, foram utilizados nesse segmento de aplicação, que vem apresentando taxas de crescimento elevadas, da ordem média de 36%/ano desde o ano de 2001. A evolução anual da capacidade instalada de 1998 a 2004 apresenta índices extremamente altos da ordem de 100% entre 1998 e 1999 e na faixa de 35 a 69%, no período de 1999 a 2004.

A importância dessa aplicação fica mais evidente na Figura 8 que ilustra comparativamente o desenvolvimento acumulativo entre sistemas autônomos e conectados desde 1995 até 2007, segundo REN21-Global States Report, (2007), Figura 8a. O valor total estimado de fotovoltaico conectado à rede até 2007 atingiu cerca de 7,7 GW. Na Figura 8b, pode-se constatar o crescimento dessa aplicação por ano. Em 2007, do total de vendas de 3.073 MWp cerca de 2.763 MWp (90%) foram direcionados para fotovoltaico conectado à rede, (MINTS, 2008).

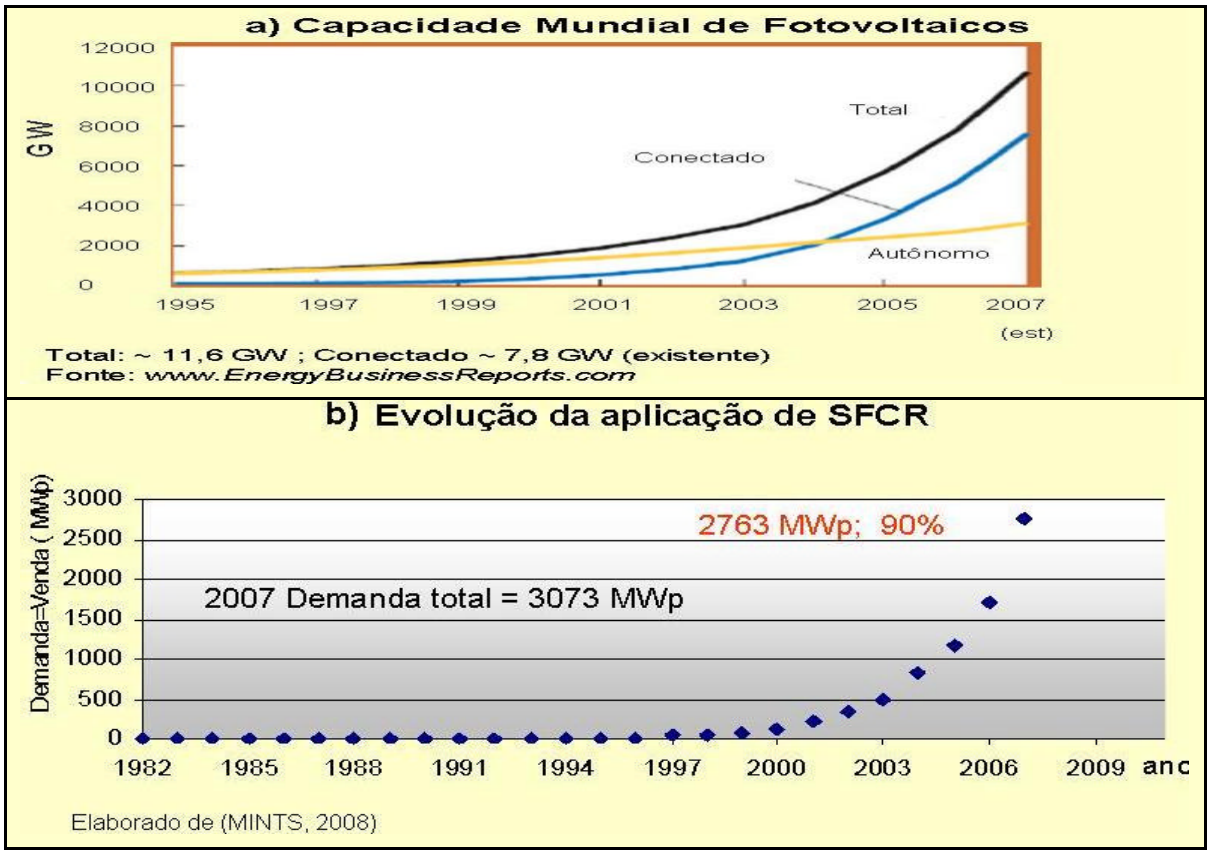
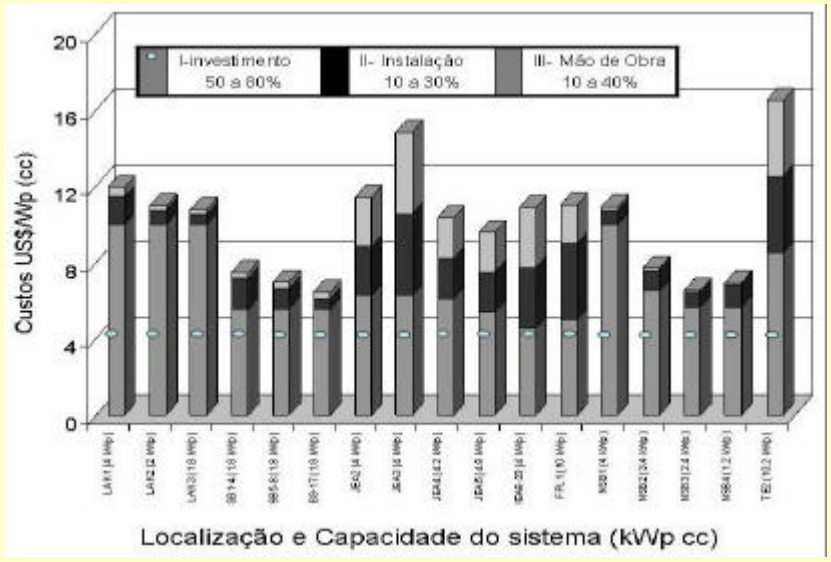


Figura 8 – Evolução da aplicação de FV conectados à rede: a) Capacidade mundial de 1995 a 2007. Valores existentes acumulados; b) Evolução por ano das vendas direcionadas a fotovoltaicos conectados à rede.

Com relação ao custo dos módulos fotovoltaicos, merecem citação outras referências que poderão auxiliar o entendimento da dinâmica de preços/custos da geração de eletricidade por SFCR.

A Figura 9 mostra uma composição básica de custos para SFCR proveniente de uma análise na base de dados do Programa FV em Edificações da Flórida (Florida PV Buildings Program), realizada por Dunlop et al., (2001). O estudo envolve 50 sistemas de várias capacidades nominais (1,2 a 10,2 kWp) em diversas localidades da Flórida, no ano 2000. O custo total de instalação foi classificado em três categorias: I-Investimento: custos com os equipamentos (módulo, inversor e acessórios) e ferramentas de projetos, responsáveis por 50 a 80%; II-Custos adicionais com a instalação (*Balance Of System*-BOS) na faixa de 10 a 30% e III-Custos de projeto e de instalação com 10-40%, percentuais relativos ao custo total situado na faixa de 6 a 17,0 U$/W cc . Segundo os autores, reduzir esse custo de um fator de 3 até 2010 e de um fator de 6 até 2020 requer não somente reduzir os custos de desenvolvimento, mas também inovação de produtos, melhores alternativas de integração entre os módulos FV e as edificações e novas alternativas para venda e distribuição.



FV Flórida - 2000

Composição de custos

50 sistemas

Cap: 1,2 a 10,2kWp

Módulo: 3,5- 8,0 U$/W

Inversor: 0,75-1,3 U$/W

BOS: 0,20-4,0 U$/W

Projeto: 0,5-2,0 U$/W

M&O: 0,01-0,2 U$/kWh

.....

Total: 6,5-17,0 U$/W cc

(DUNLOP et al., 2001)

* 6,5 a 7,0 U$/w cc para sistemas com 1,2 kWp

Figura 9 – Composição de custos de sistema FV conectados à rede
Programa FV em Edificações da Flórida (Florida PV Buildings Program),

Na Tabela 3, constam custos atuais para os dois principais equipamentos de um SFCR, no varejo dos mercados americano e europeu, publicados pelo SolarBuzz[4], em julho/2008, em comparação com valores no mercado do Brasil, provenientes de processos de aquisição por licitações, importação direta e/ou carta consulta, realizados dentro de (P&D) desenvolvidos na UFPE entre junho/2005 a outubro/2008.

Tabela 3 – Preços de equipamento de SFCR no mercado a varejo: EU, EUA e Brasil.

Item	**Europa** [1] **(EU$/Wp)**	**EUA** [1] **(US$/Wp)**	**BRASIL (R$/Wp) [US$/Wp]**		**Relativo ao EUA**
Módulo (preço médio)*	4,7	4,83	(Si-mono > 100Wp) [2]	15,15; 18,33	Acréscimo de +/- 90 a 100%
Menor custo Si-mono	2,74	4,35		[8,35; 9,00]	
Menor custo Si-poli	2,63	4,17	(Si-poli > 100Wp) [2]	14,15; 15,83 [8,11; 9,07]	Acréscimo de +/-95%
Menor custo Si-filme fino	2,34	3,72	(136 Wp) [3] flexl (45 Wp) [4] rígido	8,68 [3,6] 10,8 [6,0]	Acréscimo de +/-62%
Inversor ($/Wcc)**	0,454	0,721	(1,0 kWca) [2] (1,5 kWca 3,0 kWca 5,0 kWca) [5] (5 a 100 KWcc) [6]	3,9 [2,3] 4,9 [2,5] 2,8 [1,4] 2,9 [1,4] 2,44-3,32 [1,22-1,66]	Acréscimo de 100 a 150%

1-www.solarbuzz.com 07/2008: Publicação mensal de índices relativos à tecnologia solar.
*Reúne preços de 72 companhias em um total de 598 tipos de módulos = 125Wp [2,0 R$/US$]
**Reúne preços de 30 companhias com 222 tipos de inversores.
2- Licitações- modalidade Pregão eletrônico-realizadas dentro de P&D na UFPE em 03/ 2007 [1,7 R$/US$].
3- Proposta para aquisição por importação direta no mercado EU (sem impostos) em 07/2005, [2,4 R$/US$]
4- Proposta para aquisição no mercado nacional em 12/2007 [1,8 R$/US$]
5- Consulta para concorrência no mercado nacional, cap. 5kVA em 10/08 [2,0 R$/US$]
6- Consulta para concorrência mercado nacional, cap. 5 a 100 KVA: em 11/04 [2,0 R$/US$]

Frente a essas informações, no mercado a varejo no Brasil, o custo do módulo FV ($/Wp) é maior em cerca de 60% a 100% em relação ao apresentado no mercado internacional. Para o inversor ($/Wca), a diferença é muito maior, cerca de 100 a 150%. Evidentemente, em aquisições de grandes quantidades desses equipamentos, o fator escala deve diminuir essas diferenças.

[4] www.solarbuzz.com: SolarBuzz: Publicação mensal de índices relativos à tecnologia solar.

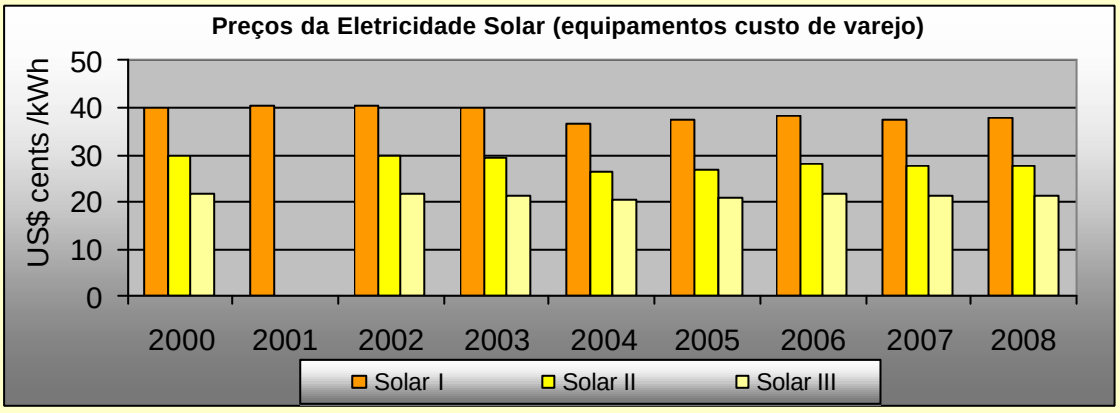
Índices norteadores do mercado de eletricidade solar, atuais, constam no *"Global Benchmark Price Índices"*. Esses índices representam o custo total (equipamento, instalação, interligação) gerado para três diferentes configurações de sistemas fotovoltaicos nos Estados Unidos, (www.solarbuzz.com/solarprices.htm em 8.08.08):

i) *Índice Solar I*- Índice de preço de eletricidade solar residencial: baseado em um sistema de 2 kWp autônomo ou conectado à rede, instalado em cobertura e com acumulação de energia (baterias, *back-up*);

ii) *Índice Solar II*-Índice de preço de eletricidade solar comercial: sistema de 50 kWp instalado no solo, conectado à rede sem acumulador de energia;

iii) *Índice Solar III*-Índice de preço de eletricidade solar industrial: sistema de 500 kWp plano, instalado em coberturas de edificações, conectado à rede e sem acumulação de energia.

A Figura 10 mostra a tarifa de eletricidade média dos últimos três anos para os três respectivos índices: Solar I, Solar II e Solar III: cerca de 0,38, 0,28 e 0,22 US$/kWh, (0,60, 0,43 e 0,34 R$/kWh), respectivamente nas condições citadas.



Solar I: sistemas até 2 kWp no telhado conectado e com bateria (*back -up*): Custo 17.999 US$;
Solar II: até 50 kW no solo conectado à rede (sem *back-up*): Custo 341.532 US$;
Solar III: com 500 KWp no teto de empresas de grandes edifícios (sem *back-up*): Custo 2.471.260 US$. Elaborado de: www.solarbuzz.com/solarprices.htm em 08.08.08.

Os valores anuais representados referem-se ao preço em julho de cada ano. (US$= 1,58 R$) A fonte de origem: "Solarbuzz" leva em consideração os preços mensais dos últimos 10 dias de cada mês de 70 -80 companhias de produtos elétricos solares;
Os custos envolvem: equipamentos, instalação e conexão à rede; para módulos= 125 Wp; financiamento a 5% a.a e amortização sobre 20 anos, tempo de vida do equipamento FV.

Figura 10- Custos de eletricidade solar nos Estados Unidos - Índices norteadores.

Considerando a opção residencial, a tarifa solar (0,38 US$/kWh) resulta cerca de três a quatro vezes a tarifa de eletricidade para o consumidor residencial nos EUA, na faixa de 0,093-0,14 US$/kWh e aparentemente, próximo ao valor da tarifa brasileira, na faixa de 0,20-0,25 US$/kWh[5].

Mesmo com o atual alto crescimento e com as políticas de subsídios existentes nos Estados Unidos e em outros paises, a geração de eletricidade por SFCR tem que procurar fomentar um maior nível de aceitação e sistemas mais eficientes, para que possa se firmar no mercado de energia elétrica.

2.6 Aspectos relacionados à avaliação de desempenho de SFCR

A base de dados mais importante sobre sistemas fotovoltaicos, principalmente de SFCR, é a Internacional Energy Agency- Photovoltaic Power System Programme TASK-2 *(IEA PVPS TASK 2*). Esse conjunto de informações, que vem sendo atualizado constantemente, é considerado como uma ferramenta única para análise de desempenho de sistemas FV, (JANH et al., 2000; 2004). No período de 1999 a 2003, reuniu informações de 774 sistemas FV, instalados em diversas localidades dos Estados Unidos, Europa, Ásia entre outros, sobre capacidades instaladas, desempenhos operacionais e modalidades de monitoramento entre outras.

Segundo Nordmann et al., (2007), dos 774 sistemas fotovoltaicos registrados, 657 sistemas apresentam informações completas para suas avaliações e desses, 645 (83,33%) são sistemas do tipo SFCR. Sessenta por cento dos sistemas analisados apresentam capacidades nominais menores que 10 kWp, apropriadas a SFCR de pequeno porte.

Dentre os métodos de análise do funcionamento operacional de SFCR, o parâmetro final e mais utilizado é o fator global de desempenho do sistema, conhecido, na literatura técnica, como *Performance Ratio* (PR). O fator (PR) considera as reais condições

[5] Tarifas de energia elétrica para consumidor residencial: Estados Unidos [0,093-0,14 US$/kWh], (www.wikipedia.org/wiki/Electricity_tariff 08/07/2008); Brasil [0,40-0,50 R$/kWh], (BEN-2007; Fatura CELPE- Conta de luz residencial em 10/2007).

de operação e todos os fatores que influem no rendimento do sistema como: condições ambientais (disponibilidade e qualidade do recurso solar, temperatura e umidade do ar, direção e velocidade do vento); condições de posicionamento do sistema (direção, orientação e inclinação); tipos de tecnologias das células fotovoltaicas (Silício mono, poli ou amorfo, filme finos); características técnicas individuais e em conjunto dos componentes (geradores, inversores); fatores de perdas (ôhmicas, descasamento) e as características de conexão do sistema com a rede elétrica convencional.

O prosseguimento desse tipo de análise técnica necessita de elementos provenientes do acompanhamento temporal das ocorrências de cada um dos parâmetros e condições envolvidas no desempenho do SFCR.

Dois procedimentos de monitoração reconhecidos constam nos "manuais de regulamentação": Ispra Guidelines - Report EUR 16339 EN e IEC 61724, (ANON,1995;1998 apud MONDOL et. al., 2006)[6].

O primeiro segue um método de monitoramento analítico e o segundo estabelece normas e diretrizes para analisar o desempenho do sistema monitorando parâmetros, medindo dados, frequência de medidas e tempo de monitoramento, (MONDOL et al., 2006). Referências mais recentes, sobre a normalização vigente aplicada na União Européia, são reportadas em Dávila et al, (2004) e em Difusión IDAE, (2002) e FSEC-GP-70-01, (2002).

Esse tema será abordado mais detalhadamente no capítulo destinado à avaliação do desempenho do sistema experimental utilizado como base técnica no desenvolvimento da metodologia proposta.

---

[6] ANON. 1995. Guidelines for the assessment of photovoltaic plants document : analysis and presentation of monitoring data. Report EUR 16339 EN, Joint Research Centre,Ispra Establishment, Commissiong of the European Countries;1995.

ANON. 1998. Photovoltaics in buidings: testing, commissiong and monitoring guide. ETSU Report Nº S/P2/00290/REP;1998.

2.7 Aspectos relacionados à avaliação de potenciais de SFCR

De forma praticamente obrigatória, metodologias de avaliação de potencial de energias renováveis (RE) consideram três níveis hieráticos de avaliações: a existência da fonte do recurso energético, a disponibilidade e possibilidade de sua captação e os meios técnicos existentes para transformar o recurso em energia útil. Esses temas serão desenvolvidos no decorrer deste trabalho.

Dentre as referências de procedimentos para a estimativa do potencial de SFCR relacionado à disponibilidade de área, destacam-se pela originalidade e abrangência, os estudos de Steemers, (2001) e de Izquierdo et al.,(2007).

Steemers, (2001), no seu trabalho *Guia de Projetos e Implementação de Sistemas FV em Cidades*, realiza um estudo tendo como base as relações de áreas e volume das edificações existentes em determinadas localidades. O autor determina o fator área/volume para várias localidades da Europa, relacionando os resultados obtidos a índices de potencialidades de instalação de SFCR. Como conclusão mostra que as localidades com grande densidade de edificações e, portanto, com ruas mais oclusivas, são menos favoráveis a SFCR instalados em fachadas. Sítios mais dispersos favorecem SFCR instalados em fachadas e em telhados.

Na avaliação do potencial para SFCR, para a Espanha, Izquierdo et al.,(2008) estimam as áreas disponíveis utilizando banco de dados de áreas urbanas das unidades administrativas que compõem o país, das superfícies ocupadas pelas edificações e pela densidade habitacional de cada unidade administrativa espanhola. A área disponível à instalação de SFCR é estimada considerando diferentes composições entre os fatores densidade demográfica e densidade de edificações, ponderados por critérios restritivos vinculados à não ocupação, à probabilidade de sombras e à utilização da área para outras finalidades.

No Brasil, o tema potencialidade de SFCR em áreas urbanas tem sido pouco explorado. Destacam-se alguns grupos de pesquisadores que vêm realizando estudos nesse

tema, como os grupos: do Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos da Universidade de São Paulo (USP) e da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Os estudos têm como princípio a existência do recurso solar em contrapartida à determinada demanda elétrica e/ou à sua redução ou enfocam o tema, da potencialidade de SFCR, tendo como base o desenvolvimento de ferramentas na área de legislação para o setor elétrico, como por exemplo, os trabalhos do grupo da UFSC citados a seguir.

O estudo *Programa de telhados solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica pública no Brasil*, (RÜTHER et al., 2008), tem como base o desenvolvimento de ferramentas que possam auxiliar a criação de uma legislação no setor elétrico para o desenvolvimento de um programa nacional de telhados solares fotovoltaicos. Os autores, baseados no Programa Alemão adaptado a alguns aspectos da realidade do Brasil, apresentam simulações para diferentes portes de programa e condições econômico-financeiras. Um dos cenários propõe um programa de 1.000 MWp de fotovoltaicos a serem instalados em um período de 10 anos, com produção média de 1.662 kWh/kWp/ano, tarifa prêmio por kWh produzido durante 25 anos nas seguintes condições: investimento da ordem de 5,0 Euros/kWp instalado, declinado a 5% ao ano, taxa interna de retorno ao investidor de 7 % a.a, custo de manutenção de 1% a.a, considerando o preço da tarifa de energia convencional de 0,47 R$/kWh com reajuste de 4 % e 7 % a.a. Nessas condições, a paridade de rede para a tecnologia solar FV será alcançada a partir do ano “5” ou “6”, respectivamente aos reajuste da energia convencional. Ou seja, tendo o ano 2008 como ano base, em 2013 ou 2012 os preços do kWh solar FV e convencional serão semelhantes.

Em outro estudo, intitulado *O potencial da geração FV integrada a edificações e conectada à rede elétrica pública no Brasil,* Rüther et al., (2008) aborda a possibilidade de injeção da energia solar, na rede em horários de pico de demanda. A proposta envolve sistemas fotovoltaicos integrados às edificações e injeção em alimentadores urbanos na cidade de Florianópolis, onde os momentos de pico de carga, normalmente, coincidem com os de insolação máxima. Áreas necessárias para a instalação dos sistemas são determinadas em função de seis tipos de tecnologias da célula fotovoltaica e do Fator Efetivo de Capacidade de Carga, traduzido como o percentual da potência instalada de um gerador fotovoltaico que pode ser considerado despachável.

CAPÍTULO 3

DESENVOLVIMENTO DA METODOLOGIA

A metodologia proposta conta com uma forte base experimental proveniente de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) em realização e direcionados aos aspectos técnicos envolvidos no desempenho global de SFCR. Fundamenta-se em avaliações referentes a três potenciais: o potencial físico, representado pela quantidade total de energia captada por determinada área em observação; o potencial geográfico, traduzido no dimensionamento da área de captação da energia incidente e o potencial técnico, relacionado à tecnologia de geração de energia fotovoltaica, desempenho e características técnicas dos equipamentos. Em função dos produtos e resultados gerados, os procedimentos e ferramentas metodológicos utilizados são agrupados em cinco ambientes: ***Físico, Técnico, Geográfico, Econômico e Analítico,*** como comentado e ilustrado na Figura 1, (Cap. 1). Os resultados associados resultam em estimativas da potencialidade de SFCR em centros urbanos, especificamente quando os sistemas são localizados em coberturas de edificações, situação no qual são denominados de Telhados Solares ou Telhados Fotovoltaicos.

Como aplicativo da metodologia desenvolvida, enfoca-se especificamente, como universo de estudo, a área do Campus da Universidade Federal de Pernambuco-Brasil. No entanto, sua utilização não é restrita ao Campus UFPE, podendo ser utilizada para outros espaços desde que alguns parâmetros e condições sejam ajustados ou redefinidos em função da disponibilidade de dados de entrada do espaço selecionado.

O desenvolvimento da metodologia proposta segue uma rotina de etapas como mostra o diagrama de blocos da Figura 11, onde para cada um dos ambientes se tem:

- Dados de entrada: informações que alimentam o processo do ambiente;
- Ferramentas ou procedimentos: mecanismos utilizados para processar as informações gerando os resultados que se tem com o objetivo;
- Dados de saída: resultados gerados dentro do ambiente e que podem ser um produto final e/ou dados de entrada para outro ambiente.

3.1 Ambiente Físico

*O A**mbiente Físico (AF)** envolve informações: da localização do espaço em estudo (coordenadas geográficas; latitude e longitude), parâmetros característicos provenientes das relações geométricas do sistema Sol-Terra (ângulos: horário, azimutal, declinação solar, cumprimento dos dias...); climatológicas e meteorológicas (nível de irradiação e temperatura ambiente) que podem ser provenientes de várias fontes, Atlas, mapas, bases de dados de séries históricas ou base de dados de medições locais. Na ausência de dados da radiação incidente no local, estimativas da radiação solar no plano horizontal até a energia incidente no local específico podem ser realizadas via procedimentos clássicos da chamada metodologia hierárquica: considerações exclusivamente de caráter geométrico do sistema Sol-Terra, permitem obter expressões para diferentes períodos de tempo (hora, dia...) da irradiação incidente sobre uma superfície horizontal situada fora da atmosfera, muitas vezes necessária para calcular ou referendar valores medidos da radiação global incidente sobre uma área terrestre. Posteriormente, os valores da radiação total no plano inclinado e suas componentes (direta e difusa) são calculados, normalmente, via modelos isotrópicos, "modelo de Duffie e Beckman" e correlações, "correlações de Liu e Jordam", por exemplo,* (KREITH et Al., 1978; LORENZO, 1994; FRAIDENRAICH et al., 1995; TIBA et al., 2000).

No caso estudo do Campus UFPE, informações de entrada do Ambiente Físico correspondem a dados recurso solar e da temperatura ambiente provenientes de medições locais, processados em termos de médias diárias mensais anuais e referendados com dados de bases históricas. Esse tópico será abordado no próximo capítulo.

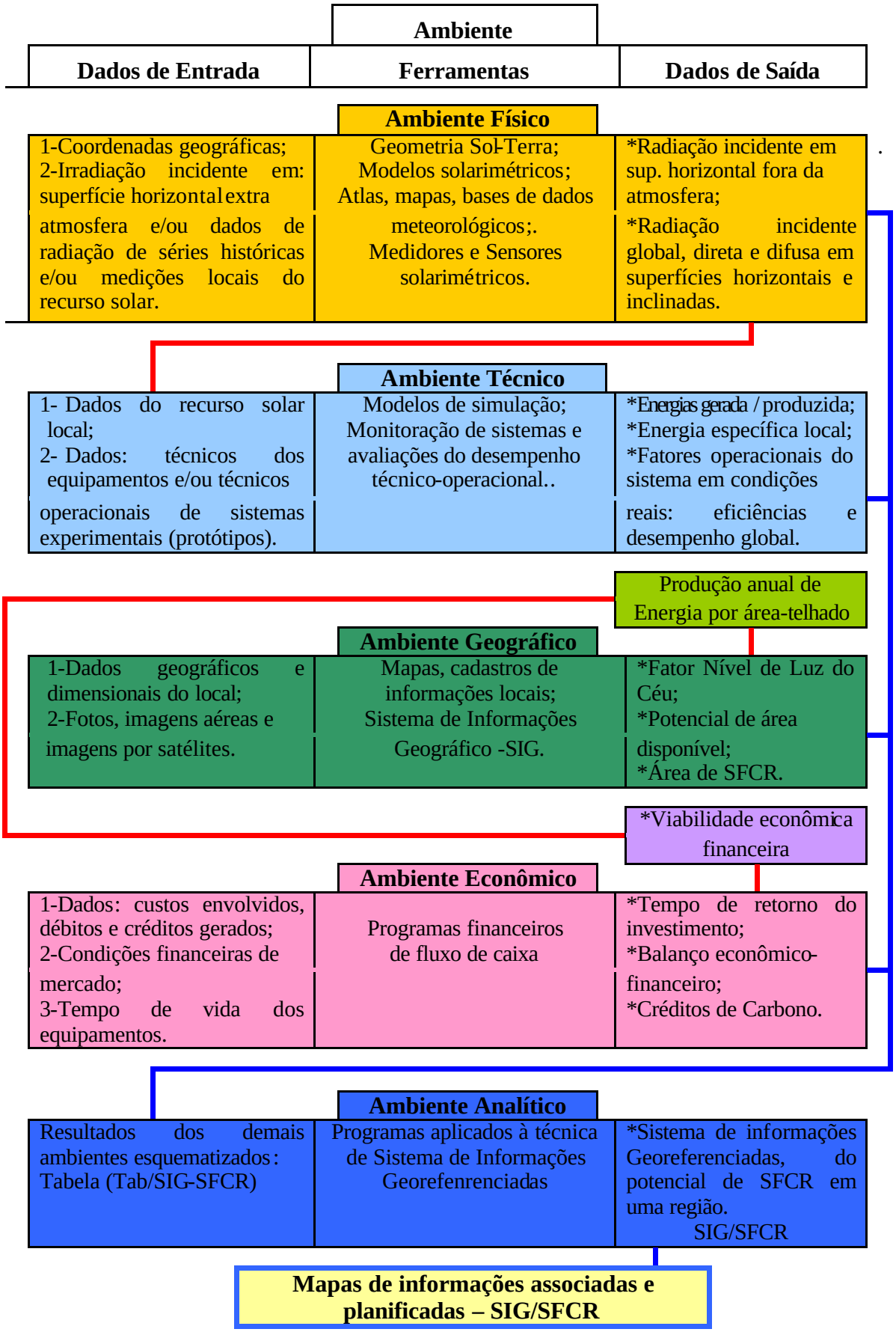


Figura 11 - Diagrama de bloco: Metodologia de avaliação do potencial de telhados solares.

3.2 Ambiente Técnico

*O **Ambiente Técnico (AT)** tem como base a energia produzida pelo sistema. Normalmente é estimada via modelos de simulação utilizando-se os dados do recurso solar, (**Ambiente Físico**) e dados técnicos de catálogos de equipamentos. Geralmente, esse tipo de procedimento não leva em consideração os efeitos negativos que a radiação provoca na eficiência do gerador fotovoltaico causados pelo aumento da temperatura de operação do modulo FV e na eficiência do inversor resultando em sistemas aparentemente mais eficientes. Estudos mais recentes utilizam, nos modelos de simulação, dados de fatores de desempenho global de sistemas FV provenientes de bases de dados operacionais de sistemas em funcionamento.*

Na presente proposta a avaliação da produção de energia tem, como base fundamental, dados proveniente da avaliação técnica de um SFCR- Teste instalado no Campus, apelidado SFCR-UFPE III. Os resultados obtidos do monitoramento experimental, desse sistema, permitem calcular a eficiência do sistema e de seus componentes em reais condições de operação (radiação, temperaturas ambiente e de operação), resultando em valores do coeficiente global de desempenho (PR) e da densidade de potência específica para a região em estudo mais realistas.

Os procedimentos adotados serão expostos a seguir e posteriormente aplicados no Estudo experimental do desempenho técnico do SFCR UFPE III.

3.2.1 Procedimentos de avaliação técnica de SFCR

Dentre os métodos de análises técnicas de desempenho de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede (SFCR), o parâmetro de avaliação final é o desempenho global do sistema, conhecido na literatura técnica internacional como *Performance Ratio* (PR). O Fator PR considera as reais condições de operação e todos os fatores que influem na eficiência global do sistema como: condições ambientais (disponibilidade e qualidade do recurso solar, temperatura e umidade do ar, direção e velocidade do vento); condições de posicionamento do sistema (direção, orientação e inclinação); tipos de tecnologias das células fotovoltaicas (silício mono, poli ou amorfo, filme finos, entre outros);

características técnicas individuais e em conjunto dos componentes (geradores, inversores); fatores de perdas (ôhmicas, descasamento) e as características de conexão do sistema com a rede elétrica convencional.

O prosseguimento desse tipo de análise necessita de elementos provenientes do acompanhamento temporal das ocorrências de cada um dos parâmetros e condições envolvidas no desempenho do SFCR.

Há dois procedimentos principais de monitoração reconhecidos e que constam nos "manuais de regulamentação": Ispra Guidelines - Report EUR 16339 EN e IEC 61724, (MONDOL et al., apud ANON.1995;1998). O primeiro segue um método de monitoramento analítico e o segundo estabelece normas e diretrizes para analisar o desempenho do sistema através da monitoração de dados experimentais, (MONDOL et al., 2006). Referências mais recentes, sobre a normalização vigente aplicada na União Européia, são reportadas em Dávila et al., (2004) e no Difusion IDAE, (2002) e no Relatório FSEC-GP-70-01, (2002).

Segundo esses procedimentos, os resultados são expressos como valores totais ou médios, relativos a um determinado período de monitoramento. Os resultados, em longo prazo, devem ser expressos como médias anuais.

As seguintes grandezas são monitoradas mediante medições:

- Recurso solar: irradiação nos dois planos, horizontal e inclinado do gerador (h_h; h_{fv}) em [W/m^2];
- Temperatura ambiente e de operação do gerador FV em [^0C];
- Corrente elétrica gerada na saída do gerador FV em [Acc];
- Tensão de operação no inversor, em [Vcc];
- Potência elétrica gerada pelo arranjo FV na entrada do inversor, em [Wcc];
- Potência elétrica solar produzida na saída do inversor, em [Wca];
- Potência elétrica total consumida pela demanda em [Wca];
- Potência elétrica consumida da rede de abastecimento de energia, em [Wac].

Os seguintes parâmetros podem ser determinados com os valores instantâneos provenientes do monitoramento e expressos como valores totais do período e/ou médias: horária diária (d), diária mensal (m) e mensal anual (a):

- Radiação solar nos planos horizontal e do gerador FV em valores totais como ($H_{fv,d}, H_{fv,m}, H_{fv,a}$) ou em valores médios como: ($\overline{H}_{fv,d}, \overline{H}_{fv,m}, \overline{H}_{fv,a}$) em [kWh/m^2.d];
- Energia solar coletada no plano do gerador FV (E_{col}), como ($E_{col,d}, E_{col,m}, E_{col,a}$) para valores totais ou em valores médios como ($\overline{E}_{col,d}, \overline{E}_{col,m}, \overline{E}_{col,a}$) em [kWh/d];
- Energia elétrica gerada pelo gerador FV, ($\overline{E}_{fv}$) em [kWh/d];
- Energia elétrica produzida pelo sistema FV, ($\overline{E}_{a}$) em [kWh/d];
- Energia elétrica consumida pela demanda, ($\overline{E}_{c}$) em [kWh/d];
- Energia elétrica solar injetada na rede, ($\overline{E}_{inj}$) em [kWh/d];
- Energia elétrica consumida com as parcelas da contribuição solar e da rede, ($\overline{E}_{c,sol}$; $\overline{E}_{c,red}$) em [kWh/d ou %].

Os valores médios em um período são calculados como exemplificado a seguir para valores da média diária, da radiação no plano do gerador e da energia coletada média diária:

$$\overline{H}_{fv,d} = \frac{1}{N}\sum_{t=1}^{t=N} h_{fv,t}.\Delta t \qquad (1)$$

$$\overline{E}_{col,d} = A_a \times \overline{H}_{fv,d} \qquad (2)$$

Onde ($h_{fv,t}$) corresponde aos valores instantâneos medidos da irradiação solar no plano do arranjo FV no período (t) da taxa de aquisição de dados, (N) é o número de ocorrências no dia (d) e (A_a) é a área do gerador fotovoltaico. Procede-se com o mesmo procedimento para os demais parâmetros:

A partir desses valores, os parâmetros de avaliação: eficiências, índices de produtividade e perdas são determinados e utilizados para analisar o desempenho global do sistema, em termos de médias, diárias (d), mensais (m) ou anuais (a), (FSEC-GP-70-01, 2002, apud MONDOL et al.,2006).

As eficiências expressam rendimentos e os índices de produtividades indicam o comportamento do sistema sob condições específicas permitindo que sistemas de diferentes capacidades e/ou localizações possam ser comparados. Esses parâmetros, definidos a seguir, podem ser determinados utilizando-se as expressões agrupadas na Tabela 4.

- Eficiências médias do: gerador FV ($\overline{h}_{fv}$), inversor ($\overline{h}_{inv}$) e sistema ($\overline{h}_{s}$);
- Índices de produtividades médios: de referência ($\overline{Y}_{r}$), do gerador FV ($\overline{Y}_{a}$) e final do sistema ($\overline{Y}_{f}$);
- Fatores de desempenho médios ($\overline{PR}$);
- Perdas no sistema relativas às perdas durante a conversão de CC/CA ($\overline{L}_{s}$), e perdas na coleção da radiação ($\overline{Lc}$), relativas às perdas na captação da irradiação pelo aumento da temperatura dos módulos, problemas na orientação do gerador e outros fatores que contribuem para diminuir a quantidade de energia coletada/gerada pelo arranjo FV;
- *Índice de Referência* (Y_r) - relação entre a irradiação diária incidente no plano do gerador fotovoltaico e a irradiação em condições (STC). Indica a energia teórica disponível por dia por kWp instalado (kWh/kWp) ou quanto tempo seria necessário para que o sistema tenha a mesma produção quando submetido à condição de radiação de 1 kW, em (h/d);
- *Índice do Arranjo Fotovoltaico* (Y_a) - relação entre a energia fotovoltaica gerada e sua potência nominal em condições (STC), expresso em (kWh/kWp). Indica quanto tempo de operação o arranjo fotovoltaico necessita operar, com a potência nominal, para gerar a mesma quantidade de energia, (h/d);

Tabela 4 - Expressões para a determinação dos parâmetros de desempenho de SFCR. Valores médios: diários (d), diários mensais (m) e diários mensais anuais (a).

$\overline{h}_{fv,d} = \frac{\overline{E}_{fv,d}}{\overline{E}_{col,d}}$	$\overline{h}_{fv,m} = \frac{1}{N}\left(\sum_{d=1}^{N} \overline{h}_{fv,d}\right)$	$\overline{h}_{fv,a} = \frac{1}{N}\left(\sum_{m=1}^{N} \overline{h}_{fv,m}\right)$
$\overline{h}_{inv,d} = \frac{\overline{E}_{a,d}}{\overline{E}_{fv,d}}$	$\overline{h}_{inv,m} = \frac{1}{N}\left(\sum_{d=1}^{N} \overline{h}_{inv,d}\right)$	$\overline{h}_{inv,a} = \frac{1}{N}\left(\sum_{m=1}^{N} \overline{h}_{inv,m}\right)$
$\overline{h}_{s,d} = \frac{\overline{E}_{a,d}}{\overline{E}_{col,d}}$	$\overline{h}_{s,m} = \frac{1}{N}\left(\sum_{d=1}^{N} \overline{h}_{s,d}\right)$	$\overline{h}_{s,a} = \frac{1}{N}\left(\sum_{m=1}^{N} \overline{h}_{s,m}\right)$
$\overline{Y}_{r,d} = \frac{\overline{H}_{fv,d}}{G_o}$	$\overline{Y}_{r,m} = \frac{1}{N}\left(\sum_{d=1}^{N} \overline{Y}_{r,d}\right)$	$\overline{Y}_{r,a} = \frac{1}{N}\left(\sum_{m=1}^{N} \overline{Y}_{r,m}\right)$
$\overline{Y}_{a,d} = \frac{\overline{E}_{fv,d}}{P_{o,fv}}$	$\overline{Y}_{a,m} = \frac{1}{N}\left(\sum_{d=1}^{N} \overline{Y}_{a,d}\right)$	$\overline{Y}_{a,a} = \frac{1}{N}\left(\sum_{m=1}^{N} \overline{Y}_{a,m}\right)$
$\overline{Y}_{f,d} = \frac{\overline{E}_{a,d}}{P_{o,fv}}$	$\overline{Y}_{f,m} = \frac{1}{N}\left(\sum_{d=1}^{N} \overline{Y}_{f,d}\right)$	$\overline{Y}_{f,a} = \frac{1}{N}\left(\sum_{m=1}^{N} \overline{Y}_{a,m}\right)$
$PR = \frac{Y_f}{Y_r} = \frac{Y_f H_{stc}}{H_{fv}}$	$\overline{PR}_d = \frac{1}{N}\sum_{d=1}^{N} PR_d$	$\overline{PR}_m = \frac{1}{N}\sum_{d=1}^{N} \overline{PR_d}$
$P_{o,fv}$ = potência nominal do arranjo FV G_o = 1 kW/m^2, radiação condições STC		$\overline{PR}_a = \frac{1}{N}\sum_{m=1}^{N} \overline{PR}_m$
$\overline{L}_{c,a} = \overline{Y_{r,a}} - \overline{Y_{a,a}}$		
$\overline{L}_{s,a} = \overline{Y_{a,a}} - \overline{Y_{f,a}}$		

- *Índice Final do Sistema* (Y_f) - relação entre a energia efetivamente útil e a potência nominal em (STC). Indica a produtividade do sistema em relação à sua potência nominal. Representa a energia injetada ou consumida pelo usuário durante certo intervalo de tempo, (kWh/kWp) ou o número de horas que o sistema necessita operar, na potência nominal, para fornecer a mesma quantidade de energia produzida, (h/d).

- *Fator de Desempenho ou Rendimento Global* (PR) - representa a eficiência da instalação em reais condições de operação e considera todos os fatores que influem na eficiência global: tipo de células, dependência da eficiência de gerador e inversor com a temperatura, perdas por descasamento entre módulos e perdas ôhmicas, eficiência energética do inversor, relação entre as capacidades nominais do inversor e do gerador entre outras.

3.2.2 Estudo experimental - Desempenho técnico do SFCR UFPE III

O sistema-teste (SFCR-UFPE III) é oriundo do primeiro sistema fotovoltaico conectado à rede instalado no Campus da UFPE em 2003. O UFPE I foi montado sobre um "trailler" localizado no canteiro central do Campus e injetava toda energia gerada na rede convencional que alimentava a decoração natalina no Campus. Entre 2004 e meados de 2007, como SFCR-UFPE II, operou com várias configurações técnicas e modalidades operacionais como, por exemplo, testes com diferentes valores da relação entre as capacidades nominais do inversor e do gerador FV, conhecido como Fator de Dimensionamento do Inversor (FDI) e em situações com e sem armazenamento de energia em baterias, (*back-up*), (BARBOSA et al., 2006; BARBOSA et al., 2007).

Em sua terceira versão (UFPE-III), desde novembro de 2007, encontra-se operando com uma capacidade de 1,28 kWp (p-Si), sem acumulação de energia e com um FDI de 0,9, valor dentro da faixa considerada ideal para SFCR localizados na cidade de Recife, (MACEDO, 2006).

3.2.2-1 Descrição e operação do sistema-teste SFCR-UFPE III

Basicamente, o sistema UFPE III é constituído pelo próprio sistema fotovoltaico, o gerador FV e o inversor, e por um quadro de comando com um sistema de aquisição de dados. A energia produzida supre parte do consumo do laboratório FAE- 2, via uma das três fases da rede elétrica local, correspondente à demanda com a iluminação e computadores.

O arranjo do gerador, no formato da sigla da UFPE, encontra-se posicionado faceando o Norte Geográfico com inclinação de 23º, ocupa uma área de cerca de 10 m^2 e pesa 128 kg, não considerando sua estrutura de suporte (perfis de alumínio). O sistema de aquisição de dados, tipo CR 1000 da Campbell, monitora os parâmetros elétricos e meteorológicos desde a captação do recurso solar, passando pela geração até a produção de energia útil e as energias, fornecida pela rede local e consumida pela carga. Cada variável envolvida é medida individualmente por sensores apropriados. As ocorrências são registradas a cada minuto e armazenadas para posterior tratamento em termos de médias diária, mensal e anual.

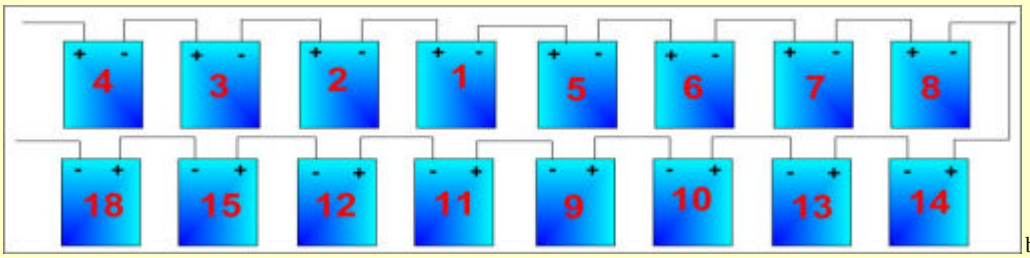
Uma vista do SFCR-UFPE III com o esquema de ligação entre os módulos e o fluxo de operação com os pontos de medição assinalados são mostrados na Figura 12. As especificações técnicas dos principais componentes do sistema são apresentadas na Tabela 5, junto com a relação dos parâmetros monitorados, características dos sensores e equipamentos de medição, simbologia e unidades utilizadas.

O gerador FV de 1,28 kWp de potencia nominal é composto por 16 módulos de Silício policristalino. O arranjo encontra-se inclinado de 23^0 faceando o Norte Verdadeiro[7]. Os módulos apresentam as seguintes características no ponto de máxima potência e nas condições STC: capacidade nominal de 80 Wp, corrente de 4,73 A e tensão de 16,9 Vcc.

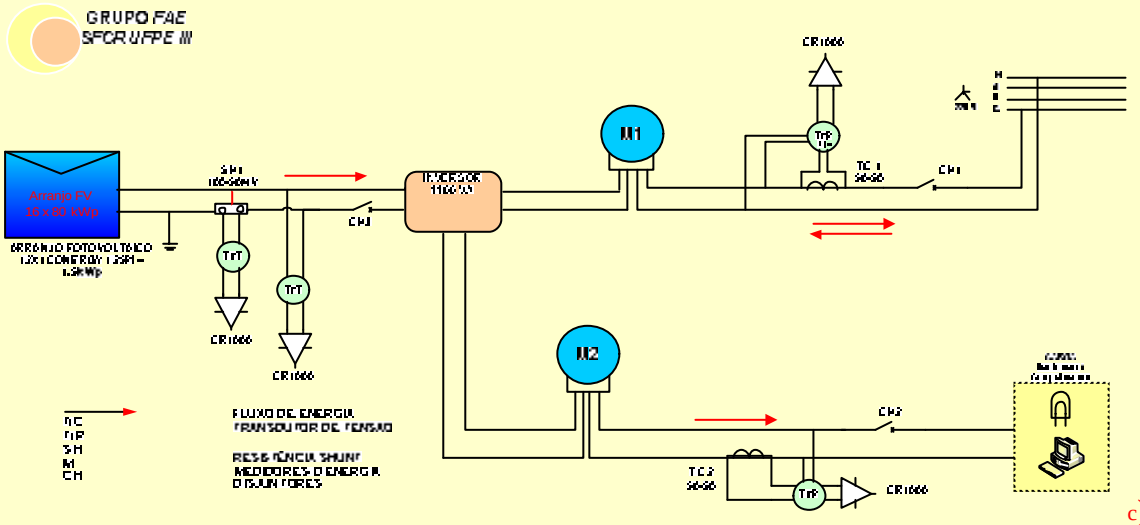
O inversor, tipo SunnyBoy 1100E da SMA Solar Technology AG com 1,1 kWcc (1,0 kVA) de capacidade nominal possui seguidor do ponto de máxima potência do gerador FV na faixa de 139 a 400 volts, corrente máxima de entrada admitida de 10 A, saída de 60 Hz, 1000 Wca e 110 Vca. Para atender essas características, o arranjo fotovoltaico foi montado interligando-se os 16 módulos em série, proporcionando em condições STC e no ponto de máxima potência do arranjo valores de 1,28 kWp, 4,73 A e 270,4 V para potência máxima, corrente e tensão de saída, respectivamente.

[7] Convenção: Para o Hemisfério Sul os ângulos são negativos, por exemplo: Latitude de Recife (?=-8)= (?=8S); Inclinação de 230 faceando o Norte Geográfico (ß=-23)= (ß=23 Faceando o Norte) = (ß=23N)

a)



b)



c)

Na estrutura de composição da sigla UFPE há 20 módulos, mas, quatro módulos estão desconectados.

Figura 12- SFCR-UFPE III: a)Vista do sistema; b) configuração do arranjo FV; c) diagrama de fluxo.

Tabela 5- SFCR UFPE III: Composição e características técnicas do sistema; Parâmetros e/ou grandezas monitorados e unidades de medição.

Equipamento (Função)	**Marca; Tipo [símbolo no diagrama]**	**Especificação do fabricante Condições STC (1kW/m^2; 25^{0}C; 1,5AM)**
Gerador/Arranjo FV (Geração de energia)	16 unidades. KC-80 interligação em série.	Potência nominal, (P_{ofv}): 1,28 Wp Ângulo de inclinação (ß) (23^0 N).
		Área; Peso: 10,8 m2; 12,8 kg
Módulo FV (componente do gerador)	KC-80: Kyocera	Pto. de máxima potência: Potência; Corrente; Tensão. $P_{máx}$ 80 W; 4,73 A;16,9 Vcc
		Eficiência: ?=12%
		Corrente curto circuito: I_{cc} = 4,96 A
		Tensão circuito aberto: V_{oc} = 21,5 Vcc
		Temp. de operação: Top = 47^{0}C;800W/m^2
		Coef. de temperatura: 2,12 10^{-3} A/^{0}C; de Corrente; de Tensão: -8,21 10^{-2} V/^{0}C
		Dimensões; peso: 976x652x52 mm; 8,0 kg
Inversor (conversão da energia gerada em CC/CA	SMA Tecnology; SunnyBoy 1100E [INV]	Potência nominal (P_{oinv}) 1,1 KVA
		Limites de entrada: Potência; Corrente; Tensão. 1,5 kW; 10 A; 139-400 Vcc
		Limites de saída: Potência nominal/pico; Tensão; Freq; Efic máx; 1,0 /1,1 kW; 220 V; 60 Hz;93,5%
		Autoconsumo: operação; Não Operação. = 4 W ~0,1 W
		Dimensões; Peso 322x322x18 mm; 21 kg
Medição e aquisição de dados: medida (símbolo; unidade), sensores; especificações; [símbolo no diagrama]		
Sistema de aquisição de dados	CR- 10X Campbell [CR10X]	Registro e armazenagem de dados Taxa aquisição de 1 em 1 min.
Irradiação no plano do gerador FV (H_{fv};W/m^2)	Pyranômetro FV Li-cor 200 AS; Série: PY55826 [IFV]	Calibração original espectro luz natural diurna (400 a 1100 nm), saída em mV (0 a 10 mV),erro absoluto +-5%, sensibilidade 0,2 kWm^{-2}/mV. Calibração em 04/08:Luz natural com piranômetro PSP Epply K= 5 mV/Wm^{-2}
Temperatura do gerador FV (T_{fv};^{0}C)	LM-35 [TFV]	Circuitos integrados com base em transistores de silício, faixa de medição -55 a 150^{0}C, resposta linear (10mV/^{0}C) precisão 0,5^{0}C
Corrente de saída no arranjo FV (i_{fv}; A)	Yocokawa TT2371A-16/A01/16 Série 21859-04 [TrC1]	Resistência shunt com transdutor de tensão: (50 A - 50 mV) (0 a 50mV; +-0,25%)
Tensão de saída no gerador FV (U_{fv}; V)	Yocokawa 2371A-16/VPK/AD Série 25055 [TtT1]	Divisor de tensão resistivo precisão 1%
Potência total consumida ($P_{t,c}$; W)	Yocokawa 2285A-016/W16/AD Série 28699-04 [TpP1]	Transdutor de potência unidirecional (220 V 5 A; 0 a 4000 W; 0,5%)
Potência fornecida pela rede elétrica local (P_{rec}; W)	Yocokawa 2285A-016/ P26/DD Série 229693-05 [TpP2]	Transdutor de potência bidirecional (220V 5 A; - 4000 a 4000 W; +-1%)
Potência ativa na saída do inversor (P_a; W)	Yocokawa TP 2285AO/16/P16-DD; Série 29641-05 [TpP3]	Transdutor de potência bidirecional (220V 5 A; - 4000 a 4000 W; +-1%)

3.2.2-2 Resultados experimentais do SFCR-UFPE III

Os principais resultados, obtidos para o período de 1 ano, novembro/2007 a outubro/2008, de monitoramento do Sistema UFPE III são mostrados nas Figuras 13 a 16. A análise foi realizada em 73% dos dias observados, 262 dias que apresentaram dados consistentes.

1- Radiação solar e geração fotovoltaica (dc)

Os resultados obtidos como médias diárias mensais da radiação incidente no plano do gerador ($\overline{H}_{fv,m}$) são mostrados na Figura13a. Valores na faixa de 4,0 a 6,0 kWh/m^2.dia foram verificados, resultando em uma radiação de 4,73 kWh/m^2.d como média diária mensal anual.

O excelente potencial solar para a região da Cidade do Recife, caracterizado não só pelo nível quantitativo, mas também pela uniformidade ao longo dos meses, pode ser observado pela freqüência de distribuição normalizada dos valores médios diários ($\overline{H}_{fv,d}$) sobre todo o período observado, Figura 13b:

Para 76 % do total de dias os resultados são maiores que 4,0 kWh/m^2.d e 34% maiores que 5,0 kWh/m^2.d. A maior incidência (42%) ocorre para valores de 4,0<($\overline{H}_{fv,d}$)=5,0. Valores maiores que 6,0 kWh/m^2.d ou menores ou iguais a 3,0 kWh/m^2.d representam apenas cerca de 5% e 6%, respectivamente.

Comparativamente, a Figura 13a mostra os valores médios diários mensais das energias coletadas ($\overline{E}_{col,m}$), geradas ($\overline{E}_{fv,m}$) e da eficiência do gerador ($\overline{h}_{fv,m}$). Em termos de médias diárias mensais anuais, os valores obtidos são: para ($\overline{E}_{col,a}$) de 48,26 kWh/d, e de 5,05 kWh/d para ($\overline{E}_{fv,a}$).

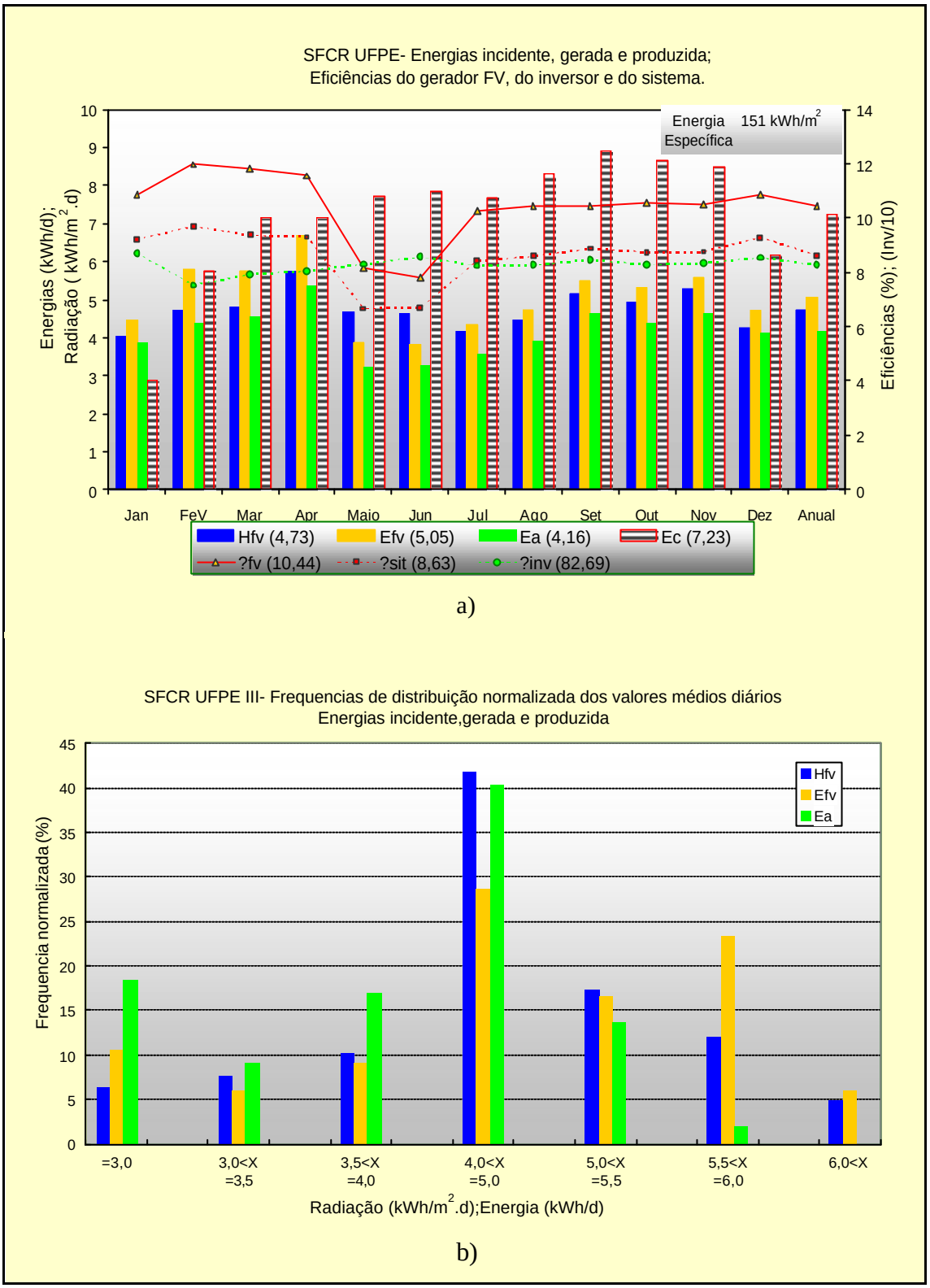


Figura 13 – SFCR UFPE III: a)Energias: radiação incidente no plano FV, gerada, produzida e consumida; Eficiências do gerador, do inversor e do sistema, valores como médias diárias mensais e anuais; b) Frequências normalizadas dos valores das médias diárias das energias incidente, gerada e produzida.

A frequência de distribuição normalizada dos valores médios diários da energia gerada ($\overline{E}_{fv,d}$) é mostrada também na Figura 13b. Em 74 % dos dias, os valores são maiores que 4,0 kWh/dia e em 26 %, menores ou iguais. Apresentam valores acima de 5,0 kWh/d, 46% dois dias e em 29 %, os resultados são maiores que 5,5 kWh/d. Apenas, cerca de 10 % e 6 % dos dias apresentam valores menores que 3,0 kWh/d e maiores que 6,0 kWh/d.

Esses resultados implicam em valores de eficiências do gerador FV ($\overline{h}_{fv,m}$) médios mensais entre o mínimo de 7,8 % (junho) e o máximo de 12 % (fevereiro) e de 10,5% como valor médio mensal anual, Figura 13a.

Valores dentro da faixa esperada para módulos de (p-Si) operando em localidades de clima tropical onde os módulos atingem temperaturas de operação (T_{op}) de 25 a 30 ºC acima da temperatura ambiente (T_{amb}).

O efeito da irradiação incidente sobre a temperatura do gerador FV pode ser observado no gráfico da Figura 14. Os valores representados correspondem a medições instantâneas da irradiação incidente e da temperatura do gerador FV. Os dados estão agrupados por faixa de incidência da irradiação e, os valores da temperatura do gerador correspondem ao valor médio das medições em três pontos (um central e dois nos extremos) do arranjo FV.

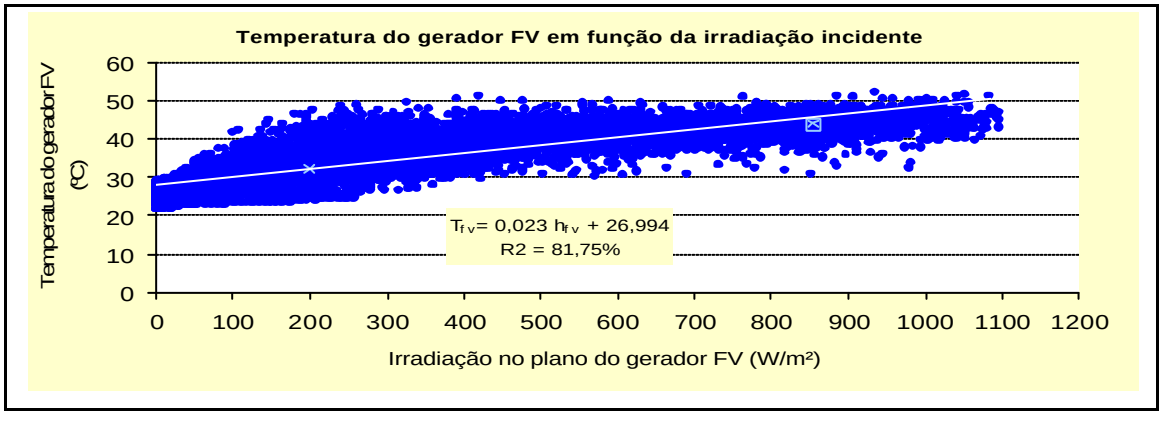


Figura 14-SFCR UFPE III: Efeito da irradiação na temperatura de operação dos módulos fotovoltaicos.

Observa-se que a temperatura do gerador FV aumenta, proporcionalmente, com a radiação incidente no seu plano, como indica pela regressão linear mostrado na Figura 14. Esse resultado concorda com os obtidos em vários outros experimentos e, que comprovam, para módulos de Silício em clima tropical, uma relação linear do tipo ($T_{op} - T_{amb} = C\ I_{fv}$), onde C situa-se na faixa de 0,02 a 0,03, (BARBOSA et al., 2007).

Esse efeito pode justificar as diferenças encontradas entre os valores da eficiência do gerados obtidos experimentalmente e os dados de catálogo do fabricante, tipicamente de eficiências de 12 a 12,5 % em STC (1,0 kW/m^2; 25^{0}C). Devido à interdependência existente entre o nível de irradiação incidente sobre um gerador FV com a sua temperatura de operação e a potência gerada (corrente elétrica gerada versus a sua tensão de operação), por conseguinte com sua eficiência.

2- Geração fotovoltaica e produção de energia (ca)

Os resultados obtidos referentes à energia produzida ($\overline{E}_{ac,m}$) e à eficiência do inversor ($\overline{h}_{inv,m}$) são comparativamente também mostrados na Figura 13a. Os valores obtidos para a eficiência do inversor situam-se, em termos de médias diárias, na faixa de 75,3 a 85,6 %, com valor médio anual de 82,70%. Resultados menores que os valores informados pelo fabricante (95%).

Os resultados experimentais mostram também que o inversor em operação apresenta um nível crítico de irradiação de cerca de 50 W/m^2 e um autoconsumo de energia menor que 0,5 kWh/d.

A produção de energia útil (E_a) resultou em valores na faixa de 3,22 a 5,37 kWh/d, médias diárias mensais, com 4,16 kWh/d como média anual, dados também apresentados na Figura13a.

A ocorrência dos valores médios diários da energia produzida mostra que: cerca de 27,4 % dos dados são iguais ou menores que 3,5 kWh e 72,6 % maiores que 3,5 kWh e menores que 6,0 kWh. Não há ocorrências de valores iguais ou superiores a 6,0 kWh. A

grande maioria dos valores (54 %) são maiores que 4,0 kWh e menores ou iguais a 5,5 kWh.

Aparentemente, os valores obtidos da energia produzida (E_a) não são satisfatórios para atender o consumo elétrico da carga estabelecida, (E_c). O SFCR UFPE III encontra-se conectado em uma das fases da rede elétrica local, que tem um baixo consumo na faixa de 2,0 a 15 kWh/d, com aproximadamente 7,0 kWh/d como valor médio diário mensal, função do ritmo de atividades no laboratório FAE, predominantemente diurnas.

No entanto, verifica-se que, em cerca de 24 % dos dias analisados, o SFCR-UFPE-III supre 100% da demanda e disponibiliza o saldo para ser injetado na rede elétrica local.

Em termos de balanços mensais, observa-se que em 11 meses não há saldo de energia disponível para ser injetado na rede convencional. Com exceção de janeiro/08, mês de férias, onde praticamente a produção diária de eletricidade solar corresponde à demanda de energia do laboratório, como pode ser observado também na Figura 13a, em todos os outros meses, houve necessidade de suprir parte da demanda com energia da rede.

O balanço final para o mês de janeiro/2008 é mostrado na Figura 15. Nesse mês, a "conta de Luz" importaria em cerca de 89 kWh/mês.

Os resultados, desse balanço, acusam que:

- Sobre o plano do gerador FV de 10,08 m^2 incidiu 125 kWh/m^2 de radiação, ou seja, foram coletados cerca de 1260 kWh;
- As energias FV: gerada foi de 138 kWh (cc) e produzida 120 kWh (ca), o que significa valores de eficiências, media mensal, de 11 %, 87 % e 9,5 % para o gerador FV, inversor e total do sistema, respectivamente;
- A energia produzida foi suficiente para suprir o consumo mensal e o saldo, que poderia ser injetado na rede (vendido à concessionária local), ficou como crédito para o balanço do próximo mês, já que não há uma política de compra de energia pela concessionária local.

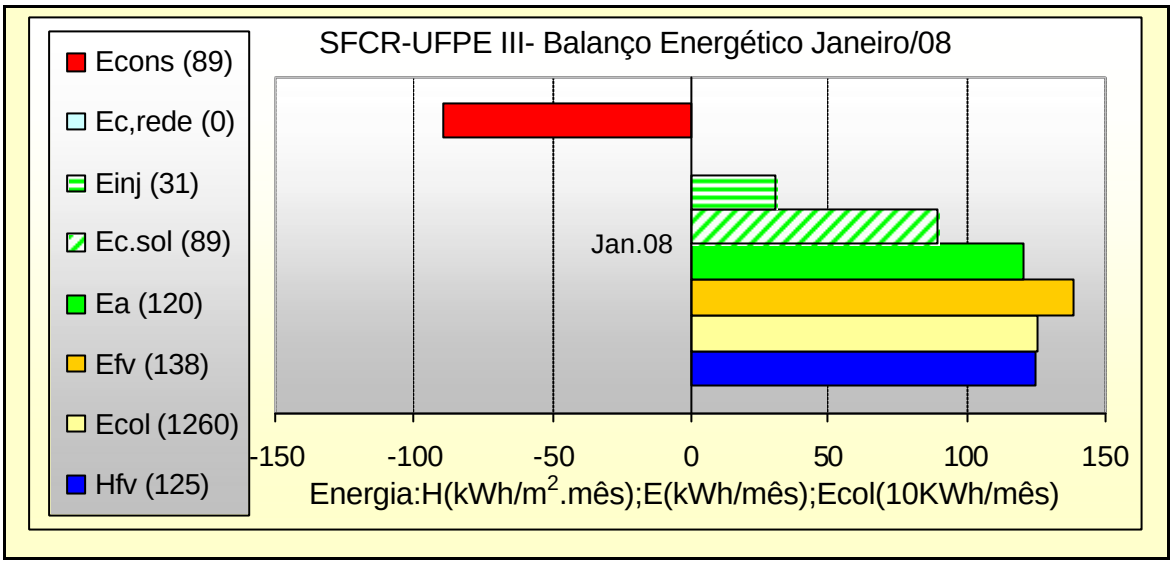


Figura 15- SFCR UFPE III: Balanço energético para o mês de janeiro /2008.

3- Índices operacionais do SFCR UFPE III

Os resultados para os Índices de Produtividade, de referência ($\overline{Y}_r$), do arranjo ($\overline{Y}_a$), final do sistema ($\overline{Y}_f$) e, do Fator de Desempenho ($\overline{PR}_a$) foram calculados segundo as expressões constantes na Tabela 4. Considerando-se o total dos dias analisados, as freqüências de ocorrências dos valores médios diários obtidos são mostradas, Figura 16.

- Para a Produtividade de Referência (Y_r), Figura 16a, a grande maioria dos valores (62 %) são maiores que 3,0 h/d e menores ou iguais a 4,0 h/d. Apenas, cerca de 9% são superiores a 5,0 h/d e iguais ou inferiores a 6,0 h/d;
- Cerca de 60 % dos valores referentes à Produtividade do Arranjo FV (Y_a) são maiores que 3,0 h/d e menores ou iguais a 5,0 h/d. 20% são inferiores ou iguais a 3,0 h/d e apenas 1,5% superiores a 5,5 h/d, Figura 16a;
- Para a Produtividade Final (Y_f), Figura 16a, quase a totalidade dos valores (91%) são menores ou iguais a 4 h/d, ou seja, em 91% dos dias analisados, o sistema necessitaria no máximo 4 h/d com 1 kW/m^2 de irradiação incidente para produzir a mesma quantidade de energia entregue à carga nas condições reais de operação;
- Cerca de 80 % dos valores médios diários do Fator de Desempenho são maiores que 0,65 e menores que 0,8, Figura 16b.

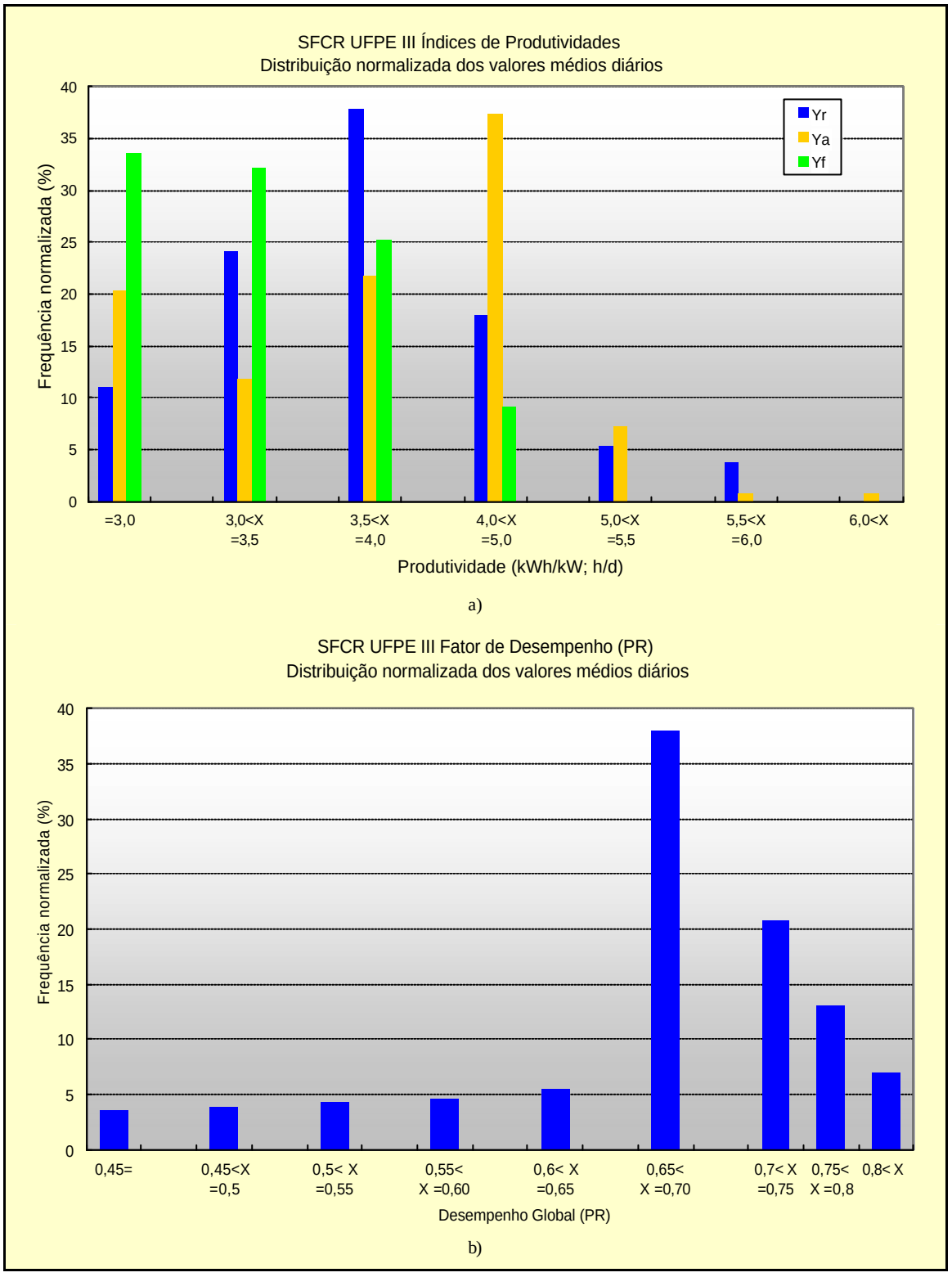


Figura 16- SFCR UFPE III. Frequência normalizada dos valores médios diários:
a) Produtividades de referência, do arranjo e final do sistema;
b) Fator de Desempenho (PR).

Resultando, em termos de valores médios mensais e médios anuais:

- Produtividade de Referência na faixa de 4,15 a 5,73 h/d, com valor médio anual de 4,75 h/d ;
- Produtividade do Arranjo FV entre 3,0 a 5,2 h/d, com valor médio anual de 4,01 h/d;
- Produtividade Final do sistema entre 2,5 a 3,7 h/d,com valor médio anual de 3,27 h/d. A média anual expressa em termos de kWh/kWp, resulta em 1.187 kWh/kWp;
- Fator de Desempenho Global do sistema entre 0,53 a 0,78, com valor médio anual de 0,69.

Os valores de (PR) obtidos são compatíveis com os citados na literatura para SFCR de pequeno porte. Por exemplo, Jahn et al.,(2000) na avaliação de 174 sistemas da base de dados PVSP-TASK 2 acusam (PR) na faixa de 0,25 a 0,9 com valor médio de 0,66. Os autores alertaram que a tendência dos valores de (PR) seria de aumentar com manutenção adequada e equipamentos de melhor qualidade tecnológica. Realmente, novas avaliações mais recentes têm acusado valores de (PR) na faixa de 0,73 a 0,76, com valor médio anual de 0,74, (JAHN et al.,2004; NORDMANN et al.,2007). Valores de (PR) na faixa de 0,68 a 0,75 e médio de 0,71, em 12 meses de monitoramento de um SFCR de pequeno porte, são também apresentados por Macedo e Zilles, (2007).

Como conclusão, na Tabela 6 encontram-se resumidos os valores médios do balanço anual para o SFCR UFPE III com Produtividade Final de 1187 kWh/kWp,: Fator de Desempenho global (PR) da ordem de 0,7 e cerca de 150 kWh/m^2 como energia específica.

Evidente, se faz necessário um período maior de medições para que o fator (PR) seja conclusivo do real desempenho global do SFCR UFPE III. No entanto, esses resultados, médios anuais para um ano de medições, podem subsidiar estudos de simulação de SFCR, proporcionando resultados mais reais às condições de operação.

Tabela 6- SFCR UFPE III-Balanço anual: Energias e Índices operacionais.
1,28 kWp (p-Si; 10,08 m^2; ß=23^{0}N)

$\overline{H}_{fv,a}$	$\overline{E}_{fv,a}$	$\overline{E}_{a,a}$	$\overline{h}_{fv,a}$	$\overline{h}_{inv,a}$	$\overline{h}_{f,a}$	$\overline{Y}_{r,m}$	$\overline{Y}_{a,a}$	$\overline{Y}_{f,a}$	$\overline{L}_{c,a}+\overline{L}_{s,a}$
(kWh/m^2.d)	(kWh/d)		(%)			(kWh/d) / kW ou (h/d)			(kWh/d)/kW
4,73	5,05	4,16	10,44	82,69	8,63	4,75	4,01	3,27	1,48
Produção anual de 1520 kWh (1,52 MWh ao ano)									
Energia específica de 150 kWh/m^2									
Produtividade Final do sistema de 1187 kWh/kWp									
Fator de Desempenho Global de 0,69									
As perdas no gerador (L_c) e no inversor (L_s) resultaram aproximadamente iguais, cerca de 0,73 e 0,75 kW, respectivamente.									

3.3 Ambiente Geográfico

*O **Ambiente Geográfico (AG)** utiliza ferramentas e dados relativos ao espaço geográfico para estimar a disponibilidade de área útil. Mapas e fotografias aéreas georreferenciados, imagens de satélites, bases de dados demográficos, sociais e urbanistas são utilizados. A utilização de mapas georreferenciados permite a determinação das dimensões e dos posicionamentos dos telhados das edificações existentes no espaço em observação. Fotografias das edificações fornecem maiores detalhes que auxiliam a determinação das configurações e tipos de telhados.*

O conhecimento da área disponível para a instalação de sistemas FV é um dado de entrada primordial para avaliações do potencial de SFCR em centros urbanos. Normalmente, esse tipo de informação não existe ou não se encontra disponibilizado, sendo necessário o desenvolvimento de métodos/procedimentos para sua estimativa.

Na presente proposta, o processamento dessas informações, mediante determinadas condições, gera um índice, o qual foi denominado **Nível Luz do Céu (NLC)**, indicativo da quantidade e qualidade da iluminação na localidade foco. Em seguida, esse índice é utilizado para estimar as áreas úteis de coberturas disponíveis a SFCR via planilhas de processamento de dados.

O índice **Nível Luz do Céu (NLC)** é conceitualmente semelhante ao **Fator de Visão do Céu (FVC)[8],** muito utilizado nas áreas da arquitetura e climatologia urbana e de medição muito trabalhosa. Definido como a quantidade de céu visível de um determinado ponto, O FVC pode ser determinado com bastante precisão, mediante técnicas trabalhosas e que demandam bastante tempo. Diferentemente, a determinação do NLC é bem menos trabalhosa e muito mais rápida, no entanto, menos precisa. Portanto, o índice elaborado (NLC) deve ser entendido como um indicativo do fator (FVC)[9].

3.3.1 Procedimentos de referências para estimativas de área de telhados para SFCR

De modo geral, métodos para estimativas de áreas disponíveis a instalações de sistemas solares devem apresentar certas características como: possibilidades de realização computacional com baixo custo e erro e considerar diversos fatores intrínsecos e adicionais à sua extensão: posicionamento (localização, orientação e inclinação), ocupação para outras finalidades, possibilidades de sombras e impedimentos não-físicos, por exemplo, valores históricos, religiosos ou ambientais. Técnicas e procedimentos aplicados para um determinado local, nem sempre são válidos para outros universos. Como comentado por Izquierdo el al., (2008), critérios adotados para uma pequena localidade, por exemplo, um pequeno centro urbano, poderão não ser viáveis em espaços de maiores escalas como grandes centros urbanos, estados, países e continentes.

Uma maneira analítica de descrever as características da massa urbana (área por densidade de edificações) e o espaçamento entre as edificações é pelo Fator de Visão do Céu (FVC), um parâmetro adimensional também conhecido como fator de configuração ou fator angular. Definido como a quantidade de céu visível de um determinado ponto. O FVC varia de 0 a 1 e indica, em termos gerais, o nível de obstrução para a luz, ou seja, a oclusividade do local. Quando igual a 1 (um) indica uma situação totalmente não obstruída.

---

[8] (*Sky View Factor – SVF*)

[9] Conceitualmente o índice proposto, (NLC) e o fator (FVC) indicam a quantidade de céu visível de um determinado ponto. No entanto, o índice (NLC) é um parâmetro estimado que não reproduz, necessariamente, as características e o valor medido/estimado do fator (FVC), motivo pelo qual se optou por uma nomenclatura diferenciada.

O Fator Visão de Céu, nas áreas da arquitetura e climatologia urbana, representa um parâmetro geométrico urbano diretamente relacionado às condições térmicas de um local, podendo ser avaliado por vários métodos: modelos matemáticos, análises fotográficas, processamento de imagens, diagramas gráficos ou via mapas da trajetória do Sol. Normalmente, esses métodos demandam muito tempo com um grande trabalho manual e/ou equipamentos fotográficos de alto custo.

Métodos alternativos, alguns não muito esclarecedores, para estimar o FVC com maior rapidez na coleta de dados e processamento das informações, costumam ser citados na literatura urbanista.

Um exemplo é o método apresentado por Grimmond et al., (2001) que utiliza câmaras fotográficas digitais com filtros e sensores óticos com analisadores que medem automaticamente a luz difusa não interceptada e por comparação com vazios urbanos, de geometria conhecida, estima o FVC.

Chapman at al.,(2002) apresenta uma técnica que permite a medida em tempo real pela utilização de receptores simples e baratos do sistema de navegação mundial (GPS). Dados da visibilidade são obtidos por imagens de satélites pelo (GPS) e são usados para desenvolver os índices relativos ao FVC de uma posição.

Souza et al., (2003) propõe uma ferramenta que utiliza um sistema SIG-3D integrado a uma ferramenta ambiental de avaliação térmica urbana que proporciona uma visão espacial da geometria urbana, visualização e quantificação do (FVC) de um local.

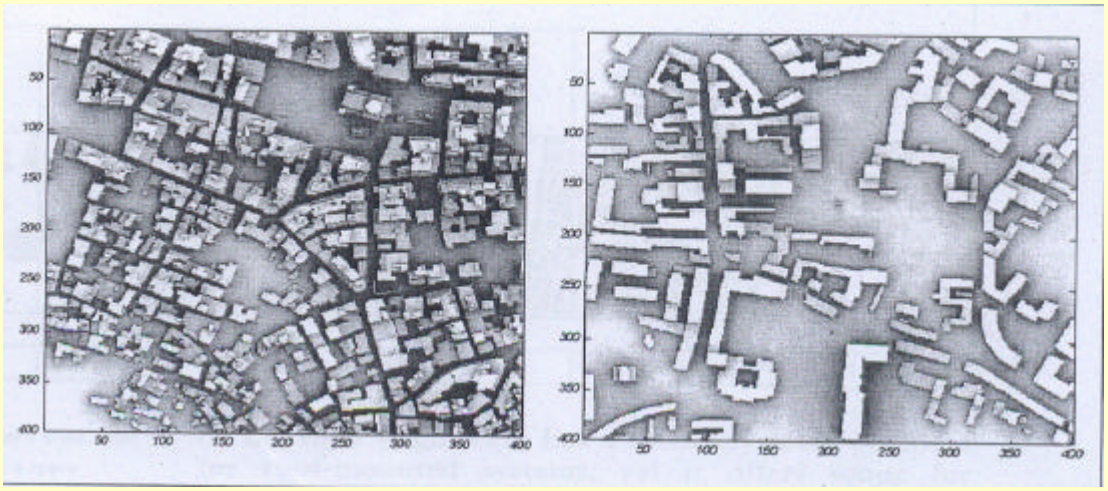
Em avaliações do potencial solar para geração de energia elétrica, análises das áreas disponíveis em centros urbanos têm sido estimadas utilizando-se fatores indicativos do (FVC) como os citados a seguir:

O Guia de Projetos e Implementação de Sistemas FV em Cidades[10], (STEEMERS, 2001), utiliza uma relação entre a área e o volume relativos às edificações de uma localidade como indicativo do (FVC). A área das superfícies pode ser um fator que

[10] *PV in the City – A Design and Implementation Guide*

indique a extensão disponível para a instalação de sistemas FV em telhados. A relação área/volume indica a potencialidade de sistemas em telhados e/ou em fachadas de edificações. Um valor alto da relação área/volume indica maior potencialidade para sistemas em fachadas, enquanto, um baixo valor indica maior potencialidade de sistemas em telhados. O autor determina o fator área/volume para várias localidades da Europa. A Figura 17 ilustra como exemplo, os resultados obtidos para localidades situadas na parte medieval de Atenas-Grécia e Grugliasco-Italia. Essas duas localidades apresentavam, em 2001, valores médios de FVC de 0,62 e 0,82, respectivamente.

(FVC): 0,68 Atenas Medieval- Grécia FVC: 0,82 Grugliasco – Itália



(A/V): 0,31 Plaka (A/V): 0,25 Partission (A/V): 0,35 II Borgo (A/V): 0,28 Paradisco

Fonte: (Steemers, 2001). *PV in the City – A Design and Implementation Guide*

Figura 17 - Exemplos ilustrativos do Fator Visão do Céu e da relação área/volume para alguns sítios na Grécia e na Itália.

Valores indicativos que as ruas de Atenas são mais oclusivas que as ruas de Grugliasco e, portanto, menos favoráveis a sistemas em fachadas. Os resultados da relação área/volume, indicativos do (FVC), para diferentes sítios nas duas localidades, foram de 0,31 e 0,25 (Plaka e Patission) em Atenas e 0,28 e 0,35 (Paradisco e II Borgo) em Grugliasco. Ou seja, comparativamente, o Sitio Patission é o mais disperso, favorável às modalidades de sistemas em fachadas e em telhados, enquanto Paradisco, o mais denso, favorece os sistemas em telhados.

Izquierdo et al.,(2008) avaliando o potencial para SFCR para a Espanha, estima as áreas disponíveis utilizando banco de dados de áreas urbanas das unidades administrativas que compõem o país, das superfícies ocupadas pelas edificações e pela densidade habitacional de cada unidade administrativa da Espanha. A área disponível à instalação de SFCR é estimada considerando diferentes composições entre os fatores densidade demográfica e densidade de edificações, ponderados por critérios restritivos vinculados a não-ocupação, à probabilidade de sombras e à utilização da área para outras finalidades.

3.3.2 Procedimento proposto para estimativa do NLC e área útil de cobertura

Na presente proposta, para a estimativa da área útil coletora da radiação incidente, ou seja, à área do gerador/arranjo FV, são utilizados como ferramentas:

- Mapas da região digitalizados e georreferenciados com resolução 200 m x 200 m;
- Fotografias das edificações como ferramenta auxiliar;
- Bases de dados de informações demográficas e de registro de bens imóveis;
- Planilhas de processamento de dados.

E, definidos como:

- (A_t), *Área Total de Cobertura (telhado) da edificação, [m^2]: área geométrica, estimada diretamente do sistema GIS/mapas georreferenciados;*
- (A_d), *Área Disponível, [m^2]; área disponível para a instalação do sistema;*

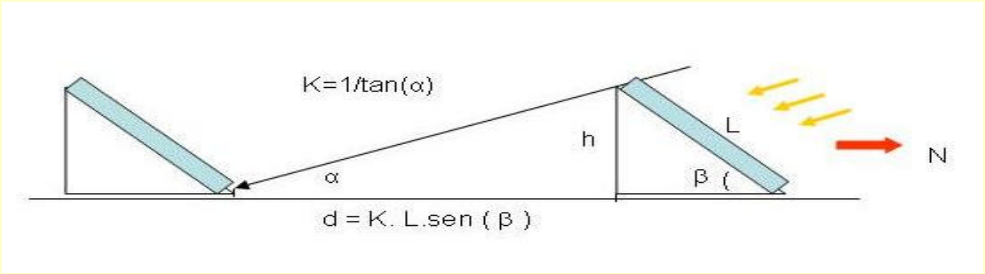
- (A_a), *Área do Arranjo FV, [m^2]: área útil, a área livre realmente disponível para o gerador FV;*
- (F_d), *Fator de Disponibilidade [%]: necessidade de espaço físico para a estrutura de sustentação e instalação dos módulos FV. Envolve também o distanciamento entre módulos necessário ao não-sombreamento entre os mesmos;*
- (F_o), *Fator de Ocupação [%]: resultante da redução pela ocupação da área para outras atividades;*
- (F_p), *Fator de Posição [%]: não desvio de posicionamento em relação ao Norte Geográfico;*
- (Fs), *Fator de Sombra, [m^2]: parcela da área total livre de possível sombreamento por outras edificações e objetos permanentes na vizinhança da área foco;*
- *(NLC), Fator Nível de Luz do Céu [%]: relação entre a área útil e a área disponível da cobertura da edificação. Gerado como produto da metodologia proposta.*

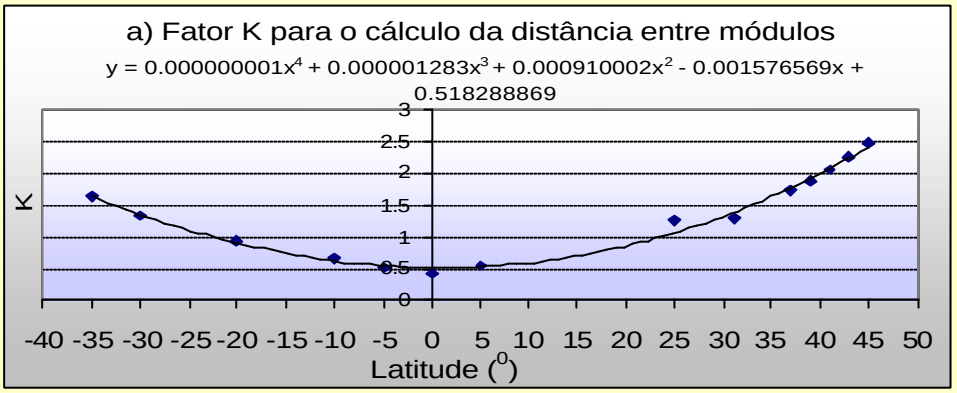
1-Fator de Disponibilidade (F_d)

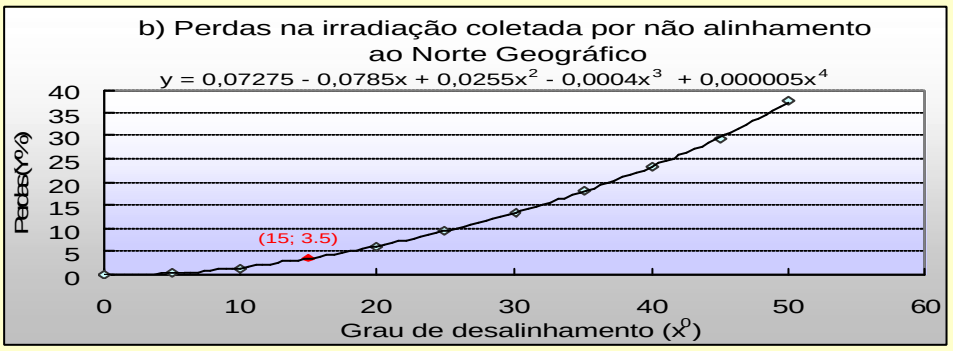
O espaçamento (d) entre os módulos ou fileira de módulos FV, necessário para o não sombreamento entre os mesmos, depende, além das dimensões dos próprios, da latitude do local e do ângulo (ß) de inclinação do plano do arranjo FV Deve ser calculado para a situação correspondente à sombra máxima que ocorre no solstício de inverno, (21 de junho) para localidades no Hemisfério Sul. Pode ser calculado, utilizando-se o Fator K como indicado na Figura 18a.

O Fator K é um coeficiente adimensional que envolve variáveis de posicionamento do plano do módulo em relação ao "movimento do Sol" (movimentos de rotação e translação da Terra). A Figura 18b mostra graficamente a variação do fator K em função da latitude do local. Os valores utilizados na elaboração do gráfico referem-se a sistemas planos fixos (sem rastreamento do Sol) e são provenientes de referências bibliográficas. Para sistemas localizados no Hemisfério Norte (latitudes positivas) e posicionados faceando o Sul, os valores constam no *Manual del Arquiteto – Energia Solar*

Fotovoltaica - Junta de Castilla Y Leon[11]. Para sistemas localizados no Hemisfério Sul, que devem facear o Norte Geográfico, os valores são provenientes do *Manual de Capacitação em Projetos de Sistemas de Aquecimento Solar,(2008), divulgado pela* ABRAVA[12].







Elaboradas de: a) Manual del Arquiteto – Energia Solar Fotovoltaica da-Junta de Castilla Y Leon e, do Manual de Capacitação em Projetos de Sistemas de Aquecimento Solar da ABRAVA; b) Manual de instalações de sistemas fotovoltaicos para residências rurais e bombeamento de água, (Tiba et al., 1999).

Figura 18- a) Valor do Fator K para o cálculo da distância (d) necessária à situação de não-sombras entre fileiras de módulos FV; b)Perda na radiação coletada por não alinhamento ao Norte Geográfico.

[11] *Manual del Arquiteto – Energia Solar Fotovoltaica-Junta de Castilla Y Leon (ISBN: 84-9718-258-8)*

[12] ABRAVA: Associação Brasileira de Refrigeração e Ar-condicionado, Ventilação e Aquecimento, www.dasabrava.org.br

O espaçamento, d= K.L.sen (ß), implica em um acréscimo da área necessária para a instalação dos módulos. Portanto, a área da superfície, incluindo as áreas relativas aos próprios módulos e aos espaçamentos entre eles, pode ser obtida como o produto da área do arranjo pelo valor (K sen ß+cos ß). Na prática, esse espaço é suficiente para a montagem, instalação e fixação da estrutura de suporte.

Para localidades situadas em baixas latitudes (?<10^0) no Hemisfério Sul, o valor máximo de espaçamento resulta em cerca de 28 % do comprimento (L) do módulo ou fileira de módulos com ($ß_{máx}=25^0$) faceando o Norte Verdadeiro como máxima inclinação

2-Fator de Ocupação (F_o)

Fotografias aéreas e de satélites são bastante úteis na visualização da existência de alguma ocupação na área em observação. Possibilitam extrair grande variedade de informações dependendo da qualidade da imagem[13].

O conhecimento prévio da finalidade de uso da edificação e/ou de sua cobertura pode, a princípio, definir o Fator de Ocupação (F_o). Como por exemplo, uma não permissão de utilização da área por motivos de segurança, o planejamento da utilização da área como terraços, para instalações de sistemas de ventilação, casos em que o Fator de Ocupação é nulo. O fator (F_o) varia no intervalo de zero, totalmente ocupado, a um, totalmente livre. Quando o universo de estudo é acessível e contém poucas edificações pode ser medido ou calculado, dependendo da qualidade das informações disponíveis. Assume o valor de 1 (um) quando desconhecido ou na impossibilidade de sua determinação, acarretando uma maior imprecisão na estimativa da área útil (A_a);

Três valores para o Fator de Ocupação foram atribuídos para as várias possibilidades de ocupação da área em observação como consta a seguir.

1- $F_o = 1$ para áreas totalmente livres, sem nenhuma ocupação;
2- $F_o = 0,5$ para áreas parcialmente ocupadas até o máximo de 50%;
3- $F_o = 0$ para áreas ocupadas em mais de 50%.

[13] As fotografias de satélites utilizadas podem ser acessadas gratuitamente via Google Earth. Fotografias com melhores resoluções podem ser adquiridas nos mercados de imagens de satélites e aéreas.

3-Fator de Posição (F_p)

Para maior captação anual da irradiação, o plano do arranjo deve ser situado faceando o Norte, (locais no Hemisfério Sul) A ocorrência de edificações cujas coberturas não permitem alinhar o plano do arranjo à linha Norte-Sul (N-S) reduz a quantidade anual da energia coletada e, consequentemente, da energia produzida pelo sistema. O não alinhamento (desvio) pode ser calculado com as informações das coordenadas geográficas do local provenientes de fotografias e/ou mapas georreferenciados.

A Figura 18b mostra a variação percentual no valor anual da irradiação incidente em uma superfície horizontal em função do ângulo de não-alinhamento N-S. Um desvio de 15^0 acarreta uma redução na energia coletada da ordem de 3,5%, admitido como limite prático para instalações de sistemas solares planos fixos, (TIBA et al., 1999). Nessa situação, o $F_p = 0,965$.

4- Fator de Sombra, (Fs)

A estimativa do fator Fs apresenta uma dificuldade maior que os demais fatores. Depende muito do crescimento urbano. Um obstáculo de altura (Y), na Cidade do Recife, posicionado faceando o Leste, pode projetar um sombreamento de três vezes sua altura no solstício de inverno.

Os métodos clássicos por traçado de diagramas de sombras são bastante trabalhosos. Como uma regra prática em instalações individualizadas, o plano do gerador deverá ser posicionado livre de obstáculos a 60^0 a Leste e a Oeste em relação à Linha N-S e a uma altura solar de 15^0, (TIBA et al., 1999), situação bastante rara em centros urbanos.

Para análises em grandes universos, (cidade, países, continentes) estimativas da probabilidade de sombras podem ser realizadas pela relação entre a área e o volume das edificações e as alturas das mesmas. Edificações de alturas semelhantes apresentam menor probabilidade de ocorrência de sombras. Alta densidade de edificações de diferentes alturas implica uma alta probabilidade de sombreamento.

Nesse estudo, o fator (F_s) foi estimado utilizando-se as informações provenientes dos mapas georreferenciados e de fotografias dos telhados (coordenadas de posição, e distancia entre as edificações) e de cadastros de edificações (alturas das edificações). Os valores atribuídos constam na Tabela 7. Os valores máximo e mínimo de (F_s=1; F_s=0) ocorrem para uma área totalmente livre de sombras ou sombreada durante a maior parte do dia. O F_s assume o valor de 0,5 para as situações intermediárias onde há sombreamento em um dos períodos do dia (manhã ou tarde) durante o ano.

Tabela 7 – Valores para o Fator de Sombras: Hemisfério Sul (?=10^0)

Valor de Fs	**Verão**		**Inverno**	
	manhã	**tarde**	**manhã**	**tarde**
1	não	não	não	não
0,5	não	sim	não	sim
0	sim	sim	sim	sim

5-Fator Nível de Luz do Céu (NLC)

O fator (NLC) sintetiza os fatores mencionados, resultando em um indicativo da quantidade e qualidade de visão de céu da localidade foco.

Conhecido o valor da área total do telhado (A_t) e suas coordenadas de posição e a inclinação (ß) desejada para o arranjo FV, o fator Nível de Luz do Céu (NLC), a área disponível (A_d) e a área do arranjo FV (A_a) podem ser expressas como:

$$NLC = A_a / A_d \quad (1)$$

$$A_d = A_t \,.F_d \quad (2)$$

$$A_a = A_d \,.F_o \,.F_p \,.F_s \quad (3)$$

$$NLC = F_o \,.F_p \,.F_s \quad (4)$$

Em função dos fatores (F_o, F_p e F_s), foi elaborada uma classificação para o fator (NLC) como indicativo da potencialidade de instalação de SFCR em telhados como consta na Tabela 8.

Tabela 8 – Classificação do Fator Nível de Luz do Céu (NLC)

Classificação	**Muito bom**	**Bom**	**Médio**	**Baixo**
Valor NLC	0,8= (NLC) =1,0	0,7=(NLC) <0,8	0,6=(NLC)<0,7	0< (NLC) <0,6

É evidente que o valor mínimo do Fator Nível de Luz do Céu (NLC=0) é alcançado em qualquer situação em que um dos demais fatores envolvidos seja nulo. Por exemplo, uma excelente área de cobertura, totalmente desocupada (F_o=1), plana ou pouco inclinada faceando o Norte (F_p=1), mas com alta probabilidade de sombras durante todo o dia proveniente de edificações mais altas e vizinhas ao leste e ao oeste (F_s=0), resulta em um valor nulo para o Fator (NLC). Nessas situações, o espaço não é viável para a instalação de sistemas solares.

Quando o (NLC) alcança o valor máximo de 1 (um) significa que a cobertura encontra-se situada livre de sombras e posicionada em termos da máxima coleção de energia anual e que a totalidade da área existente encontra-se disponível para ser ocupada totalmente pelo sistema fotovoltaico e sua estrutura.

Adicionalmente, se (Fd=1) a área de cobertura do telhado pode ser totalmente convertida em área do arranjo FV. Esta situação particular apresenta-se quando os módulos substituem os elementos construtivos da cobertura (por exemplo, as telhas) nas chamadas Edificações Fotovoltaicas Conectadas à Rede (EFCR)[14], considerada como tecnologia com nível zero de ocupação de área.

Ainda em relação às dimensões da área útil, dois comentários merecem atenção: nos países onde já existe uma legislação ou regulamentação para a aplicação de SFRC em edificações, como particularmente na Espanha, existe um tamanho mínimo de sistema,

[14] *Building Integrated Photovoltaic System* - BIPV

portanto de área útil, para que o mesmo possa ser instalado. O SFCR deve obrigatoriamente, em horas de funcionamento no ano, ser capaz de fornecer, no mínimo, 1.000 KWh de eletricidade para cada kWp instalado, (DIFUSIÓN IDAE, 2002)[15].

Um segundo ponto, muito importante, é que ainda não há uma padronização entre a dimensão física de um módulo fotovoltaico e sua capacidade nominal. Fato que dificulta o trabalho do projetista principalmente em SFCR integrados à edificação já que, normalmente, os elementos da construção civil (telhas, janelas) têm dimensões padronizadas. No entanto, há uma faixa de correspondência entre esses valores como consta na Tabela. 9.

Tabela 9 - Características físicas de módulos fotovoltaicos

Capacidade (Wp)	**10-20**	**50-65**	**85-100**	**125-130**	**150-180**	**200**	**265-300**
Área (m^2)	0,15-0,3	0,4-0,5	0,6-0,8	0,9-1,0	1,2-1,4	1,48	2,1-2,5
Peso (kg) (~)		5-6	8,3	11,6	16,5	19,5	44-49
Elaborada de catálogos de diferentes fabricantes de módulos de tecnologias diferentes							

3.4 Ambiente Econômico

O Ambiente Econômico é inserido como um conjunto de informações adicionais relacionadas ao custo de instalação de um SFCR, à energia economizada e aos produtos gerados como a redução da emissão de Gases de Efeito Estufa-GEE, por exemplo. Para uma análise econômica preliminar, em uma determinada situação, propõe-se, como ferramenta básica, o Programa RETSCreen[16]. Essa ferramenta vem sendo muito utilizada e difundida na interne para a realização de balanços econômico-financeiros e estimativas, em base anual, da energia gerada em função de condições impostas pelo usuário. Semelhante a outros modelos de análises econômico-financeiras, o RETScreen envolve um fluxo de caixa entre o total dos custos anuais (custos iniciais de investimento, incentivos e subsídios, pagamentos anuais e

[15] DIFUSIÓN IDAE: *Publicación del Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía.* (www.idea.es)

[16] Clean Energy Project Analysis – *RETScreen* International, Minister of Natural Resources Canada, (2001-2005) in www.retscreen.net

empréstimos...) e o total da economia e receitas anuais (energia economizada, receita por produtos gerados e redução da emissão de GEE). Os balanços são realizados anualmente considerando os fatores de mercado e índices econômico-financeiros (inflação, taxas de juros, tempo de vida dos equipamentos e tempo de dívida, preços de energias, custos de combustíveis). Como resultados, são obtidos os indicadores de viabilidade financeira (tempo de retorno do investimento realizado, custo do capital investido, renda pela redução de GEE, taxas internas de retorno, entre outros).

Análises econômico-financeiras da geração de energia elétrica por fontes renováveis, como a solar e a eólica, são bastante complexas quando se tem uma matriz energética renovável e predominantemente hídrica e um modelo de contratação de energia elétrica, pelas empresas distribuidoras, por sistema de leilão com o critério de menor custo e de contratos de longo prazo. Efetivamente as energias renováveis poderão participar do processo, desde que atendam ao critério de preços competitivos e contratos de longo prazo estabelecidos pelo mercado de energia.

Exemplificando com a geração eólica, comercialmente já mais estabelecida que a solar. Resultados de análises econômico-financeiras mostram que só tarifas acima de 281,50 US$/MWh, (0,56 R$/kWh) tornariam viável o projeto de uma central eólica de 100 MW em Itaparica-PE. A título de comparação, o PROINFA estabeleceu como valor máximo de contrato uma tarifa entre 204,35 e 231 US$/MWh, (0,4087 e 0,4820 R$/kWh) para geração eólica, (ABREU, 2008).

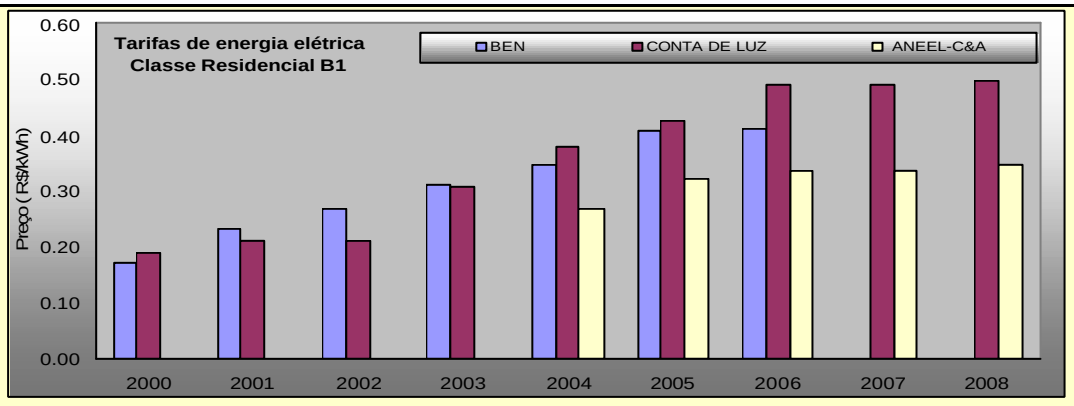
Como informa Bezerra (2008): "Nos Leilões de Energia Nova, realizados em 2005 e 2006, a totalidade dos 879 $MW_{médios}$ contratados de empreendimentos no Nordeste foi de empreendimentos termelétricos, sendo 868 $MW_{médios}$ (99%) com combustíveis fósseis, energia não-renovável, e 11 $MW_{médios}$ (1%) de bagaço de cana-de-açúcar. Em relação à oferta de potência a instalar em empreendimentos no Nordeste nos leilões realizados nos anos de 2005 e 2006, observa-se uma evolução bastante acentuada da oferta de geração termelétrica por combustíveis não-renováveis. No caso da oferta de empreendimentos de geração para o Nordeste, observa-se também 100% de oferta da geração por combustíveis não renováveis (Leilões A-3 e A-5 de 2007). Com a alternativa de Leilão Específico de Fontes Alternativas, ocorrido em 18/07/2007, observa-se um montante de apenas 6,5 MW de oferta de empreendimentos de PCH no Nordeste. Para o

Nordeste, o impacto das contratações de grandes montantes de geração fóssil poderá ter sérias repercussões no turismo na região. A imagem do país, e especialmente do Nordeste, no âmbito mundial, sofrerá repercussões negativas com a implantação de grandes blocos de energia por fontes poluentes".

É evidente que esse universo de leilões e contratos de longo prazo não é o nicho de aplicação de SFCR.

Considerando esse aspecto, onde o produtor é o consumidor, salienta-se a diferença significativa entre os valores da tarifa residencial nacional publicada no Balanço Energético Nacional (BEN), as legisladas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e as pagas pelo consumidor final às concessionárias de energia elétrica, a chamada "Conta de Luz".

A Figura 19 ilustra o caso para um consumidor do Centro Urbano da Cidade do Recife/PE. De valores semelhantes até 2004, as diferenças entre essas tarifas passam a ser significativas contra o consumidor depois de 2005. No momento, o valor da tarifa BEN permanece no patamar de cerca de 0,40 R$/kWh (0,20 US$/kWh), enquanto a tarifa Conta de Luz atingiu 0,5 R$/kWh em 2006 e permanece nesse patamar até o momento (out. 2008). Um reajuste médio de 14% ao ano, no período de oito anos, 2000 a 2008, e de 10% nos últimos 5 anos.



Elaborada de:
BEN- média nacional, (BEN, 2007 em www.mme.gov.br);
ANEEL/C&A: oficial permitida à concessionária, livre de impostos, (www.aneel.gov.br)
CONTA DE LUZ: valores médios, mensal anual, com todos os tributos e encargos e livre da taxa de iluminação, (CELPE/Registro Contador 0539085026-Monofásico B1).

Figura 19 - Evolução da tarifa residencial de energia elétrica no Recife-PE. BR.

Para o usuário/produtor de energia de SFCR, a tarifa de comparação deve ser a desembolsada pelo mesmo com sua Conta de Luz, de 0,50 R$/kWh (0,25US$/kWh em out.2008).

Este valor é muito superior aos apresentados por vários países desenvolvidos, inclusive pelo Canadá e pela Noruega, países cujas bases de geração elétrica são semelhantes ao Brasil, predominantemente hídrica, com cerca de 56% e 99% do total gerado, respectivamente, (BANDEIRA, 2003).

A tarifa elétrica varia muito de país para país. Depende fortemente do tipo de combustível, tecnologias de geração, operação, transmissão e distribuição, subsídios e sempre dos efeitos do clima.

A Tabela 10 apresenta uma comparação entre valores de tarifa elétrica em vários países no mundo. Considerando o período de 2000 a 2006, a tarifa residencial (BEN) duplicou, passando de cerca de 0,1 para 0,2 US$/kWh.

Tabela 10- Tarifa de Energia Elétrica no Brasil - Comparação Mundial

País	**U$/kWh**	**País**	**U$/kWh**
África do Sul	0,036	Estados Unidos	0,093 -0,14
Alemanha	0,132	Finlândia	0,069
Austrália	0,071	França	0,085
Bélgica	0,114	Holanda	0,126
Brasil (2006)[a]	0,189	Irlanda	0,239
Brasil (2001) [b,c]	0,094	Islândia [2]	0,116
Canadá	0,061	Itália	0,367
Canadá (2002) [c]	0,060	Japão (H K Ilha)[1]	0,123
Dinamarca	0,229	Reino Unido	0,112
Espanha	0,104	Suécia	0,660

Elaborada a partir de: www.wikipedia.org/wiki/Eletricfity_tarrif em 8/07/2008
Período considerado 2006-2007; (1) 04/07/2008; (2) 07/07/2008
a) BEN 2007-Ano Base 2006; b) BEN 2002-Ano Base 2001; c) BANDEIRA, 2003.

Como já comentado, este estudo propõe como ferramenta básica para a Ambiente Econômico o Programa RETScreen, de origem canadense, desenvolvido por diversos especialistas e fornecido sem custos.

Esse programa caracteriza-se como uma ferramenta de apoio na tomada de decisões mediante análises financeiras e de risco realizadas sempre de forma comparativa entre dois tipos de tecnologia de geração de energia, ou seja, a tecnologia de referência, já estabelecida ou em utilização (caso referência), e a opção renovável proposta (caso proposto).

As análises são fundamentadas nos custos envolvidos durante o tempo de vida do sistema, na avaliação da produção e economia de energia e na redução das emissões para vários tipos de tecnologias eficientes ou renováveis. A produção de energia pode ser de uma única fonte renovável ou de um conjunto de fontes. Para isso, o programa apresenta diversas ferramentas peculiares às tecnologias propostas. Por exemplo, no caso de sistemas solares fotovoltaicos, envolve ferramentas de cálculo que permitem estimar a energia produzida e a quantidade de CO_2 evitado pelo uso do sistema fotovoltaico.

O RETScreen possui uma extensa base de informações com bancos de dados de produtos e características técnicas de equipamentos utilizados em processos de geração de energia, de custos e de clima. A Base de Dados de Clima envolve cerca de 4.700 locais de estações terrestre ao redor do globo e a incorporação direta do conjunto de dados da Nasa (*Surface Meteorology and Solar Energy*) para áreas habitadas. Os dados climáticos cobrem a inteira superfície do planeta, inclusive às áreas cobertas por redes elétricas centrais, redes isoladas e áreas isoladas das redes.

Semelhante a outros modelos de análises econômico-financeiras, no RETScreen os balanços são realizados anualmente, considerando os totais dos custos e das receitas e os fatores de mercado e índices econômico-financeiros próprios da localidade do sistema proposto. Os custos absolutos não são levados em consideração, mas, sim a taxa de aumento de custo entre a tecnologia de referência e a renovável proposta.

A utilização do programa RETScreen será exemplificada no próximo capítulo quando da aplicação da metodologia desenvolvida no caso Estudo do Campus da UFPE.

3.5 Ambiente Analítico

*O **Ambiente Analítico** configura-se como um programa de suporte decisório a planejamentos alimentado por informações pertinentes a determinados questionamentos. Utiliza, como ferramenta base, a metodologia de SIG-Sistema de Informação Geográfica*[17] *incorporado ao solfware ArcView GIS 3.2. O (SIG) é uma ferramenta para a compreensão e manipulação do espaço geográfico, baseado em uma tecnologia de armazenamento, análise e tratamento de dados espaciais e/ou não espaciais e/ou temporais. Permite agrupar informações inter-relacionadas e de naturezas diversas, quantificar fatores determinantes e colocar as informações disponíveis de forma mais acessível e espacialmente visíveis. Possibilita a realização de análises rápidas e precisas e redução do tempo para tomadas de decisões.*

Na presente proposta, um programa chamado *SIG-SFCR,* utiliza o mapa de localização georreferenciado do espaço em estudo como informação espacial e como dados de entrada às informações provenientes dos demais ambientes organizadas em uma planilha eletrônica, TAB-SIG/SFCR.

O *SIG-SFCR* trata cada edificação do mapa georreferenciado como uma unidade (polígono) devidamente codificada e identificada na Tab-SIG/SFCR, configurada segundo linhas e colunas.

- Cada linha contém as informações de uma única unidade codificada;
- Cada coluna contém um tipo de informação.

Os seguintes tipos de informação compõem a Tab-SIG/SFCR: Nome da edificação, Código de identificação, Imagem, Tipo de edificação (particular/público), Latitude, Longitude, Material do telhado (telha cinza/telha vermelha, concreto...), Tipo de

[17] (*Geographical Information System-GIS*)

telhado (plano, isso é sem divisão por águas; com águas), Áreas Leste, Oeste, Norte, Sul, Área total, Área disponível, Área útil, Fatores Fo, Fd, Fp, Fs e NLC, Energia específica, Produção anual de energia, Capacidade do SFCR, Custo de Investimento, e Custo Específico.

O SIG-SFCR, quando condicionado a um determinado questionamento, agrupa, para cada unidade codificada, as informações pertinentes e fornece os resultados associados e planificados. Por exemplo, se questionado quais as edificações com telhados de cerâmica (telha vermelha), com áreas superiores a 100 m^2 e que estejam alinhados ao Norte (faceando o Norte Geográfico), o resultado será apresentado na forma gráfica de mapas georreferenciados da localidade apresentando as unidades que atendem aos critérios especificados. As possibilidades de visualização dos resultados são diversificadas, podendo ser individualizadas (todas as unidades que satisfazem um a um os critérios) ou em conjunto (unidades que atendem todos os critérios).

O SIG tem-se mostrado uma ferramenta bastante útil na área de fontes renováveis de energia, como mostrado a seguir com alguns exemplos gerais da sua aplicação na área de energias renováveis. No próximo capítulo o SIG desenvolvido para a abordagem desse trabalho será apresentado.

3.5.1 O SIG em fontes renováveis

Segundo Tiba *et a*l., (2007), a utilização do SIG, em fontes renováveis de energia, foi iniciada nos anos 90 e sua aplicação pode ser classificada em três grupos: como ferramenta de suporte à decisão de integração de energias renováveis em grande escala e a nível regional, para avaliação de geração distribuída e conectada à rede e para sistemas de produção descentralizada e autônoma de eletricidade. Como exemplos, destacam-se os SIGs: SOLAR, PV e, o recentemente desenvolvido SIGA-SOL.

O Sistema de Informações Geográficas Aplicado à Energia Solar (SIGA-SOL) foi desenvolvido em 2007 por pesquisadores da UFPE, do Grupo de Fontes Alternativas de Energia e do Departamento de Engenharia Cartográfica e da Companhia Hidroelétrica do Rio São Francisco (CHESF). O SIGA-SOL apresenta-se como uma ferramenta para a gestão e planejamento de programas de inserção de fontes renováveis de energia em escala

macro espacial (estado) e local (município) em uma área de 183.500 km^2 envolvendo os Estados de Alagoas, Pernambuco e Paraíba, (TIBA et al., 2007).

O Solar *Geographic Information System* (SOLAR-GIS) foi desenvolvido em 1996, com os objetivos de demonstrar o próprio potencial da metodologia SIG e sua aplicabilidade no desenvolvimento da implantação de fontes renováveis para a eletrificação rural. A qualificação do potencial de eletrificação é demonstrada via comparação de custos equivalentes entre várias alternativas para o abastecimento elétrico: fontes renováveis ou não, sistemas autônomos ou mini-redes com sistemas fotovoltaicos, eólicos, a diesel ou híbridos. Foi aplicado para as regiões da Tunísia, Marrocos, Itália, Espanha, Grécia, Cabo Verde, Índia e Brasil (Pará), (TIBA et al., 2007);

O Photovoltaic Geographic Information System (PV-GIS), desenvolvido pelo centro de pesquisa da União *Européia (UE), Joint Research Center* em 2001, combina dados experimentais de laboratório e de monitoramento e testes de sistemas de observações em longo prazo com bases de dados geográficos e climatológicos. Vem sendo utilizado como uma ferramenta de pesquisa de desempenho de sistemas fotovoltaicos, como ferramenta de suporte de diretrizes políticas de mercado na União Européia e para analisar as diferenças nacionais e regionais da geração de eletricidades por sistemas fotovoltaicos em 25 países membros da EU e cinco paises candidatos, (SÚRI et al., 2007).

CAPÍTULO 4
APLICAÇÃO DA METODOLOGIA PARA O CAMPUS DA UFPE

Desenvolvimentos de metodologias relacionadas à avaliação de potenciais para inserção de sistemas FV tornam-se mais esclarecedoras quando direcionadas a um determinado espaço. Apresenta-se a seguir, os resultados do caso estudo Campus da Universidade Federal de Pernambuco (**Campus UFPE**). Inicia-se pelo ambiente geográfico com a estimativa das áreas úteis dos telhados das edificações do Campus. Em seguida, substanciados pelos resultados obtidos com o sistema-teste, SFCR UFPE III, os ambientes, físico e técnico são abordados conjuntamente com algumas considerações relativas ao ambiente econômico. Os resultados agregados são disponibilizados mediante o SIG-UFPE/ SFCR dentro do ambiente analítico.

4.1 Caracterização do UFPE

O Campus Universitário Joaquim Amazonas, conhecido como **Campus UFPE** e ilustrado na Figura 20, localiza-se no bairro da Cidade Universitária, Zona Oeste da Cidade do Recife a $8,1^0$ de latitude Sul e $34,5^0$ de longitude Oeste. Com uma área de 159 hectares ($1,6\ 10^6\ m^2$), na qual estão distribuídos nove dos dez centros acadêmicos existentes (Educação, Tecnologia e Geociências, Informática, Ciências Biológicas, Filosofia e Ciências Humanas, Artes e Comunicação, Ciências Exatas e da Natureza, Ciências Sociais e Aplicadas, Ciências da Saúde), sete dos seus oito órgãos suplementares (Editora Universitária, Hospital das Clínicas, Laboratório de Imunopatologia Keizo Asami - Lika).

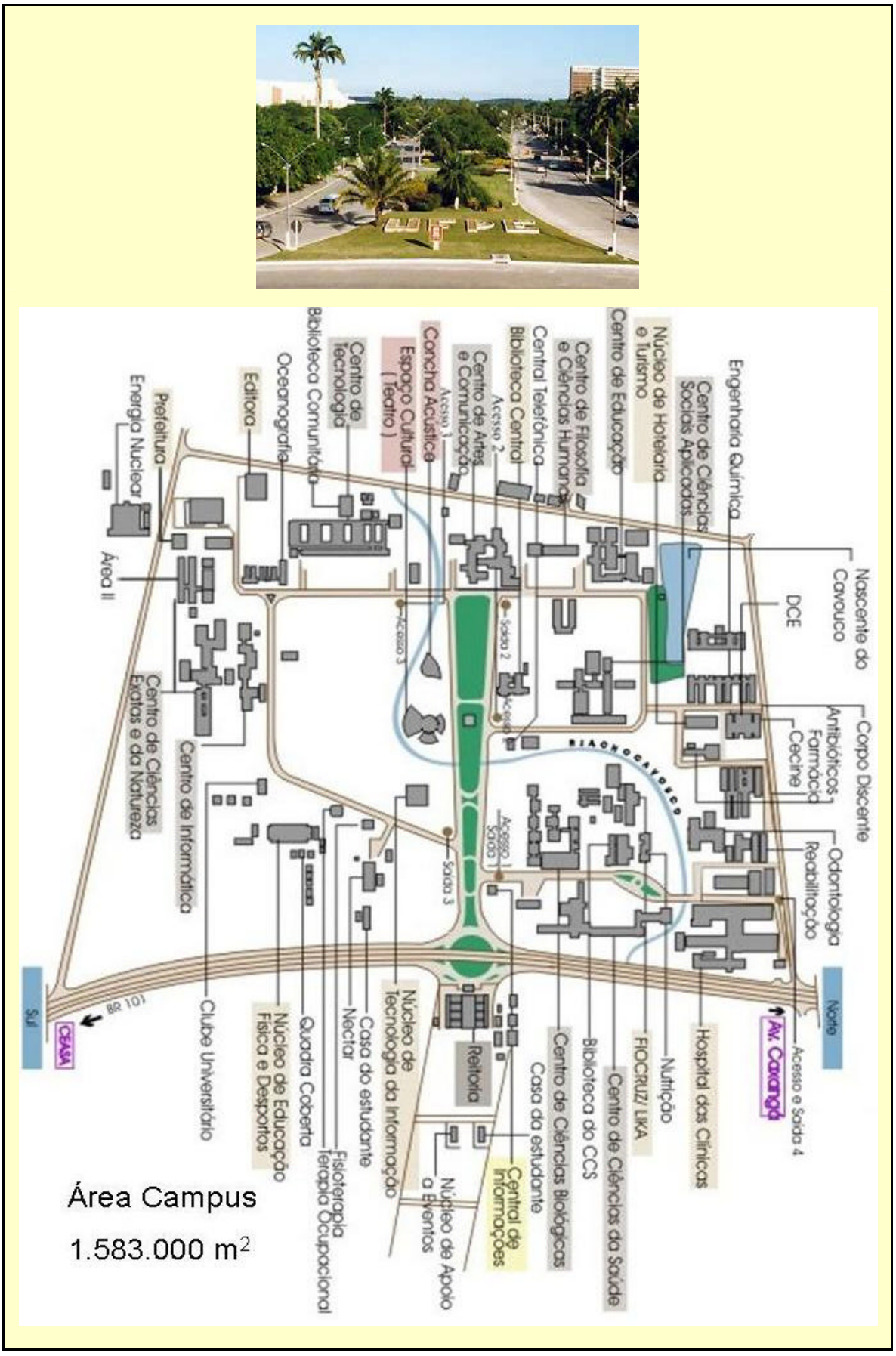


Figura 20- Campus UFPE- a) Vista geral; b) Mapa de ocupação.

Núcleo de Tecnologia da Informação, Núcleo de Educação Física e Desportos e Prefeitura) o Centro de Convenções, a Concha Acústica e o Colégio de Aplicação.

Completam a Universidade Federal de Pernambuco as seguintes unidades localizadas no centro da Cidade do Recife: o Centro de Ciências Jurídicas, a Antiga Escola de Engenharia, o Departamento Cultural, o Núcleo de TV e Rádio, o Memorial de Medicina e os Campus do Agreste e de Vitória. A área fora do Campus importa em cerca de 3.820.000 m^2.

O mais recente Inventário de Bens Imóveis da UFPE (IBI-2007), realizado por Florêncio (2008), apresenta as cerca de 102 edificações existentes no Campus UFPE por suas áreas construídas e projetadas. Acusa 331.809 m^2 como área construída, 323.441,40 m^2 como área de projeção dos imóveis e 1.266.826,60 m^2 como área livre, resultando em uma taxa de ocupação de aproximadamente 20%. Correspondem a edificações com cessão de área/uso 152.947 m^2 de terreno cedido, cerca de 9,6% da área total do Campus[18].

Esse estudo envolve as áreas projetadas das edificações localizadas no Campus Joaquim Amazonas e de uso próprio da UFPE. Portanto, foi admitido com referencia básica o valor de 170.494 m^2 de área projetada no Campus UFPE.

Quando as características como consumidor de energia, o Campus UFPE vem apresentando uma taxa de consumo de energia elétrica crescente e bastante elevada de cerca de 8% ao ano. A Figura 21 mostra a evolução do consumo nos períodos de janeiro a dezembro de 2007 e janeiro a setembro de 2008.

Observa-se que no ano de 2007, o consumo médio mensal foi de cerca de 1,95 GWh/mês. O valor médio de janeiro a setembro de 2008 atingiu 2,03 GWh/mês. Um aumento de 8% em relação ao mesmo período em 2007 (1,88 GWh/mês) O consumo anual médio entre setembro/2007 a setembro/2008 resultou em 2,2 GWh/mês.

[18] Os dados do IBI-2007 não envolvem as áreas do complexo LIKA e do Colégio de Aplicação

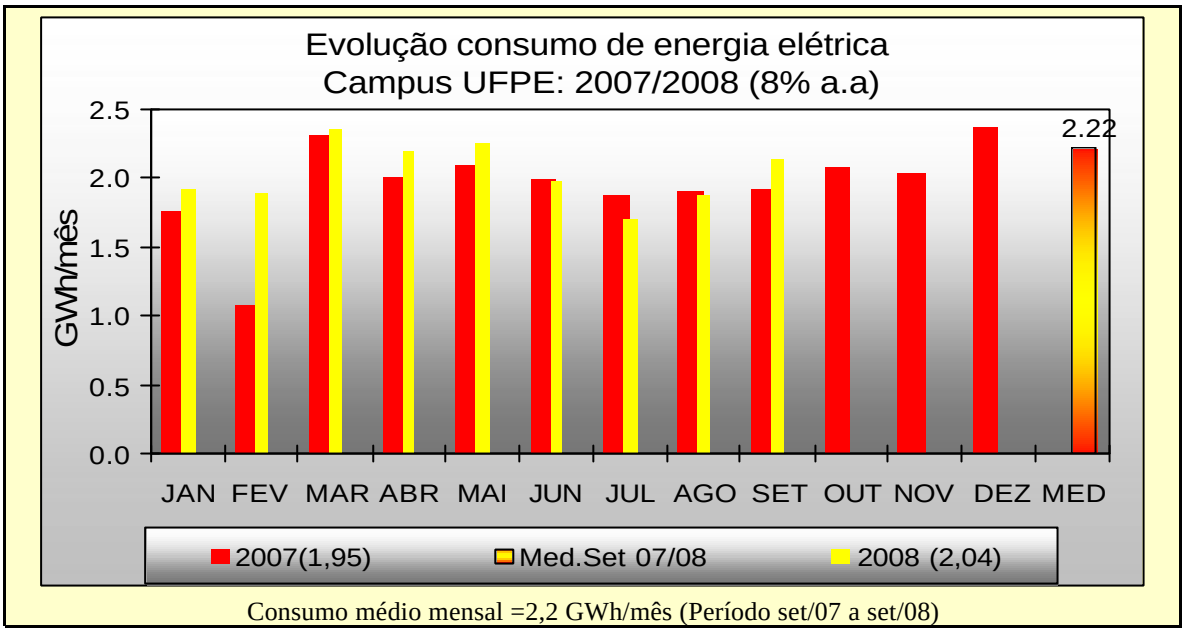


Figura 21- Campus UFPE- Evolução do consumo de energia elétrica da UFPE.

4.2 Estimativa da área útil de telhados do Campus UFPE para SFCR

Para o dimensionamento da Área Útil (A_a) de cada telhado se faz necessário determinar o seu Nível de Luz do Céu (NLC) via estimativa dos fatores (F_d,F_o,F_s,F_p) de cada edificação em observação.

O estudo foi realizado se utilizado as seguintes ferramentas:

1. Mapas georreferenciados do Campus, com uma resolução de 200m x 200m e, plantas da ocupação do Campus;
2. Fotografias aéreas, locais e imagens de satélites (*Google Earth*);
3. Base de dados do Inventário de Bens Imóveis da UFPE. (UFPE-IBI/07), (FLORÊNCIO, 2008).

Como facilitador, para a aplicação da metodologia, a área do Campus UFPE foi dividida em 7 setores delineados pela formação dos centos acadêmicos, segundo o IBI-UFPE/2007 e/ou pela proximidade das edificações, como mostra a Figura 22.

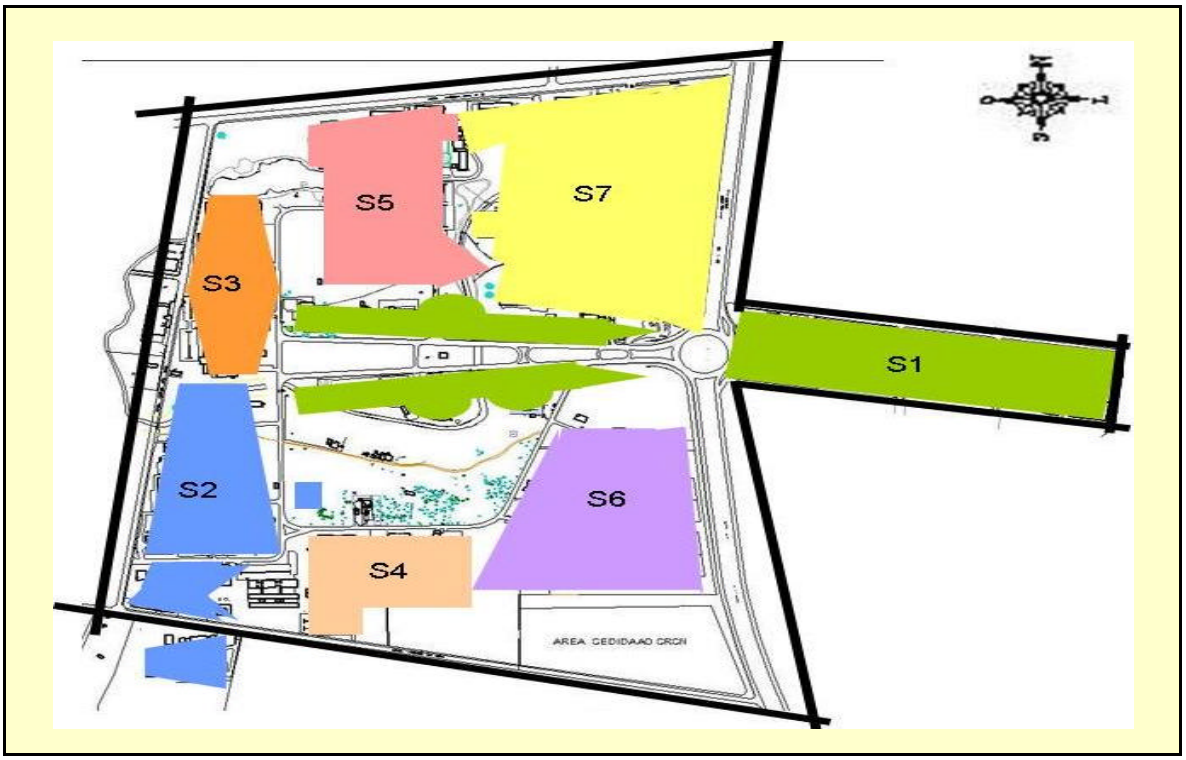


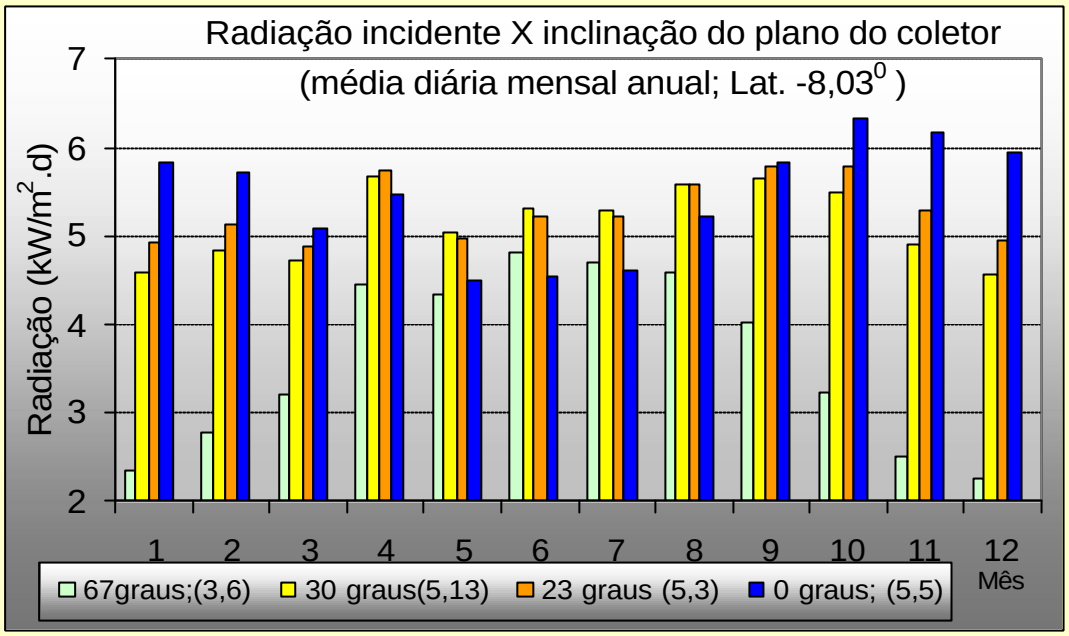
Figura 22- Campus UFPE- Mapa de ocupação por divisão em setores.

O Setor Amarelo apresenta uma maior densidade de edificações, como consta no mapa de ocupação da Figura 20, fato indicativo de uma maior possibilidade de sombreamento entre as edificações.

4.2.1 Campus UFPE – Estimativas dos Fatores Disponibilidade (F_d), Ocupação (F_o), Posição (F_p) e Sombras (F_s).

Como descrito no item 3.3.2, O espaçamento (d) entre os módulos ou fileira de módulos FV, necessário para o não sombreamento entre os mesmos, depende da latitude do local (?), do ângulo de inclinação do plano do arranjo FV (ß), além de suas dimensões. Portanto, para seguir a metodologia desenvolvida, se faz necessário determinar a inclinação do plano do gerador FV para a máxima coleta da radiação incidente.

Para áreas situadas no Campus da UFPE, (?=8,03^0 S), a dependência da radiação incidente com a inclinação do plano coletor é mostrada na Figura 23, para inclinações de 0^0, 23^0, 30^0 e 67^0, faceando o Norte



Elaboração do autor: Níveis de radiação H_h da Base de Dados INMET.

Figura 23- Campus UFPE: Radiação incidente em função do ângulo de inclinação do plano coletor

Os resultados foram obtidos utilizando-se a metodologia clássica de cálculo da radiação em um plano inclinado, (TIBA et al., 2000) com a Base de Dados INMET[19], com os valores expressos como média diária mensal da radiação incidente em um plano horizontal na superfície da Terra.

Os resultados mostram:

- A energia incidente é máxima para (ß=0^0), com cerca de 5 kWh/m^2.d, como média diária mensal anual, com valor máximo nos meses de verão (5,7 a 6,3 kWh/m^2.d, setembro a fevereiro) e mínimo no período de inverno (4,5 kWh/m^2.d, maio a julho);

[19] Instituto Nacional de Metrologia- INMET, (www.inmet.gov.br)

- O fluxo de energia incidente ao longo do ano para planos com inclinação igual à latitude do local (ß=-8,03^0) resulta praticamente igual à condição plano horizontal (ß=0^0);

- Valores de inclinação muito superiores à latitude do local, (?>>8,03^0) favorecem os meses de inverno, fator que deve ser levado em conta quando se faz necessário, na questão do suprimento de energia, a sazonalidade. No entanto, os valores da radiação incidente diminuem à medida que a inclinação do plano FV aumenta. Por exemplo, para (ß=67^{0}N), a média diária mensal anual resulta em cerca de 3,3 kWh/m^2.d e, para o mês de junho (inverno), em 4,8 kWh/m^2.d;

- Para inclinação de (ß=23^{0}N) os resultados são mais homogêneos ao longo do ano em relação à opção plano horizontal (ß=0^0) e apresenta valores médio e máximo (5,3 kWh/m^2.d e 5,8 kWh/m^2.d) muito próximos ao médio e máximo apresentados com inclinação nula.

- Portanto, para a Cidade do Recife, a inclinação do plano coletor deve se situar no intervalo de 0 a 23^0, faceando o Norte Verdadeiro.

Vale salientar que como regra prática, para a facilitação da montagem e manutenção no arranjo FV, (menor deposição de pó e melhor escoamento da água de chuvas), utiliza-se, como ângulo de inclinação do plano gerador, o valor igual ao valor da latitude local acrescido de 10 a 15^0.

Do ponto de vista de desempenho global do sistema, importa mais a quantidade anual de energia produzida pelo SFCR do que a distribuição sazonal da energia gerada. No entanto, há situações nas quais a sazonalidade deve ser considerada em detrimento da maior quantidade de energia anual, como por exemplo, no atendimento de demandas específicas crescentes ao período de verão (necessidades de refrigeração) ou inverno (necessidades de aquecimento).

Para o caso de SFCR no Campus UFPE, a proposta prever a maximização da geração anual de energia e uma distribuição mais homogênea ao longo do ano. Portanto, o ângulo de inclinação do plano do gerador FV foi definido como vinte e três graus, faceando o Norte Geográfico (ß=23^0).

1- Fator de Disponibilidade (F_d)

Considerando a localização do Campus UFPE de, aproximadamente, oito graus de Latitude Sul, (?=-8,03^0), o valor de inclinação do plano do gerador FV, (ß=23^0) e a situação mais conservativa (solstício de inverno), a distância de espaçamento (d) necessária para não-sombreamento resulta em cerca de 20% do valor do comprimento (L) do módulo ou fileiras de módulos, de acordo com o exposto no item 3.3.2.

Portanto, cada edificação, no máximo, pode apresentar uma disponibilidade de 80% da área de sua cobertura, o que resulta em um Fator de Disponibilidade, igual para todas as áreas de telhados, de F_d=0,8.

2-Fator de Ocupação (F_o)

Os Fatores de Ocupação para as áreas de coberturas das edificações do Campus UFPE foram determinados conforme descrito no desenvolvimento da metodologia, item 3.3.2.

Como salientado, a qualidade da imagem (fotografias aéreas e/ou de satélites) e o conhecimento prévio da finalidade de uso da edificação e/ou de sua cobertura são de fundamental importância. Em imagens de boa qualidade e de cores variadas, como a ilustrada na Figura 24a, as identificações de formas e da existência de obstáculos são relativamente fáceis. Ao contrario do que ocorrem em imagens de telhados de cores homogêneas e acinzentadas, como as da UFPE, Figura 24b.

a) Bairro da Várzea/Recife-PE b) Campus UFPE/Recife-PE

Figura 24 - Imagens de áreas de cobertura de telhados: tonalidades diversificadas e homogêneas

O conhecimento prévio da finalidade da área pode definir o valor de (F_o), como por exemplo, as áreas das coberturas do Núcleo de Tecnologia de Informação e do Restaurante Universitário, destinadas à utilização de sistemas ventilação e exaustão do ar. Nesses casos, de áreas totalmente (100%) ocupadas para outras atividades, o Fator de Ocupação é nulo (F_o=0). Em outros casos, a ocupação é parcial e parte da cobertura pode ser utilizada para SFCR. A área da cobertura do edifício central do Centro de Tecnologia e Geociências (CTG-Central) com cerca de 50% da área de cobertura utilizada como observatório, por exemplo. Nesse caso F_o=0,5, segundo aos critérios propostos no item 3.3.2.

Na Figura 25 constam exemplos ilustrativos dos resultados obtidos de (F_o) para algumas das edificações analisadas

b

(F_o=1) coberturas livres: biblioteca, auditório e galpões e graduação CTG.
(F_o<1) coberturas com ocupação parcial: 50% da terraça do CTG, F_o=0,5;
(F_o=0) coberturas totalmente ocupadas: NTI e Restaurante
(F_p=1) coberturas alinhadas: biblioteca, auditório, galpões e graduação do CTG, NTI, restaurante.
(F_p<1) cobertura não alinhada: centro de convenções, desvio de 45^0, F_p=0,7.
(F_s=1) coberturas livres de sombras durante todo o dia: biblioteca, auditório e graduação CTG, reitoria,
(F_s<1) coberturas com sombras no período da manhã ou da tarde :galpões do CTG (Fs=0,5)
(F_s=0) coberturas com sombras durante todo dia

Figura 25- Campus UFPE: Ilustrações de áreas de telhados com indicação dos valores dos Fatores de Ocupação, Posição e Sombra.

3-Fator de Posição (Fp)

As coordenadas de posicionamento (direção e sentido), determinadas diretamente dos mapas georreferenciados ou dos mapas de ocupação, permitem determinar o grau de não-alinhamento, em relação à linha Norte-Sul, de cada área-telhado, ou seja, o Fator de Posição (F_p).

Seguindo o procedimento proposto, item 3.3.2(vi), os resultados obtidos mostram que na grande maioria, as áreas de coberturas se apresentam alinhadas em relação ao Norte Geográfico dentro do limite estabelecido de no máximo 15^0 (quinze graus) de desalinhamento, ou seja, redução na radiação incidente máxima de 3,5%. Portanto, para essas edificações, o Fator de Posição resulta no valor unitário, (F_p=1).

Para as edificações com coberturas desalinhadas, normalmente, com formas não lineares, (F_p) assume valores de acordo com o exposto no item 3.3.2, Figura 18b.

Por exemplo, a cobertura do anfiteatro do Centro de Convenções encontra-se desalinhada em cerca de 45^0 em relação ao Norte Verdadeiro, implicando uma perda na energia incidente de cerca de 30%, ou seja, um Fator de Posição de 0,7, segundo os critérios estabelecidos. Na Figura 25 constam exemplos de diferentes situações encontradas no Campus da UFPE.

3-Fator de Sombras (F_s)

Os valores do Fator de Sombras (F_s) foram atribuídos de acordo com os estabelecidos na Tabela 7 (item 3.3.2).

Esse fator é extremamente vinculado à dinâmica do crescimento urbano além, evidentemente, do "Movimento do Sol"[20] ao longo do ano. Edificações e arborização

[20] Expressão comumente utilizada para descrever o movimento da Terra ao redor do Sol vista por um observador na terra.

podem surgir onde antes não existiam. As fotos da Figura 26 ilustram bem esse comentário.

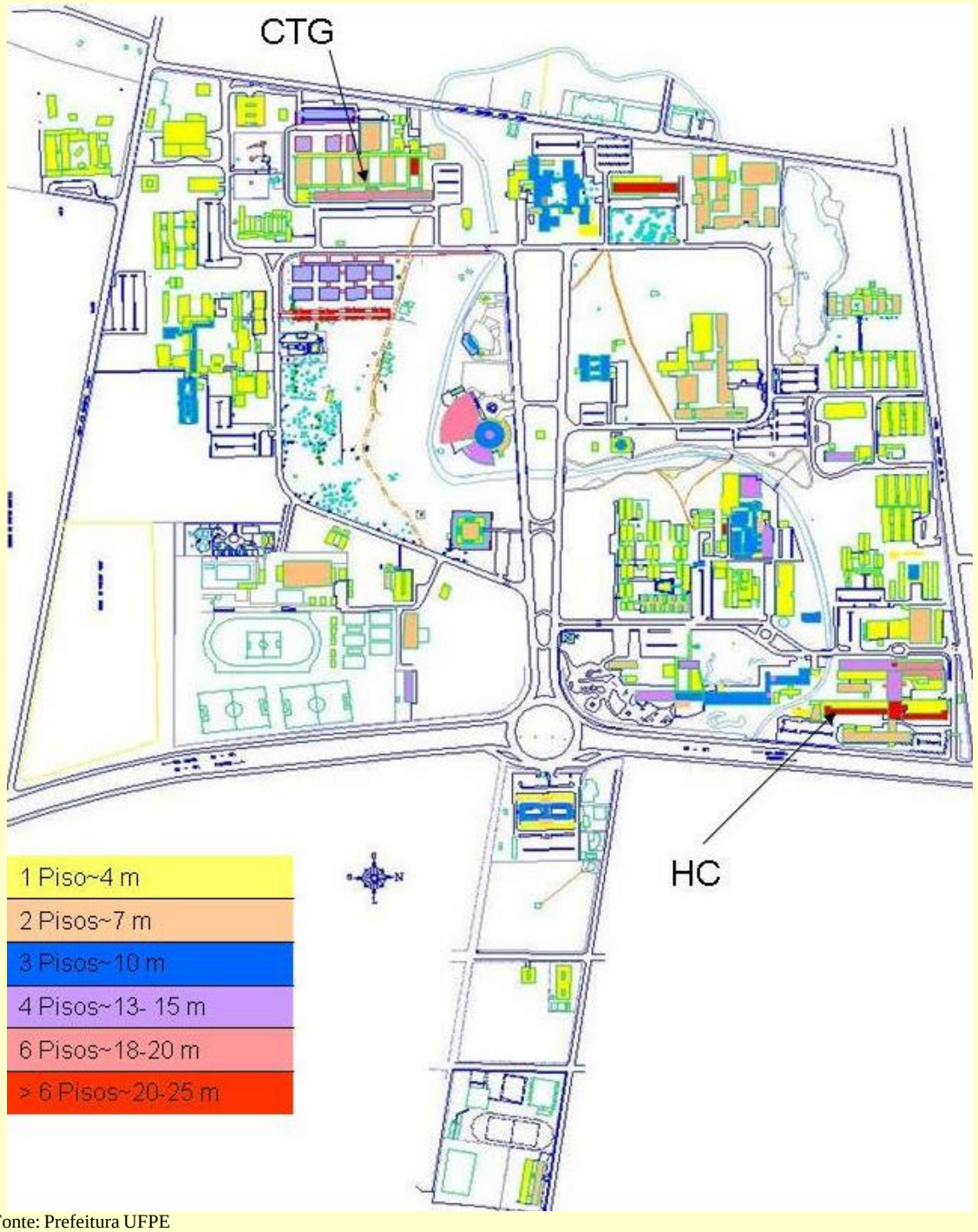
Anos 70 (data não conhecida)

Ano 2008 (agosto)

Figura 26 - Campus UFPE: Ilustrações de sombras pela dinâmica do crescimento urbano. Região da Biblioteca Central em diferentes épocas.

Mostram a edificação da Biblioteca Central em dois períodos distintos: no primeiro, em meados dos anos 70, quando praticamente toda área de cobertura recebia sol durante todo o dia. Na situação atual, grande parte do telhado recebe sombras, no período da manhã, provenientes das árvores situadas ao Leste da edificação. Portanto, vistorias locais são indispensáveis no momento da elaboração de um projeto específico de instalação de sistemas solares.

A estimativa do Fator de Sombras pode ser bastante facilitada com o auxílio de mapas de ocupação por classificação das edificações pelas suas alturas. A Figura 27 mostra um exemplo desse tipo de mapa para a UFPE, no qual as edificações com indicação de um piso correspondem a uma altura de aproximadamente 4 m; dois pisos de 7 a 8 m; três pisos cerca de 10 m; quatro pisos de 13 a 15 m; cinco pisos de 18 a 20 m e com mais de seis pisos de 20 a 25 m de altura. Essa classificação é um indicativo da altura da edificação e não da existência física do número de pisos. Observa-se a existência de algumas edificações (ou conjunto de edificações) com grandes alturas, superiores ou equivalentes a seis pisos, como por exemplo, o Hospital das Clínicas (HC).



Fonte: Prefeitura UFPE

Figura 27-Campus UFPE: Mapa de ocupação por classificação das alturas das edificações.

Composto por diversos prédios de alturas diferentes e com pouco espaço livre entre os mesmos, o Conjunto Hospital das Clínicas encontra-se ilustrado na Figura 28. O prédio principal do (HC), tem 20 a 25 m de altura por cerca de 180 m de extensão. Vizinho e ao Leste há um conjunto de edificação com cerca de 4m de altura. Na direção Oeste, existem vários prédios térreos, outros com cerca de 4 m e logo após edificações com cerca

de 13 a 20m de altura. Sombras do HC, de até 75 m de comprimento, podem ocorrer na direção Oeste no Solstício de inverno, no período da manhã. O mesmo ocorre no período da tarde na direção contrária. Portanto, para as edificações de menor altura e situada na frente do HC (ao Leste) e que só recebe sombras no período da tarde, Fs=0,5. As edificações situadas ao Oeste do HC e ao Leste das edificações de 13 a 20 m de altura, estão totalmente comprometidas e Fs=0.

Um outro exemplo bastante esclarecedor ocorre no Centro de Tecnologia e Geociências, Figura 28 (coluna esquerda). As edificações chamadas “Galpões do CTG”, com cerca de 7 m de altura, situam-se a Oeste e vizinhas ao “Edifício Graduação” que tem 13 a 15 m de altura e cerca de 200 m de extensão. Durante grande parte do período da manhã os telhados dos galpões ficam sombreados, e nesse caso, F_s=0,5.

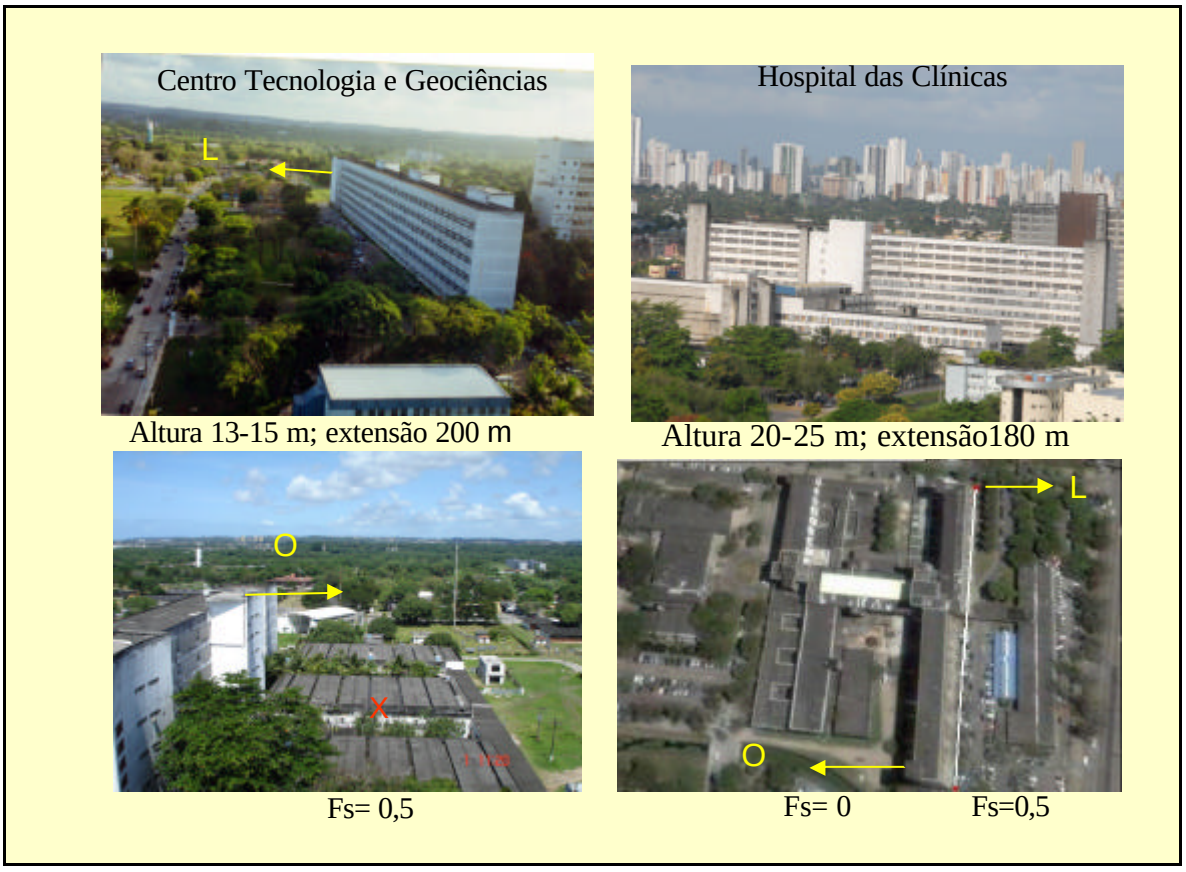


Figura 28 - Campus UFPE: Ocorrência de sombreamento por proximidade entre edificações (F_s<1)

4-Fator Nível de Luz do Céu (NLC)

Conforme descrito no item 3.3-2, o fator Nível de Luz do Céu indica a qualidade e quantidade do potencial de radiação incidente no plano do telhado, podendo ser estimado mediante a Eq. 4. Como exemplificação, na Tabela 11 constam valores do Fator NLC, classificados segundo os critérios da Tabela 8, para algumas das edificações citadas e ilustradas nas figuras 5 e 27.

Tabela 11- Campus UFPE/Recife. Fator Nível de Luz do Céu para edificações-exemplo

Edificação Telhado	**Teatro UFPE**	**NTI**	**CTG GSM**	**CTG Graduação**	**CTG Galpões**
Fo; Fp; Fs	1; 0,7; 1	0; 1; 1	1; 1; 0	1; 1;1	1; 1;0,5
NLC	0,7	0	0	1	0,5
Classificação	Bom	Não viável	Não viável	Muito bom	Baixo

Observando os valores resultantes para os NLC, pode-se concluir que o telhado da edificação CTG-Graduação apresenta as melhores condições para SFCR, entre os exemplos citados.

5-Área útil de telhado disponível para SFCR

O estudo considera como unidade de análise inicial a área projetada da cobertura da edificação. Em alguns casos, um conjunto de prédios pode ser considerado como uma unidade, como por exemplo, o bloco dos 4 Galpões do Centro de Tecnologia e Geociências, (CTG- Galpões).

Foram consideradas como áreas não habilitadas: as coberturas/telhados que apresentam pequenas áreas (>20m^2), como os telhados das guaritas de segurança; coberturas de edificações estratégicas, como a central de segurança e telefonia, estações de rádio e de tratamento de água e coberturas não planas como as dos campos esportivos e Concha Acústica.

Dentro desses limites, a área total analisada corresponde a cerca de 160.000 m^2 envolvendo 67 unidades. Ou seja, cerca de 90 % da área total de todas as edificações existente no Campus e de uso próprio da UFPE (171.000 m^2).

A área total do telhado de cada unidade informada no IBI-UFPE/2007, como área projetada da edificação, foi comparada com o valor medido/estimado mediante suas coordenadas de posição e/ou por suas dimensões via leituras diretas nos mapas e/ou imagens de satélites georreferenciados. Esse procedimento permite a realização de correções possibilitando uma melhor estimativa da área real da cobertura. Espaços vazios (cortes arquitetônicos) podem ser identificados pelas imagens de satélites e/ou fotografias aéreas.

No caso do Campus UFPE, na sua grande maioria, as edificações apresentam formas quadradas ou retangulares e á área projetada (IBI-UFPE/2007) praticamente reproduz a área estimada. As diferenças entre esses valores foram menores que 15%. Por facilidade de informação, foi adotado como valor da área do telhado o dado informado no IBI-UFPE/2007, e corrigido em caso de maiores divergências proveniente da arquitetura do edifício.

Seguindo a metodologia apresentada, a Área Útil (A_u) é calculada a partir do dado de Área Total do telhado (A_t), conhecido ou medido/estimado, do Fator de Disponibilidade (F_d), referente à necessidade de espaço para a montagem e calculado em função da latitude do local (?) e da inclinação do arranjo FV (ß), e do NLC calculado com os fatores F_o, F_s, F_p.

Ressalta-se que a (A_u) corresponde à área do arranjo FV (A_a) e não a área ocupada pelo mesmo. Para um melhor entendimento, na Tabela 12 constam valores das áreas, envolvidas no estudo, para algumas edificações-exemplo do Campus UFPE.

Tabela 12- Campus UFPE. Área total do telhado e Área Útil para SFCR de edificações-exemplo

Edificação Área (m^2)	Teatro UFPE	NTI	CTG Graduação	CTG 1 Galpão
Telhado[1]	4.541	700	2.877	991
Telhado[2,3]	4.680	625	2.600	1.012
Útil [3]	2.543	0	2.302	397

1-Área Projetada informada no IBI-UFPE/2007; 2- Área medida via Mapas/imagens georreferenciados; 3-área útil calculada pela metodologia presente Eq.3 e 4

4.3 Avaliação da produção de energia elétrica

Como já mencionado, a energia produzida pode ser estimada utilizando-se modelos clássicos da geometria solar, (Ambiente Físico) junto com dados técnicos de catálogos do gerador FV e inversor ou com dados operacionais relativos a sistemas-teste, (Ambiente Técnico). Para um maior grau de confiança, os dados de radiação devem ser representativos, ou seja, dados médios relativos a séries históricas de estações climatológicas (período de observações de aproximadamente 10 anos) ou de experimentos em longo prazo.

No caso especifico, do Campus UFPE, a avaliação da produção de energia tem como base os indicadores operacionais do sistema teste SFCR-UFPE III durante o período de 1 ano (nov/2007 e out/2008), abordados no Capítulo 3 e resumidos na Tabela 6, item 3.2.2-2. Portanto, se faz necessário referendá-los via séries históricas de níveis de radiação para a Cidade do Recife.

A Tabela 13 apresenta três séries históricas de dados de radiação no plano horizontal (H_h) para a Cidade do Recife. Esses dados são provenientes das seguintes bases de dados: Atlas Solarimétrico do Brasil, (TIBA et al., 2000), do Instituto Nacional de Metrologia- INMET, (www.inmet.gov.br) e NASA, (NASA global.satellite/analysis data)[21].

[21] Disponível em: Clean Energy Project Analysis (www.retscreen.net)

Considerando esses níveis de ($H_{h,\ base}$), os valores da radiação incidente em um plano inclinado, ($H_{fv,base}$) de 23^0 e faceando o Norte, foram calculados como abordado no item 3.1 e comparados com os valores experimentais medidos, (H_{fv}). Os resultados constam no gráfico da Figura 29.

Observa-se que, em termos de média mensal anual, os resultados obtidos, provenientes das bases de dados Atlas de 4,94 kW/m^2.d e INMET de 5,21 kW/m^2.d, mostram boa concordância com o valor experimental de 4,73 kW/m^2.d. As diferenças, de cerca de 4% e 10 %, respectivamente, situam-se dentro da margem de erro do sensor de radiação utilizado nas medições experimentais (Tabela 5, item 3.2.2). O resultado proveniente da base de dados NASA, de 5,68 kW/m^2.d, é cerca de 20% maior que o valor experimental.

Tabela 13-Campus UFPE/Recife. Radiação no plano horizontal (?=-8,03)
Médias diárias mensais (kWh/m^2.d)

Mês	**H_h [Atlas]**	**H_h [INMET]**	**H_h [NASA]**
Janeiro	6,437	5,827	6,74
Fevereiro	5,566	5,720	6,50
Março	5,352	5,072	6,23
Abril	3,528	5,485	5,40
Maio	4,510	4,494	4,98
Junho	3,702	4,535	4,49
Julho	3,819	4,603	4,62
Agosto	5,168	5,215	5,39
Setembro	5,976	5,822	6,09
Outubro	5,695	6,329	6,64
Novembro	6,169	6,168	6,82
Dezembro	6,343	5,951	6,78
Média anual	**5,189**	**5,435**	**5,890**

Bases de Dados:Atlas Solarimétrico do Brasil, (TIBA et al., 2000);
Instituto Nacional de Metrologia - INMET, (www.inmet.gov.br);
Dados de Satélites NASA, (NASA globalsatellite/analysis data).

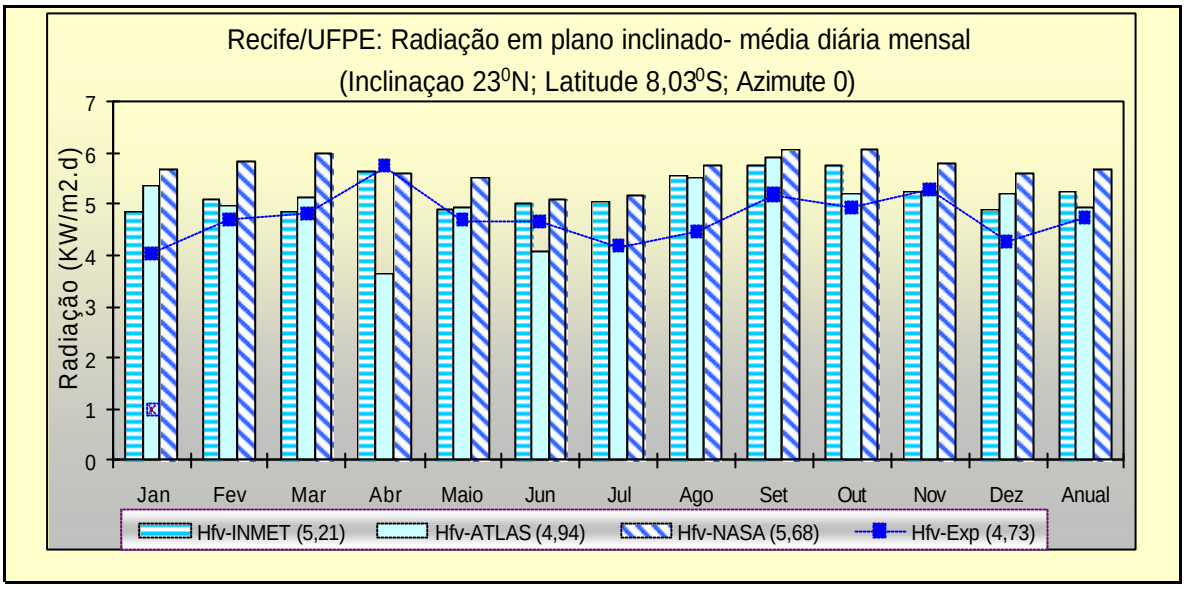


Figura 29-Campus UFPE/Recife: Radiação incidente em um plano inclinado de 23^0, faceando o Norte: Base de Dados: Atlas do Brasil, INMET e NASA.

Para padronização das informações, foi definido um Sistema Padrão configurado como um arranjo de 10 m^2 de módulos fotovoltaicos, com características semelhantes as do SFCR-UFPE III: módulos FV de (p-Si), localização (?=8,03^{0}S), posicionamento (ß=23^0) faceando o Norte e um Fator de Desempenho Global de 0,69.

A produção de energia elétrica para esse Sistema Padrão foi estimada por simulação utilizando-se a base de dados "Atlas do Brasil" e os índices operacionais de produtividade e desempenho global obtidos do sistema teste, SFCR-UFPE III.

Os resultados obtidos, representados pelo balanço energético na Figura 30, mostram uma produção média diária de 4,72 kWh/d, ou seja, cerca de 130 kWh/mês ou 1,56 MWh/ano. Nessas condições, a Energia Especifica, (EE)[22] resulta em 156 kWh/m^2.

Exemplificando, seria necessária uma área de módulos FV (p-Si) de cerca de 34.000 m^2 (0,2% da área do Campus) para reduzir, por exemplo, em 20% o atual consumo de eletricidade da UFPE (2,2 GWh/mês).

[22] A Energia Especifica é referida em termos anuais.

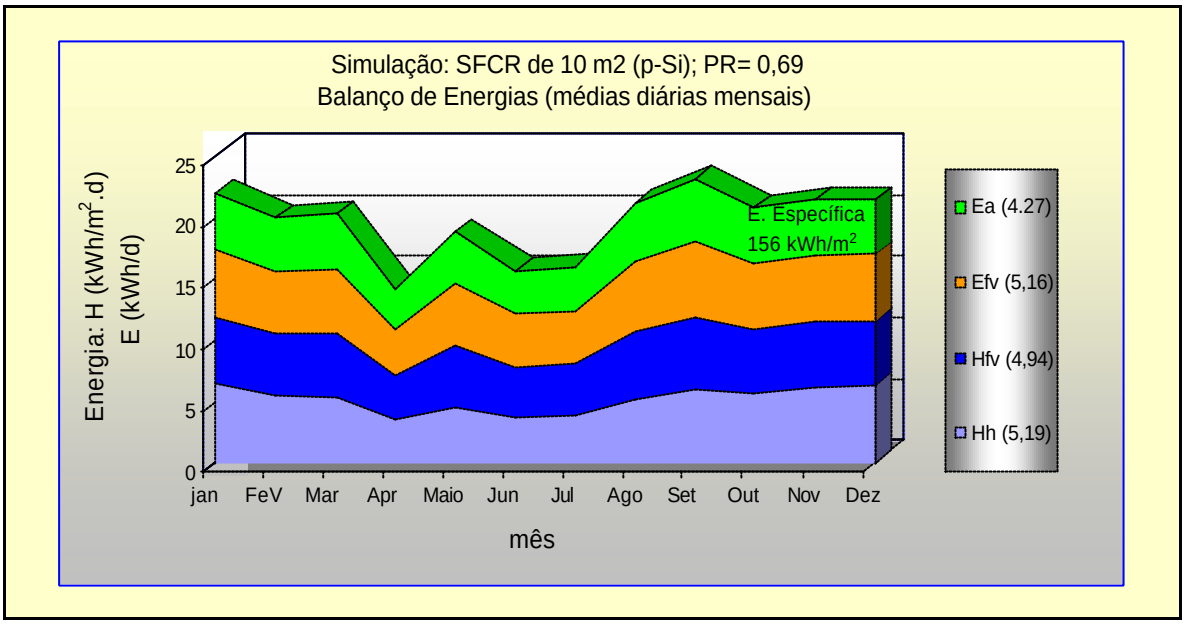


Figura 30-Campus UFPE/Recife: Balanço de energias e energia específica para o SFCR-Padrão.

Esse valor de Energia Específica (156 kWh/m^2.a) é representativo para qualquer sistema FV nas mesmas condições do sistema padrão em áreas que apresente um Nível de Luz de Céu igual a um, (NLC=1). Como por exemplo, as coberturas do CTG-Graduação e Hospital das Clínicas. Por outro lado, nas coberturas do CTG-Galpões e Teatro UFPE, a Energia Especifica é 50% e 70% menor (78 e kWh/m^2) já que, nessas edificações, o NLC= 0,5 e 0,7 respectivamente, como consta na Tabela 11.

Na metodologia apresentada, o cálculo da Área Útil (A_u), resulta do produto do NLC do telhado com a Área Total Disponível (A_d).

Portanto, há duas maneiras de estimar a quantidade de energia que seria produzida pelo SFCR de área (A_u), instalado no telhado de área (A_t). Considerando os valores da Energia Especifica no local sem nenhuma consideração da sua qualificação para SFCR (E.E*). Ou, considerando os valores da Energia Especifica (E.E) correspondente a NLC=1 e da área do arranjo fotovoltaico (A_u), como exemplificado na Tabela 15 para algumas edificações-exemplo.

Tabela 14- Campus UFPE/Recife. Energia produzida e área útil de SFCR em telhados de edificações-exemplo

Área (m^2) **Energia Específica ($kWh/m^2.a$)**	**Teatro UFPE**	**CTG Graduação**	**CTG 1 Galpão**
Telhado	4.542	2.877	991
Disponível (A_d) **E.E***	3.634 109	2.302 156	793 78
Útil (A_u) **E.E**	2.543 156	2.302 156	397 156
Energia Produzida Anual ($E_{a,a}$) (MWh/ano)	397	358	62

A área do telhado Teatro-UFPE é 58% superior à do telhado CTG-Graduação. No entanto, a sua produção de energia é maior apenas de 22%. Fato decorrente da qualidade menor (NLC=0,7) dessa área em relação à área do telhado CTG-Graduação (NLC=1).

4.4 Considerações sobre o ambiente econômico

Pelas considerações colocadas anteriormente, item 3.4, a metodologia apresentada não tem a pretensão de realizar uma análise econômico-financeira mais complexa, supondo uma concorrência entre fontes de geração elétrica. No caso estudo Campus da UFPE, o Ambiente Econômico é caracterizado como uma fonte de informações adicionais sobre os custos envolvidos e o tempo de retorno do investimento realizado.

A composição de custos por Wp instalado, para o SFCR padrão na cidade do Recife (Campus UFPE) em um espaço com NLC=1, é mostrada na Tabela 15. O investimento corresponde aos custos com equipamentos e ferramentas de projeto. O custo da instalação envolve as despesas com materiais e acessórios, e o custo com a mão-de-obra de instalação.

Esses itens levam em consideração:

1- Equipamentos: custos no mercado do Brasil, (Tabela 3, item 2.5);

2- Ferramentas de projeto: 3 a 10 % do custo de Investimento;

3- Material e Mão-de-Obra de instalação: cerca de 8% do custo de instalação. (baseado nas experiências de instalação de SFCR do Grupo FAE e considerando que o custo de mão de obra no Brasil é bem menos oneroso que nos países da Europa e nos Estados Unidos).

Tabela 15-Composição de custos de um SFCR de 10 m2
1,3 kWp (p-Si), instalado a 23^0N na Cidade do Recife ($8,03^0$S) e NLC=1.

Item	**Custo unitário R$/unidade**
CT=Custo do sistema instalado (R$/Wp) ***(R$/m^2)***	***24,00*** ***3.120,00***
INVENT = Investimento (92 %) Gerador, 25 anos de vida útil, (R$/Wp) Inversor 10 anos de vida, (R$/Wca) Ferramentas de projeto (R$/Wp) (Estabelecido 6,8 % do investimento)	**22,0** 17,0 3,5 1,5
Instalação: material (BOS) + mão-de-obra. (estabelecido 8% do custo total) (R$/Wp)	**2,0**
R$/US$=2,00	

O custo total, para um SFCR (p-Si) de 10 m^2 (1,3 kWp) e NLC=1, resultou em cerca de R$ 31.200,00, (15.600 US$), ou seja, um custo por kWp instalado de R$ 24,00 (12,0 US$/Wp$_{inst}$). O custo de investimento resultou em cerca de 92% do custo total, correspondendo à instalação um percentual do custo total de 8%.

É interessante também, observar o custo por metro quadrado de área FV resultante em cerca de 3.120,00 R$/m^2, (1.560,00 US/m^2).

Considerando, a realidade e peculiaridades do mercado FV no Brasil e o volume de compra dos equipamentos, o resultado obtido de 12,00 US$/Wp$_{inst}$ é representativo quando comparado a outros valores citados na literatura, para sistemas de características semelhantes ao sistema Padrão:

- Encontra-se dentro da faixa de custos (6,0 a 17 US$/Wp.$_{inst}$) para sistemas de 1,2 a 10,2 kWp instalados em diversas localidades na Flórida, citada por James et al., (2001), (Figura 9, item 2.5);
- É cerca de três vezes superior a valores mais atuais do mercado internacional, por exemplo, de 4,5 U$/Wp$_{inst}$ nos Estados Unidos, (www.solarbuzz.com 07/2008) e de 9,00 US$/Wp$_{ins}$. apresentado pelo *Sistema Solar I,* (Figura 10). Vale salientar, que o Solar I com 2 kWp e custo de cerca de 18.000 US$ possui acumulador de energia, equipamento que onera bastante a composição do custo de investimento;
- É cerca de 30% maior que o valor estimado de 5,00 Euros/Wp.$_{inst}$, (~9,00 US$) citado por Rüther et al., (2008) para SFCR em telhados dentro de um programa de 1.000 MWp. Nesse programa, o tipo da tecnologia da célula fotovoltaica utilizada, de (a-Si) e o volume de aquisição de módulos FV previsto, podem ter contribuído na redução do custo do KWp$_{ints}$.

Normalmente, módulos de (a-Si) apresentam menor custo do que os módulos de (c-Si). SFCR- Padrão. Quanto ao fator escala na aquisição dos equipamentos, esse tem forte e importante influência na composição do custo de investimento.

O custo do kWp.$_{inst}$ pode ser bastante reduzido em função do volume de equipamentos adquiridos e pela possibilidade de aquisição direta, dos módulos e inversores, no mercado internacional. Nesse caso, os resultados podem ser mais promissores. Segundo, Lorenzo (1994) há uma redução de cerca de 40% a 45% no custo do kWp instalado, entre as instalação de um sistema FV autônomo de 10 KWp e de mil sistemas também de 10 kWp.

Evidentemente, em se tratado de espaços que apresentem NLC<1 e mantendo-se como critério de projeto a Energia Específica para espaços com NLC=1, a área necessária do arranjo fotovoltaico será maior, e consequentemente, o custo de investimento, ou seja, um valor do custo do KWh$_{inst.}$ mais alto.

Nas condições consideradas, mercado nacional e sistema Padrão, o Tempo de Retorno[23] Simples (TRS) resulta em cerca de 40 anos. Valor de TRS muito maior que a vida útil do sistema, admitida igual a sua garantia de fabrica, normalmente de 25 anos.

Tomando como base o valor do mercado internacional de 5 US$/$Wp_{inst.}$, o TRS decresce para 16 anos. Valor ainda muito longo, mas cerca de 2,5 vezes menor do que o valor obtido no caso de aquisição no mercado nacional.

O Tempo de Retorno considera apenas o valor nominal do investimento e a receita pela economia de energia, desconsiderando as condições econômico-financeiras vigentes no momento. Portando, não é um parâmetro de decisão, mas, apenas um indicativo.

Com a ferramenta proposta para esse Ambiente, o Programa RETScreen, pode-se realizar um estudo econômico-financeiro detalhado com análises de sensibilidade e de risco, o que não é o caso no momento. O RETScreen realiza o fluxo de caixa tendo sempre um sistema de referência em comparação com o sistema proposto.

No caso do UFPE/Brasil, o sistema de referência corresponde à rede elétrica da concessionária cuja energia é de origem mista, ou seja, provém de todas as fontes utilizadas na matriz de geração de eletricidade no Brasil, com 89% de origem renovável dos quais 77 %, hídrica.

Visando exemplificar a aplicação do Programa RETScreen, foi realizado um balanço econômico-financeiro simplificado para um SFCR com capacidade nominal 80 kWp e características técnicas similares as do Sistema Padrão, a ser instalado na Cidade do Recife em um espaço que apresente NLC=1, por exemplo, no teto da edificação CTG-Graduação.

[23] Tempo de retorno simples: tempo necessário para que a economia proveniente pelo uso do sistema compense o investimento realizado, não considerando: o custo do capital investido, índices de inflação, juros e taxa de retorno.

Os resultados obtidos mostram valores de TRS muito longo, de cerca de16 anos, custo de geração da ordem de 0,32 US$/kWh, 28% superiores ao preço da tarifa elétrica atual e Taxas Internas de Retorno da ordem de 8% a.a.

Do ponto de vista estritamente financeiro, a realidade atual no Brasil é muito desfavorável à tecnologia de SFCR. Mesmo considerando o custo de investimento semelhante aos do mercado internacional (5,0 US$/W) e o preço da energia produzida igual à tarifa de energia elétrica atual, (0,25 US$/kWh).

A ausência de uma política de incentivo à tecnologia de SFCR junto aos índices econômico-financeiros não atrativos, por exemplo, taxas de juros altas de 24% a.a, inflação em torno de 5,9% a.a , indicam a não viabilidade financeira dessa aplicação no momento[24].

4.5 Resultados dentro do Ambiente Analítico

Conforme previsto no desenvolvimento da metodologia, item 3.5, todos os dados relativos às unidades analisadas foram inseridos, como dados de entrada para o programa SIG-UFPE/SFCR, em uma planilha eletrônica, denominada Tab-SIG/UFPE/SFCR.

Vários questionamentos podem ser respondidos pelo SIG-UFPE/SFCR que apresenta os resultados obtidos de forma mais acessível e espacialmente visíveis como pode ser observado no próximo item.

No Apêndice A1 constam os mapas de localização com as edificações estudadas junto a Tabela A1, que apresenta o modelo da Tab-SIG/UFPE/SFCR com os principais dados de interesse ao presente estudo.

[24] Banco Central do Brasil: Histórico de Metas de para a inflação no Brasil (www.bcb.gov.br em 10/11/2008); Banco do Brasil - modalidade empréstimo veículo novo (24 a 32%) entre 07 a 11/2008 (bb.com.br em 10/11/2008)

Analisando o universo de dados de entrada, Tab-SIG/UFPE/SFCR, para o SIG-UFPE/SFCR, resumidos na Tabela 16, observa-se:

1. A área total de telhados envolvida no estudo resultou em aproximadamente 160 mil metros quadrados, 94% da área projetada de todas as edificações no Campus e de uso da UFPE, considerada como referencia básica, cerca de 170 mil metros quadrados.

2. Como resultado global, cerca de 111 mil m^2 de área de telhados encontram-se disponível para a instalação de SFCR.

3. 75% dessa área, 83,6 mil m^2, apresenta Nível de Luz do Céu muito bom, indicativo da possibilidade de produção de 156 kWh/m^2 de energia elétrica via SFCR.

4. 75% dessa área, 83,6 mil m^2, apresenta Nível de Luz do Céu muito bom, indicativo da possibilidade de produção de 156 kWh/m^2 de energia elétrica via SFCR.

5. Ou seja, da possibilidade de instalação de cerca de 11 MWp de capacidade nominal de fotovoltaicos como SFCR com produção em torno de 13 GWh/ano de energia elétrica disponível para ser injetada na rede da concessionária.

6. Cerca de 46 % dos telhados analisados apresentam valores do Nível de Luz do Céu classificados como Muito bom (0,8= NLC = 1,0), e 53% como Baixo (NLC <0,6). Significando que em 46 % dos telhados um SFCR produziria cerca de 156 kWh/m^2 anualmente;

7. Praticamente todas as coberturas das edificações do Campus UFPE apresentam um alinhamento com o Norte Geográfico satisfatório. Ou seja, Fator de Posição igual a um (F_p=1). Um único caso apresenta desalinhamento superior ao limite de 15^0. Trata-se do teto do Teatro do Centro de Convenções, defasado em cerca de 45^0 o que acarreta na redução na energia incidente da ordem de 30%, (F_p=0,7);

Tabela 16- Resultados consolidados por Setor da Tab-SIG/UFPE/SFCR
Dados de entrada para o SIG-UFPE/SFGR

Campus UFPE	
Área total Campus	1.583.000 m^2
Área projetada total das edificações no Campus e de uso da UFPE	170.494 m^2
Área projetada total das edificações analisadas	159.942 m^2
Área disponível total de telhados para aplicação de SFCR	110.884 m^2
Área útil total de telhados para módulos fotovoltaicos	83.567 m^2
Capacidade nominal total de fotovoltaicos	10.864 kWp
Capacidade de produção de energia anual	13.037 MWh/ano
Nível de Luz do Céu dos telhados analisados x Aplicação SFCR	
Aplicação recomendada, 0,8=NLC=1	46%
Aplicação não recomendada, NLC<0,6	53%
Aplicação inviável	1%

Identifi-cação	**Foto Anexo**	**Área (m^2)**			**Capacidade (KWp)**	**Prod.Energia (MWh /ano)**
		Proj	**Disp**	**Útil**		
Total Setor Verde	A1+A2	19.093	9.100	8.010	1.041	1.250
Total Setor Azul	A3+A4	23.348	18.257	10.562	1.373	1.648
Total Setor Salmão	A5	14.743	11.794	7.318	951	1.142
Total Setor Lilás	A6	7.535	2.329	2.329	303	363
Total Setor Amarelo	A7	49.961	38.823	35.582	4.626	5.551
Total Setor Rosa	A8	25.403	19.797	13.322	1.732	2.078
Total Setor Laranja	A9	19.858	10.783	6.446	838	1,006

8. A grande maioria, dos telhados, apresenta um Fator de Ocupação igual a um (F_o=1). São poucas as exceções como os prédios: Central do Centro de Tecnologia e Geociências (F_o=0,5), Restaurante Universitário e Núcleo de Tecnologia da Informação (F_o=0);

9. O Fator de Sombras apresenta-se como o mais vulnerável à influência do crescimento urbano e da vegetação. Sombreamentos, por proximidade de edificações de diferentes alturas são muito comuns, acarretando que grandes áreas a princípio aptas à SFCR não sejam adequadas a essa finalidade. Por exemplo, a ala Galpões do Centro de Tecnologia e as vizinhanças do Hospital das Clínicas;

4.6 Resultados: SIG-UFPE/SFCR

Como já mencionado, o SIG utilizado tem como base o mapa georreferenciado da UFPE como informação espacial e a planilha eletrônica, com as informações de entrada.

As informações inter-relacionadas agrupadas e expressas de uma forma mais acessível permitem determinar ações mais eficientes na implementação de políticas e programas de geração de energia solar em edificações.

A Tab-SIG/UFPE/SFCR foi elaborada com capacidade para um número muito grande de tipos de variáveis, como: natureza e tipo de uso da edificação, tipo de material do telhado, número de águas, inclinação e área do telhado, coordenadas de posição de pontos no telhado, fatores de ocupação, posição, sombras e Nível de Luz do Sol, área útil e capacidade nominal do sistema compatível, potencial de geração de energia e custo do sistema, entre outras.

No caso especifico, as edificações têm varias características iguais. Por exemplo, todas têm a mesma natureza (acadêmicas e públicas); com poucas exceções, todas têm coberturas de concreto e /ou telhas de cimento e inclinações semelhantes, (0 a 20^0).

Mediante determinados questionamentos, baseado em uma ou mais variável, que se traduzem em equações, a Tab-SIG/UFPE/S é consultada, e a resposta é mostrada graficamente a partir da informação vetorial selecionada.

Para exemplificar a operacionalidade e versatilidade do SIG-UFPE/SFCR, mostra-se a seguir alguns resultados-exemplo expressos em função do Nível de Luz de Céu (NLC).

Outros questionamentos podem ser formulados, em função das variáveis colocadas na Tab-SIG/UFPE/SFCR, e os resultados espacialmente descritos serão apresentados.

1. Entre os telhados analisados quais não estão disponíveis a aplicação SFCR?

   O SIG-UFPE/SFCR consulta a Tab-SIG/UFPE/SFCR seleciona todas as possibilidades que satisfazem o questionamento (telhados com Fd=0 e NLC =0) e apresenta espacialmente os resultados, como mostrado na Figura 31.

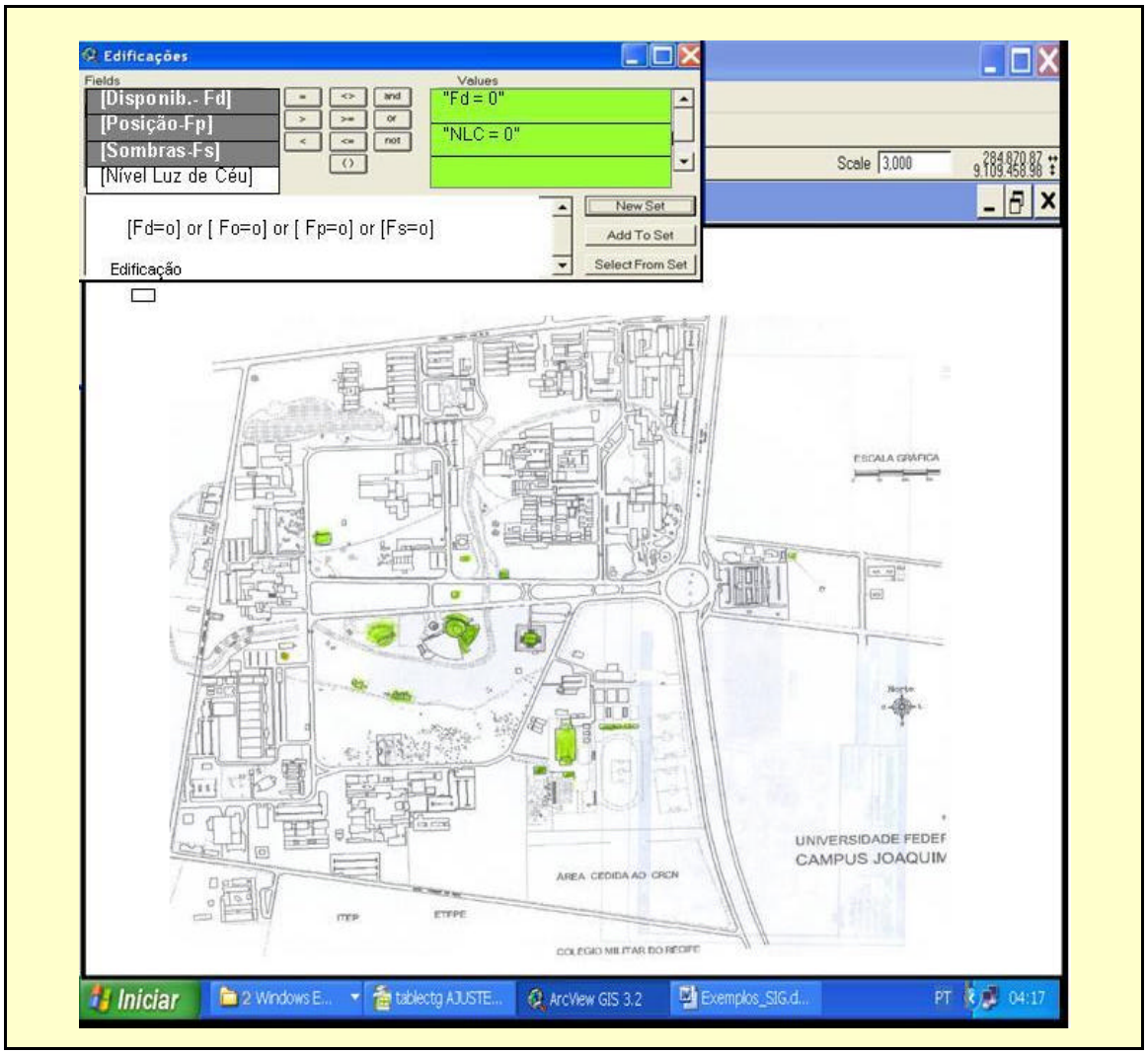


Figura 31-Campus UFPE: Mapa demonstrativo das edificações com telhados não aplicáveis à instalação de SFCR no Campus da UFPE

2. Quais os melhores telhados em função do índice Nível de Luz do Céu?

   A Tab-SIG/UFPE/SFCR é consultada e o SIG-UFPE/SFCR classifica para cada faixa de valores da variável os telhados correspondentes. Por sinalização diferenciada coloca essas informações graficamente, apresentando os telhados mostrados no mapa da Figura 32.

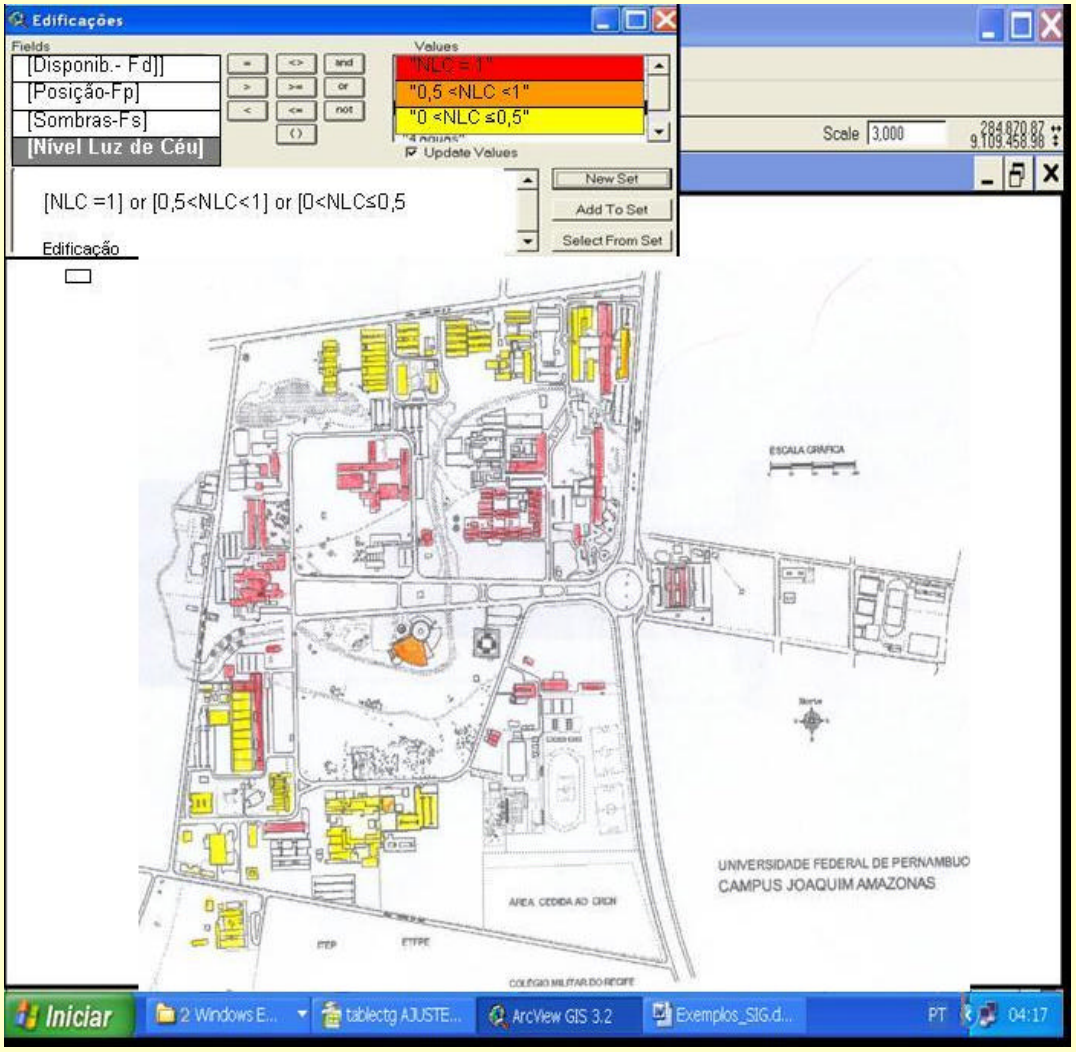


Figura 32-Campus UFPE: Mapa de classificação das edificações pelo Nível de Luz do Céu de seus telhados

CAPÍTULO 5
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estabelecimento de políticas que possam fomentar o desenvolvimento da geração elétrica não centralizada em meios urbanos, mediante sistemas fotovoltaicos conectados à rede depende fortemente da avaliação do seu potencial efetivo e de seus factíveis limites econômicos.

Com esse enfoque, a metodologia foi desenvolvida e apresenta-se como um mecanismo disponível para estimativas do potencial de sistemas solares em telhados e áreas similares, apta a ser utilizada em programas de planejamento elétrico com energias renováveis, como o da aplicação da tecnologia de sistemas fotovoltaicos conectados à rede em centros urbanos.

Caracteriza-se por sua versatilidade, agilidade, abrangência e envolver um número pequeno de tipos de informação. A precisão dos resultados depende fortemente do nível qualitativo e quantitativo das informações sobre o local e suas edificações.

Sua utilização não é restrita ao exemplo analisado (Campus UFPE), podendo ser utilizada para outros espaços, desde que alguns parâmetros e condições sejam ajustados ou redefinidos em função da disponibilidade de dados sobre a localidade.

Especificadamente, o procedimento de avaliação da área útil do telhado pode ser utilizado para outros objetivos, por exemplo, como estimativa do potencial de captação de água de chuva e do potencial de aquecimento de água por coletores solares.

A utilização de dados operacionais de um sistema teste, (SFCR-UFPE III), como suporte ao ambiente técnico, proporcionou resultados mais realistas em contraponto a outros procedimentos que utilizam informações de catálogos.

A versatilidade da ferramenta SIG permite que os resultados possam ser espacialmente apresentados em diversas possibilidades em função do questionamento realizado.

O caso do Campus UFPE, os mapas resultantes mostram as potencialidades dos telhados em termos de área útil disponível, do Nível de Luz do Céu e de produção de energia, classificando os melhores e/ou menos favoráveis telhados para a aplicação de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede.

Como resultado global, cerca de 111 mil m^2 de área de telhados encontram-se disponível para a instalação de SFCR no Campus UFPE. 75% dessa área, 83,6 mil m^2, apresenta Nível de Luz do Céu muito bom, indicativo da possibilidade de produção de 156 kWh/m^2 de energia. Ou seja, da possibilidade de instalação em torno de 11 MWp de fotovoltaicos e produção estimada de 13 GWh/ano de energia elétrica disponível para ser injetada na rede da concessionária.

Dentro desse contexto, como sugestão propõe-se um projeto de inserção de alguns telhados solares no Campus da UFPE em edificações que apresentem valores de Nível de Luz de Céu (NLC) classificados como Muito Bom.

Os resultados obtidos acusam diversos telhados com excelentes condições além das relacionadas com o potencial solar e o desenvolvimento da massa urbana (NLC=1). Como por exemplo, as coberturas do Auditório Newton Maia, Laboratório de Dispositivos e Nano-estruturas (LDN) e Prédio CTG-Graduação, todos no setor Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE. Sistemas com capacidades de até 60 KWp, 40kWp e de até 300 kWp, respectivamente, poderiam ser instalados, como sistemas únicos ou modulares de 10 kWp e produção de 1,56 MWh/ano.

As possibilidades de pesquisa, desenvolvimento de produtos, intercâmbio de pesquisadores, convênios com empresas, envolvendo as mais diversas áreas de

conhecimento seriam enormes. Grupos de pesquisa e alunos do CTG, nas áreas de eletrônica, elétrica, civil, mecânica e também de outros ramos, como arquitetura e economia, por exemplo, poderiam contar com o sistema como um verdadeiro laboratório, e a UFPE despontar como inovadora no uso da tecnologia de telhados solares.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU. V. B.,(2008). **Análise da viabilidade econômico-financeira da energia eólica diante do novo contexto do setor elétrico**. Dissertação de Mestrado em Economia. Orientadores Prof. André Matos Magalhães e Marcos Roberto Góis de Oliveira. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

ANON., (1995). **Guidelines for the assessment of photovoltaic plants document: analysis and preentation of monitoring data**. Report EUR 16339 EN, Joint Reseaarch Centre, Ispra Establishment, Commissing of the European Countries, 1995.

ANON., (1998). **Photovoltaics in buidings: testing, commissionig and monitoring guide**. ETSU Report N^{O} S/P2/00290/REP, 1998.

APPROVED BASELINE METHODOLOGY–**AM0026 (**http://cdm.unfcc.in 18/04/2007).

BANDEIRA, F. de P. M., (2003). **Avaliação do preço da energia elétrica para o consumo direto brasileiro.** Nota Técnica. Consultoria Legislativa-Câmara dos Deputados, Brasília, DF 2003.

BARBOSA, E. M de S., SILVA, D.O., MELO, R. de O., (2007). **Sistema fotovoltaico conectado à rede com baterias- Sistema UFPE-BRASIL.** Avances em Energías Renovables y Meio Ambiente, vol.II. ISSN 0329-5184, Novembro.

BARBOSA, E. M. de S., MELO, R. DE O., TIBA, C., (2006). **The First grid-connected photovoltaic system in Federal University of Pernambuco-Brazil**. World Renewable Energy Congress – WREC-2006, n^{o} PV95, CD-ROM. Florença Itália, Agosto, 2007.

BARBOSA, E. M. de S., VILAÇA, E., MELO, J. DE C., TIBA, C., LIMA, F. DE A., (2008). **Grid-connected system of Lampião Restaurant – NE/Brazil**. X WREC - World Renewable Energy. CD-ROM. Glasgow, Scotland-UK, Julho, 2008.

BARBOSA, E. M. de S., LOPES, L. G. C., C. TIBA. (2004). **Sistemas fotovoltaicos interligados à rede no Arquipélago Fernando de Noronha.** XII Congresso Ibérico e VII Iberoamericano de Energia Solar –CIES. Vol. II, pp 995-1000. Vigo, Espanha, Setembro, 2004.

BEN 2007: **Balanço Energético Nacional 2007**. Ministério de Minas e Energia do Brasil. Governo Federal. Brasil 2008. [http://www.mme.gov.br]

BEZERRA. P., (2008). **Energias alternativas, limpas e renováveis.** Anais da V Semana do Meio Ambiente. CR-ROM. Fundação Joaquim Nabuco, Recife/PE, Junho, 2008.

CHAPMAN, L., THORNES, J., BRADLEY, A. V., (2002). **Sky-view factor approximation using GPS receivers**. Jornal Internacional da Climatologia, Vol. 22, edição 5, pp.615-621. 2002IJCli. 22.615C

CHIRANI, R.A., ZAREI, A, (2006). **Assessment of first project photovoltaic in Iran grid connected type.** Word Renewable Energy Congress – WREC-2006, n^{o} PV112, Florença Itália, Agosto, 2006.

DÁVILA, L., CASTRO, M., AMADOR, J., PUERTA, D., COLMENAR, A., (2004). **Sistema de medidas para el modelado y monitorizado de generadores fotovoltaicos conectados a red**. XII Congresso Ibérico e VII Iberoamericano de Energia Solar –CIES. Vol II, pp 10491054. Vigo, Espanha, Setembro, 2004.

DIFUSIÓN IDAE., (2002). **Pliego de condiciones técnicas de instalaciones conectadas a red**. Depósito Legal: M-47488-2002, Madrid, Outubro, 2002.

DUNLOP, J. P., FARHI, B. N., POST, H. N., SZARO, J. S., VENTRE, G. G., (2001). **Reducing the costs of grid-connected photovoltaic systems.** Proceedings of Solar Forum 2001Solar Energy: The Power to Choose. Washington, DC, April, 2001.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **International Energy Outlook. IEO-2005/ EIA-2005**. [htpp://www.eia.doe.gov].

FLORÊNCIO. M. R., (2008). Inventario de bens e imóveis da UFPE. **IBI-UFPE/2007**.

FRAIDENRAICH, N., LYRA, F.M. (1995). **Energia Solar-Fundamentos e Tecnologias de Conversão Heliotermoelétrica e Fotovoltaica.** Editora Universitária UFPE, Recife-PE, 1995. INSB 85-7315-024-6.

FRAIDENRAICH, N., TIBA, C., VILELA, O.C. e. BARBOSA, E. M. de S., (2003). **Energia Solar Fotovoltaica. Capítulo 2- Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Organizador TOLMASQUIM, M. T. Editora Interciência -RJ, 2003. ISBN 85-7193-095-3.

FSEC-GP-70-01 (2002). **Grid-connected photovoltaic system design review and approval- operation and procedures**. Procedure #7003, version 4.

GRIMMOND, C.S.B., POTTER, S.K., ZUTTER, H.N., SOUCH, C., (2001). **Rapid methods to estimate sky-view factors applied to urban areas**. International Journal of Climatology. Vol. 21, Issue 7, pp 903-913. Copyright © 2001 Royal Meteorological Society, 2001.

IEA PVPS TASK 2., (2002). **Performance, Reliability and Analysis of Photovoltaic Systems.** http://www.iea-pvps-task2.org/public/index.htm em 16 03 2006 e 11 08 2007.

IZQUIERDO, S., RODRIGUES, M., FUEYO, N., (2008). **A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations**. Solar Energy vol. 82 (10), pp 929-939. ISSN 0038-092X

JAHN, U., MAYER, D., HEIDENREICH, M., DAHL, R., CASTELLO, S., CLAVADETSCHER, L., FROLICH, A., GRIMMING, B., NASSE, W., SAKUTA, K., SUGIURA, T., BORG, VAN DER N., OTTERDIJK, VAN K., (2000). **International Energy Agency PVPS TASK 2. 2002: Analysis of the operation performance of the IEA data base PV systems**. 16th European Photovoltaic Solar Energy and Exhibition, Glasgow, United Kingdom, Maio, 2000.

JAHN, U., NASSE, W., CLAVADETSCHER, L., MAYER, D., (2004). **Achievements of TASK 2 of IEA PPSP: final results on PV system performance**. 19th European Photovoltaic Solar Energy and Exhibition, Paris, França, 2004.

KREITH, F., KREIDER, J.F., (1978). **Principles of Solar Engineering**. New York – USA, McGraw-Hill.

LEE, R. F., SIMM, I., JENKYN-JONES, B., (2001). **Could carbon financing appreciably accelerate the diffusion of Solar Home Systems? Prototype Carbon.** Fund/ UNDP/World Bank Energy Sector Management Assistance Program, Washington, DC, June, 2001.

LORENZO, E., (1994). **Eletricidad Solar. Ingenieria de los Sistemas Fotovoltaicos.** Artes Gráficas Gala, S.L. 1ª. Edição. 1994. ISBN: 84-86505-45-3.

MACÊDO, W.N., (2006). **Análise do fator de dimensionamento do inversor aplicado a sistemas fotovoltaicos conectados à rede**. Tese de Doutorado. Orientador Prof. Dr.Zilles, R. Instituto de Eletrotecnica e Energia, Universidade de São Paulo, 2006.

MACEDO, W.N. E ZILLES. R., (2006). **Contribuição energética de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica de baixa tensão**. I CBENS- I Congresso Brasileiro de Energia Solar. CR-ROM. Fortaleza, Brasil, Abril, 2006.

MANUAL DEL ARQUITETO – ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA.-Junta de Castilla Y Leon. ISBN: 84-9718-258-8.

MANUAL DE CAPACITAÇÃO EM PROJETOS DE SISTEMAS DE AQUECIMENTO SOLAR- ABRAVA. 2008.

MAYCOCK, P.D., (2005). **Photovoltaics market update.Global PV production continued to increase**. Renewable Energy World**.** 8, 86-99, Review Issue 2005-2006, July-August, 2005.

MAYCOCK, P.D., (2004). **Photovoltaic market update. Global PV production continued to grow phenomenally in 2003- but grow is still linked to the markets of Japan, Germany and California.** Renewable Energy World. Vol. 7, 86-101, Review Issue 2004-2005, July-August, 2004.

MAYCOCK, P.D. **The World PV market – Production increases 36**%. Renewable Energy World. vol. 5, 147-1161, Review Issue 2002-2003, July-August, 2002.

MAYCOCK, P.D., (2001). **The PV boom- Where Germany and Japan lead, will California follow?** Renewable Energy World. Vol. 4, 145-165, Review Issue 2001-2002, July-August, 2001.

MIGUEL, A. DE., BILBAO, J., CAZORRO, J.R.S., MARTIN, C., (2000). **Performance analysis of a grid-connected system in a rural site in the northwest of Spain.** VII World Renewable Energy Congress. Germany. CD-ROM verson. 2000.

MINTS, P. **Germany-model success?** (2007).The International Renewable Energy Magazine-Refocus May-June 2007.

MINTS, P., (2008) **Is Booming Growth Sustainable? The Global Photovoltaic Industry**. Renewable Energy World Magazine August, 2008.

MONDOL, J. D., YOHANIS, Y., SMYTH, NORTON, B., (2006). **Long term performance analysis of grid connrcted photovoltaic system in Northern Ireland.** Energy Conversion & Management, 47, 2925-2947, 2006.

NORDMANN, T., CLAVADETSCHER, L., JAHN, U., (2007). **PV system performance and cost analysis, A report by IEA PVPS TASK 2.** 22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Milan, Italy, 3-7 September, 2007

PEREIRA SOLIANO, O.L., FIGUEIREDO, M das G., MACHADO, T. M., PIMENTA, M., CARVALHO, K. M. **Projeto Eletrificação com Sistema Fotovoltaicos da COELBA - Determinação da Linha de Base e Cálculo da Redução de Emissões de Gases do Efeito Estufa.** Relatório Final FNMA - II/Programa de Geração de Conhecimentos em Mudanças Climáticas e Desertificação.

RAMIRO, A., HERNÁNDEZ, F. J., GONZÁLES, J. F., SABIO, E., GONZÁLES-GARCIA, C. M., GAÑÁN, J. e ROMÁN, S., (2004). **Instalación fotovoltaica de 96,6 kW conectada a red en la Escuela de Ingenierías Industriales de Badajoz**. XII Congresso Ibérico y VII Congresso Iberoamericano de Energia Solar. Vol. II, pp 1007-1012. Vigo, Espanha, 14-18 Setembro, 2004.

RAULSTON, J. C. (2001). **Largest photovoltaic systems in some countries.** em http://www.pvresources.com em 09 de Junho 2007.

RENEWABLES GLOBAL STATUS REPORT-REN21, (2007). **Renewable Energy Policy Network for 21st Century.** [http://www.ren21.net/pdf/RE2007]

RETSCREEN International. **Clean Energy Project Analysis**. Natural Resources Canada, 3a Edition. [htpp://www.restcren.net]

RIVER, B., (2001). **Grid-tied markets for photovoltaic-a new source emerges**. Renewable Energy World, 4, 177-189, Review Issue 2001-2002, July-August, 2001.

RUTHER, R., DACOREGIO, M. M., (2000). **Performance Assessment of a 2 kWp Grid - Connected, Building - Integrated, Amorphous Silicon Photovoltaic Installation in Brazil.** Progress In Photovoltaics. vol.7, n.2, p.257 – 266. Inglaterra, 2000.

RUTHER, R., SALAMONI, I., MONTENEGRO, A., BRAUN, P., DEVIENNE, F. R., (2008). **Programa de telhados solares fotovoltaicos conectados à rede elétrica pública no Brasil**. XII-ENTAC- Encontro Nacional de Tecnologias do Ambiente Construído. Novembro, 2008.

RUTHER, R., SALAMONI, I., JARDIM, C. da S., Knob, P., (2007). **O potencial da geração FV integrada a edificações e conectada à rede elétrica pública no Brasil**, I CBENS – I Congresso Brasileiro de Energia Solar, Fortaleza, CE, Abril 2007.

SOUZA, L.C.L de, Rodrigues, D. S., Mendes, J.G., (2004). **Contribuições para o desenvolvimento sustentável em cidades Portuguesas e Brasileiras**. Coimbra : Livraria Almedina, 2004. ISBN 972-40-2346-X.

STEEMERS, K., (2001). **PV in the city- A design and implementation guide**. Renewable Energy World. vol 4, n.6, p. 106-114. Nov-Dez, 2001.

SIQUEIRA, A. N de., (2004). **Estudo das distribuições de probabilidade da radiação solar diária no Brasil.** Dissertação de Mestrado. Orientador Prof. Dr. Chigueru Tiba, Programa de Pós-graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares Universidade Federal de Pernambuco/ Departamento de Energia Nuclear. Recife, 2004.

SOLARNEWS/Refocus. (2005). **Europe to install 4,500 MW of PV by 2010**. Maio-Junho 2005.

SÚRI, M., HULD, T.A., DUNLOP, E. D., OSSENBRINK, H., (2007). **A. Potential of solar electricity generation in the European Union member states and candidate countries**. **Solar Energy.** 81 (10), 1295-1305. ISSN 0038-092X. 2007.

TIBA, C., BEZERRA, P., (2007). **Modelos de gestão por geotecnologia para sistemas rurais utilizando fontes renováveis de energia**. SIGA-SOL. CHESF/UFPE, 2007.

TIBA, C., FRAIDENRAICH, N., BARBOSA, E. M. de S., (1999). **Instalações de sistemas fotovoltaicos para residências rurais e bombeamento de água.** Versão 2.0 Editora Universitária da UFPE. Recife, 1999. INSB 662.997 621.47

TIBA, C., GROSS, H., FRADENRAICH, N., LYRA, F. M., (2000). **Atlas Solarimétrico do Brasil - Banco de Dados Terrestre**. Editora Universitária da UFPE. Recife, Brasil, 2000.

ZILLES, R., BEZERRA, P., RUTHER, R., (1998). **Sistemas fotovoltaicos conectados à rede de distribuição de eletricidade-EFCR.** Anais do Encontro: Programa para Desenvolvimento das Aplicações Fotovoltaicas no Brasil. Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos Universidade de São Paulo, Agosto, 1998.

Global Benchmark Price Índices. [http://www.solarbuzz.com] em 08/08/08

Endereços eletrônicos:

htpp://www.eia.doe.gov

http://www.inmet.gov.br

http://www.mme.gov.br

http://www.NASAglobal.satellite/analysis.data

http://www.re.focus.net

http://www.ren21.net

http://www.restcreen.net//clean (energy project analysis)

http://www.solarbuzz.com

(www.wikipedia,org/wiki/Electricity_tariff 08/07/2008);

APENDICE A1

DADOS DE ENTRADA PARA O SIG/UFPE/SFCR

Tabela Tab-SIG/UFPE/SFCR

Ilustrações de edificações analisadas.

Tabela A1- Tab-SIG UFPE/SFCR: Composição de dados de entrada para o SIG-UFPE/SFCR -Exemplos de edificações

Identificação No	Nome	Telhado		Área (m^2)			Fatores				Nível Luz Céu	Energia Específica ($kWh/m^2.a$)	Produção Energia (MWh /a)	Capacidade Nominal (kWp)
Total Geral		**Material**	**Tipo**	**Proj**	**Disp**	**Útil**	**Fd**	**Fo**	**Fs**	**Fp**	**NLC**			
61	**Edificações**			**159.941**	**110.884**	**83.567**						**156**	**13.036,45**	**10.864**
Total Setor Verde: 11 Edificações Ilustração A1+A2				**19.093**	**9.100**	**8.010**						**156**	**1.249,54**	**1.041**
1	Reitoria	Concreto + telha	Plano	4.308	3.446	3.446	1	1	1	1	1	156	537.595	448
2	NTI	Concreto	Plano	700	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
3	CECON 1	Especial	Curvo	4.542	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0
4	CECON Teatro	Concreto + telha	Curvo	4.542	3633	2543	1	1	1	0,7	0,7	109	396,75	331
Total Setor Azul: 18 Edificações Ilustração A3+A4				**23.348**	**18.257**	**10.562**						**156**	**1.647,63**	**1.373**
12	CTG-Auditório	Concreto	Plano	576	461	461	1	1	1	1	1	156	71,89	60
13	LDN	Concreto + Telha	2 Águas	373	298	298	1	1	1	1	1	156	46,55	39
14	GSM	Concreto + Telha	Plano	56	45	0	1	1	1	0	0	0	0	0
15	CTG-Central	Concreto + Telha	Plano	1.053	842	842	1	1	1	1	1	156	131,41	55

16	CTG-Graduação	Concreto + Telha	Plano	2.877	2.302	2.302	1	1	1	1	1	156	359,05	299
19	CTG-Galpões-1	Concreto + Telha	2 Águas	991	793	397	1	1	1	0,5	0,5	78	61,85	52
Total Setor Salmão 5 Edificações Ilustração A5				**14.743**	**11.794**	**7.318**						**156**	**1.141,61**	**951**
29	Ciclo Geral Área II	Concreto + Telha	Plano	3.552	2.842	2.842	1	1	1	1	1	156	443,29	369
33	Administração	Concreto + Telha	Plano	521	417	208	1	1	1	1	1	156	32,51	27
Total Setor Lilás 6 Edificações Ilustração A6				**7.535**	**2.329**	**2.329**						**156**	**363, 24**	**303**
34	Centro Filariose Linfática	Concreto + Telha	Plano	227	182	182	1	1	1	1	1	156	28,33	24
35	Núcleo de Apoio ao Idoso	Concreto + Telha	Plano	473	378	378	1	1	1	1	1	156	58,99	49
37	Núcleo Empreendimentos	Concreto + Telha	Plano	1.564	1.251	1.251	1	1	1	1	1	156	195,14	163
38	Casa do Estudante	Concreto + Telha	Plano	648	519	519	1	1	1	1	1	156	80,93	67
Total Setor Amarelo 10 Edificações Ilustração A7				**49.961**	**38.823**	**35.582**						**156**	**5.550,79**	**4.626**
41	C.Ciência da Saúde	Concreto + Telha	Plano	7.163	5.730	5.730	1	1	1	1	1	156	893,88	596
44	Biblioteca	Concreto + Telha	Plano	1.879	1.503	1.503	1	1	1	1	1	156	234,50	195
45	Hospital das Clínicas	Concreto + Telha	Plano	19.821	15.857	15.857	1	1	1	1	1	156	2.473,66	2.061
46	Clínica Dermatologia	Concreto + Telha	Plano	600	480	240	1	1	1	0,5	0,5	78	37,44	31

Total Setor Rosa 7 Edificações Ilustração A8				**25.403**	**19.797**	**13.322**						**156**	**2.078,23**	**1.732**
54	Núcleo de Hotelaria e Turismo	Concreto + Telha	Plano	1.442	1.154	577	1	1	1	0,5	0,5	78	90,00	75
55	D. Antibiótico	Concreto + Telha	Plano	1.313	1.050	525	0,5	1	1	0,5	0,5	78	81,93	34
56	C. Ciências Sociais e Aplicadas	Concreto + Telha	Plano	8.559	6.847	6.847	1	1	1	1	1	156	1.068,13	890
Total Setor Laranja 4 Edificações Ilustração A9				**19.858**	**10.783**	**6.446**						**156**	**1.005,58**	**838**
58	C. de Educação	Concreto + Telha	Plano	4.464	3.571	1.785	1	1	1	0,5	0,5	78	278,55	232
59	C. Filosofia e Ciências Humanas	Concreto + Telha	Plano	2.635	2.108	2.108	1	1	1	1	1	156	328,89	274

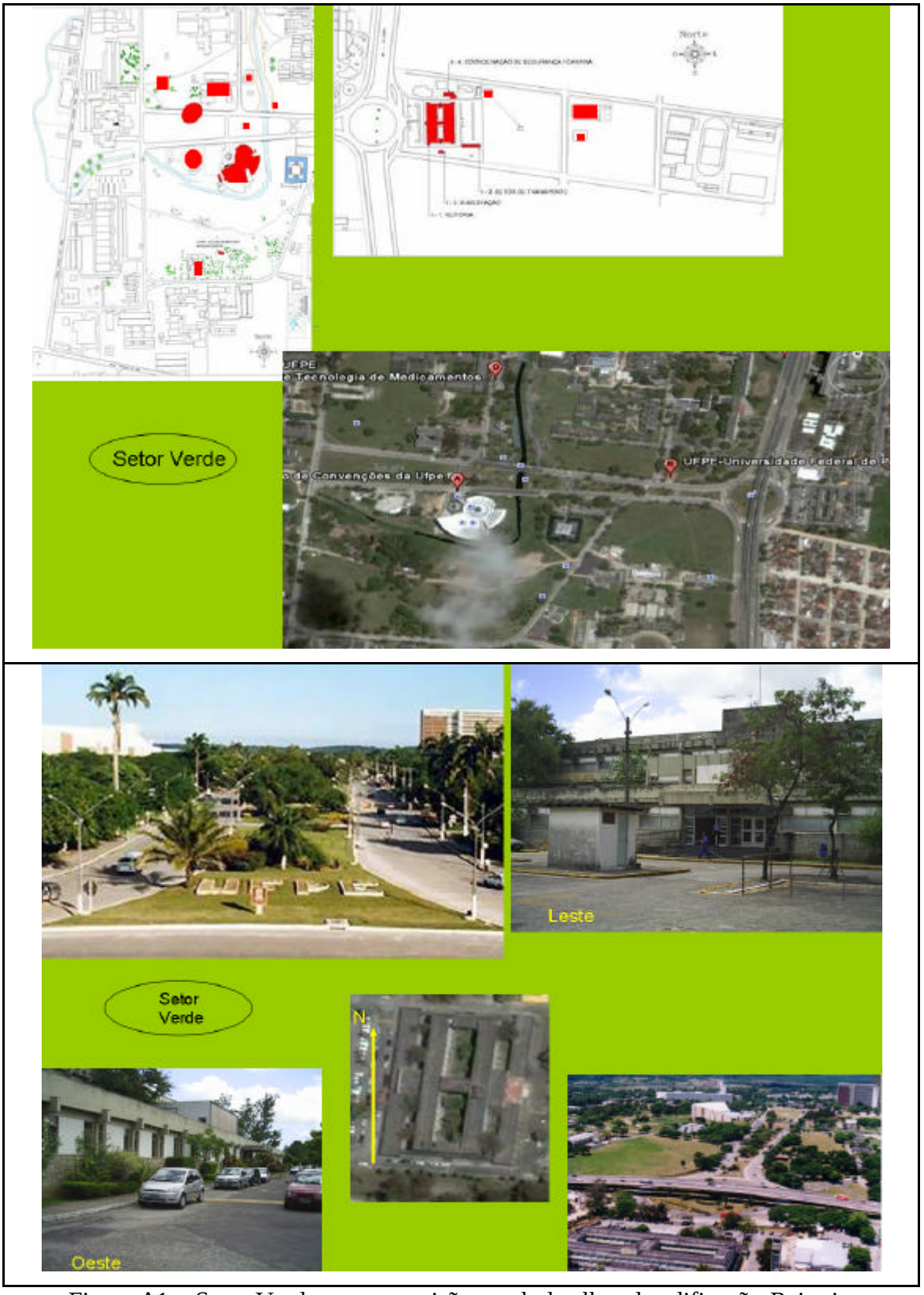


Figura A1 – Setor Verde: mapas e visão geral, detalhes da edificação Reitoria.

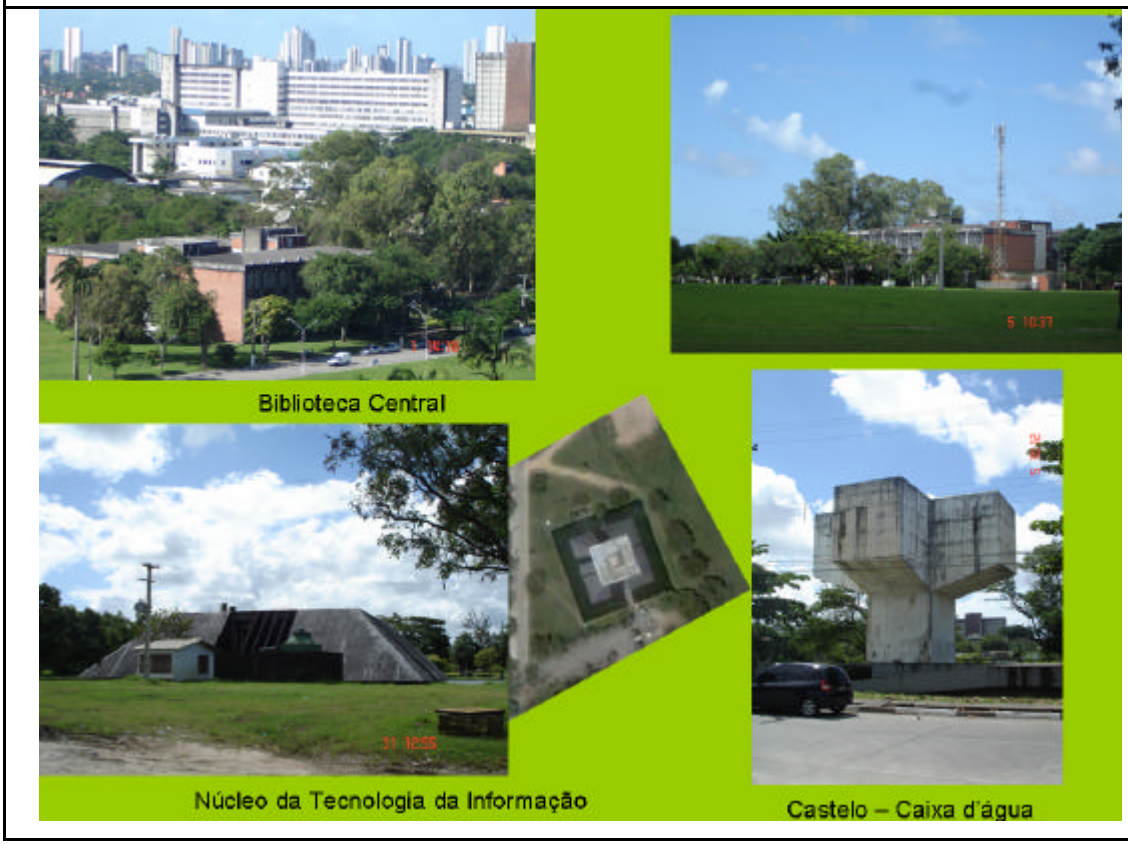


Figura A2 – Continuação Setor Verde: detalhes das edificações

Figura A3 – Setor Azul: mapas e visão geral de edificações

Figura A4 – Setor Azul: detalhes das edificações

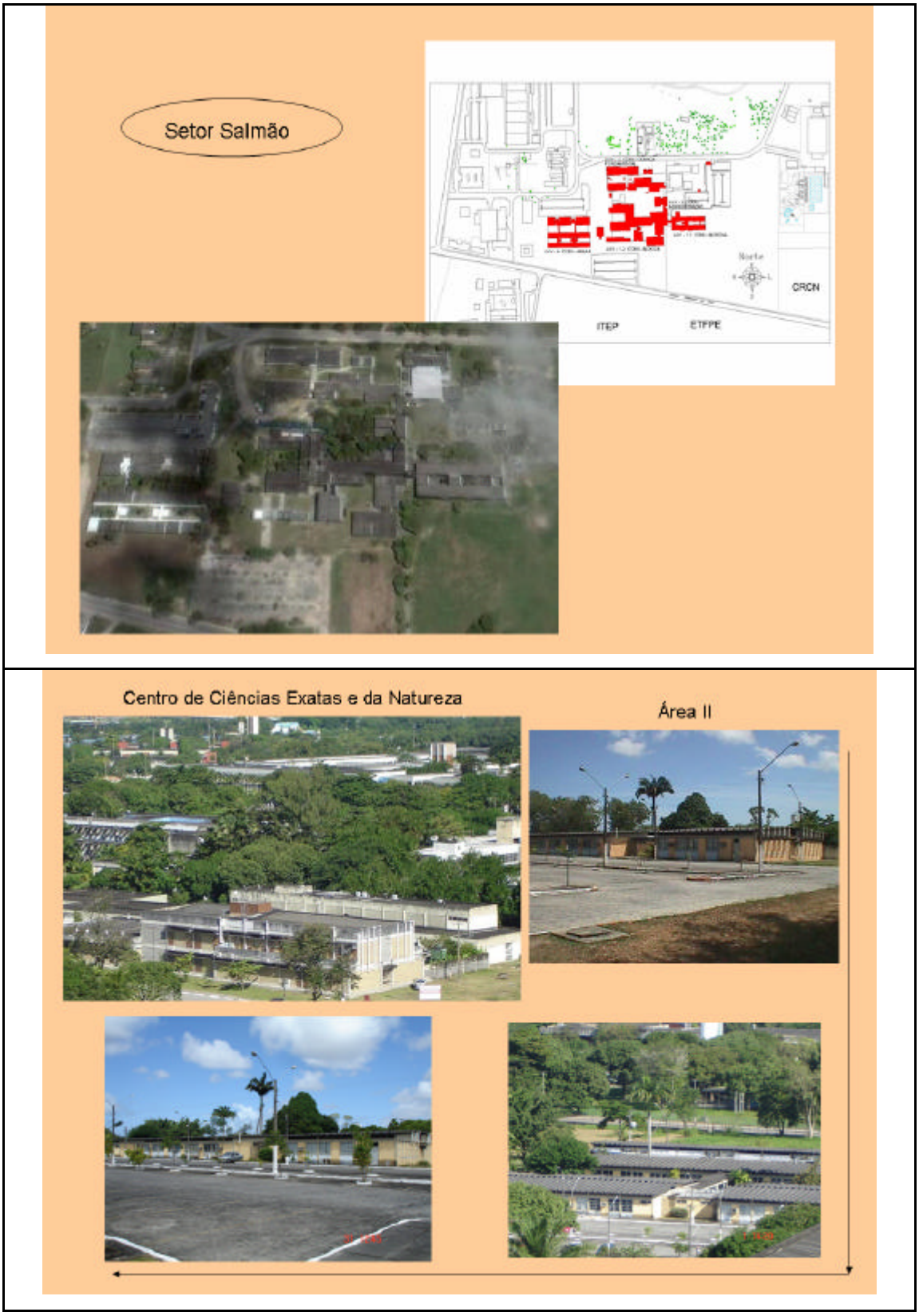


Figura A5– Setor Salmão: mapas e visão geral

Figura A6 – Setor Lilás: mapas e visão geral, detalhes das edificações.

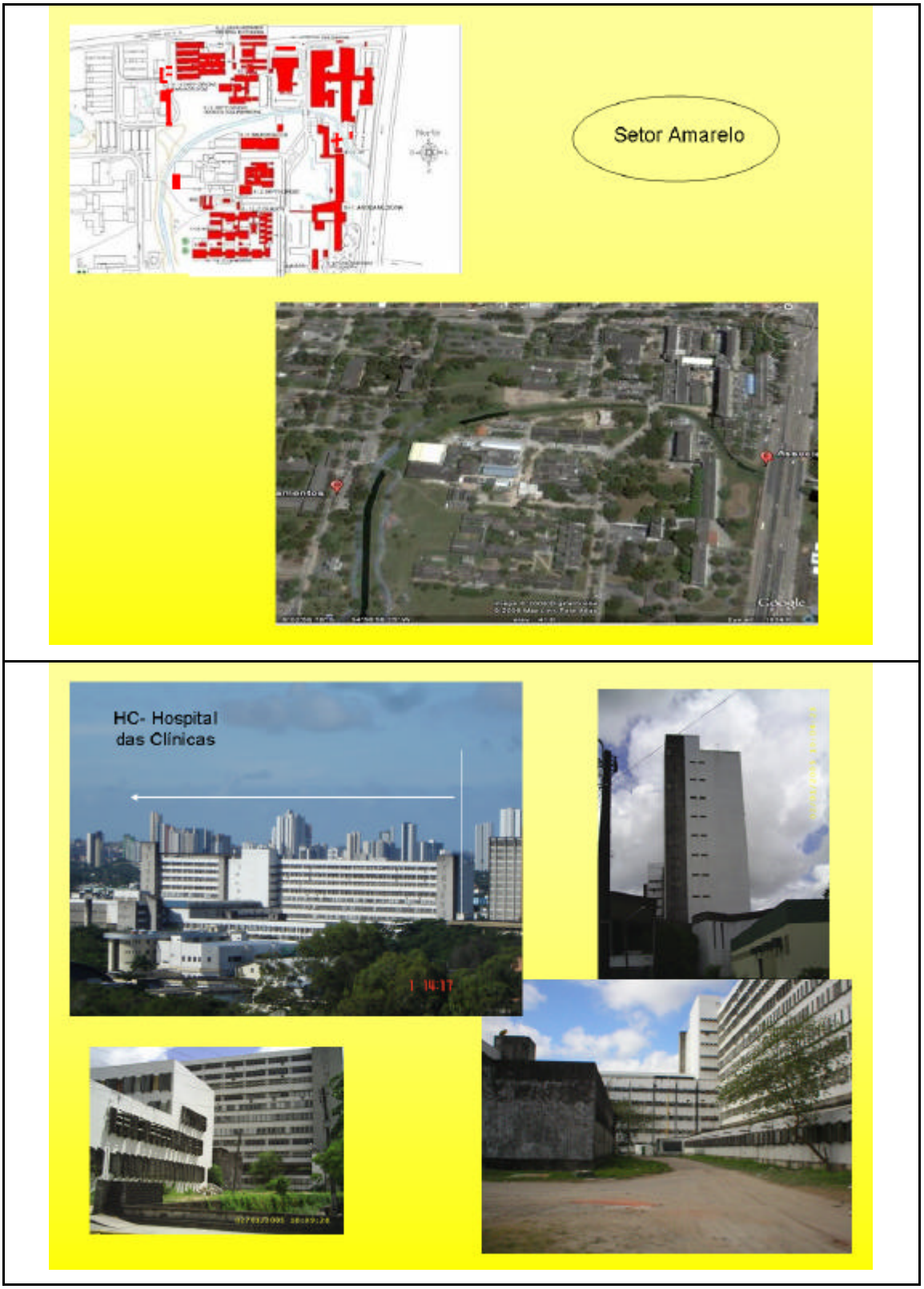


Figura A7– Setor Amarelo: mapas e visão geral, detalhes da edificação Hospital das Clínicas.

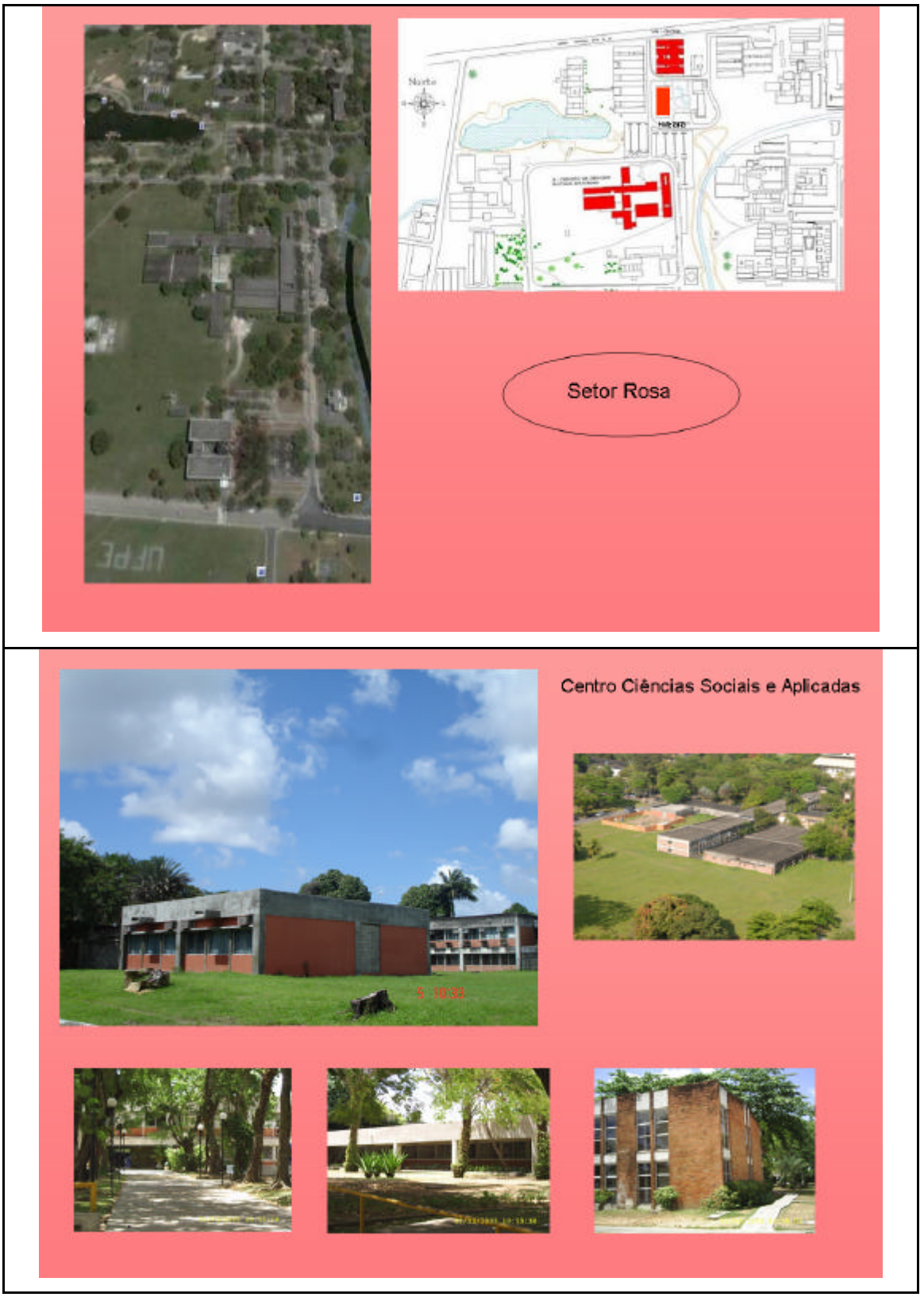


Figura A8- Setor Rosa: mapas, visão geral e detalhes do Centro de Ciências Aplicadas.

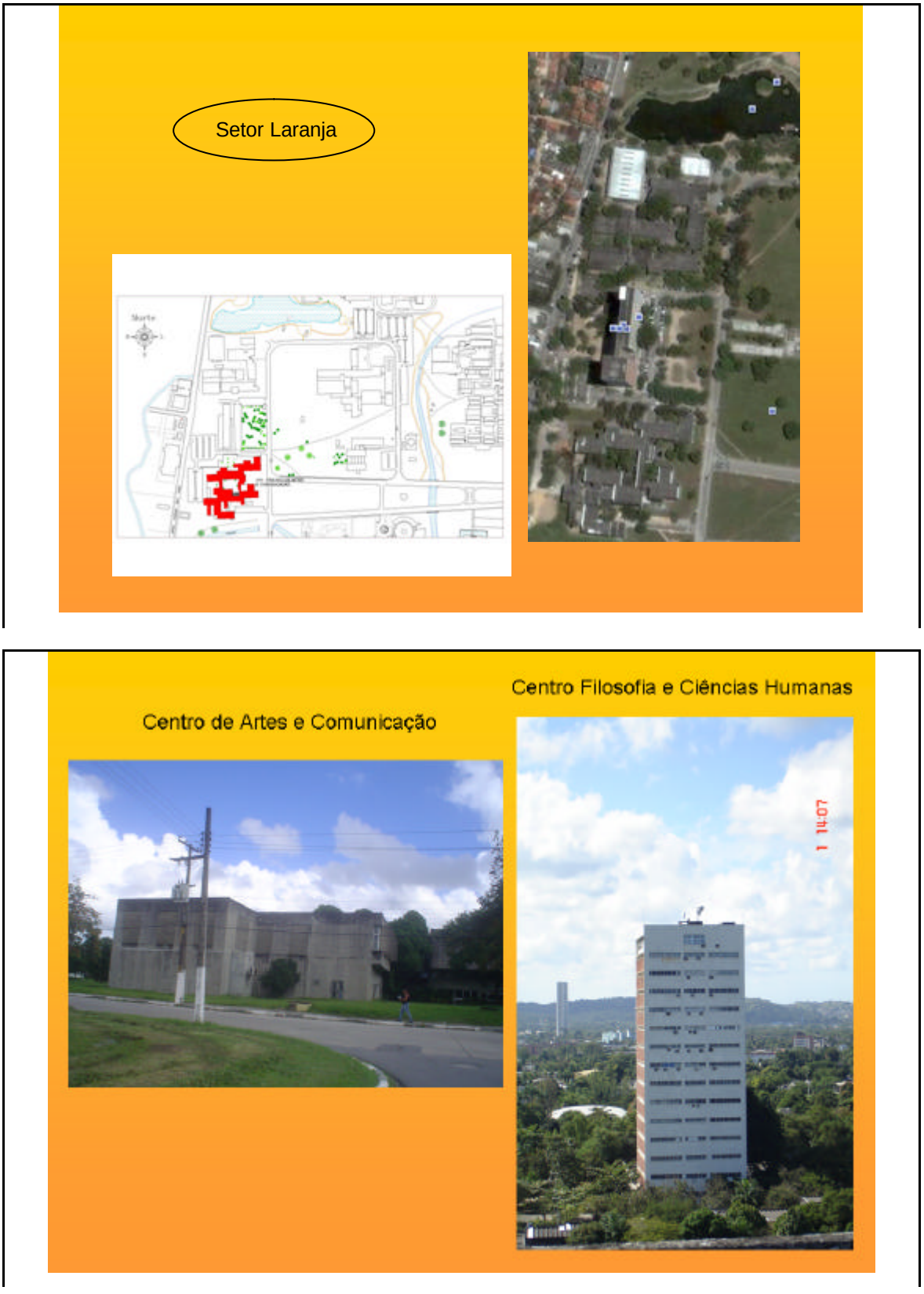


Figura A9 –Setor Laranja: mapas e visão geral, detalhes do Centro de Filosofia e Ciências Humanas e do Centro de Artes e Comunicação