



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**  
**MINTER**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE  
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA COBERTURA  
DAS EDIFICAÇÕES DO CAMPUS I - CEFET- MG,  
INTERLIGADO À REDE ELÉTRICA**

**Autora:** Fátima Oliveira Takenaka

**Orientador:** Ricardo Rüther, Ph.D

**Florianópolis, Julho de 2010.**





**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**  
**MINTER**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE  
ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NA COBERTURA  
DAS EDIFICAÇÕES DO CAMPUS I - CEFET- MG,  
INTERLIGADO À REDE ELÉTRICA**

**Autora:** Fátima Oliveira Takenaka

**Orientador:** Ricardo Rüther, Ph.D

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina, como parte dos requisitos de obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

**Florianópolis, Julho de 2010.**



**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA  
SOLAR FOTOVOLTAICA NA COBERTURA DAS  
EDIFICAÇÕES DO CAMPUS I - CEFET- MG, INTERLIGADO À  
REDE ELÉTRICA.**

Fátima Oliveira Takenaka

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de  
**Mestre em Engenharia Civil**  
pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

Prof. Ricardo Rüther, Ph.D  
Orientador

Prof. Humberto Ramos Roman, Dr.  
Coordenador do Minter UFSC/CEFET-MG

Prof<sup>ª</sup>. Janaíde Cavalcante Rocha, Dra.  
Coordenadora PPGEC-UFSC

**Banca Examinadora:**

Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Antônia Sônia Cardoso Diniz, Ph.D (PUCMINAS)

Prof. Dr. Roberto Lamberts, Ph.D (PPGEC – UFSC)

Prof. Dr. Fernando Ruttkay Pereira Ph.D (PosARQ – UFSC)

Florianópolis, Julho de 2010.



*“Eis que amontoei e acumulei mais sabedoria que todos os que me precederam em Jerusalém. Porque meu espírito estudou muito a sabedoria e a ciência, e apliquei o meu espírito ao discernimento da sabedoria, da loucura e da tolice. Mas cheguei à conclusão de que isso é também vento que passa. Porque no acúmulo da sabedoria, acumula-se tristeza, e quem aumenta a ciência, aumenta a dor.”*

*Eclesiastes 1:16 -18.*



## OFERECIMENTO

A Lourdes, minha mãe, a  
quem eu devo TUDO,

Minhas filhas, Camila e Iza-  
bela, MEUS AMORES,

A Paty e Paul, meus irmãos,

A Margô, minha tia,

Ao Eduardo, que faz com  
que os meus dias sejam  
mais FELIZES.



## AGRADECIMENTOS

A Deus,  
Em especial ao CEFET-MG e ao CPEI-MG,  
Aos meus estimados colegas do mestrado,  
Ao Prof. Ricardo Rüther pela orienta  o,  
A Isabel Salamoni pela dedica  o e paciência,  
A querida Cristina César Guimarães pelo apoio e amizade,  
Aos membros da banca pela especial participa  o e contribui  o,  
A **todos aqueles** que de uma forma ou de outra estiveram ao  
meu lado e colaboraram para eu levar a termo esse projeto.



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA.....	5
1.2. JUSTIFICATIVA.....	7
1.3. OBJETIVOS.....	8
1.3.1. Objetivo Geral .....	8
1.3.2. Objetivos Específicos .....	8
1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO.....	9
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	11
2.1. INTRODUÇÃO.....	11
2.2. CONTEXTO HISTÓRICO-AMBIENTAL DO CENÁRIO ENERGÉTICO .....	11
2.2.1. Cenário Energético Mundial .....	12
2.2.2. Cenário Energético Brasileiro .....	14
2.3. REGULAMENTAÇÃO DO SETOR ENERGÉTICO ....	17
2.3.1. Estrutura Tarifária no Brasil .....	17
2.3.2. Componentes Tarifários da Demanda de Potência .....	18
2.3.3. A Composição de Valores Calculados na Tarifação .....	19
2.3.3.1. A tarifa convencional .....	20

2.3.3.2. A tarifa horo-sazonal.....	20
2.4. IMPACTOS AMBIENTAIS.....	21
2.5. A GERAÇÃO FV NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	22
2.5.1. Aplicações FV no Mundo.....	23
2.5.2. Aplicações FV no Brasil.....	25
2.6. TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS .....	26
2.6.1. Silício monocristalino (c-Si) e Silício policristalino (p-Si).....	28
2.6.2. Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si).....	28
2.7. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS.....	29
2.8. VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A GERAÇÃO FV	34
2.9. BENEFÍCIOS DOS SISTEMAS FV .....	36
2.9.1. Benefícios para o Setor Elétrico .....	36
2.9.2. Benefícios para o Setor Ambiental.....	36
2.9.3. Benefícios para o Setor Socioeconômico .....	37
2.9.4. Benefícios para o Setor Arquitetônico.....	37
2.10. O PAPEL DAS INSTITUIÇÕES DE ENSINO SUPERIOR (IES) RUMO AO DESENVOLVIMENTO.....	38
2.10.1. Educação para o Desenvolvimento Sustentável	38
2.10.2. Exemplos de IES Atuando na Sustentabilidade.	39
2.10.3. Usos Finais de uma Instituição de Ensino .....	40

<b>3. METODOLOGIA</b> .....	43
3.1. INTRODUÇÃO.....	43
3.1.1. Fluxograma .....	43
3.2. OBJETO DE ESTUDO DA PESQUISA - Campus I, CEFET-MG.....	45
3.3. LEVANTAMENTO DOS DADOS .....	50
3.3.1. Consumo de Energia das Edificações .....	50
3.3.2. Áreas de Cobertura das Edificações .....	52
3.3.3. Irradiação Solar de Belo Horizonte .....	54
3.4. DISPOSIÇÃO DOS MÓDULOS FV.....	56
3.4.1. Orientação e Inclinação dos Módulos FV .....	56
3.5. SIMULAÇÕES DO POTENCIAL DE GERAÇÃO FV ..	57
3.6. AVALIAÇÃO ECONÔMICA.....	61
<b>4. RESULTADOS</b> .....	63
4.1. INTRODUÇÃO.....	63
4.2. PRIMEIRO CASO: SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FV PARA SUPRIR 100% DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA, UTILIZANDO-SE TRÊS TECNOLOGIAS .....	64
4.2.1. Análise do Consumo de Energia Elétrica das Edificações.....	64
4.2.2. Cálculo das Áreas de Cobertura das Edificações	66

4.2.3. Análise dos Dados da Memória de Massa do Medidor .....	67
4.2.4. Traçado das Curvas de Irradiação Solar para a Cidade de BH.....	70
4.2.5. Cálculo da Potência FV .....	72
4.2.6. Traçado das Curvas de Potência FV .....	74
4.2.7. Sobreposição das Curvas de Potência FV e Demanda.....	77
4.3. SEGUNDO CASO: SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FV UTILIZANDO 100% DAS ÁREAS DE COBERTURA DAS EDIFICAÇÕES .....	80
4.3.1. Análise Histórica do Consumo de Energia Elétrica .....	80
4.3.2. Cálculo da Potência FV considerando toda a área útil. ....	82
4.3.2.1. Estudo do Prédio Escolar (A) - (Inclinação 20 e zero grau).....	82
4.3.2.2. Estudo do Prédio Administrativo (B) - (Inclinação 20 e zero grau).....	84
4.3.2.2.1. Estudo do Sombreamento no Prédio Administrativo (B) .....	85
4.3.2.3. Estudo do Prédio da Mecânica (C) - (Inclinação 20 e zero grau).....	87
4.3.2.4. Estudo do Prédio do Ginásio (D) - (Inclinação 20 e zero grau).....	89

4.3.2.5. Quantificação da Potência FV por sistema .....	90
4.3.2.6. Análise dos Sistemas para as Tecnologias Selecionadas.....	91
4.3.3. Cálculo da Geração Solar FV .....	92
4.3.4. Avaliação Econômica .....	94
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>105</b>
5.1. LIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	107
5.2. CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA .....	108
5.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	109
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>111</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 (a) e (b) - Oferta mundial de energia por fonte. Fonte: MME, 2009.....	14
Figura 2 - Capacidade de geração elétrica no Brasil - Total: 111,76 GW. Fonte: ANNEL, 2009. ....	15
Figura 3 - Consumo de energia elétrica por região em 2007. Fonte: ONS, 2008. ....	16
Figura 4 - Consumo de energia elétrica por setor no Brasil em 2008. Fonte: Adaptado do BEN, 2009.....	17
Figura 5 - Os componentes das faturas de energia elétrica. Fonte: ANEEL, 2008. ....	18
Figura 6 - Taxas médias de crescimento anual da capacidade de energia renovável. <b>Fonte:</b> REN21, 2008.....	22
Figura 7- Produção mundial de painéis FV das tecnologias.	25
Figura 8 - Curva de demanda e efeito de redução de pico ao adicionar módulos FV. Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2008.....	26
Figura 9 - Diagrama esquemático de um sistema solar FV integrado à cobertura e interligado à rede elétrica. Fonte: Rütther, 2004 a. ....	32
Figura 10 - Percentual de participação no mercado FV para as tecnologias no período de 1999 a 2009. Fonte: Adaptado: PHOTON INTERNATIONAL, 2010.....	33
Figura 11 - Distribuição dos custos referentes às instalações. Fonte: <i>ENERGY PARTNERS</i> , 2006.....	34
Figura 12 - Curva de aprendizagem para sistemas FV.....	35

Figura 13 - Usos finais de energia elétrica. Fonte: SEMASP, 2009. ....	40
Figura 14 - Fluxograma da estrutura do trabalho. ....	44
Figura 15 - Fachadas Principais das edificações: A - Prédio Escolar. B - Prédio Administrativo. C - Prédio da Mecânica. D - Ginásio de Esportes. Fonte: Acervo Digital da Instituição, 2008. ....	45
Figura 16 - Divisão de áreas construídas do Campus I. Fonte: CEFET-MG. ....	46
Figura 17 - Divisão do consumo de energia por uso final. Fonte: SILVA, 2006. ....	47
Figura 18 - Divisão do consumo de energia por edificação. Fonte: SILVA, 2006. ....	48
Figura 19 - Vista aérea do CEFET-MG - Campus I. Fonte: Acervo Digital do CEFET. ....	49
Figura 20 - Vista do Campus I. Fonte: Acervo Digital, 2008..	49
Figura 21 - Planta de áreas de cobertura das edificações - Campus I Fonte: CEFET- MG. ....	54
Figura 22 - Vista das edificações do Campus I. Fonte: Acervo Digital do CEFET-MG. ....	54
Figura 23 - Gráfico dos valores da irradiação média na horizontal. Fonte: <i>Radiasol</i> , 2009. ....	55
Figura 24 - Gráfico de um dia limpo para a cidade de Belo Horizonte. Fonte: <i>Radiasol</i> , 2009. ....	56

Figura 25 - Gráfico do consumo de energia mensal. Fonte: CEMIG, 2010. ....	65
Figura 26 - Gráfico do consumo médio diário para os meses do ano de 2009. Fonte: CEMIG, 2010. ....	66
Figura 27 - Gráfico de demanda semanal para os meses de Março a Junho de 2009. Fonte: CEMIG, 2009. ....	68
Figura 28 - Gráficos de dez dias de maior demanda dos meses de Março a Junho de 2009. Fonte: CEMIG, 2009. ....	69
Figura 29 - Gráficos das irradiações solares. Fonte: CEFET-MG, 2009. ....	70
Figura 30 - Gráficos da potência FV para as diferentes tecnologias. ....	76
Figura 31 - Gráficos da sobreposição da potência FV para as três tecnologias selecionadas. ....	77
Figura 32 - Gráficos das curvas sobrepostas de potência FV e demanda. ....	78
Figura 33 (a) e (b) - Gráficos da sobreposição resultante para c-Si e p-Si. ....	79
Figura 34 - Gráfico do consumo de energia elétrica anual. ....	81
Figura 35 - Distribuição dos módulos FV (p-Si) para a inclinação de 20 graus. ....	83
Figura 36 - Distribuição dos módulos FV (p-Si) a zero grau. ....	83
Figura 37 - Distribuição (p-Si) a 20 graus - Prédio Administrativo. ....	84

Figura 38 - Distribuição dos módulos FV (p-Si) a zero grau - Prédio Administrativo.....	84
Figura 39 - Simulação do sombreamento em três dimensões. ....	86
Figura 40 - Simulação das quatro estações do ano. ....	86
Figura 41 (a) e (b) - Distribuição dos módulos FV (20 e zero graus) de p-Si.....	88
Figura 42 (a) e (b) - Distribuição dos módulos (p-Si) a 20 e zero graus. ....	89
Figura 43 - Esquema de ligação do sistema FV integrado à edificação e interligado a rede. Fonte: Adaptado de Santos, 2009. ....	94

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estimativa da participação no mercado de diferentes células FV até 2020. ....	27
Tabela 2 - Ângulo de inclinação ( $\beta$ ) X média anual do total diário de irradiação solar. ....	57
Tabela 3 - Características das tecnologias FV selecionadas.	59
Tabela 4 - Valores das eficiências considerando uma temperatura média de operação de 45 <sup>o</sup> C. ....	60
Tabela 5 - Demanda e Consumo de energia do Campus I ...	65
Tabela 6 - Tabela da divisão de áreas de cobertura disponíveis. ....	67
Tabela 7 - Dados de irradiação solar com as superfícies inclinadas a 20 graus e desvio de azimutal -12 graus - Belo Horizonte.....	72
Tabela 8 - Valor do $G_{poa}$ para inclinações de zero e 20 graus com desvio azimutal -12 graus. ....	72
Tabela 9 - Divisão dos sistemas FV por tecnologia. ....	73
Tabela 10 - Quantificação dos módulos FV por sistema.....	73
Tabela 11- Levantamento da potência FV do Prédio Escolar com inclinação de 20 graus. ....	83
Tabela 12 - Levantamento da potência FV do Prédio Escolar com os módulos na horizontal. ....	83
Tabela 13 - Levantamento da potência FV do Prédio Administrativo para os dois sistemas.....	84

Tabela 14 - Levantamento da potência FV do Prédio Administrativo com os módulos sem inclinação.....	84
Tabela 15 - Quantificação dos módulos e da potência FV....	87
Tabela 16 - Levantamento da potência FV do Prédio da Mecânica com inclinação de 20 graus.....	87
Tabela 17 - Levantamento da potência FV do Prédio da Mecânica com horizontal e com 33 graus de inclinação. ....	88
Tabela 18 - Levantamento da potência FV do Prédio do Ginásio para inclinação de 20 e 0 graus.....	89
Tabela 19 - Quantificação da potência em kWp para as tecnologias.....	90
Tabela 20 - Apresentação dos sistemas por tecnologia.....	91
Tabela 21 - Geração de energia anual dos sistemas FV .....	92
Tabela 22 - Contribuição energética excedente dos sistemas FV .....	93
Tabela 23 - Custos dos sistemas FV levantados no estudo..	95
Tabela 24 - Economia média anual dos sistemas FV. ....	95
Tabela 25 - Cálculo financeiro para o sistema (a-Si) - <i>Net-metering</i> . ....	97
Tabela 26- Cálculo financeiro para o sistema (c-Si) - <i>Net-metering</i> . ....	98
Tabela 27- Cálculo financeiro sistema (p-Si) - <i>Net-metering</i> . ....	99
Tabela 28 - Cálculo financeiro sistema (a-Si) - Modelo: <i>feed-in tariff</i> . ....	100

Tabela 29 - Cálculo financeiro sistema (c-Si) - Modelo: <i>feed-in tariff</i> .....	101
Tabela 30 - Cálculo financeiro sistema (p-Si) - Modelo: <i>feed-in tariff</i> .....	102



## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Subclasses dos grupos tarifários. ....	19
---	----



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

**ABNT** - Associação Brasileira de Normas Técnicas

**ANEEL** - Agência Nacional de Energia Elétrica

**a-Si** - Silício - amorfo

**BEN** - Balanço Energético Nacional

**BOS** - *Balance of system*

**CdTe** - Telureto de cádmio

**CEFET- MG** - Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

**CEMIG** - Companhia Energética de Minas Gerais

**CEPEL** - Centro de Pesquisas em Energia Elétrica

**CHESF** - Companhia Hidroelétrica do São Francisco

**CQNUMC** - Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima

**CPEI** - Centro de Pesquisa em Energia Inteligente

**CRESESB** - Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica no Brasil

**EEG** - *Renewable Energy Sources Act*

**EPE** - Empresa de Pesquisa Energética

**EPIA** - Comunidade Européia da Indústria Fotovoltaica

**FECC** - Fator Efetivo de Capacidade de Carga

**FP** - Fora de Ponta

**FPS** - Fora de Ponta em Período Seco

**FRE** - Fonte Renovável de Energia

**FV** - Fotovoltaica

**GD** - Geração Distribuída

**GEE** - Gases de Efeito Estufa

**G<sub>POA</sub>** – Ganho por Radiação Solar

**GRSU** - Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos

**GWp** - Giga Watt pico

**IBGE** - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

**ICMS** - Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Prestação de Serviço

**IE** - Instituições de Ensino

**IEA** - *International Energy Agency*

**IES** - Instituições de Ensino Superior

**IPPC** - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas

**kV** - Quilo Volt

**kWh** - Quilo Watt hora

**kWp** - Quilo Watt pico

**MJ** - Mega Joule

**MME** - Ministério de Minas e Energia

**c-Si** - Silício monocristalino

**MW** - Mega Watt

**ONS** - Operador Nacional do Sistema Elétrico

**P** - ponta

**PCNEM** - Parâmetros Curriculares Nacionais para o Ensino Médio

**PGD** - Programa de Incentivo à Geração Distribuída

**PNE** - Plano Nacional de Energia

**PNMC** - Plano Nacional sobre Mudança do Clima

**PRODEEM** - Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios

**PROINFA** - Fontes Alternativas de Energia Elétrica

**PS** - Período Seco

**p-Si** - Silício policristalino

**PU** - Período Úmido

**REN21** - Rede de Energias Renováveis para o Século XXI

**SGA** - Sistema de Gestão Ambiental

**SFCR** - Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica

**SWERA** - *Solar and Wind - Energy Resources Assessment*

**T&D** - Transmissão e Distribuição

**TIR** - Taxa Interna de Retorno

**TWh** - Tera Watt hora

**UFPE** - Universidade Federal de Pernambuco

**UFRGS** - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

**UFSC** - Universidade Federal de Santa Catarina

**USP** - Universidade de São Paulo

**Wp** - Watt pico



## RESUMO

TAKENAKA, F. O. Avaliação do potencial de geração de energia solar fotovoltaica na cobertura das edificações do Campus I-CEFET-MG, interligado à rede elétrica. Florianópolis, 2010. P. 141. Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina.

A utilização das fontes de energia de forma sustentável é, atualmente, uma das grandes preocupações mundiais, mais ainda em função da escassez de recursos naturais e da sua exploração de forma predatória, o que pode causar danos irreversíveis ao meio ambiente. Nesse cenário, torna-se importante o estudo de aplicações que empreguem fontes alternativas de energia, que sejam renováveis, e que tenham baixo impacto sobre a natureza. Em países com grande incidência solar, como o Brasil, a interligação de um sistema solar fotovoltaico (FV) integrado à edificação e interligado à rede elétrica se constitui um bom exemplo de geração de energia alternativa e ecologicamente sustentável. Por sua característica de gerar energia no ponto de consumo e poder ser incorporado ao envelope da edificação existente, o sistema solar FV é capaz de produzir energia elétrica para atender a demanda local, aumentando a capacidade da rede de distribuição e reduzindo os picos de carga. Este trabalho objetiva avaliar o potencial de geração e a viabilidade de implantação de um sistema de geração solar FV no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, CEFET- MG – Campus I, localizado em Belo Horizonte.

**Palavras-chave:** Energia Solar Fotovoltaica, Geração de Energia, Fontes Renováveis.



## ABSTRACT

The need for the use of electricity in a sustainable manner has led to a growing concern worldwide, causing more and more scholars and researchers to engage in the search for applications targeting renewable energy sources. In countries with high solar incidence, such as Brazil, the interconnection of a solar photovoltaic generator integrated into the building and connected to the grid is setting a good example of alternative energy generation. For its ability to generate energy at the point of consumption and of being incorporated into the building, the solar photovoltaic system is capable of producing energy to meet local demand by increasing the capacity of the distribution network and reducing the peak load. This study evaluates the feasibility of implementing a system of solar photovoltaic generation in the Federal Center for Technological Education of Minas Gerais, CEFET-MG - Campus I, located in Belo Horizonte. CEFET-MG has among other purposes to stimulate the development of science and technology. The proposed work strengthens the role of social institutions to contribute to greater investment and application of scientific and technologic innovation.

**Keywords:** solar photovoltaic, power generation, renewable sources.



### 1. INTRODUÇÃO

A expansão do consumo de energia no mundo contemporâneo e a utilização cada vez maior de recursos não renováveis do planeta apresentam-se como grandes desafios a serem enfrentados pela humanidade e que demandam soluções cada vez mais criativas.

Nesse cenário, são de vital importância os estudos que devem indicar possíveis saídas para o atendimento da crescente demanda de energia elétrica sem que sejam causados danos irreparáveis ao ecossistema mundial.

O quadro de oferta futura de energia elétrica aponta a fragilidade e as dificuldades no abastecimento do mercado de energia para os próximos anos no Brasil.

De acordo com dados publicados pelo Plano Nacional de Energia - PNE 2030 (ANNEL, 2008), o consumo de energia elétrica em 2030 deverá se situar entre 950 e 1.250 TWh/ano (projeção), o que exigirá um aumento expressivo na oferta de energia elétrica no Brasil. Mesmo que no futuro seja dada prioridade à expansão da oferta de energia de origem hídrica, a instalação de novas usinas gerando 120 mil MW poderá não ser suficiente para atender à demanda por energia nesse horizonte. Baseado nesse contexto, uma fonte renovável de energia (FRE) de forma distribuída seria uma alternativa para auxiliar no suprimento energético do país.

Entre as novas alternativas para uma produção de energia de maneira sustentável e limpa, destaca-se a geração solar fotovoltaica (FV) por ser uma fonte de conversão direta da energia solar em energia elétrica de maneira não poluente, silenciosa, eficiente e não prejudicial ao meio ambiente (RÜTHER, 2004).

A energia solar FV é vista como o caminho ideal para a geração de energia elétrica por se tratar de uma fonte inesgotável, sustentável e amigável ao meio ambiente, trazendo benefícios tanto sociais e ambientais, quanto energéticos. O elemento ativo mais utilizado na fabricação dos painéis FV é o silício, que conforme Hammond (1998) é o segundo elemento mais abundante na superfície da terra.

Os módulos FV interligados à rede elétrica podem ser integrados à edificação, necessitando como requisitos para sua utilização uma orientação solar e uma inclinação adequada (a orientação ideal ocorre quando as superfícies da edificação estão voltadas para o norte geográfico, no hemisfério sul, e a inclinação ideal equivale a um valor igual à latitude local, o que permite maior captação solar).

Em países como Alemanha, Espanha, Japão e Estados Unidos, os sistemas FV integrados à edificação e interligados à rede elétrica têm auxiliado as fontes convencionais de energia na redução do pico de demanda e a sua aplicação, em grande escala, tem contribuído de forma a equilibrar o sistema de geração nos períodos em que existe maior consumo de energia (JARDIM, 2007).

A Alemanha passou a receber incentivos governamentais para promover a energia FV a partir de 1988. Em 1991, o lançamento do Programa 1000 telhados (financiamento da instalação de módulos em coberturas de edificações residenciais como projeto piloto) e a garantia de financiamento de 60 a 79% das instalações dos sistemas possibilitaram a afirmação decisiva do uso da tecnologia FV. Na seqüência, a fim de consolidar essa fonte renovável de energia, a Eurosolar, lançou o programa de 100.000 telhados (1999), garantindo investimentos e um mercado para aplicação dos módulos FV.

A Alemanha é o país que apresenta, com sucesso, mecanismo de incentivo às energias renováveis, aplicando o sistema com o produtor independente conectado à rede elétrica, resultando numa mini-usina geradora. Dessa forma, toda a energia gerada é vendida à rede com uma tarifa prêmio (WENZEL, 2007).

A Espanha também se apresenta como um dos países com uma capacidade instalada de energia FV considerável dentro da matriz energética mundial. No ano de 2008, houve a instalação de 3,13 GWp, o que representou 53% do consumo anual mundial. Para os anos seguintes não é esperado um aumento tão significativo da potência FV instalada, devido à atual crise econômica (SOLAR PLAZA, 2008).

Nesses dois países, pelo fato de haver garantia de compra da energia gerada por meio de uma tarifa prêmio e existir um grande incentivo do governo para que a tecnologia seja utilizada, torna-se lucrativo o investimento nos sistemas FV integrados à edificação e interligados à rede elétrica, sendo essa opção de geração de energia considerada já consolidada.

O Japão iniciou o programa *Sunshine Project* de incentivo às tecnologias FV em 1974. Pelo fato de possuir grande população, grande demanda energética e escassez de grandes áreas disponíveis para atender as fontes convencionais, isso fez com que as áreas das edificações públicas fossem as primeiras a serem utilizadas para a implantação dos sistemas FV. Assim, o aproveitamento das áreas das edificações já existentes consolidou a integração da tecnologia FV com o uso das coberturas (KUROKAWA *et al.*, 2001).

Os EUA criaram um programa de instalação de sistemas solares que tem como objetivo instalar 1.000.000 de “telhados solares” até 2010 incluindo a geração FV (SHHAYANI, 2006).

No entanto, assim como no Japão quanto nos EUA, o investidor não possui incentivo adequado já que o valor pago na venda da energia FV é o mesmo do valor de compra, o que dificulta o retorno do investimento.

O Brasil é um país tropical que apresenta elevados níveis de irradiação solar que, na maioria dos casos, são superiores aos dos países da Europa e da Ásia. Esse caráter deve ser merecedor de atenção, principalmente quando se trata do aproveitamento do sol para a geração de energia elétrica de uma forma sustentável.

No Brasil, as primeiras experiências utilizando a tecnologia solar FV se deram em sistemas isolados em comunidades no interior de alguns estados. Isto é, instalados em locais onde a energia convencional é de difícil acesso e grande investimento inicial. Os sistemas conectados à rede elétrica pública ainda são projetos pilotos em alguns estados brasileiros propiciando estudo desta nova forma de geração a pesquisadores de diversas partes do país (VIANA, 2007).

É importante ressaltar que os trabalhos voltados à utilização do sistema solar FV no Brasil vem sendo analisados não

somente para uso residencial, mas também para edificações públicas, pois estas muitas vezes, apresentam um pico de carga diurno, o que coincide com o pico de geração FV. Outro fator relevante se refere às características construtivas deste setor que, na maior parte, são constituídas por grandes áreas planas contínuas, que são adequadas à integração desses sistemas.

Os trabalhos sobre energia FV desenvolvidos no Brasil têm como principais objetivos: demonstrar e disseminar o conceito de sistemas FV integrados às edificações; verificar o comportamento do sistema e da tecnologia utilizada quando exposta a temperaturas médias elevadas; verificar a qualidade da energia injetada na rede; estudar a contribuição que esse tipo de aplicação pode fornecer na geração distribuída de energia dentro do contexto energético; estudar o perfil de operação quanto ao acoplamento entre potências de geração e inversão; aprofundar o conhecimento quanto aos aspectos técnicos e legais relacionados ao uso desses sistemas como geradores de eletricidade verificando sua confiabilidade e segurança (OLIVEIRA, 2002).

No Brasil, as primeiras experiências de sistemas FV conectados à rede elétrica de distribuição datam de meados da década de 90, com a instalação em 1995 de uma central de 11 kWp pela Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) em Recife, PE, seguido das centrais de 2,1 kWp e 0,75 kWp em 1997 e 1998, instaladas no prédio da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFSC, SC, e no laboratório de Sistemas Fotovoltáicos da USP, SP, respectivamente.

Em alguns estados brasileiros a aplicação de sistemas FV conectados à rede de distribuição de energia encontra-se em expansão, sendo que entre 1995 e 2005 foram instalados 76,65 kWp de potência FV. Em 2009, o valor de potência FV instalada já se contabilizou 152,5 kWp com 29 sistemas experimentais. Os estados que fazem parte desse cenário de crescimento, visando o uso específico destes sistemas, são Minas Gerais, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, São Paulo, Rio de Janeiro, Recife e Pernambuco (OLIVEIRA, 2002; ZILLES, 2005; DIAS, 2006, ZILLES, 2008, VARELLA, 2009).

Embora a energia solar FV seja uma tecnologia madura, confiável e tecnicamente viável, sua utilização ainda não tem um mercado consolidado no Brasil, onde o seu custo elevado impe-

de a sua expansão (OLIVEIRA, 2002). Deve-se encontrar formas de viabilizá-la de maneira condizente com a atual estrutura do setor energético, a fim de ser uma das tecnologias capazes de contribuir positivamente com a geração de energia elétrica nacional, atendendo às mais diversas necessidades da sociedade.

### 1.1. APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA

O sistema de geração convencional de energia elétrica possui problemas de ordem física e humana, como poluição, ruídos, dependência de combustíveis fósseis, degradação do meio ambiente, emissão de CO<sub>2</sub>, *blackouts*, falhas e racionamento que tornam sua utilização vulnerável e finita. Além disso, a queima de combustíveis fósseis favorece a emissão de partículas poluentes e outros gases derivados que propiciam grandes mudanças climáticas decorrentes da intensificação do efeito estufa e que têm afetado o equilíbrio ecológico do planeta.

O aumento da demanda energética mundial é consequência direta do crescimento populacional e do uso, cada vez maior, de equipamentos que demandam da utilização da energia elétrica. Com isso, faz-se necessário a instalação de novas plantas geradoras para aumentar a capacidade energética. No entanto, ainda não se contabiliza o ônus que a sociedade paga com a deterioração do meio ambiente e o custeio social na geração de energia elétrica de forma convencional.

As dificuldades ambientais, evidenciadas por meio da aplicação de legislação rígida - como, por exemplo, a construção de novas usinas hidrelétricas que devem receber parecer favorável de comissões de meio ambiente que produzam relatórios de impacto ambiental favoráveis à aprovação de sua implantação e, a crescente escassez de recursos energéticos naturais necessários à implantação de novas usinas são fatores negativos a serem considerados, dificultando o financiamento de grandes investimentos relacionados aos empreendimentos futuros na produção de eletricidade.

Segundo Oliveira (2002), a entrada das Edificações Fotovoltaicas Conectadas à Rede (EFCR) no mercado energético brasileiro e, de modo geral, a disseminação e a viabilidade desta tecnologia renovável na geração de energia distribuída, podem

representar um aumento na flexibilidade e na capacidade de expansão do setor energético.

As EFCR representam uma das aplicações possíveis da tecnologia solar FV, de maneira que as coberturas, as fachadas, os *brises* e as janelas das edificações apresentam-se como a base para a instalação dos módulos solares FV.

Como característica positiva do uso da tecnologia FV para produção de eletricidade, destaca-se que seu processo de geração de energia não produz danos ao meio ambiente. Além disso, sua localização próxima ao local de consumo, com um caráter modular, permite a utilização de sistemas de pequeno porte. Como aspectos limitadores, pode-se citar: o fato de sua curva de geração ser diurna; a instalação possuir baixo fator de capacidade e haver aleatoriedade na disponibilidade do recurso (sol), o que dificulta a previsão de atendimento de cargas instantâneas (OLIVEIRA, 2002).

Entretanto, existem algumas barreiras quanto à inserção das EFCR, barreiras colocadas em função de características específicas do seu perfil de operação, uma vez que a forma de planejamento do setor elétrico brasileiro é construída gerando eletricidade de forma centralizada e ainda sem a inclusão efetiva de fontes renováveis e distribuídas de pequena escala (OLIVEIRA, 2002). As barreiras enfrentadas por essa tecnologia podem ser divididas em três grupos, sendo elas de:

- Caráter técnico,
- Comercial e
- De regulamentação.

Essas barreiras são referentes às dificuldades que as concessionárias de eletricidade têm em operar com as fontes complementares de geração distribuída de energia.

As *barreiras técnicas* dizem respeito às normas de segurança e à qualidade da energia injetada na rede, assegurando a compatibilidade técnica entre o novo gerador e a rede na qual será interconectada.

As *barreiras comerciais* estão relacionadas aos procedimentos de contrato entre a concessionária e o usuário, que de-

vem regular como se deve proceder à remuneração de sistemas de geração distribuídas, em tempo real, o que não é uma tarefa fácil.

Por fim, as *barreiras regulatórias* são provenientes, principalmente da estrutura tarifária imposta às fontes geradoras distribuídas e da proibição de funcionamento em paralelo com a rede quando a mesma não estiver energizada (OLIVEIRA, 2002).

Como aspectos motivadores necessários para a realização desse estudo pode-se apontar a busca pelos ganhos ambientais, sustentáveis e renováveis de se ter a instalação de um sistema de geração próximo dos usos finais sem as perdas inerentes da geração de energia elétrica convencional.

### 1.2. JUSTIFICATIVA

A realização de um estudo para implantação de sistema FV sobre uma edificação pública já conectada à concessionária reveste-se de importância por demonstrar que é possível e viável a aplicação da tecnologia FV como solução energética complementar.

Além disso, é uma maneira de disseminar sua utilização e desmistificar conceitos de ser ela uma energia excessivamente cara e pouco aplicável, abrindo uma nova visão para a sua aplicação, tal como já ocorre em países desenvolvidos.

Segundo Zomer (2008), a integração de geradores FV à arquitetura deveria ser vista como um desafio para a nova geração de edifícios, pois essa eficiente tecnologia só precisa adquirir um preço mais competitivo no mercado para ser largamente utilizada.

A importância desse estudo nas instituições de ensino justifica-se particularmente pelo grande incentivo do Governo Federal para expansão, modernização e melhoramento das escolas técnicas já existentes (CEFET's) e a criação de novas instituições (IE's) para atender ao crescimento econômico, à qualificação do empregado no mercado de trabalho e ao aumento da população.

A demarcação de fronteiras para delimitação do trabalho é essencial, uma vez que devem ser bem definidos os objetivos propostos. Ciente disso, o objeto de estudo se restringe à instituição de ensino técnico profissionalizante, CEFET- MG, Campus I, utilizando-se, para isso, as coberturas das edificações já existentes, além da análise do histórico do consumo energético dos últimos 16 anos, compreendendo janeiro de 1994 a dezembro de 2009.

### 1.3. OBJETIVOS

#### 1.3.1. Objetivo Geral

Avaliar o potencial de geração de energia solar FV de forma integrada à edificação e interligada à rede elétrica de uma instituição de ensino público, o CEFET - MG. Essa avaliação considera diferentes tecnologias de módulos FV, além de que os módulos serão alocados apenas na área de cobertura das edificações dessa unidade de ensino.

#### 1.3.2. Objetivos Específicos

- Analisar a característica do consumo de energia elétrica anual e o consumo histórico das edificações em questão;
- Calcular as áreas de cobertura das edificações do CEFET-MG;
- Analisar as leituras das memórias de massa do medidor local, do alimentador BHGT-23 e dos registros de dados de irradiação solar para a cidade de Belo Horizonte;
- Gerar e sobrepor curvas de demanda, irradiação e potência FV;
- Quantificar a capacidade de geração de energia solar fotovoltaica para suprir o consumo de energia elétrica média diária e ampliar a análise para toda a área útil de cobertura das edificações verificando a sua contribuição;
- Apresentar um estudo simplificado da análise de investimento dos sistemas fotovoltaicos propostos no estudo.

### 1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação está estruturada em cinco capítulos, os quais detalham a seqüência da pesquisa realizada.

O primeiro capítulo traz uma breve introdução do tema pesquisado, apresenta o objeto de estudo, bem como a justificativa para a realização do trabalho, além de detalhar os objetivos da pesquisa.

A revisão bibliográfica, no segundo capítulo, abrange e focaliza, dentro de um universo amplo de informação e referências bibliográficas de diferentes pesquisadores, os assuntos mais pertinentes ao campo do estudo proposto. Além disso, neste capítulo há o relato das experiências nacionais e internacionais relacionadas à área pesquisada.

O terceiro capítulo apresenta uma descrição detalhada da metodologia a ser utilizada na avaliação da geração de energia solar FV e destaca os procedimentos necessários para atingir os objetivos.

No quarto capítulo são expostos os resultados obtidos e apresentadas as discussões sobre os mesmos.

Finalmente, as conclusões são apresentadas no quinto capítulo, assim como as sugestões para trabalhos futuros.



### 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 2.1. INTRODUÇÃO

A revisão da literatura apresentada no presente trabalho faz uma abordagem geral do campo da evolução das questões energéticas dentro de um contexto histórico, mostrando ser a energia solar FV uma forma de energia renovável de grande importância para a sustentabilidade da geração de energia elétrica trazendo suas características e vantagens como elemento viável no abastecimento energético.

#### 2.2. CONTEXTO HISTÓRICO-AMBIENTAL DO CENÁRIO ENERGÉTICO

O século XX testemunhou a maior mudança nas fontes de energia renovável que o mundo talvez tenha experimentado desde que o uso do fogo foi disseminado. Nos primeiros vinte e cinco anos do século, o carvão foi indiscutivelmente a principal fonte de energia para o mundo industrializado.

O carvão teria continuado a ser a principal fonte de energia se a descoberta de grandes quantidades de petróleo no sul da Rússia, no Oriente Médio e, mais tarde, nos Estados Unidos, não tivesse despertado rapidamente o interesse com relação à facilidade comparativa de sua extração e transporte, e de sua conversão para atender a uma grande quantidade de necessidades (MME, 2009).

Caracterizadas de uma forma global, as energias renováveis englobam: solar; eólica; biomassa e bio-combustíveis; hídrica; oceano, ondas e marés; geotermia. Todas estas fontes de energia existem em diferentes proporções no planeta Terra e o uso delas todas constitui a fórmula para que se possa aproveitar a energia disponível em cada ecossistema de maneira sustentável.

As energias renováveis e o seu uso resolverão grande parte dos problemas nos chamados países em desenvolvimento, porque estes poderão ter energia disponível com base nos seus recursos e não nos recursos dos países desenvolvidos (sejam eles tecnológicos ou mesmo em matérias-primas). O seu desen-

volvimento será a medida das suas necessidades versus sua disponibilidade (BEN, 2008).

### 2.2.1. Cenário Energético Mundial

Existem fatores geopolíticos relacionados ao suprimento de energia e matérias-primas que indicam o rumo que as relações internacionais deverão tomar nas próximas décadas. Como todas as fontes de energia primária dependem de um conjunto de medidas adicionais necessárias para transformá-la em uma forma utilizável e transportá-la para as áreas de consumo, outros fatores além da distribuição geográfica dos recursos são aspectos essenciais da geopolítica energética.

Os países que dependem de recursos energéticos importados têm dois objetivos principais: primeiro, adotar políticas destinadas a assegurar o acesso ao suprimento externo adicional que é essencial para suas necessidades nacionais; segundo, reduzir a necessidade de acesso a suprimentos externos.

Para assegurar o acesso a suprimentos externos, um governo possui várias opções: pode procurar relações bilaterais com os principais produtores; pode criar um sistema de fornecedores preferenciais; pode participar de organizações governamentais.

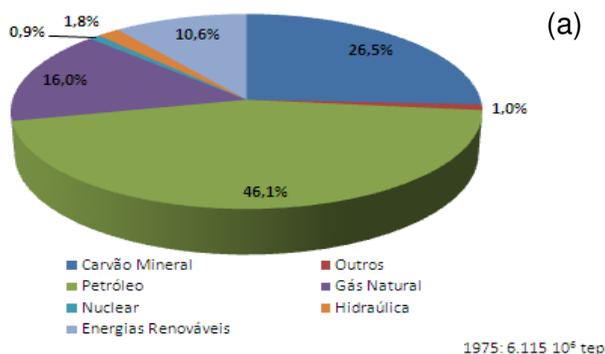
A questão do acesso aos recursos energéticos envolve, na verdade, três interesses, que são compartilhados por todos os países carentes de energia:

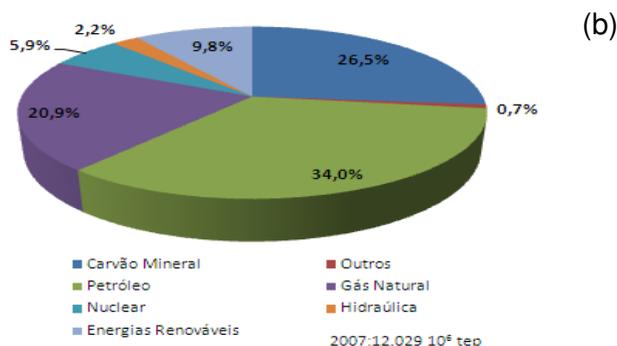
1. O suprimento de energia importada deve ser suficiente; existe um nível de importações abaixo do qual a segurança nacional é colocada em risco;
2. O suprimento de energia importada deve ser contínuo. Interrupções ou cortes no suprimento podem ter sérias repercussões políticas e econômicas nos países industrializados. Naturalmente, é esta vulnerabilidade a interrupções do suprimento, que dá aos estados fornecedores uma poderosa arma contra os países que dependem de energia importada;
3. A energia importada deve ser obtida a preços “razoáveis”.

O mais difícil de definir com relação aos três aspectos do acesso apontados anteriormente, diz respeito ao preço. É evidente que o preço pago deve guardar alguma relação com o custo de formas alternativas de energia, tanto disponíveis, como planejadas. O preço ainda deve refletir o fato de que as atuais fontes de energia não são renováveis e suas reservas estão diminuindo. O preço também deve refletir uma “capacidade de pagar”.

Esses três fatores - um suprimento suficiente e contínuo a um preço razoável - constituem um trio indissolúvel de interesses energéticos. A falta de qualquer um desses fatores pode ter conseqüências desastrosas para o bem-estar econômico, a estabilidade política e a segurança nacional do país consumidor (BEN, 2009).

A matriz energética mundial é composta basicamente por fontes energéticas não renováveis, provenientes principalmente do petróleo, gás natural e carvão mineral. Na Figura 1 (a) e (b) observa-se uma modificação na partição energética, particularmente um aumento percentual na oferta da energia nuclear (0,9% para 5,9%) e do gás natural (16% para 20,9%), contrapondo a evolução da oferta do petróleo, no período considerado.



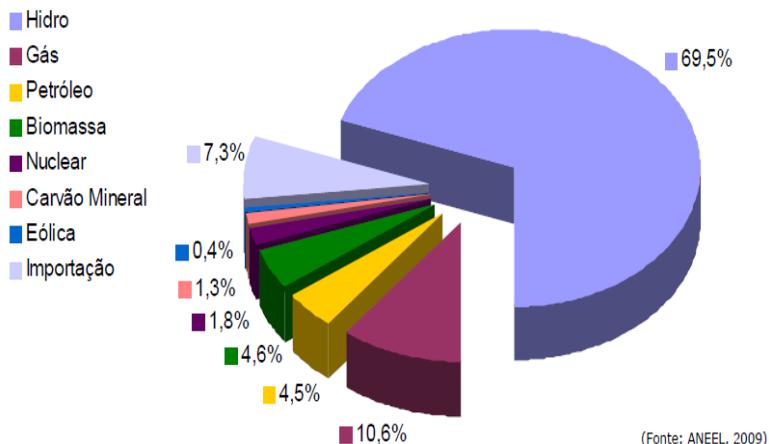


**Figura 1 (a) e (b)** - Oferta mundial de energia por fonte. **Fonte:** MME, 2009.

### 2.2.2. Cenário Energético Brasileiro

Ao longo de século XX, o Brasil passou por um expressivo desenvolvimento econômico que se refletiu no aumento da demanda de energia. Dentre os fatores que explicam tal crescimento alinham-se um importante processo de industrialização e uma notável expansão demográfica, acompanhada de uma taxa de urbanização acelerada.

Com grande extensão territorial e com quase 184 milhões de habitantes, segundo estimativas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2008), o Brasil é um dos poucos países cuja matriz energética possui um grande percentual de fontes renováveis de energia, em especial a energia hidroelétrica, conforme a Figura 2.

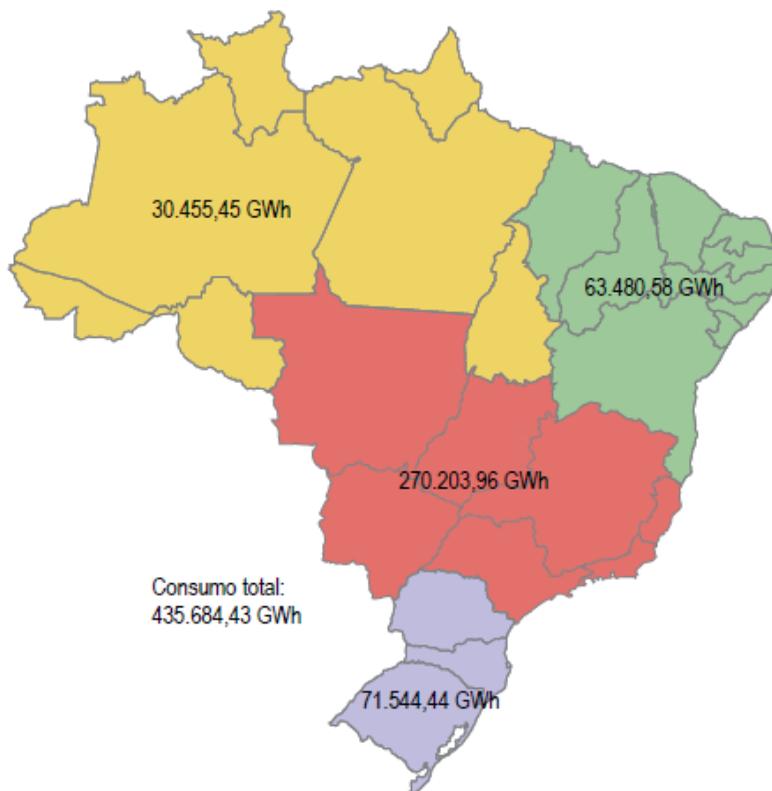


**Figura 2** - Capacidade de geração elétrica no Brasil - Total: 111,76 GW. **Fonte:** ANEEL, 2009.

Conforme descrito no Plano Nacional de Energia - PNE 2030, entre os anos de 2005 e 2030, a matriz energética nacional sofrerá expansão da oferta de eletricidade não condizente ao aumento expressivo da demanda. Para isso, medidas como o estímulo ao Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), o aumento da oferta de co-geração, a diminuição das perdas não técnicas na distribuição e a redução no desperdício e consumo de energia serão empreendidas para o uso eficiente da eletricidade.

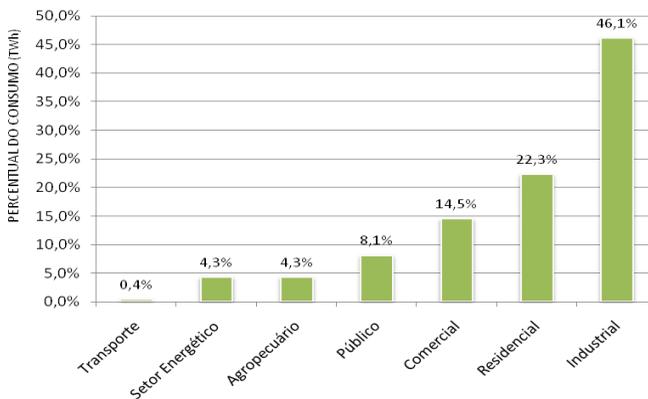
O consumo de energia está diretamente ligado ao desenvolvimento econômico de qualquer sociedade. Ele reflete tanto o ritmo das atividades dos setores - industrial comercial e serviços - quanto à qualidade de vida da população.

O consumo energético no Brasil além de variar por setor de utilização varia também por região. Assim, embora a região Sudeste/Centro-Oeste continue a liderar o ranking dos consumidores, a evolução do consumo nas demais regiões tem sido mais acentuada (Figura 3) (ANEEL, 2008).



**Figura 3** - Consumo de energia elétrica por região em 2007. **Fonte:** ONS, 2008.

Analisando-se o gráfico do consumo energético por setores (Figura 4), pode-se observar que quase metade da energia consumida no país em 2008 deveu-se à área industrial. Outro setor que se destaca pelo volume absorvido é o residencial impulsionado pela expansão do Programa Luz para Todos, do Governo Federal, coordenado pela Eletrobrás (BEN, 2009).



**Figura 4 - Consumo de energia elétrica por setor no Brasil em 2008.**  
**Fonte:** Adaptado do BEN, 2009.

A diretriz básica é manter o balanço entre a Oferta e a Demanda do sistema energético brasileiro. Dados oficiais gerados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) apresentam riscos de déficit de 4,5% para o ano de 2010 e de 10% para 2011 (MME e EPE, 2008).

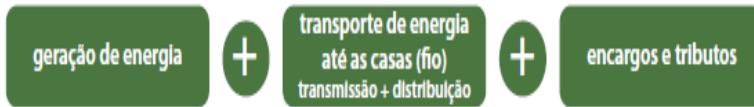
### 2.3. REGULAMENTAÇÃO DO SETOR ENERGÉTICO

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foi criada pela Lei 9.427, durante a reestruturação do setor elétrico brasileiro. O Estado abriria mão, gradualmente, dos meios de produção do setor elétrico e passaria a ser regulador e fiscal da qualidade dos serviços prestados à população.

#### 2.3.1. Estrutura Tarifária no Brasil

Os dois mais importantes desafios enfrentados por uma agência reguladora são reduzir a assimetria de informações e disseminar a cultura da regulação. Esses desafios ficam maiores ainda quando se trata de um setor complexo como é o caso do setor elétrico brasileiro.

As faturas mensais emitidas pelas distribuidoras registram a quantidade de energia elétrica consumida no mês anterior e medida em kWh (quilowatt-hora). O valor final a ser pago pelo cliente corresponde à soma de três componentes (Figura 5): o resultado da multiplicação do volume consumido pela tarifa (valor do kWh, expresso em reais); os encargos do setor elétrico e os tributos determinados por lei. Os encargos do setor elétrico, embutidos na tarifa - e, portanto, transparentes ao consumidor - têm aplicação específica. Os tributos são destinados ao governo. Já a parcela que fica com a distribuidora, é utilizada para os investimentos em expansão e manutenção da rede, remuneração dos acionistas e cobertura de seus custos (ANEEL, 2008).



**Figura 5** - Os componentes das faturas de energia elétrica. **Fonte:** ANEEL, 2008.

### 2.3.2. Componentes Tarifários da Demanda de Potência

Define-se estrutura tarifária como sendo o conjunto de tarifas aplicáveis aos componentes de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência, de acordo com a modalidade de fornecimento (CEDOC, 2000). No Brasil, as tarifas de energia elétrica estão estruturadas em dois grandes grupos de consumidores: “grupo A” e “grupo B”.

As tarifas do “grupo A” são para consumidores atendidos pela rede de alta tensão, de 2,3 a 230 kV. As tarifas do “grupo B” se destinam às unidades consumidoras atendidas em tensão inferior a 2,3 kV (ANEEL, 2008). Cada grupo possui uma estrutura tarifária distinta de acordo com as suas peculiaridades de consumo e de demanda de potência, conforme o Quadro 1:

**Quadro 1** - Subclasses dos grupos tarifários.

<b>A1</b> para o nível de tensão de 230 kV ou mais;	<b>B1</b> Residencial e residencial de baixa renda;
<b>A2</b> para o nível de tensão de 88 a 138 kV;	<b>B2</b> Rural, cooperativa de eletrificação rural e serviço público de irrigação;
<b>A3</b> para o nível de tensão de 69 kV;	<b>B3</b> Outras classes: industrial, comercial, serviços e outras atividades, poder público, serviço público e consumo próprio;
<b>A3a</b> para o nível de tensão de 30 a 44 kV;	
<b>A4</b> para o nível de tensão de 2,3 a 25 kV;	<b>B4</b> Classe iluminação pública.
<b>AS</b> para sistema subterrâneo.	

**Fonte:** ANEEL, 2005.

As tarifas do “**grupo A**” são construídas em três modalidades de fornecimento: convencional, horo-sazonal azul e horo-sazonal verde, sendo que a convenção por cores é apenas para facilitar a referência.

Já as tarifas do “**grupo B**” são estabelecidas somente para o componente de consumo de energia, em reais por megawatt-hora, considerando que o custo da demanda de potência está incorporado ao custo do fornecimento de energia em megawatt-hora (ANEEL, 2005).

### 2.3.3. A Composição de Valores Calculados na Tarifação

A tarifa de energia elétrica é a composição de valores calculados que representam cada parcela dos investimentos e operações técnicas realizados pelos agentes da cadeia de produção e da estrutura necessária para que a energia possa ser utilizada pelo consumidor.

A tarifa representa, portanto, a soma de todos os componentes do processo industrial de geração, transporte (transmissão e distribuição) e comercialização de energia elétrica. São acrescidos ainda os encargos direcionados ao custeio da aplicação de políticas públicas. Desse modo, os impostos e encargos estão relacionados na conta de luz.

A conta de luz de cada consumidor contém o preço final, que é a tarifa definida pela ANEEL, mais os impostos não incluídos nos custos da energia elétrica, como ICMS, PIS e COFINS.

O reajuste e as revisões são mecanismos pelos quais as tarifas de energia elétrica podem ser alteradas. Estão previstos nos contratos de concessão e permitem a manutenção do equilíbrio econômico financeiro das concessionárias, conforme a lei.

### **2.3.3.1. A tarifa convencional**

A estrutura tarifária convencional é caracterizada pela aplicação de tarifas de consumo de energia e/ou demanda de potência, independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano. A tarifa convencional apresenta um valor para a demanda de potência em reais por quilowatt e outro para o consumo de energia em reais por megawatt-hora (ANEEL, 2005).

O consumidor atendido em alta tensão pode optar pela estrutura tarifária convencional, se atendido em tensão de fornecimento abaixo de 69 kV, sempre que tiver contratado uma demanda inferior a 300 kW.

### **2.3.3.2. A tarifa horo-sazonal**

A estrutura tarifária horo-sazonal é caracterizada pela aplicação de tarifas diferenciadas - Azul e Verde - de consumo de energia elétrica e de demanda de potência, de acordo com as horas de utilização do dia e dos períodos do ano (CEDOC, 2000).

Para as horas do dia são estabelecidos dois períodos, denominados postos tarifários. O posto tarifário “ponta” corresponde ao período de maior consumo de energia elétrica, que ocorre entre 18 e 21 horas do dia. O posto tarifário “fora da ponta” compreende as demais horas dos dias úteis e às 24 horas dos sábados, domingos e feriados. As tarifas no horário de “ponta” são mais elevadas do que no horário “fora de ponta” (ANEEL, 2005).

Para o ano, são estabelecidos dois períodos: “período seco”, quando a incidência de chuvas é menor, e “período úmido” quando é maior o volume de chuvas. As tarifas no período seco são mais altas, refletindo o maior custo de produção de energia elétrica devido à menor quantidade de água nos reservatórios das usinas hidrelétricas, provocando a eventual necessidade de complementação da carga por geração térmica, que é mais cara. O período seco compreende os meses de maio a novembro e o período úmido os meses de dezembro a abril (ANEEL, 2005).

### 2.4. IMPACTOS AMBIENTAIS

O crescimento rápido e mal planejado da produção e do consumo energético, principalmente após a Revolução Industrial, gerou impactos ambientais consideráveis.

Dentre eles pode-se citar o aquecimento global e efeito estufa, a destruição da camada de ozônio, a chuva ácida, a desertificação, as mudanças climáticas, entre outros.

O efeito estufa é um fenômeno natural causado por gases presentes na atmosfera terrestre. Sabe-se que a atmosfera é constituída por uma mistura de gases, em predominância, o nitrogênio ( $N_2$ ) e o oxigênio ( $O_2$ ) e vários outros denominados “gases estufa” como o dióxido de carbono ( $CO_2$ ), ozônio ( $O_3$ ), metano ( $CH_4$ ), óxido nitroso ( $N_2O$ ) e o vapor d’água ( $H_2O$ ). Estes gases denominados “estufa” recebem este nome por apresentarem a capacidade de reter o calor proveniente da radiação solar mantendo a temperatura terrestre. (MCT, 1999).

Somando-se, ao processo natural, as atividades que contribuem para o aumento das concentrações de gases causadores do efeito estufa, como a queima de combustíveis fósseis e o agronegócio, ampliou-se a capacidade de absorção de energia. Estudos científicos comprovaram um aumento de  $0,8^{\circ}C$  na temperatura média da Terra no último século, passando de aproximadamente  $13,8^{\circ}C$  para  $14,6^{\circ}C$  (IPCC, 2007).

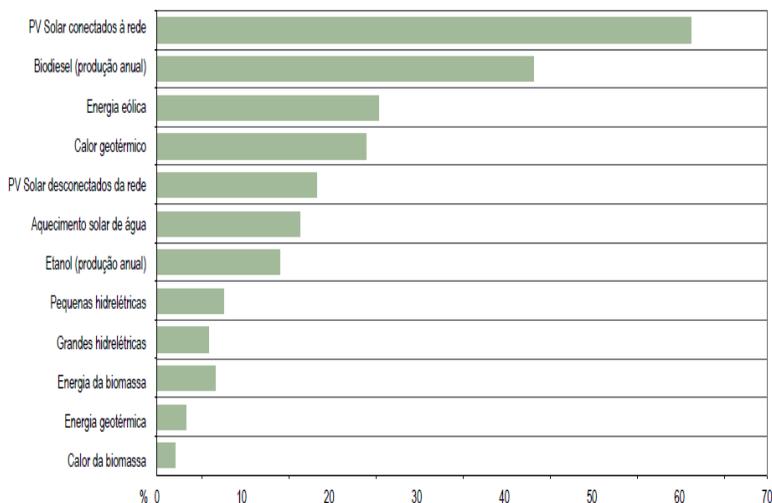
Verões mais quentes, invernos mais rigorosos, secas, incêndios florestais, aumento da intensidade das tempestades e furacões, ondas de calor, derretimento das calotas polares e elevação do nível do mar são algumas das conseqüências das mudanças climáticas previstas pelo Painel Intergovernamental de

Mudanças do Clima, caso a temperatura do planeta continue subindo (IPCC, 2007).

O Brasil, segundo a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMC), não tem obrigações quantificadas de redução de emissões, por não ter responsabilidade histórica significativa pelo acúmulo de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera (PNMC, 2008).

Com forte participação de fontes renováveis de energia, em predominância a hidroelétrica, sabe-se que mais de 70% das emissões de GEE do país estão relacionadas ao desmatamento e às queimadas (ANEEL, 2008).

Entre 2002 e 2006, a capacidade instalada das principais fontes renováveis aumentou entre 20% e 60%, conforme a Figura 6 extraída do estudo *Renewables 2007 - Global Status Report*, produzido pela Rede de Energias Renováveis para o Século XXI (REN21), em colaboração com o *Worldwatch Institute*.



**Figura 6** - Taxas médias de crescimento anual da capacidade de energia renovável. **Fonte:** REN21, 2008.

### 2.5. A GERAÇÃO FV NA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

A Geração Distribuída (GD) é a geração de energia elétrica, de qualquer potência, conectada diretamente no sistema

elétrico de distribuição, ou por meio de instalações de consumidores, podendo operar em paralelo ou de forma isolada e despachadas - ou não - pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) (ANEEL, 2008).

A utilização da GD implica a redução da complexidade do atual sistema de transmissão e distribuição (T&D) de energia. A geração convencional é centralizada e distante do ponto de consumo, o que torna este modelo mais caro, de baixa confiabilidade e vulnerável, sujeitando os consumidores às possibilidades de *blackouts* e racionamentos como o ocorrido no Brasil em 2001, ou o apagão ocorrido no nordeste dos EUA em 2003, sendo que ambos poderiam ser evitados, por exemplo, pelo uso dos sistemas FV conectados à rede (PEREZ, COLLINS, 2004).

A opção pelos sistemas de GD faz com que os sistemas FV apresentem vários benefícios para as concessionárias. Isso pela adição de energia à rede, redução das perdas em transmissão, redução dos custos, menor tempo de implantação e, principalmente, pela postergação dos custos de expansão, já que o sistema FV pode estar instalado e dar suporte de capacidade a um alimentador considerado crítico para o sistema (JARDIM, 2007).

### 2.5.1. Aplicações FV no Mundo

O estabelecimento de planos nacionais de incentivo e subvenção de programas em muitos países do mundo, principalmente Japão, Alemanha, Espanha e EUA, levaram ao crescimento impressionante deste sistema de geração. Segundo *Winfried Hoffmann*, presidente da Comunidade Européia da Indústria Fotovoltaica (EPIA), a indústria FV está se preparando para tornar-se um dos setores mais dinâmicos da economia global.

Numa escala mundial, a produção anual dos módulos FV, em 2009 apresentou um aumento de 56% em relação ao ano anterior, atingindo 12,3 GW de potência instalada, com previsão, seguindo o ritmo de crescimento e os contratos já firmados, de atingir 21 GW em 2010. Neste mesmo ano, a potência total acumulada, considerando o período de 1999 a 2009 foi de 32,3 GW. (*PHOTON INTERNATIONAL*, 2010).

Apesar da enorme disponibilidade dos recursos solares e das potencialidades do sistema FV, a América Latina tem sido responsável por uma pequena parcela do mercado mundial FV. Este fato pode ser explicado pela falta de programas de incentivo, de conhecimento, de estratégias para melhor aplicação e eficiência, etc.

O Relatório *Trends in Photovoltaic Applications* (IEA, 2007) apresenta que 1/3 dos países pertencentes ao PVPS e relatam que as aplicações não conectadas à rede dominam seus mercados. No entanto, esses mesmos países mostram que estas aplicações vêm diminuindo ao longo do tempo e que a forte tendência atual é o mercado de sistemas FV conectados à rede elétrica.

Segundo Sick et al (1996), os módulos FV utilizados nos sistemas são projetados e fabricados para o uso em ambientes externos, sendo resistentes aos agentes físicos como o sol, a chuva, o vento, entre outros, devendo operar de modo satisfatório por períodos de 30 anos ou mais. Seu rendimento pode ser afetado por vários fatores, dentre eles pode-se citar a localização geográfica, a inclinação e a orientação da instalação. A temperatura, o estado de limpeza e a separação dos painéis, bem como a resistência dos condutores também influenciam no desempenho do sistema FV.

Segundo Green (2003), a indústria FV vem crescendo em média de 30 a 40% ao ano desde 1996. A Figura 7 relata o crescimento da produção anual mundial de painéis solares FV (MWp/ano) e o percentual do ano de 1999 até 2009, conforme *Photon International* (2010).



**Figura 7-** Produção mundial de painéis FV das tecnologias.

**Fonte:** Adaptado do *Phonton international*, 2010.

### 2.5.2. Aplicações FV no Brasil

A primeira iniciativa que efetivou o uso da energia solar FV em âmbito nacional foi o Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios (PRODEEM), sendo considerado um dos maiores programas de eletrificação rural utilizando sistemas FV. Atualmente, outros estímulos como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), o Programa de Incentivo à Geração Distribuída (PGD), o Programa Luz para Todos, a cobrança de incentivos fiscais, entre outros, vêm sendo implementados com a finalidade de aumentar a participação da energia solar FV na matriz energética brasileira.

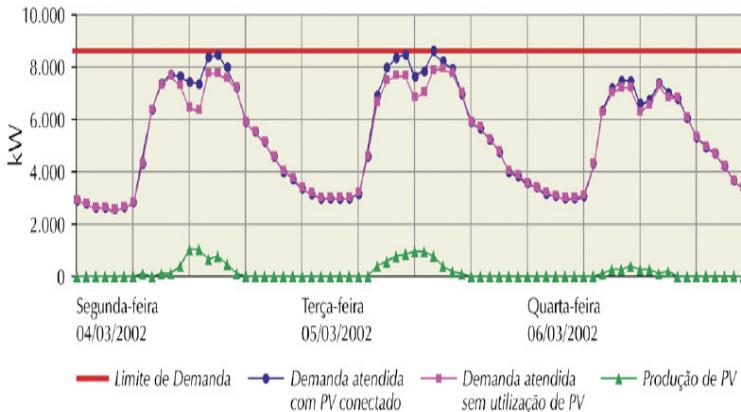
Especialistas identificam duas principais aplicações do sistema FV brasileiro: sistemas híbridos FV/diesel em pequenas redes na região amazônica e sistemas FV interligados à rede em áreas urbanas.

Os sistemas híbridos consistem na combinação de sistemas FV com outras fontes de energia que asseguram a carga das baterias na ausência de sol, como por exemplo, o diesel (CRESESB, 2004).

Devido à sua modularidade e simplicidade, os sistemas FV/diesel são uma das opções para atender às comunidades

isoladas com baixa densidade. Segundo O Atlas Brasileiro de Energia Solar, os sistemas híbridos cobrem cerca de 50% da região amazônica; porém atendem apenas 3% da população.

Os sistemas FV conectados à rede são de imensa importância, pois podem contribuir para reduções dos picos de energia durante o dia. Regiões com altas cargas de consumo diurno, como a grande demanda de ar-condicionado em edifícios comerciais, em geral, possuem curvas de demanda em sincronia com a irradiação solar, justificando a utilização desta fonte de energia (KNOB *et al.*, 2006). A Figura 8 mostra, para uma curva de demanda típica, em um centro urbano, o efeito de redução de pico ao adicionar um pequeno número de módulos FV, para auxiliar na redução dos requisitos de carga da rede.



**Figura 8** - Curva de demanda e efeito de redução de pico ao adicionar módulos FV. **Fonte:** Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2008.

## 2.6. TECNOLOGIAS FOTOVOLTAICAS

O efeito fotovoltaico nos materiais semicondutores resulta na geração solar FV quando os fótons contidos na irradiação solar incidem sobre os mesmos (ex: Silício) com características elétricas (junção elétrica p-n ou p-i-n), podendo assim, a energia de uma fração desses fótons excitarem elétrons do semicondutor que por sua vez, poderão dar origem ao deslocamento dos elétrons e conseqüentemente o surgimento da corrente elétrica (RÜTHER, 2004a).

Grande parte das aplicações, segundo Rüter (2004), está ligada ao sistema de fachada e cobertura das edificações. No sistema de fachada, o gerador FV pode ser utilizado como revestimento de parede, painel para vãos e vidros; enquanto que, para o sistema de cobertura os mesmos são utilizados como telhado e no caso dos translúcidos favorecem a iluminação natural.

Os principais semicondutores utilizados para a produção das células FV são: silício monocristalino (c-Si), silício policristalino (p-si), o silício amorfo hidrogenado (a-Si:H ou a-Si), o HIT, baseado em silício cristalino com uma camada de silício amorfo, o telureto de cádmio (CdTe) e outros compostos relacionados ao cobre, índio e gálio, CIGS. A Tabela 1 apresenta uma perspectiva de crescimento para os diferentes tipos de células FV.

**Tabela 1** - Estimativa da participação no mercado de diferentes células FV até 2020.

Tipos de célula	2000	2010	2020
Silício cristalino e multicristalino	>90%	80-90%	50%
Silício de filme fino	10%	10%	30%
CdTe e CIS de filme fino	<1%	5%	15%
Novos dispositivos	n.d.	1%	5%
Produção (GWp)	0,3	3	n.d.

**Fonte:** JAGER-WALDAU, 2004 apud DASILVA, 2006.

Dentre a grande variedade de tecnologias disponíveis no mercado, o trabalho destaca principalmente as tecnologias de silício: silício amorfo (a-Si), silício monocristalino (c-Si), e silício policristalino (p-Si), pois são as mais utilizadas para produção de módulos FV (representam 99% do mercado) e também por serem as utilizadas neste estudo.

Devido ao crescimento do mercado FV, a necessidade de novas tecnologias tornou-se evidente para atender às exigências físicas e estruturais das instalações. Os materiais utilizados devem assim apresentar formas e tamanhos adequados para montagem, boa aparência estética aliada a um alto padrão de qualidade e confiabilidade, proporcionando grandes benefícios ao usuário, ao sistema elétrico e à sociedade (PHOTON INTERNACIONAL, 2008).

### 2.6.1. Silício monocristalino (c-Si) e Silício policristalino (p-Si)

A tecnologia do silício cristalino, tanto na forma monocristalina (c-Si), quanto na forma policristalina (p-Si), é a mais tradicional das tecnologias FV, sendo responsável por mais de 80% da produção mundial de módulos FV (MAYCOCK, 2003). Tal tecnologia consolidou-se no mercado mundial devido à confiabilidade e robustez. Porém, caracteriza-se pelo alto custo de produção e baixa resistência a elevadas temperaturas.

As células que utilizam o silício monocristalino (c-Si) passam por um processo denominado *Czochralski*, no qual o monocristal é “crescido” a partir de um banho de silício de alta pureza (99,9999%) em reatores sob atmosfera controlada e com velocidades de crescimento do cristal extremamente lentas (da ordem de cm/hora). Após as etapas complementares que envolvem a usinagem do tarugo, lapidação, ataque químico e polimento, o silício é dopado com impurezas do tipo P e tipo N e conectado em série para a obtenção do módulo fotovoltaico (RÜTHER, 2004).

Basicamente, as técnicas de fabricação das células policristalinas são similares às das células monocristalinas, porém, com um processo menos rigoroso. Como vantagem tem-se a produção com menor custo; em contrapartida, devido ao elevado número de pequenos cristais, as descontinuidades tornam este material menos eficiente em termos de conversão de energia (CASTRO, 2008).

Pesquisas têm sido realizadas para aumentar a eficiência e a confiabilidade dos módulos FV baseados em filmes finos, para que sejam competitivos com os modelos em silício cristalino tanto em termos energéticos, quanto econômicos.

### 2.6.2. Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si)

Devido à necessidade de se reduzir os custos e fazer da energia FV um recurso renovável mais competitivo em aplicações terrestres, foram lançados na década de 80 painéis solares de filmes finos de silício amorfo.

Uma célula de silício amorfo se difere das demais estruturas cristalinas por possuir um alto desordenamento dos átomos. O uso desta tecnologia tem apresentado grandes vantagens tan-

to nas propriedades elétricas, quanto no processo de fabricação. Segundo Rüter (2004), o processo de produção é realizado em temperaturas relativamente baixas, cerca de 300° C em plasma, o que possibilita a deposição destes filmes finos em diversos substratos de baixo custo, como o vidro, o aço inox e alguns plásticos.

Pelo fato do processo de fabricação ser relativamente simples, barato e de baixo consumo energético, o silício amorfo tem substituído os materiais utilizados nas fachadas e coberturas. Entretanto, esta tecnologia apresenta uma desvantagem que a princípio mostrou-se como uma limitação.

Devido ao efeito *Staebler-Wronski*, os painéis de a-Si sofrem um decréscimo intrínseco em seu desempenho, quando expostos à luz solar, que se estabiliza após um declínio em eficiência de 15 a 20%. Em aproximadamente 1000 horas de exposição ao sol, a desempenho das células estabilizam-se nos níveis da garantia do produto (RÜTHER, 2004).

Graças ao desenvolvimento tecnológico, científico e industrial empreendido, este problema foi minimizado. Hoje, a indústria de a-Si fornece painéis com eficiência estabilizada, ou seja, ela fornece o produto com uma potência de 10 a 15% maior do que a nominal para que após, aproximadamente, um ano, a potência esteja dentro dos parâmetros nominais.

Estudos realizados por Rüter (2001, 2004) relatam que os módulos de a-Si são uma ótima opção de tecnologia para sistemas interligados, integração com a edificação e utilização em climas quentes como no Brasil.

### 2.7. SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas FV podem ser implantados por meio de duas configurações distintas: isolados ou conectados à rede elétrica. Dentre as principais diferenças entre os sistemas, destacam-se a existência ou não de acumuladores de energia (baterias) e a orientação dos módulos FV.

Os sistemas isolados ou autônomos caracterizam-se pela necessidade de um acumulador de energia, no qual a energia gerada pelos módulos é armazenada e distribuída para os pontos de consumo (RÜTHER, 2004). Este armazenamento pode ser

feito por baterias quando se deseja utilizar aparelhos elétricos ou na forma de energia gravitacional quando se bombeia água para tanques em sistemas de abastecimento. Conforme Green (2003), o sistema de acumulação de energia é o grande responsável pelo alto custo da instalação, representando cerca de 30% do investimento total.

Em sistemas que utilizam os acumuladores (bancos de baterias), usa-se um dispositivo de gerenciamento, cuja função é controlar a carga e a descarga na bateria evitando possíveis danos à mesma. Geralmente, a instalação elétrica isolada é usada em sistemas em corrente CC. Caso o sistema opere em corrente alternada, é necessária a utilização de um inversor CC/CA (CRESESB, 2004).

Sistemas autônomos são normalmente utilizados para refrigeração, iluminação, utilização de eletrodomésticos, telecomunicações, bombeamento de água, entre outras cargas de baixa potência (ZAHEDI, 2006).

Os sistemas FV conectados à rede elétrica (SFCR) dispensam o uso dos armazenadores de energia. Em contrapartida, os sistemas FV descentralizados que possuem os acumuladores de energia, dependendo do dimensionamento de acordo com o qual foram projetados, podem desperdiçar uma parcela de geração de energia nos momentos em que estiverem completamente cheios. Deste modo, o custo diminui significativamente e o desempenho do sistema conectado à rede aumenta por ser uma tecnologia complementar ao sistema elétrico de grande porte ao qual está conectado (OLIVEIRA, 2002).

O meio físico para a implantação do sistema passa a ser o envelope da edificação, que de forma distribuída, fornece por meio da utilização do inversor uma tensão alternada compatível com a rede da concessionária local.

Desta forma, segundo Rütther (2004), os sistemas SFCR passam a ser produtores independentes de energia e assim, quando houver consumo de energia elétrica no horário de geração esta é utilizada, podendo ainda criar um excedente a ser repassado à rede se a oferta de energia for maior do que a demanda (*net metering*). Em caso contrário, quando não houver

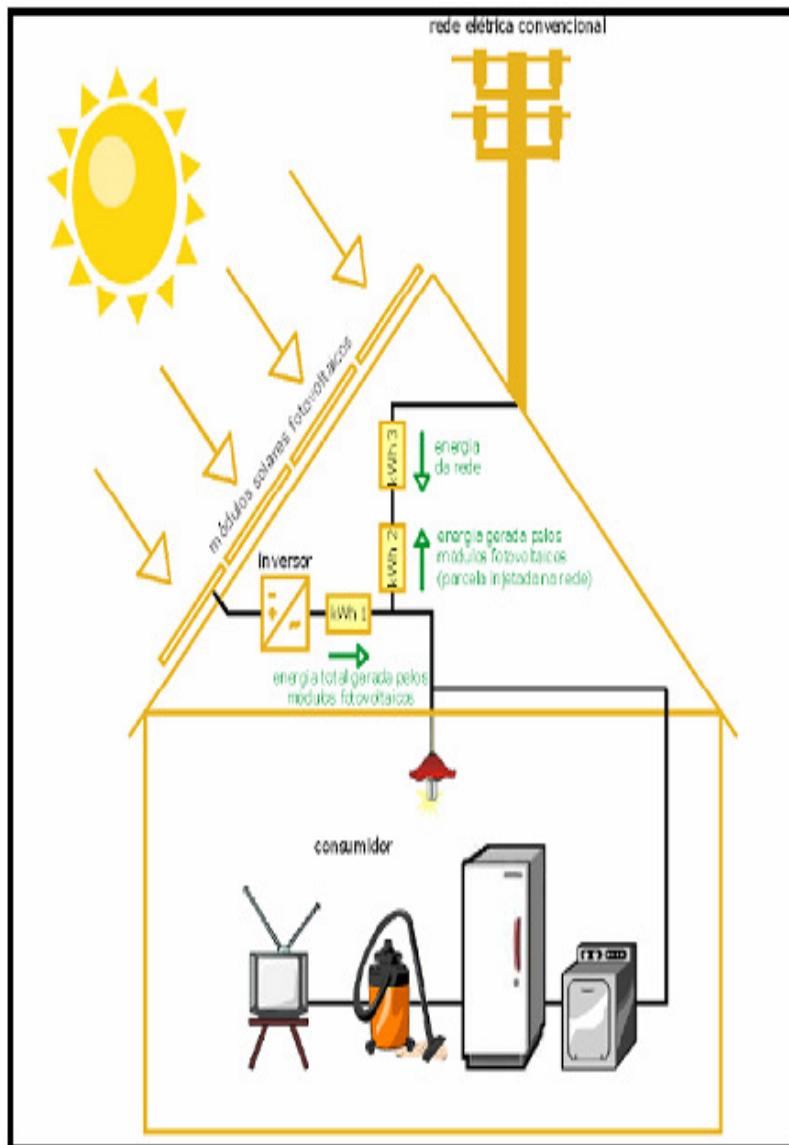
geração de energia FV, a rede é responsável por suprir os usos finais da edificação.

Em função das suas características peculiares, os sistemas (SFCR) são uma opção tecnicamente interessante por ser uma fonte geradora de energia nos horários de pico energético (BENEDITO *et al.*, 2008).

Como os módulos FV geram energia em corrente contínua, é necessário o uso dos conversores CC-CA ou inversores. Este equipamento eletrônico tem a função de converter a corrente contínua em corrente alternada de modo a atender as características e qualidade da rede de distribuição. As características mais importantes são a tensão, a corrente, a potência, a forma de onda, a frequência, o fator de potência e a distorção harmônica (RÜTHER, 2004).

Além dos componentes descritos acima, uma instalação solar FV é composta por vários itens incluindo fusíveis e disjuntores, diodos de proteção, cabos elétricos, terminais de proteção contra sobre tensões e descargas atmosféricas e caixas de conexão.

A Figura 9 apresenta um modelo solar FV integrado à cobertura de uma edificação interligada à rede elétrica. O relógio medidor 1 (kWh 1) mede a energia gerada pelo sistema solar fotovoltaico; o relógio medidor 2 (kWh 2) mede a energia gerada pelo sistema solar que é injetada na rede elétrica; o relógio medidor 3 (kWh 3) mede a energia recebida da rede elétrica.

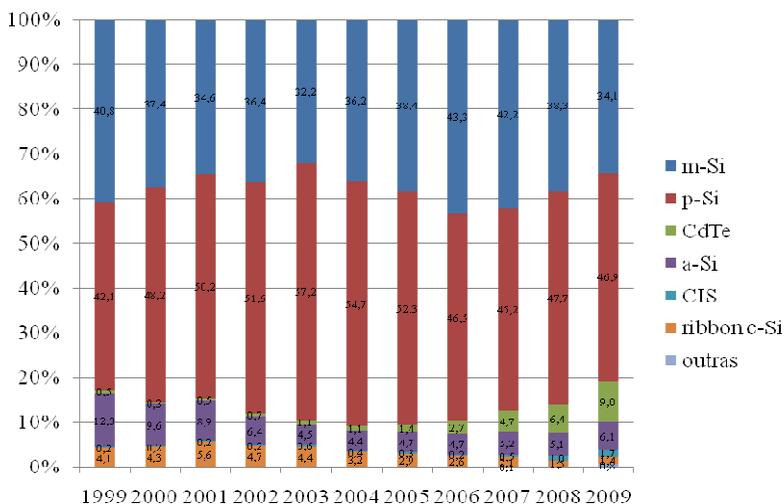


**Figura 9** - Diagrama esquemático de um sistema solar FV integrado à cobertura e interligado à rede elétrica. **Fonte:** Rüter, 2004 a.

Grande parte das edificações construídas em alguns países tem sido com o SFCR de distribuição de eletricidade, um

fenômeno diferente do tradicional, quando os empreendimentos são destinados, na maioria das vezes, ao atendimento isolado.

A participação do silício cristalino na fabricação dos módulos FV para a aplicação nos SFCR é predominante, mas nos últimos cinco anos está sendo possível notar uma tendência de crescimento na participação dos módulos de filmes finos conforme apresenta a Figura 10. Em 2009 houve um destaque no crescimento para a tecnologia do telureto de cádmio (CdTe), principalmente devido ao crescimento expressivo da produção do fabricante *First Solar*, líder do segmento deste tipo de produto (PHOTON INTERNATIONAL, 2010).

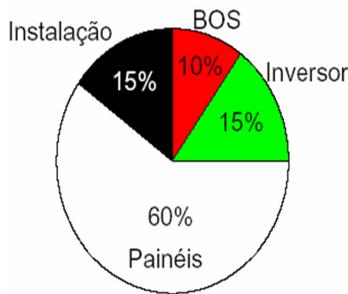


**Figura 10** - Percentual de participação no mercado FV para as tecnologias no período de 1999 a 2009. **Fonte:** Adaptado: PHOTON INTERNATIONAL, 2010.

A obtenção de energia elétrica por intermédio da tecnologia FV sido uma das alternativas mais promissoras para o suprimento da demanda de energia, pois ela gera eletricidade de forma distribuída, característica que difere da forma como se constitui o setor elétrico brasileiro.

### 2.8. VIABILIDADE ECONÔMICA PARA A GERAÇÃO FV

As instalações FV possuem um custo superior ao da energia fornecida de maneira convencional. Entretanto, estes custos vêm declinando continuamente devido ao aperfeiçoamento dos processos de fabricação, ao aumento da eficiência dos módulos, aos programas de incentivo, em especial o 1000 - *Roofs Program*, lançado pelo governo alemão no início da década de 90, aos métodos de instalação, podendo ou não ser conectados à rede, entre outros (MINTS, 2008; ERGE *et al.*, 2001). A Figura 11 apresenta uma distribuição dos custos referentes à instalação para sistemas residenciais interligados à rede e com potência de 2 kWp.



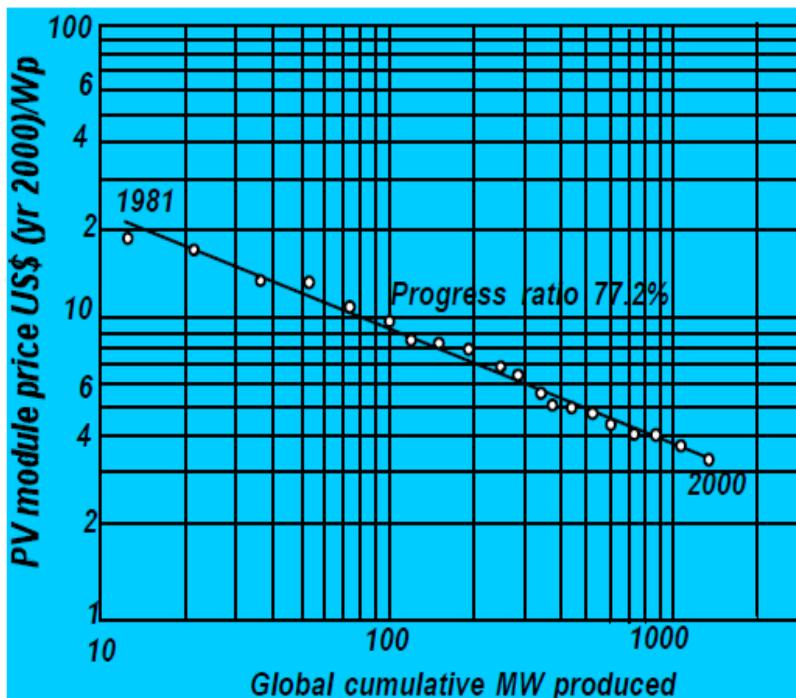
**Figura 11** - Distribuição dos custos referentes às instalações. **Fonte:** ENERGY PARTNERS, 2006.

A sigla BOS refere-se ao termo *Balance of Systems*, que designa todos os componentes complementares de um sistema solar FV. Dentre eles podem-se citar: os cabos, os conectores, as estruturas de fixação, os proteções, etc.

Para analisar e estimar a redução dos preços desta tecnologia, atualmente, utiliza-se o método da curva de aprendizado (*learning curves*) ou curva de experiência.

Este método baseia-se na observação empírica de que muitas tecnologias apresentam um declínio linear no preço em relação às vendas acumuladas quando plotado em um gráfico bi-logarítmico (MOOR *et al.*, 2003). O coeficiente angular desta linha é a relação de progresso (RP), definida como a relação de preço depois que as vendas acumuladas tenham dobrado. Na Figura 12 pode-se observar que a RP para os sistemas FV é em

torno de 77% (*ENERGY PARTNERS*, 2006). Isto equivale a dizer que cada vez que a produção acumulada dobre, os custos de produção caem em 23%.



**Figura 12** - Curva de aprendizagem para sistemas FV.  
**Fonte:** ENERGY PARTNERS, 2006.

Utilizando desta metodologia de análise foi realizado na Inglaterra um estudo para demonstrar os benefícios obtidos com as instalações FV, em principal, aquelas conectadas à rede elétrica. Considerando a modularidade, o uso dos módulos FV em substituição aos materiais de revestimentos como: os vidros, os telhados, os granitos, entre outros e, principalmente, os curtos prazos de instalação, associados à geração junto ao ponto de consumo, os edifícios solares apresentaram melhor desempenho econômico com relação aos das usinas geradoras convencionais (RÜTHER, 2004).

### 2.9. BENEFÍCIOS DOS SISTEMAS FV

Os benefícios atribuídos aos sistemas FV dependem da perspectiva sob a qual os mesmos são analisados. A indústria de eletricidade, por exemplo, valoriza o sistema quanto à qualidade da energia produzida e bens proporcionados à rede; já o setor de construção visa à estética e a funcionalidade dos módulos; enquanto que os governos e a própria sociedade objetiva promover o desenvolvimento sustentável desta tecnologia e sua autosuficiência.

Assim, a tecnologia FV possui inúmeros benefícios, que podem ser classificados segundo quatro categorias: elétricos, ambientais, socioeconômicos e arquitetônicos.

#### 2.9.1. Benefícios para o Setor Elétrico

Segundo Rütther (2004), as vantagens oferecidas pelos sistemas solares FV integrados às edificações urbanas e interligados ao sistema de distribuição são:

- Diminuição das perdas por transmissão e distribuição (T&D) de energia;
- Redução dos investimentos em linhas de transmissão e distribuição;
- Redução da exigência (superaquecimento) sobre transformadores, com consequente aumento da vida útil dos mesmos;
- Pode ser considerado um *just-in-time* pelo curto prazo de instalação, constituindo-se em uma boa ferramenta para prevenir erros associados ao planejamento centralizado;
- Possui um elevado fator efetivo de capacidade de carga (FECC). O FECC é uma medida da capacidade de crédito, ou seja, ele determina a capacidade do SFCR em reduzir o pico de demanda.

#### 2.9.2. Benefícios para o Setor Ambiental

O mais importante benefício ambiental proporcionado pela geração FV é a ausência de emissões de gases poluentes, de qualquer tipo, durante sua operação. Porém, a fabricação e pos-

terior disposição dos módulos e demais componentes do sistema causam emissões de gases precursores do efeito estufa, sendo que os principais esforços dos fabricantes estão focalizados no desenvolvimento de novos materiais e processos (WEA, 2004).

Outro aspecto a ser levantado é o tempo de recuperação do investimento energético utilizado na produção das placas. Isto é conhecido como *payback* energético, pois segundo estudos realizados, esta recuperação varia de 2 a 5 anos de uso, podendo ser em alguns casos ultrapassar a vida útil do equipamento, tornando a geração FV mais consumidora do que produtora (PNE, 2030).

### **2.9.3. Benefícios para o Setor Socioeconômico**

Podem-se mencionar os seguintes benefícios socioeconômicos (IEA PVPS, 2008):

- Incentivo à atividade econômica local, seja pela própria disponibilidade de energia, qualidade de vida, produtividade e pela criação de empregos;
- Redução das importações de combustíveis e proteção do mercado quanto à volatilidade de preços;
- Redução dos custos associados ao transporte e poluição que advém do uso de combustíveis fósseis;
- Potencialidade para fomentar a cooperação internacional, por meio dos programas e assistência aos países em desenvolvimento.

### **2.9.4. Benefícios para o Setor Arquitetônico**

Junto aos benefícios comuns a qualquer instalação FV à rede, a integração em edifícios oferece uma série de vantagens adicionais (RÜTHER, 2004):

- Edifícios solares FV não apresentam a necessidade de área física dedicada, uma vez que a área necessária já é ocupada pela edificação;

- Utilização como elementos de controle da iluminação ambiental, já que filtram a luz incidente, no caso das células FV de filme fino semitransparentes utilizadas em janelas transparentes;
- Substituição de materiais convencionais de acabamento como o vidro, o telhado, o granito.

### **2.10. O PAPEL DAS INSTITUIÇÕES DE ENSINO SUPERIOR (IES) RUMO AO DESENVOLVIMENTO**

O desenvolvimento da consciência ecológica em diferentes camadas e setores da sociedade mundial acaba por envolver também o setor da educação, a exemplo das Instituições de Ensino Superior (IES).

Na visão de Careto e Vendeirinho (2003) em Portugal, as Universidades e outras Instituições de Ensino Superior precisam praticar aquilo que ensinam. Enquanto as universidades são, frequentemente vistas como instituições estagnadas e burocráticas, outras instituições demonstraram ser capazes de, pelo menos, iniciar o caminho da sustentabilidade.

#### **2.10.1. Educação para o Desenvolvimento Sustentável**

O consumo descontrolado dos recursos naturais, a degradação do meio ambiente e o crescimento demográfico, passaram a exigir ações corretivas bem maiores que as preventivas.

Para Mayor (1998), a educação é a chave do desenvolvimento sustentável e auto-suficiente. A educação deve ser fornecida a todos os membros da sociedade, de tal maneira que cada um se beneficie de chances reais de se instruir ao longo da vida.

Um dos pilares do desenvolvimento sustentável é a educação ambiental que contribui para a compreensão fundamental da relação e interação da humanidade com o todo, com o ambiente e provoca uma ética ambiental pública a respeito da qualidade de vida e do equilíbrio ecológico, abrindo os olhos dos indivíduos e dos grupos sociais organizados para um desejo de participar da construção de sua cidadania (ZITZKE, 2002).

Isto é, construir um cidadão consciente de sua realidade socioambiental mediante a aquisição de diversos tipos de conhecimento. De uma maneira geral, as IES adquirem um encargo ativo e eficaz na predisposição das novas gerações para um futuro realizável e possível (FOUTO, 2002; KRAEMER, 2004).

### **2.10.2. Exemplos de IES Atuando na Sustentabilidade**

Com as restrições ambientais mais rigorosas, e a progressiva redução dos recursos naturais usados na matriz energética, o setor elétrico precisa encontrar saídas para a utilização da energia produzida.

Qualquer que seja a forma de conversão de energia: hidro-elétrica, eólico-elétrica, eólico-potencial, termo-elétrica, solar-elétrica, solar-térmica, solar-biomassa, etc; ou a fonte primária (águas dos rios, combustíveis fósseis, sol, vento, biomassa), há sempre uma maneira de se racionalizar a utilização dos recursos disponíveis. Com esse comportamento, adiam-se os investimentos, racionaliza-se o uso de recursos naturais e reduzem-se os impactos ambientais.

A energia elétrica, fundamental para as sociedades modernas, raramente é obtida (em particular em grandes quantidades) sem que o ambiente seja impactado. A crescente demanda de energia elétrica encontra, como principal barreira, a necessidade da conversão de formas primárias de energia em processos de transformação que agridem ou destroem a natureza (DOIG, 1999; PLASTOW, 2001).

É essencial que a sociedade esteja consciente e esclarecida sobre os impactos na natureza do uso da energia para seu conforto, lazer e desenvolvimento (CRESESB, 2006).

A Universidade Federal de Santa Catarina é um exemplo de tentativa da implementação de um SGA. Foi criada uma coordenadoria de Gestão Ambiental, ligada diretamente ao gabinete da reitoria, e, ainda, foi estabelecida uma política de gestão ambiental responsável.

Na prática, alguns programas propostos já estão em andamento. Foi desenvolvido, por meio de parceria com órgãos públicos estaduais, ONGs e associações, o Projeto Sala Verde. Esta atividade consiste em criar um espaço na instituição dedi-

cado ao delineamento e desenvolvimento de atividades de caráter educacional, tendo como uma das principais ferramentas a divulgação e a difusão de publicações sobre Meio Ambiente (RIBEIRO *et al.*; 2005).

Ainda no Estado de Santa Catarina aparece a Universidade Regional de Blumenau. A FURB é uma instituição comprometida com a proteção ambiental e com a economia dos recursos naturais, visando uma melhoria na qualidade de vida atual e futura (POLÍTICA AMBIENTAL DA FURB, 2006).

O Sistema de Gestão Ambiental da FURB é uma estrutura organizacional e de responsabilidades destinada a programar a política ambiental e os objetivos de gestão ambiental da FURB e é composto pela Coordenadoria do Meio Ambiente, Responsáveis e Agentes Ambientais (BUTZKE, PEREIRA E NOEBAUER, 2002).

A Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) também vem se empenhando em implementar um SGA (Sistema de Gestão Ambiental). Analisando o diagnóstico realizado a partir dos dados obtidos na UFRGS, foi constatada a existência de algumas iniciativas pontuais objetivando melhoras nos aspectos ambientais da universidade (RIBEIRO *et al.*; 2005).

### 2.10.3. Usos Finais de uma Instituição de Ensino

Em uma escola de maneira geral, considerando-se que não existam maquinários pesados e grandes sistemas de condicionamento de ar, o gasto com energia resulta na seguinte distribuição mostrada na Figura 13 para os usos finais e participações na fatura mensal de energia elétrica (SEMASP, 2009).



**Figura 13** - Usos finais de energia elétrica. **Fonte:** SEMASP, 2009.

Os sistemas de iluminação, que respondem pela maior parte dos gastos com eletricidade, requerem uma atenção especial para a adequação dos padrões de iluminação, em função

das tarefas visuais desenvolvidas dentro e fora das salas de aula (iluminação externa, pátios, quadras esportivas (SEMASP, 2009).

Para SEMASP (2009) a adoção de medidas administrativas que permitam um funcionamento adequado de uma unidade escolar é baseada em um detalhado conhecimento das instalações, no entendimento da cobrança das faturas, na análise e acompanhamento dos consumos e na realização de um cadastro de equipamentos e recursos.

Deste modo, deve-se buscar uma reeducação da população em geral, considerada como fortes aliadas para a divulgação da questão do uso racional da energia. O estreitamento entre professores e profissionais da área técnica poderá ser o elo que permita que o espaço escolar se torne um local de reflexão e adequação da informação tecnológica ao público leigo e principalmente de elaboração de abordagens interdisciplinares consciente com a realidade vivida pelos alunos (PCNEM, 2005).



### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da metodologia proposta para realização do trabalho requereu, inicialmente, um levantamento de dados históricos do consumo de energia médio diário do objeto de análise (Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG) durante o período de 16 anos.

Além disso, foi desenvolvido um estudo das plantas arquitetônicas das edificações e a partir deste estudo, foi avaliado o potencial de geração de energia solar FV de um sistema hipotético conectado à rede elétrica, baseado em três tecnologias, e integrado às edificações dos prédios em questão.

A caracterização e a localização das edificações delimitaram a extensão da análise proposta, assim como a coleta de dados históricos. Como ferramentas computacionais de auxílio foram utilizados os programas de *Auto-Cad*, *Excel*, *Ecotec* e o *Radiasol* de simulação das médias diárias mensais e anuais de radiação solar no plano do módulo, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, 2002).

##### 3.1.1. Fluxograma

No trabalho foram realizadas várias etapas para atingir os objetivos propostos, as etapas são mostradas no fluxograma da Figura 14.

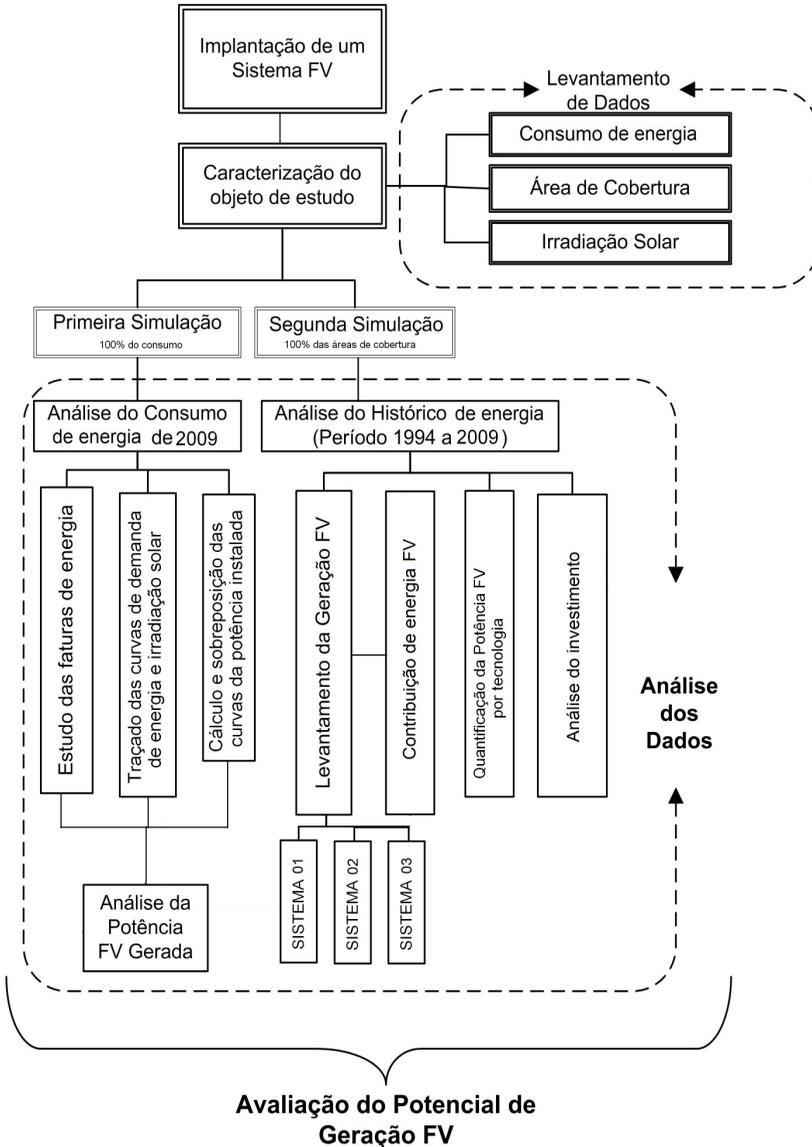
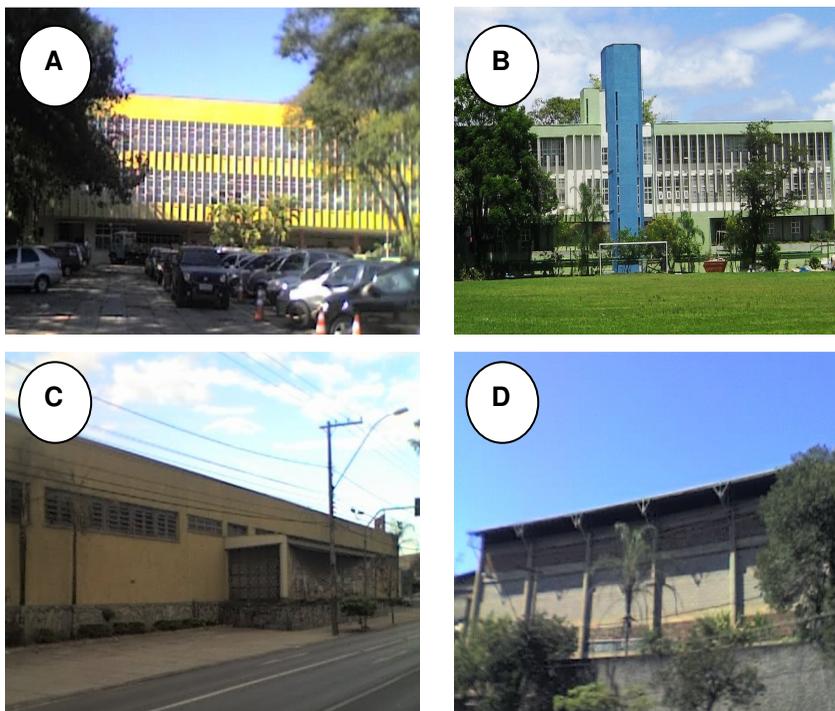


Figura 14 - Fluxograma da estrutura do trabalho.

### 3.2. OBJETO DE ESTUDO DA PESQUISA - Campus I, CEFET-MG

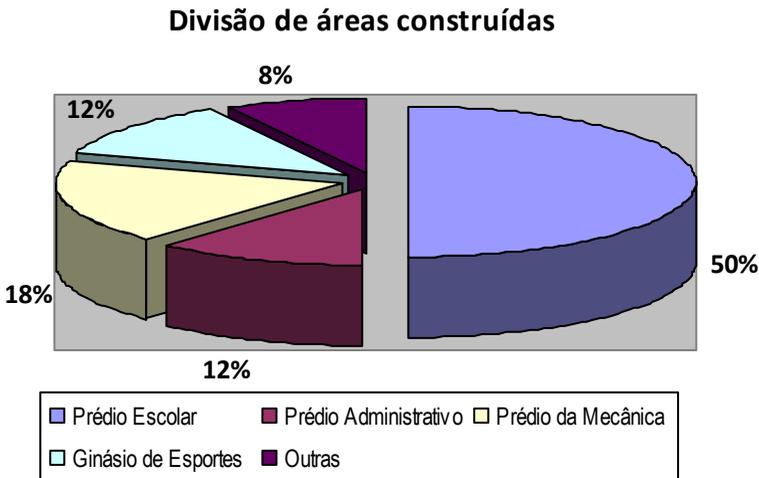
O Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG), Campus I, objeto de estudo desse trabalho, possui uma área de terreno aproximada de 30.000 m<sup>2</sup> e uma área construída de 40.000 m<sup>2</sup> constituída de quatro edificações, situado na região oeste de Belo Horizonte - MG, onde predominam construções arquitetônicas de caráter horizontal. A Figura 15 apresenta as fachadas principais das quatro edificações.



**Figura 15** - Fachadas Principais das edificações: A - Prédio Escolar. B - Prédio Administrativo. C - Prédio da Mecânica. D - Ginásio de Esportes. **Fonte:** Acervo Digital da Instituição, 2008.

As edificações são datadas do ano de 1958 a 1985, podendo-se atribuir a elas uma importância local por fazerem parte da estruturação arquitetônica de uma instituição tradicional e histórica de Belo Horizonte. O Prédio Escolar é uma construção atípica, compreendendo toda a extensão do quarteirão, com linhas retas, horizontais e bem visíveis em diversos pontos de sua área de localização.

O Prédio Escolar é o mais representativo com relação ao total de área construída, representando 50% deste total. A divisão de áreas construídas por edificação é mostrada na Figura 16.



**Figura 16** - Divisão de áreas construídas do Campus I. **Fonte:** CEFET-MG.

Para as edificações em estudo, as atividades desenvolvidas são de ensino, pesquisa e extensão. Os espaços são predominantemente salas de aula convencionais, laboratórios e oficinas de aulas práticas. A maior demanda de energia elétrica se concentra nas cargas de iluminação artificial.

Na verificação do consumo por uso final de energia elétrica, a iluminação geral do Campus corresponde a aproximadamente 61% do total da energia elétrica gasta nas edificações (SILVA, 2006). Os resultados obtidos por este estudo estão resumidos na Figura 17.



**Figura 17** - Divisão do consumo de energia por uso final. **Fonte:** SILVA, 2006.

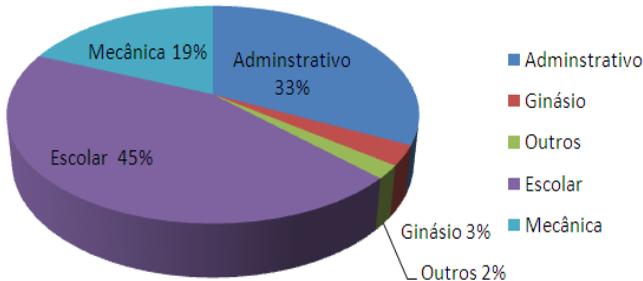
As edificações apresentam, no máximo, quatro pavimentos, com acesso de rampas e escadas, sendo que apenas o Prédio Administrativo possui elevador e uma caixa d'água na cobertura.

As quatro edificações possuem características bem definidas sendo estas descritas a seguir:

- Prédio Principal: apresenta o maior número de ocupantes (alunos, professores e funcionários), por possuir o maior número de salas de aula convencionais, as quais são utilizadas nos três turnos do dia;
- Prédio Administrativo: apresenta poucos aparelhos de ar condicionado, um elevador central, um auditório, uma biblioteca;
- Ginásio de Esportes: utilizado somente para aulas de educação física e, esporadicamente, para algum evento escolar;
- Prédio da Mecânica: composto por alguns laboratórios, duas coordenações de curso e algumas salas de aula para grupos reduzidos de alunos.

O levantamento da divisão do consumo médio mensal de energia elétrica por edificação e por tipo de usos finais (SILVA, 2006) é apresentado na Figura 18.

### Consumo de Energia Elétrica por Edificação



**Figura 18** - Divisão do consumo de energia por edificação. **Fonte:** SILVA, 2006.

Os dados de consumo de energia elétrica apresentados nas Figuras 16 a 18 são referentes ao valor médio de consumo de energia elétrica. Estes dados foram coletados através de medição, as quais foram levantadas e avaliadas ponto a ponto (SILVA, 2006).

Através da imagem aérea mostrada na Figura 19 torna-se possível visualizar a densidade habitacional em torno das edificações selecionadas nesse estudo, bem como a inexistência de área de sombreamento de edificações vizinhas e vegetações altas que poderiam interferir na geração solar FV.



**Figura 19** - Vista aérea do CEFET-MG - Campus I. **Fonte:** Acervo Digital do CEFET.

Pelo fato do custo do sistema solar de geração FV ainda ser elevado, priorizou-se a sua aplicação e utilização nas edificações que possuem localização e condições favoráveis. Isto, com o objetivo de agregar o máximo de valor à geração, de forma eficiente e, almejando a redução generalizada dos custos do sistema FV. Na Figura 20 é mostrada uma vista do Campus I - CEFET-MG.



**Figura 20** - Vista do Campus I. **Fonte:** Acervo Digital, 2008.

### 3.3. LEVANTAMENTO DOS DADOS

Inicialmente, a partir do levantamento de dados foi adquirido material referente ao consumo de energia elétrica, as áreas de cobertura e irradiação solar de Belo Horizonte - MG. Os setores de consulta da Instituição foram: departamento administrativo, arquivo morto, prefeitura do Campus I, Centro de Pesquisa em Energia Inteligente e assessorias de projetos e planejamento as quais cederam às documentações, dados e as informações existentes e pertinentes para a realização desse trabalho.

#### 3.3.1. Consumo de Energia das Edificações

A partir da pesquisa documental e com base nas contas de energia elétrica, foi analisado o perfil histórico de consumo das edificações em estudo, bem como o tipo de tarifação e os parâmetros de medição.

O estudo levou em consideração inicialmente o consumo de energia elétrica mensal durante 16 anos (janeiro de 1994 a dezembro de 2009) registrado nas contas de faturamento de energia elétrica. Estes dados foram obtidos do demonstrativo apresentado na fatura de energia elétrica da concessionária CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais).

Mediante ao levantamento desses dados foram selecionados os valores médios de consumo mensal (FHP) somados aos valores de consumo de 18 às 21 horas (HP).

Para o cálculo da geração solar FV foi considerado o consumo médio diário total de energia elétrica de janeiro a dezembro de 2009.

Em consulta à prefeitura do CEFET-MG (responsável pela execução de projetos e reparos na instituição) e à concessionária de energia elétrica (CEMIG), foram identificados o medidor e o alimentador que atende as edificações. A partir desta identificação foram solicitados os dados de memória de massa, necessários para a verificação do comportamento da demanda de energia média diária e mensal.

O sistema de aquisição dos dados do medidor e do alimentador é automático e registra os valores médios de 15 em 15 minutos.

O alimentador <sup>1</sup> BHGT 23, que atende à instituição, encontra-se em uma área de zona urbana mista que contempla edificações residenciais, comerciais e de serviços.

A memória de massa do alimentador foi solicitada à concessionária CEMIG, com o intuito de verificar o comportamento da demanda horária das cargas, assim como a determinação dos horários de maior e menor consumo de energia elétrica.

Para determinar os horários de maior e menor consumo elétrico da região atendida por este alimentador, foram levantadas as curvas de demanda média diária e o perfil de carregamento nos dias úteis, sábados, domingos e feriados. Essa análise justifica-se, uma vez que o carregamento do alimentador no final de semana e feriados é bem inferior ao dos dias úteis.

A partir da análise, verificou-se que o setor no qual está inserido esse alimentador, possui um pico noturno, mesmo estando localizado em um setor de característica misto, atingindo seu valor máximo por volta das 19 horas. Esse horário, corresponde ao horário da demanda de pico do contrato feito pela Instituição com a CEMIG, que é de 18h00min às 21h00min. Sabe-se que, esse horário de pico se justifica mais para as áreas residenciais, em que durante o dia os consumidores permanecem a maior parte do tempo fora de suas residências só retornando à noite.

A grande contribuição para esse fato é a utilização dos chuveiros elétricos nas residências, sendo esse normalmente responsável pela maior parcela de demanda de energia elétrica, nos setores que possuem grande número de edificações residenciais verticais, como é o caso das grandes cidades.

Segundo Jardim (2007) é importante determinar se o perfil do alimentador é diurno ou noturno com a finalidade de verificar se o estudo proposto é interessante no viés da concessionária de energia pública local com relação à possibilidade do gera-

---

<sup>1</sup> Alimentador de distribuição: parte de uma rede primária de uma determinada área de uma localidade que alimenta diretamente ou por intermédio de seus ramais, transformadores de distribuição e /ou consumidores.

dor solar FV poder dar suporte de carga a alimentadores urbanos.

Ressalta-se ainda que, o alimentador BHGT 23 que abastece o campus I, atende outras edificações inseridas na região de sua abrangência, e que, se encontram próximas ao objeto de estudo.

O período de tempo analisado foi o ano de 2009, coincidindo com o mesmo período cronológico do cálculo da geração do sistema FV hipotético.

Os estudos do comportamento do medidor local da instituição por intermédio de memória de massa, juntamente com o levantamento do consumo de energia elétrica, apresentado nas faturas, foram importantes para o conhecimento da curva representativa do perfil diário típico da demanda das edificações.

Com os dados da memória de massa do medidor foram gerados gráficos dos dias úteis das semanas típicas e dos dias de maior demanda energética que demonstram o perfil horário diário da demanda ativa energética.

Após essa etapa, foram realizadas duas simulações para a avaliação do potencial de geração FV. O primeiro estudo traçou as curvas com os dados da memória de massa, nesse caso, levando em consideração meses e dias consecutivos que apresentaram maior valor de  $G_{poa}$  ou semelhança a um dia de irradiação solar tendo como característica dia limpo. O segundo estudo apresentou a geração solar FV de duas tecnologias diferentes utilizando toda a área de cobertura disponível.

Ressalta-se ainda, que a Instituição não dispõe de dados de consumo de energia específico para cada edificação, portanto, as análises foram realizadas sobre o consumo médio de energia elétrica total do Campus I.

### **3.3.2. Áreas de Cobertura das Edificações**

Inicialmente, não foi considerado o percentual de sombreamento, uma vez que a área do Campus encontra-se em uma região sem construções verticais e vegetações altas, que poderiam apresentar sombra às edificações.

Assim sendo, foram analisadas as plantas de cobertura das edificações em questão. Essa análise levou em consideração a área disponível para a instalação dos módulos FV, a inclinação e a orientação dessas coberturas.

As plantas arquitetônicas foram cedidas pela Assessoria de projetos e infra-estrutura da instituição. Os arquivos disponibilizados foram revisados mediante a um levantamento topográfico *in-loco*, para atualização das plantas disponíveis, tendo assim, as dimensões reais das edificações.

O quantitativo das áreas de cobertura construídas foi realizado mediante a um levantamento em planta. Neste quantitativo, levou-se em consideração a área de cobertura construída existente, assim como analisadas apenas as áreas consideradas disponíveis à integração dos sistemas FV, sendo subtraídas as áreas de caixas d'água e de elevador. Houve a preocupação da não interferência na questão estética das edificações e nos aspectos econômicos.

Para a edificação do Prédio Administrativo (B) foi realizado um estudo simplificado de sombreamento global, com simulações ao longo do ano, utilizando o programa *Ecotect* do fabricante *Autodesk*, no qual, por meio de um modelo tridimensional foi delimitado as áreas onde não seria viável a implantação dos módulos FV.

As áreas de cobertura foram quantificadas para duas situações de estudo. Primeiramente, considerando o cálculo de geração de energia solar FV para suprir a demanda de energia média diária total (ano base de 2009) da Instituição e, posteriormente, ocupando toda a área útil disponível, para que, caso houvesse um excedente, este seria disponibilizado para a rede elétrica pública local.

A Figura 21 apresenta a planta de cobertura das edificações. Nesta, foram destacadas, o posicionamento do norte e em forma de hachuras, as áreas para integração dos sistemas FV.



**Figura 21** - Planta de áreas de cobertura das edificações - Campus I  
**Fonte:** CEFET- MG.

A Figura 22 apresenta uma vista da extensão de áreas, que poderiam ser aproveitadas na implantação dos módulos para geração solar FV.



**Figura 22** - Vista das edificações do Campus I. **Fonte:** Acervo Digital do CEFET-MG.

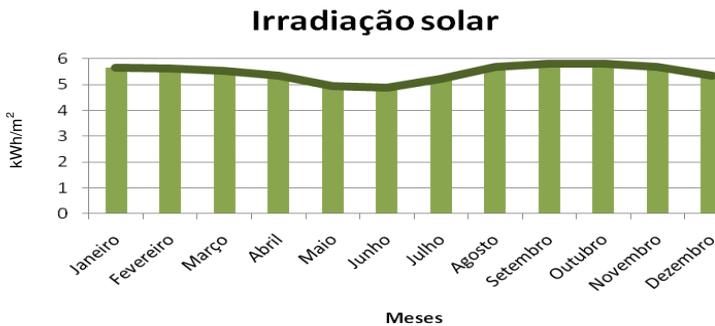
### 3.3.3. Irradiação Solar de Belo Horizonte

Analisando-se as médias anuais de irradiação difusa, direta, global horizontal e global, na inclinação da latitude média

(Wh/m<sup>2</sup>/dia) da cidade de Belo Horizonte (Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2006) e, comparando-as com todas as capitais brasileiras verificaram-se altas médias, as quais merecem atenção, quando da aplicação da energia solar. Atualmente, devido a esse fato, a cidade de Belo Horizonte destaca-se a nível nacional quando se trata da utilização dos sistemas solares de aquecimento.

Inicialmente, foi fornecida ao programa *Radiasol* a informação da irradiação solar global diária sobre a superfície com a correspondente latitude e ângulo azimutal<sup>2</sup> para realização dos cálculos.

A cidade de Belo Horizonte, localizada na latitude 19°33' sul e longitude 43° oeste, apresenta o valor médio de irradiação solar diária no plano horizontal em torno de 5,352 kWh/m<sup>2</sup>/dia, obtido na simulação do programa *Radiasol* com os valores médios de irradiação coletados no projeto *SWERA (Solar and Wind - Energy Resources Assessment)*, como mostra a Figura 23.

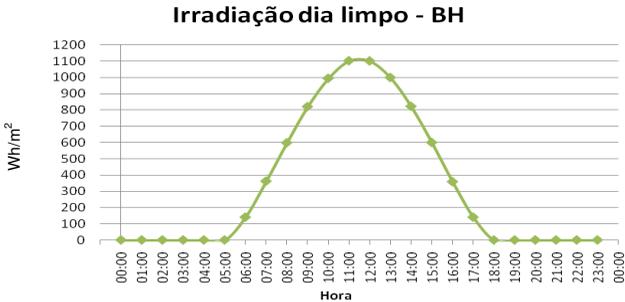


**Figura 23** - Gráfico dos valores da irradiação média na horizontal.

**Fonte:** *Radiasol*, 2009.

Utilizando também o programa *Radiasol* foi selecionada uma curva de irradiação de um dia limpo, caracterizada como “sino,” que pode ser visualiza na Figura 24.

<sup>2</sup> Ângulo azimutal de uma superfície é denominado como sendo o parâmetro de direcionamento do painel em relação ao movimento diário leste-oeste do sol, que é o ângulo entre o norte geográfico e a projeção da reta normal à superfície no plano horizontal.



**Figura 24** - Gráfico de um dia limpo para a cidade de Belo Horizonte. **Fonte:** *Radiasol*, 2009.

Para os meses de Março a Junho de 2009 foi gerado pelo programa *Excel* 120 curvas, no intervalo de 15 em 15 minutos, que retratam o comportamento médio diário de irradiação solar.

### 3.4. DISPOSIÇÃO DOS MÓDULOS FV

As localizações e orientações das edificações foram observadas para se proceder ao levantamento das inclinações e orientações dos sistemas FV, sabendo-se que o rendimento do gerador FV varia de acordo com a intensidade da irradiação incidente que é função da orientação e inclinação dos módulos.

Com base nos dados de irradiação solar, orientação e disposição dos módulos foram realizadas duas simulações (primeiro e segundo caso) e efetuado o estudo da estimativa do potencial de geração solar FV do sistema hipotético proposto.

#### 3.4.1. Orientação e Inclinação dos Módulos FV

Considera-se, para uma maior geração do sistema FV uma inclinação igual à latitude local. Desta forma, a determinação da média mensal do total diário da irradiação solar incidente no plano de 20 graus e orientado, considerando o desvio azimutal dos módulos ( $\alpha$ ) de -12 graus, em relação ao norte verdadeiro foi definido o  $G_{POA}$  de 5,632 kWh/m<sup>2</sup>/dia pelo programa *Radiasol*.

Realizaram-se dois estudos para as edificações, com o objetivo de avaliar o potencial de energia FV. No primeiro estudo, foram analisados os módulos com inclinação igual à latitude local. No segundo estudo, os módulos na horizontal. E, finalmente,

para o Prédio da Mecânica foi considerada também, a inclinação de 33 graus devido à estrutura já existente no telhado.

Na segunda simulação e para os dois tipos de tecnologia selecionada, os módulos FV foram distribuídos na cobertura das quatro edificações, utilizando-se o programa *AutoCAD*, considerando suas respectivas dimensões reais, a fim de quantificar o número de módulos que poderiam ser colocados na mesma.

### 3.5. SIMULAÇÕES DO POTENCIAL DE GERAÇÃO FV

Para quantificar a irradiação incidente sobre o plano dos módulos FV utilizou-se o programa *Radiasol*, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, 2002). Este programa considera a localização geográfica, pela latitude e longitude, e a inclinação dos módulos em relação ao norte geográfico. Este programa foi calibrado com os valores de irradiação média diária mensal pelo Projeto SWERA (PEREIRA *et al.*, 2006) (2007).

No total foram simulados, sete ângulos de inclinação para o desvio azimutal ( $\alpha$ ) de zero e -12 graus, com o intuito de verificar a influência  $G_{poa}$ . Utilizou-se o programa *Radiasol* verificar o valor que melhor atendesse à integração com a arquitetura existente e que não oferecesse perdas significativas no potencial de geração FV como mostra a Tabela 2.

**Tabela 2** - Ângulo de inclinação ( $\beta$ ) X média anual do total diário de irradiação solar.

Ângulo $\beta$ (graus)	0°	10°	15°	20°	25°	33°	90°
Irradiação (kWh/m <sup>2</sup> /dia) para $\alpha = -12^\circ$	5,352	5,360	5,417	5,632	5,448	5,394	3,300
Irradiação (kWh/m <sup>2</sup> /dia) para $\alpha = 0^\circ$	5,352	5,364	5,424	5,655	5,458	5,406	3,298

**Fonte:** *Radiasol*, 2009.

O valor da potência a ser instalada no sistema FV ( $P_{cc}$ ) foi obtido em função do consumo de energia médio diário das edificações (E), do ganho por irradiação incidente no plano do módulo ( $G_{poa}$ ) e do rendimento do sistema inversor e conexões (R),

cujo valor está situado entre 0,7 e 0,9, sendo adotado neste estudo o valor de 0,8. (Equação 1).

$$P_{cc} = \{[(E / G_{poa})] / R\} \quad (\text{Eq.1})$$

Onde:

$P_{cc}$  = potência média necessária em corrente contínua ( $kW_{p_{cc}}$ );

$G_{poa}$  = ganho por irradiação solar: médio mensal do total diário ( $kWh/m^2/dia$ );

$E$  = consumo médio diário durante o ano ( $kWh/dia$ );

$R$  = rendimento ou eficiência do sistema inversor e conexões.

Para de estimar o valor da geração FV de energia elétrica dos sistemas que foram selecionados utilizou-se a seguinte fórmula (Equação 2), obtida através de Rüther.

$$E = [(A \times E_{ff} \times G_{poa} \times R) / 100] \quad (\text{Eq.2})$$

Onde:

$A$  = área total do sistema ( $m^2$ );

$E_{ff}$  = eficiência de conversão da tecnologia FV utilizada, (potência instalada/área do módulo.  $G_{poa}$ , em %);

$R$  = rendimento do sistema igual a 0,8;

$E$  = energia gerada pelo sistema FV ( $kWh/dia$ ).

Foram consideradas inicialmente nas simulações três tecnologias com suas respectivas eficiências de conversão FV e características técnicas e físicas.

A escolha da tecnologia dos módulos solares FV foi realizada considerando o silício amorfo (a-Si) que possui uma menor eficiência e o silício policristalino e monocristalino (p-Si e c-Si), sendo esse considerado tradicional no campo das aplicações integradas às coberturas das edificações, em vários países do mundo. Essas três tecnologias possuem grande aceitação no mercado mundial e apresentam aplicações em alguns sistemas experimentais no Brasil.

A tecnologia do silício policristalino apresenta uma eficiência maior do que a tecnologia do silício amorfo, de maneira que, para ela suprir a demanda diária de energia elétrica da Instituição, necessitaria de uma menor área para implantação destes módulos FV.

Os módulos que foram selecionados para este estudo, foram os de silício monocristalino e policristalino (c-Si e p-Si) e silício amorfo (a-Si) com potências nominais de 120 W, 205 W e 144 W, respectivamente.

Para o estudo das tecnologias foram traçados três sistemas. A Tabela 3 apresenta as tecnologias dos módulos para os cálculos que serão apresentados nos resultados, assim como o fabricante, o modelo, a eficiência, a potência e a área dos mesmos.

**Tabela 3** - Características das tecnologias FV selecionadas.

Sistema	Tecnologia	Fabricante	Modelo	Eficiência (%)	Potência (W)	Área (m <sup>2</sup> )
1	a-Si	Bekaert ECD Solar Systems	Uni-Solar	6,3	144	2,26
2	c-Si	Alfasolar	120 M	13,9	120	0,86
3	p-Si	Kyocera	KD205 GX-LP	13,8	205	1,48

**Fonte:** Dados dos fabricantes, 2009.

Sabendo-se que os módulos são etiquetados nos padrões de testes normais (*STC*) a uma temperatura de 25°C, 1,5 A.M para 1000W/m<sup>2</sup> e, considerando que as tecnologias de silício monocristalino (c-Si) e silício policristalino (p-Si) dependem da temperatura de operação da célula, e que cada módulo possui um coeficiente de temperatura diferente, foi necessário calcular novamente o coeficiente de operação para uma temperatura de operação dos módulos (*NOCT*) de 45°C.

Para o cálculo da nova eficiência, considerando a variação desta com a temperatura ( $E_{ff\ NOCT}$ ), obteve-se assim um novo valor de  $\Delta E_{ff}$  (Equação 3).

$$\Delta E_{ff} = (NOCT - STC) / TCO_{eff} \quad (Eq.3)$$

Onde:

$TCO_{eff}$  = coeficiente de temperatura sobre a potência do módulo;

**STC** = condição padrão de teste a 25°C;

A equação 4 foi utilizada para obter o novo valor da eficiência considerando as questões de temperatura ( $E_{ff\ NOCT}$ ).

$$E_{ff\ NOCT} = C_{STC} \{ [100 - (I \cdot TCO_{Eff} \cdot \Delta T)] / 100 \} \quad (Eq.4)$$

A Tabela 4 apresenta as eficiências das tecnologias selecionadas no estudo, considerando a temperatura de 25°C para a temperatura padrão e a temperatura média de operação de 45°C. É importante observar que a tecnologia do silício amorfo (a-Si) independe da temperatura de operação das células, sendo que não possuem coeficientes de temperatura negativos e, portanto, não necessita de correção de temperatura (SALAMONI, 2004).

**Tabela 4** - Valores das eficiências considerando uma temperatura média de operação de 45°C.

Tecnologia	Fabricante	$TCO_{Eff}$ (%/°C) fabricante	NOCT (°C) (selecionada)	$E_{ffNOCT}$ (%)
c-Si	Alfasolar	-0,40 <sup>4</sup>	45	12,42
p-Si	Kyocera	-0,40 <sup>5</sup>	45	10,67

**Fonte:** Adaptada de Salamoni, 2004.

Nos cálculos para avaliação da geração de energia FV foram utilizados os valores considerando a temperatura de operação de  $E_{ffNOCT}$  já corrigida para 45°C.

Deste modo, utilizando a metodologia descrita acima, foram quantificados o número de módulos FV e, em seguida, a partir dos dimensionamentos, estimou-se o potencial de geração FV para os sistemas. Assim foi verificada qual a contribuição prevista para cada caso estudado.

A definição de sistemas diferentes foi importante para conhecer qual a opção mais conveniente do ponto de vista da avaliação proposta e da contribuição no suprimento de energia elétrica convencional, apresentando uma maior ou menor parcela do potencial de geração FV.

As duas simulações do sistema FV foram realizadas com base em uma análise mensal e diária, comparando-se valores

diários da curva de demanda média com a curva geração de potência FV média.

O sistema de geração hipotético proposto para a avaliação do sistema FV seria composto de módulos, inversores de corrente CC para CA, medidores, cabos para conexão e sistema de fiação.

### 3.6. AVALIAÇÃO ECONÔMICA

Para a avaliação econômica foi realizado um estudo simplificado do investimento para os três sistemas FV propostos no estudo com o objetivo de verificar a viabilidade financeira atual e futura para a implementação dos sistemas de geração solar FV que foram levantados na simulação considerando 100% da área de cobertura disponível das edificações.

A análise considerou apenas o valor inicial de aquisição dos sistemas de geração FV e da estimativa do tempo de retorno pelo cálculo do valor presente líquido do investimento e da receita de cada tecnologia para a geração.

Para os sistemas interligados à rede elétrica pode haver vários tipos de medição e tarifação de energia proveniente da geração FV.

Os modelos de sistema de preços para o estudo proposto foi primeiramente o *net-metering* e o *feed-in tariff*, que já são utilizados em alguns países que já consagraram essa nova tecnologia de geração distribuída.

Na análise da viabilidade econômica no modelo *net-metering*, preço do kWh gerado pelo sistema FV igual ao adquirido pela concessionária de energia, o tempo de retorno do investimento considerou a taxa interna de retorno TIR ao investidor como sendo de 7% ao ano e dois cenários de reajuste tarifário da energia convencional de 4% e 7% ao ano, para um período de 25 anos (RÜTHER, SALAMONI *et al.*, 2008).

O valor futuro da economia proporcionada pelos sistemas propostos no estudo e o saldo devedor foi calculado conforme Santos, 2009, utilizando para a análise a equação 5.

$$F = (P \cdot (1+i)^n) \quad (\text{Eq.5})$$

Onde:

**F** = Valor futuro;

**P** = Valor presente;

**i** = taxa de crescimento (TIR = 0,07; reajuste tarifário anual de 0,04 e 0,07);

**n** = número de anos até o ano futuro (25).

### 4. RESULTADOS

#### 4.1. INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta os resultados e as discussões sobre a avaliação do potencial de geração de energia solar FV obtido para as edificações selecionadas do CEFET-MG, Campus I.

De acordo com a metodologia, foram calculados o consumo de energia elétrica e as áreas de cobertura disponíveis de quatro edificações para integração dos módulos solares que compõem o sistema FV hipotético proposto.

Para as edificações estudadas e, considerando os dois estudos realizados, foram calculados os valores mensais de geração solar FV para suprir a demanda de energia do CEFET-MG, Campus I, considerando somente as áreas de coberturas para a implantação de três tipos de tecnologias atualmente disponíveis no mercado.

Foram considerados dois casos: o primeiro considerando a instalação dos módulos solares FV para suprir 100% do consumo de energia elétrica média diária total com base no ano de 2009.

O segundo caso simulou a integração dos módulos em 100% das áreas disponíveis na cobertura, podendo gerar um excedente para a rede pública local, quando a demanda for menor que a geração de energia FV.

As condições reais das edificações do Campus I foram consideradas no estudo e os módulos FV selecionados foram orientados para o norte, considerando que, para a latitude local de Belo Horizonte a opção de inclinação dos módulos a 20 graus atende as condições ideais para um maior aproveitamento de irradiação solar.

Outra opção estudada foi com os módulos na horizontal, para atender uma melhor adequação arquitetônica de algumas coberturas e uma menor contribuição de sombreamento de um sistema, se opondo a outro sistema na sua vizinhança dos módulos de 33 graus, devido à inclinação já existente no mesmo.

### 4.2. PRIMEIRO CASO: SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FV PARA SUPRIR 100% DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA, UTILIZANDO-SE TRÊS TECNOLOGIAS

#### 4.2.1. Análise do Consumo de Energia Elétrica das Edificações

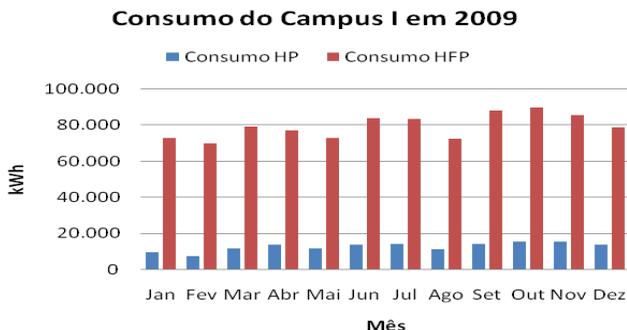
Verificou-se que toda a energia consumida pela Instituição é proveniente da CEMIG, não sendo utilizada nenhuma outra fonte de alimentação externa ou mesmo interna como *backup*, emergência ou mesmo uma fonte para suprir ou minimizar o consumo de energia no HP.

As tarifas de energia elétrica se dividem em tarifa monômnia e binômnia. A monômnia é a tarifa de fornecimento de energia elétrica constituída por preços aplicáveis unicamente ao consumo de energia elétrica ativa e a tarifa binômnia (convencional, horo-sazonais: Verde e Azul) é a tarifa que apresenta preços do consumo de energia elétrica ativa (Wh) e a demanda faturável (W).

Tomando como base a conta de energia elétrica emitida pela concessionária CEMIG, o Campus I do CEFET-MG se enquadra na classificação comercial, com tarifa binômnia do tipo horo-sazonal Verde, com aplicação de tarifa diferenciada para o consumo de energia elétrica e uma tarifa única para a demanda de potência.

A Figura 25 apresenta as variações do consumo de energia médio mensal para os doze meses do ano de 2009. Verifica-se que o maior consumo ocorreu entre os meses de setembro a novembro e o menor consumo nos meses de fevereiro e agosto. É interessante destacar que não houve uma relação direta do consumo com as estações do ano, pois é de se esperar um consumo maior nos meses de verão e menor nos meses de inverno, o que de fato não ocorreu.

## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados



**Figura 25** - Gráfico do consumo de energia mensal. **Fonte:** CEMIG, 2010.

A Tabela 5 apresenta os valores tabulados do consumo e da demanda do Campus I - CEFET MG para o período citado.

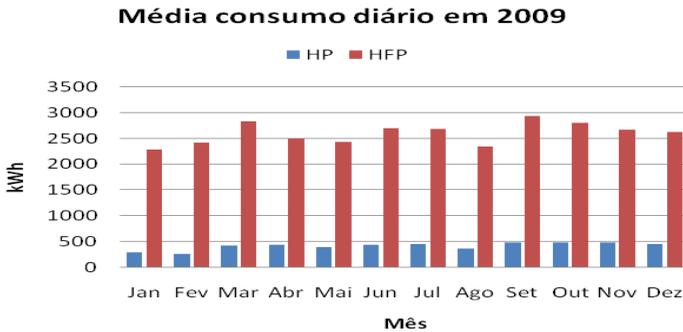
**Tabela 5** - Demanda e Consumo de energia do Campus I

Mês Ano 2009	Demanda (kW)		Consumo (kWh)	
	HP	HFP	HP	HFP
Jan	288	342	9.600	73.200
Fev	258	282	7.800	70.200
Mar	282	336	12.100	79.200
Abr	324	348	13.800	77.400
Mai	270	306	12.100	73.200
Jun	282	288	13.800	84.000
Jul	288	312	14.500	83.400
Ago	276	288	11.400	72.600
Set	300	312	14.400	88.200
Out	294	336	15.300	85.600
Nov	294	360	15.600	90.600
Dez	300	354	13.800	78.900
<b>Total anual</b>			154.200	955.900
<b>Total do consumo (kWh/ano)</b>			<b>1.110.100</b>	

**Fonte:** CEMIG, 2010.

A utilização de cargas de climatização não é representativa no consumo, uma vez que a maior demanda de energia elétrica concentra-se nas cargas de iluminação artificial, que permanecem energizadas durante todo o dia.

No estudo para avaliar o potencial de geração solar FV do sistema proposto para o atendimento do consumo de energia elétrica do CEFET - Campus I foi considerado o valor médio de 3.041,37 kWh/dia com base nos 365 dias do ano, conforme mostra a Figura 26.



**Figura 26** - Gráfico do consumo médio diário para os meses do ano de 2009. **Fonte:** CEMIG, 2010.

### 4.2.2. Cálculo das Áreas de Cobertura das Edificações

O total de áreas de cobertura das edificações disponíveis para a integração do sistema FV é de 9841 m<sup>2</sup>, sendo estimado a partir do projeto arquitetônico, conforme foi descrito na metodologia. Em linhas gerais, a tipologia das coberturas é plana ou com baixa declividade. Na região do Prédio da Mecânica, há uma pequena inclinação na laje que proporciona iluminação zenital para o interior da edificação.

As áreas potencialmente disponíveis do Prédio Escolar e do Prédio Administrativo são planas, sendo que a cobertura do Ginásio é de telhas metálicas. Todas as áreas consideradas disponíveis foram utilizadas para a integração dos módulos FV.

Nas áreas para a integração dos sistemas FV, já foram desconsideradas as que possuem algum tipo de obstáculos na laje, o que ser visualizado na Figura 21, mostrada no capítulo 3.

## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

A divisão das áreas de cobertura das edificações é mostrada na Tabela 6.

**Tabela 6** - Tabela da divisão de áreas de cobertura disponíveis.

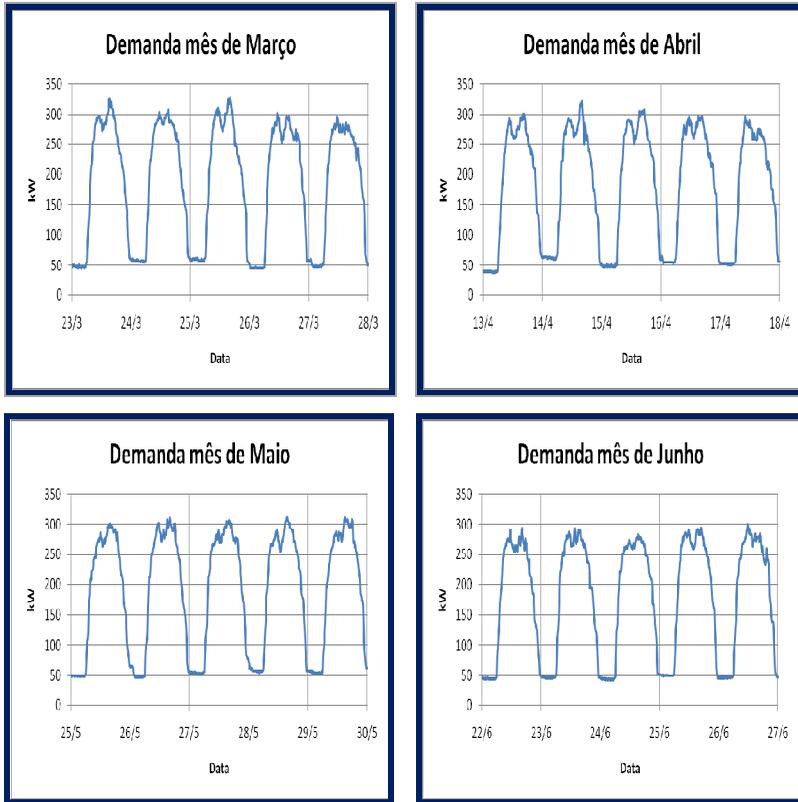
Nº	Edificação	Descrição	Largura (m)	Comprim. (m)	Área disponível (m <sup>2</sup> )
01	A	Prédio Escolar	8,91	332,60	2919
02	B	Prédio Administrativo	13,50	57,66	778
03	C	Prédio da Mecânica	64,00	71,00	4402
04	D	Ginásio de Esportes	35,60	35,60	1742
<b>Área total disponível na cobertura</b>					<b>9841</b>

### 4.2.3. Análise dos Dados da Memória de Massa do Medidor

Foram fornecidos pela CEMIG dados da memória de massa para verificação do perfil do consumo de energia das edificações no período de Março a Junho de 2009.

Os valores medidos de 15 em 15 minutos foram registrados em todos os 120 dias consecutivos do período descrito acima. Por meio de cálculo, resultaram em tabelas de demanda de energia que determinaram, de forma mais detalhada, o comportamento da demanda diária dos dias úteis de maior consumo em cada mês para o período em análise.

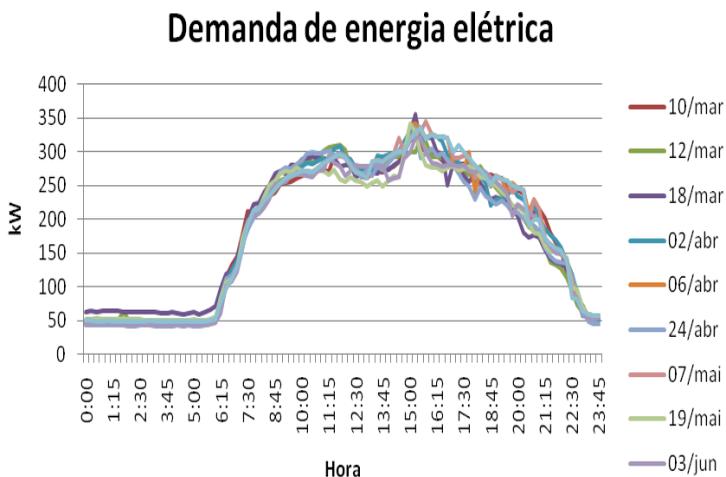
A Figura 27 mostra a semana em que se obteve a maior demanda para os meses de Março, Abril, Maio e Junho de 2009.



**Figura 27** - Gráfico de demanda semanal para os meses de Março a Junho de 2009. **Fonte:** CEMIG, 2009.

Verifica-se que o valor de pico para os dias úteis está próximo do valor da demanda contratada (320 kW). Estas semanas representam as semanas típicas de maiores demandas dos meses de Março a Junho de 2009, ressalta-se, que para uma análise mais elaborada seriam necessárias as demandas dos doze meses do ano. Desde modo, teríamos para o mês de Novembro (maior demanda de energia elétrica de 2009) todos os gráficos do respectivo mês para uma análise mais aprofundada.

Para uma análise diária da demanda média ativa, a Figura 28 apresenta a demanda dos dias úteis de maior demanda de energia elétrica para os meses analisados.



**Figura 28** - Gráficos de dez dias de maior demanda dos meses de Março a Junho de 2009. **Fonte:** CEMIG, 2009.

Diante da análise dos gráficos, verificou-se que a demanda é mais acentuada no período diurno, concentrando-se entre 9 e 17 horas nos dias úteis sendo que aos sábados, domingos e feriados há uma diminuição considerável no valor da demanda em kW (faixa de 50 kW), pois somente as cargas essenciais ficam energizadas.

Esta característica de consumo é interessante, uma vez que a geração solar FV só se dá durante as horas de incidência solar. Sendo assim, teremos sincronismo entre a geração FV e as maiores demandas de energia elétrica.

No mês de março, o pico máximo de demanda ocorreu no dia 18, às 15h15min com 355 kW. Nos meses seguintes, os picos máximos ocorreram respectivamente no dia 06/04, às 15h30min com 335 kW e no dia 07/05 às 15h45min com 345 kW.

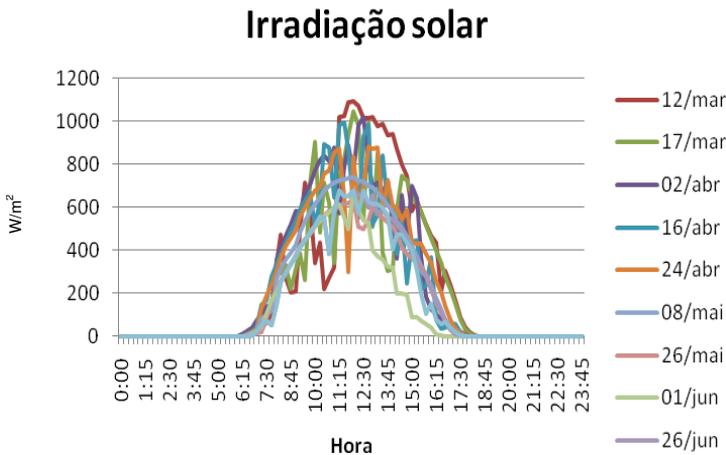
No comportamento da demanda diária observou-se que em vários dias, a demanda máxima esteve próxima do valor de contrato com a CEMIG e que em alguns dias, obteve-se um pico

de demanda máxima superior ao valor contratado, por volta das 15 horas.

Verificou-se também, que para todos os 89 dias úteis levantados, a demanda após o horário de 18 horas decresce, coincidindo com o término das atividades administrativas da Instituição.

### 4.2.4. Traçado das Curvas de Irradiação Solar para a Cidade de BH

A Figura 29 apresenta a média de irradiação solar diária obtida com os dados coletados pela estação meteorológica que se localiza no CEFET-MG - Campus 2, e por meio destes gráficos foi possível verificar que tanto o valor médio da irradiação como a forma de sua curva variam bastante de dia para dia. Isto se deve ao fato de que pode haver dias mais ensolarados, mais nublados, ou com níveis de irradiação muito variáveis ao longo de um mesmo dia.



**Figura 29** - Gráficos das irradiações solares. **Fonte:** CEFET- MG, 2009.

Observou-se que em um dia de céu limpo, o valor médio do  $G_{poa}$  foi de 4,27 kWh/m<sup>2</sup>/dia, ou seja, este valor foi inferior ao valor médio encontrado do  $G_{poa}$  para os outros dias levantados,

## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

---

os quais não obtiveram uma curva de irradiação simétrica como se verificou no dia 08 de Maio.

Encontrou-se pela integração das áreas das curvas de irradiação solar o valor médio do  $G_{\text{poa}}$  na ordem de  $5,23 \text{ kWh/m}^2/\text{dia}$ .

Em alguns intervalos do gráfico de irradiação solar houve grandes oscilações, como por exemplo, no dia 17 de Março das 08h15min às 14h30min. Este intervalo de muitas oscilações, provavelmente com grande aparecimento de nuvens, coincide com o período de um dia limpo em que deveriam ocorrer os maiores índices de irradiação solar.

A irradiação solar no dia 01 de Junho apresentou uma característica interessante, pois nesse dia, por volta das 12h30min aconteceu um pico de irradiação solar sendo que, após este horário, houve uma diminuição acentuada de irradiação até por volta das 16h15min.

A diversificação no traçado das curvas apresentadas para as análises diárias de irradiação solar mostrou ser importante para a verificação de um comportamento diferenciado para cada dia do ano.

Uma outra maneira de se encontrar o valor médio do  $G_{\text{poa}}$  é por intermédio do software *Radiasol*, que é um programa desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), como já foi mencionado anteriormente.

Para este estudo, o programa foi alimentado com dados de coordenadas geográficas e de irradiação do Projeto SWERA para a cidade de Belo Horizonte. Com a inclusão do ângulo de inclinação dos módulos FV e do desvio azimutal em relação ao norte verdadeiro obteve-se os valores médios de irradiação em  $\text{kWh/m}^2/\text{dia}$ .

Sabe-se que o que irá influenciar na quantidade de irradiação incidente nos módulos FV são a inclinação e a orientação dos mesmos assim como os índices de irradiação solar da cidade, na qual estes módulos estarão inseridos.

## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

A Tabela 7 apresenta os valores das médias diárias mensais de irradiação solar para os 12 meses do ano, considerando a opção de inclinação dos módulos FV a 20 graus e desvio azimutal de 0 grau. Os valores foram simulados para a cidade de Belo Horizonte, onde se localiza o Campus I, com base no programa *Radiasol*.

**Tabela 7** - Dados de irradiação solar com as superfícies inclinadas a 20 graus e desvio de azimutal -12 graus - Belo Horizonte.

Mês	Irradiação (kWh/m <sup>2</sup> )	Mês	Irradiação (kWh/m <sup>2</sup> )
Janeiro	5,966	Julho	5,053
Fevereiro	6,177	Agosto	5,744
Março	5,936	Setembro	5,865
Abril	5,747	Outubro	5,996
Maiο	5,058	Novembro	5,510
Junho	4,830	Dezembro	5,711
<b>Média diária mensal (kWh/m<sup>2</sup>/ano)</b>	<b>5,632</b>		

Fonte: *Radiasol*, 2009.

Os resultados obtidos a partir da influência no  $G_{poa}$  para diferentes inclinações dos módulos são mostrados na Tabela 8. A irradiação solar média anual foi obtida analisando-se as irradiações médias diárias mensais.

**Tabela 8** - Valor do  $G_{poa}$  para inclinações de zero e 20 graus com desvio azimutal -12 graus.

Inclinação do módulo	0º	20º
Irradiação média solar diária - $G_{poa}$ (kWh/m <sup>2</sup> /ano)	5,352	5,632
Percentual da diferença no valor do $G_{poa}$ (%)	95,02	100

Fonte: *Radiasol*, 2009.

### 4.2.5. Cálculo da Potência FV

Três tecnologias foram escolhidas e de cada uma delas optou-se por um modelo de módulo FV com suas características elétricas e construtivas já especificadas, tendo os dados dos módulos sido apresentados na Tabela 3.

## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

Foram calculados os valores da potência FV, utilizando-se as tecnologias comercialmente disponíveis e previamente escolhidas para serem implementadas na cobertura das edificações.

Utilizaram-se as equações descritas no Capítulo 3 da Metodologia, com os respectivos valores das eficiências dos módulos ( $E_{ffNOCT}$ ).

Conforme mostra a Tabela 9, cada sistema contempla uma tecnologia e objetiva atender a um consumo médio diário de 3.041,37 kWh/dia.

**Tabela 9** - Divisão dos sistemas FV por tecnologia.

Sistema	Tecnologia	Fabricante	Modelo
1	c-Si	Alfasolar	120 M
2	p-Si	Kyocera	KD205GX-LP
3	a-Si	Uni-solar	144 PLV

**Fonte:** Adaptado dos dados dos fabricantes dos módulos FV.

Assim, considerando o  $G_{poa}$  médio diário em 5,632 kWh/m<sup>2</sup> e o rendimento 0,8 chegou-se ao valor de  $P_{cc} = 674,9$  kWp<sub>cc</sub>. A Tabela 10 apresenta a quantidade de módulos FV necessários de cada sistema.

**Tabela 10** - Quantificação dos módulos FV por sistema.

Sistema	Qdade módulos (un)	Potência instalada (kWp)	Área de ocupação (m <sup>2</sup> )	Área ocupada pelos módulos (%)
1	4686	674,78	9806	99,64
2	5624	674,88	4836	47,66
3	3292	674,86	4872	47,96

Para atender 100% do consumo médio diário total proposto no estudo<sup>3</sup> os módulos das tecnologias de c-Si e p-Si utili-

<sup>3</sup> No estudo acima, foi considerado a eficiência do sistema inversor de 0,8, o consumo de energia dos doze meses do ano de 2009, valor considerado representativo com relação ao histórico dos 16 anos de consumo de energia anual.

zariam aproximadamente 50% da área total disponível, sendo que para os módulos da tecnologia de a-Si seria necessário 99,64% da área.

Com relação às tecnologias de a-Si, p-Si e c-Si, a eficiência de conversão dos módulos, assim como a correção da temperatura de operação, quando necessária, foi levada em consideração nos cálculos.

Pelos cálculos apresentados na Tabela 10 verificou-se que, mesmo para a tecnologia com menor eficiência (a-Si), a área de cobertura disponível das edificações é suficiente para atender ao consumo de energia médio diário total.

Conforme levantado no Capítulo 3, a área total disponível de cobertura das edificações para integração dos módulos FV é de 9841 m<sup>2</sup> o que comportaria os valores acima determinados para que a geração de energia solar FV fosse necessária para suprir 100% do consumo de energia médio diário.

Esta simulação foi realizada sem utilizar as áreas das fachadas, brises e estacionamentos. Pode-se assim, concluir que as edificações possuem áreas de cobertura disponível para a implementação do sistema FV hipotético proposto.

É importante observar a sazonalidade entre geração FV e consumo de energia elétrica, assim como o fato de que quando ocorrer à coincidência temporal dos mesmos haverá uma redução do consumo de energia elétrica na Instituição supondo que o sistema hipotético proposto esteja interligado à rede elétrica pública local.

### 4.2.6. Traçado das Curvas de Potência FV

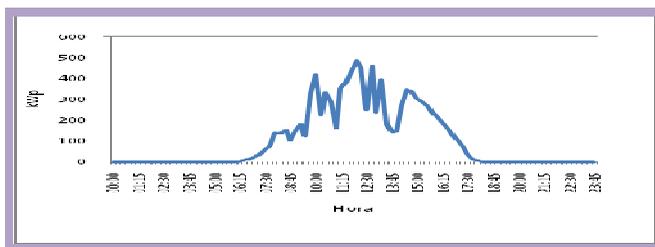
Para cada tecnologia, foram traçadas as curvas de potência FV instantânea para alguns dos dias selecionados anteriormente, considerando-se a quantidade de módulos para suprir o consumo médio de energia diário.

O valor da potência FV foi calculado, considerando-se o valor médio de irradiação solar de 15 em 15 minutos, o número de módulos necessários para cada tecnologia, a área, a eficiência de conversão do respectivo módulo e o rendimento do sistema.

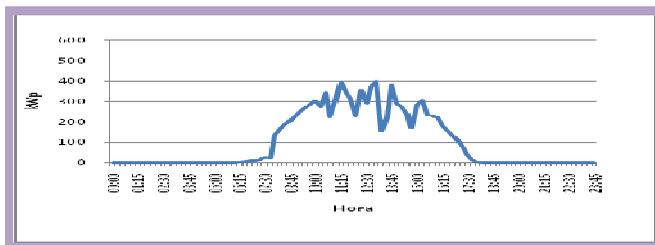
## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

A Figura 30 apresenta os gráficos da simulação de potência FV gerada instantânea para os dias selecionados de maior incidência solar do mês de Março para as tecnologias de p-Si, a-Si e c-Si. Nestes gráficos, considerou-se para o mesmo dia analisado uma tecnologia diferente e, conseqüentemente, a eficiência de conversão dos módulos variada.

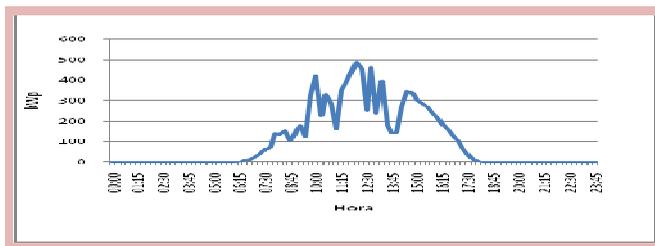
Curva de potência FV (p-Si)



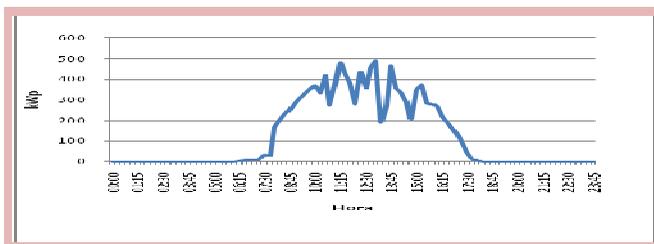
Curva de potência FV (p-Si)



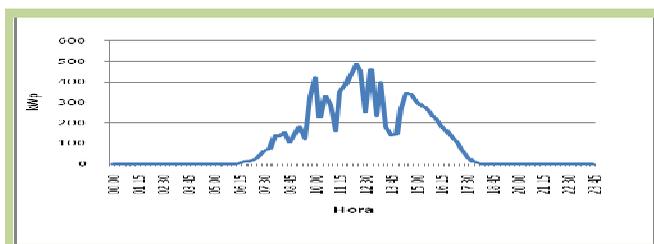
Curva de potência FV (a-Si)



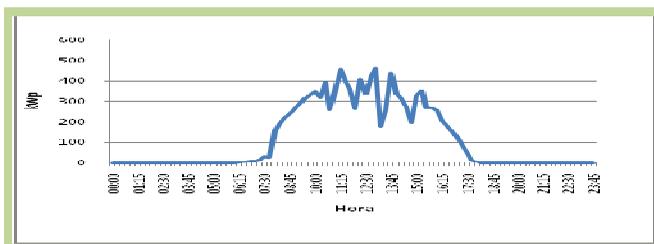
Curva de potência FV (a-Si)



Curva de potência FV (c-Si)



Curva de potência FV (c-Si)



**Figura 30** - Gráficos da potência FV para as diferentes tecnologias.

Os parâmetros para geração das curvas da potência FV<sup>4</sup> foram: a quantidade de módulos, a eficiência de conversão já corrigida para 45°C e a área dos módulos.

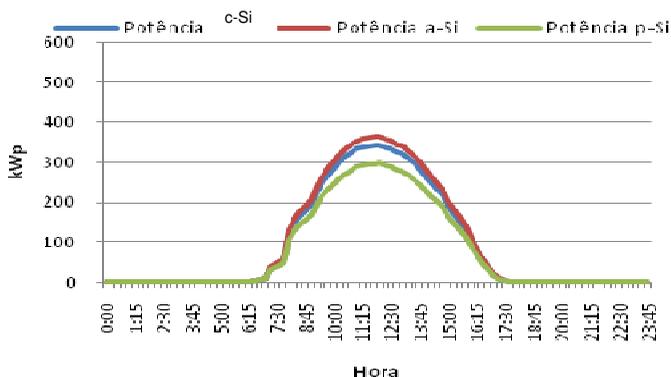
A curva de irradiação solar é determinante para o nível de potência FV, ou seja, oscilações de influência solar ao longo do período diurno provocarão consideráveis variações nos valores da potência FV. A incidência solar sobre os módulos depende de uma série de fatores de forma direta e indireta, podendo assim

<sup>4</sup> A potência instalada no sistema FV (Wp) é a potência em corrente contínua obtida em função da equação (1) apresentada no capítulo da metodologia.

fornecer, para cada dia analisado, uma resposta de geração diferente.

A Figura 31 sobrepõe para o dia 08 de Maio (curva de melhor simetria, dia limpo) as curvas de potência FV, considerando as três tecnologias. Verifica-se que, para o mesmo intervalo de tempo, o valor da potência varia devido à tecnologia utilizada.

### Sobreposição das potências FV por tecnologia



**Figura 31** - Gráficos da sobreposição da potência FV para as três tecnologias selecionadas.

Para o dia 08 de Maio, às 11h45min, os valores encontrados foram de 295,88 kWp para o a-Si, 354,99 kWp para o c-Si e 362,87 kWp para o p-Si.

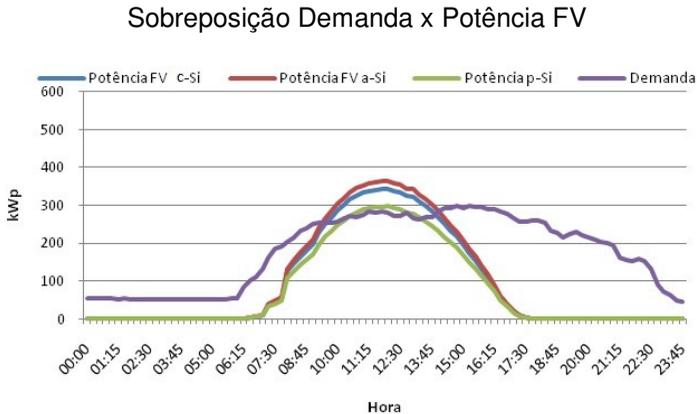
#### 4.2.7. Sobreposição das Curvas de Potência FV e Demanda

Em primeira análise, verificou-se que para os dias 03 de Março e 05 de Maio, houve um valor instantâneo de potência FV para as três tecnologias selecionadas superior ao valor da demanda contratada. A demanda contratada da concessionária de energia é de 320 kW e a potência do sistema FV atingiu valores na ordem de 500 kWp e 380 kWp, respectivamente. Esta característica é importante, pois em um intervalo de horas teremos efetivamente uma redução de demanda instantânea.

Observou-se nos 120 dias analisados que essa redução não garante a possibilidade de diminuição da demanda contrata-

da, pois o pico da demanda da Instituição, que se concentra por volta das 15:00 horas, não coincide com o pico da potência FV que acontece por volta das 12:00 horas.

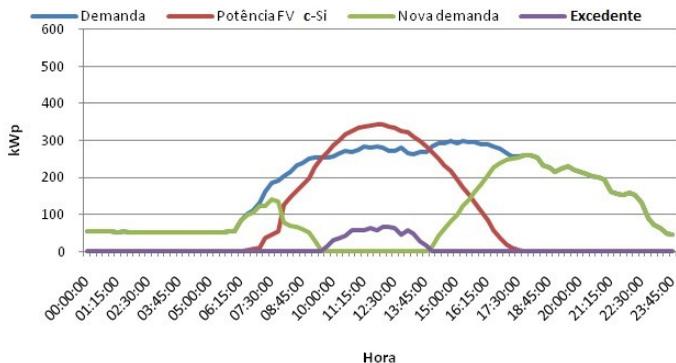
Na Figura 32 o fato da sobreposição das curvas de potência FV e da demanda para o dia 08 de Maio (dia de céu limpo) presumiu para o período de 8:00 às 16:00 horas aproximadamente, o aparecimento de uma nova curva de demanda em kW para cada tecnologia.



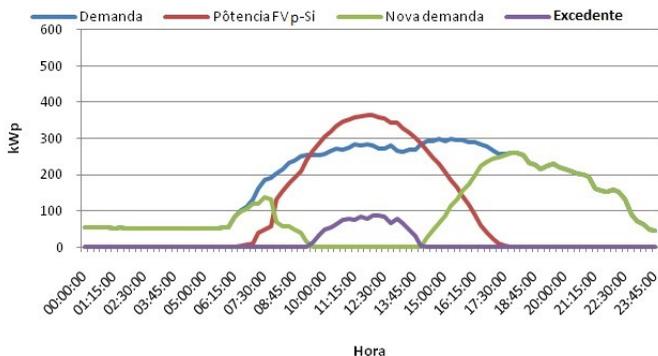
**Figura 32** - Gráficos das curvas sobrepostas de potência FV e demanda.

Deste modo, em uma segunda análise, para este dia verificou-se que haverá um intervalo ao longo do dia que ocorrerá um excedente de energia como mostra a Figura 33 (a) e (b). Nesse intervalo, houve o suprimento da demanda de energia consumida (nova demanda) e uma parcela excedente para as tecnologias de c-Si e p-Si respectivamente.

Sobreposição resultante (a)



### Sobreposição resultante (b)



**Figura 33 (a) e (b)** - Gráficos da sobreposição resultante para c-Si e p-Si.

Para a simulação estudada no primeiro caso, verificou-se que não há carência de áreas de cobertura para a implantação do sistema FV hipotético com o objetivo de atender o consumo médio de energia elétrica total diária do Campus I - CEFET-MG.

### **4.3. SEGUNDO CASO: SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA FV UTILIZANDO 100% DAS ÁREAS DE COBERTURA DAS EDIFICAÇÕES**

#### **4.3.1. Análise Histórica do Consumo de Energia Elétrica**

O CEFET- MG, Campus I está enquadrado na tarifa horazonal Verde. O fornecimento de energia elétrica pela CEMIG ao Campus é realizado por ramal de 13,8 kV.

Verificou-se, com base nos dados fornecidos pela CEMIG, que a Instituição recebe energia elétrica de um único alimentador BHGT 23, por meio da rede de distribuição da concessionária.

Existem duas subestações de 13,8 kV para 220/127 V, sendo uma subestação exclusiva para o Prédio da Mecânica, com um transformador de 300 kVA e outra para o restante do campus, também de 300 kVA.

A tensão elétrica que abastece o Campus chega por uma subestação com uma tensão de 13,8 kV, passando por transformadores e sendo distribuída por cabos subterrâneos. A medição não é individualizada, sendo uma única conta emitida pela CEMIG para todo o Campus.

Até 2001, o Campus era enquadrado na tarifa convencional, não havendo demanda contratada. A partir de outubro daquele ano, por exigência da CEMIG e, atendendo à legislação da ANEEL, ele foi enquadrado na tarifa horazonal, tendo optado pela tarifa Verde, com uma demanda contratada de 320 kW. Nesta modalidade tarifária, há uma única demanda contratada e quatro tarifas para o consumo: duas para a HP (das 18h 00min às 21h 00min) nos dias úteis, sendo diferenciadas no período seco e úmido, e duas tarifas para o HFP, também diferentes no período seco e úmido.

Com essa mudança de tarifa, verificou-se uma redução considerável no consumo de energia elétrica do ano de 2000 para o ano de 2001, que correspondeu a aproximadamente 63%. Isso representou uma diminuição de 16,3% no valor anual em R\$ na conta de energia elétrica no período de 2000 para 2001.

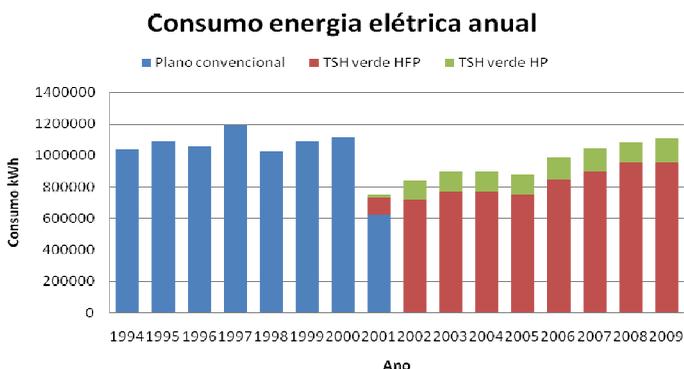
## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

Outro fato importante ocorrido no ano de 2001 foi o racionamento de energia elétrica no país, devido à falta de chuva e, conseqüentemente, baixo nível de água nos reservatórios, o que contribuiu para a redução do consumo de energia elétrica na Instituição.

Em seguida, com a meta de economizar energia elétrica, houve um processo de conscientização dos usuários juntamente com a implantação, substituição e manutenção de sistemas eficientes de força e iluminação.

A partir da mudança ocorrida em 2001, o consumo de energia elétrica apresentou uma diminuição de 44.400 kWh para 30.000 kWh do mês de Outubro para o mês de Novembro, representando uma redução só no primeiro mês da mudança de 32,43%. O que contribuiu significativamente para uma redução no consumo de energia elétrica que se prolongou até o ano de 2005, com uma variação máxima de 6,27% no consumo de energia anual.

Analisou-se o histórico do consumo energético do CEFET-MG, Campus I, mediante o levantamento de dados do consumo de energia elétrica mensal, compreendendo Janeiro de 1994 a Dezembro de 2009, conforme o demonstrativo na fatura da concessionária CEMIG, como mostra a Figura 34.



**Figura 34** - Gráfico do consumo de energia elétrica anual.

**Fonte:** CEMIG, 2010.

A partir de 2005 o consumo médio diário vem aumentando gradativamente, ano após ano, saindo de 2.045,24 kWh/dia para 3.041,37 kWh/dia em 2009, ou seja, aproximadamente 32,75% de aumento de consumo médio diário nos últimos quatro anos. Com essa análise percebe-se que em 16 anos o consumo energético médio diário não apresentou uma característica constante de crescimento.

### 4.3.2. Cálculo da Potência FV considerando toda a área útil.

Nessa análise foi considerada toda a área útil de cobertura disponível de cada edificação, separadamente. Nesta análise, não foi considerado a tecnologia do a-Si, pois para essa tecnologia conforme apresentado no primeiro caso seria necessária a utilização de aproximadamente 100% da área útil para suprir o consumo médio diário da Instituição.

Para cada edificação e tecnologia foi calculada a quantidade de potência instalada (kWp), sendo que nesse levantamento, também foi considerada uma margem para movimentação e segurança nas instalações dos módulos.

Foi considerando, ainda, a possibilidade de que a implantação dos módulos FV fosse expandida para toda a área, com a finalidade de gerar um excedente a ser repassado à rede elétrica pública local.

Por meio do programa *AutoCAD* os módulos formam distribuídos na cobertura de cada edificação. Para cada sistema proposto no estudo, foram calculados os valores de potência em kWp, tendo as superfícies dos módulos voltadas para o norte, com inclinação de 20 graus (primeira análise) e de zero grau (segunda análise).

#### 4.3.2.1. Estudo do Prédio Escolar (A) - (Inclinação 20 e zero grau).

A

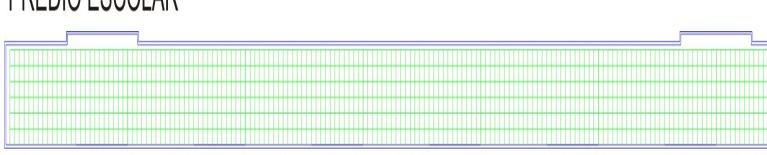
Tabela 11 e a Figura 35 apresentam o levantamento dos módulos para a inclinação de 20 graus.

## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

**Tabela 11** - Levantamento da potência FV do Prédio Escolar com inclinação de 20 graus.

<b>Inclinação 20 graus</b>	<b>Sistema 1 (c-Si)</b>	<b>Sistema 2 (p-Si)</b>
Número de módulos	3416	1950
Área utilizada m <sup>2</sup>	2732,98	2721,11
kWp	409,92	399,75

PRÉDIO ESCOLAR



**Figura 35** - Distribuição dos módulos FV (p-Si) para a inclinação de 20 graus.

A Tabela 12 e a Figura 36 apresentam o levantamento dos módulos sem inclinação. Comparando as tabelas com inclinação diferente pode-se observar que para 20 graus a potência FV foi maior.

**Tabela 12** - Levantamento da potência FV do Prédio Escolar com os módulos na horizontal.

<b>Inclinação 0 grau</b>	<b>Sistema 1 (c-Si)</b>	<b>Sistema 2 (p-Si)</b>
Número de módulos	2928	1620
Área utilizada m <sup>2</sup>	2492,89	2413,12
kWp	351,36	332,10

PRÉDIO ESCOLAR



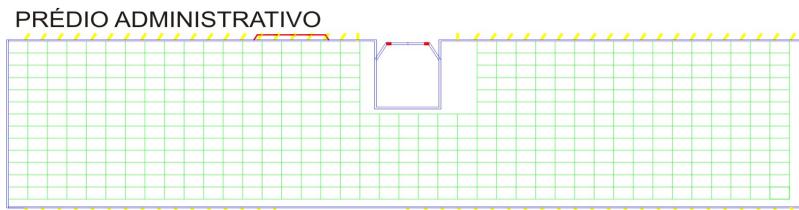
**Figura 36** - Distribuição dos módulos FV (p-Si) a zero grau.

### 4.3.2.2. Estudo do Prédio Administrativo (B) - (Inclinação 20 e zero grau).

A Tabela 13 e a Tabela 14 assim como a Figura 37 e a Figura 38 apresentam o levantamento e distribuição dos módulos para a inclinação de 20 graus e zero grau, respectivamente. Verificou-se que para os dois posicionamentos o maior valor de potência FV encontrado foi para o sistema 1, com a tecnologia do c-Si, devido as dimensões físicas do módulo FV selecionado.

**Tabela 13** - Levantamento da potência FV do Prédio Administrativo para os dois sistemas.

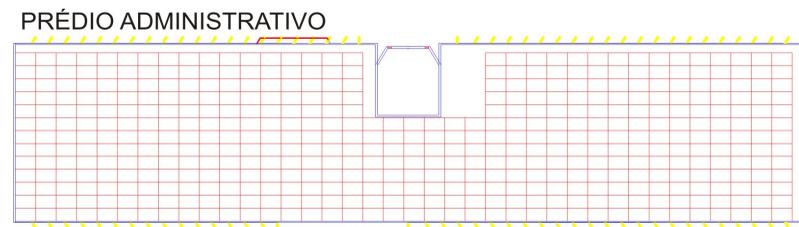
Inclinação 20 graus	Sistema 1 (c-Si)	Sistema 2 (p-Si)
Número de módulos	884	284
Área utilizada m <sup>2</sup>	707,24	675,39
kWp	106,08	58,22



**Figura 37** - Distribuição (p-Si) a 20 graus - Prédio Administrativo.

**Tabela 14** - Levantamento da potência FV do Prédio Administrativo com os módulos sem inclinação.

Inclinação 0 grau	Sistema 1 (c-Si)	Sistema 2 (p-Si)
Número de módulos	856	464
Área utilizada m <sup>2</sup>	708,36	689,04
kWp	102,72	95,12



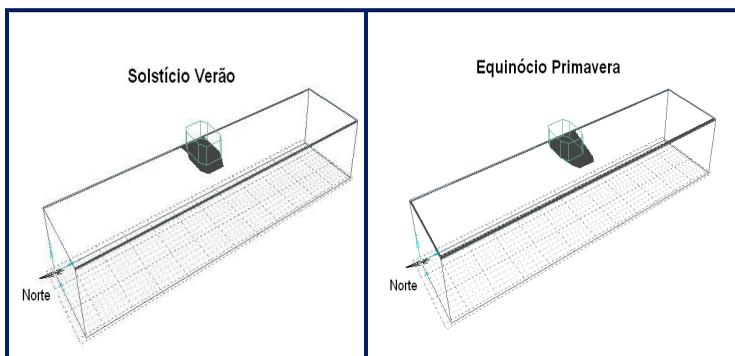
**Figura 38** - Distribuição dos módulos FV (p-Si) a zero grau - Prédio Administrativo.

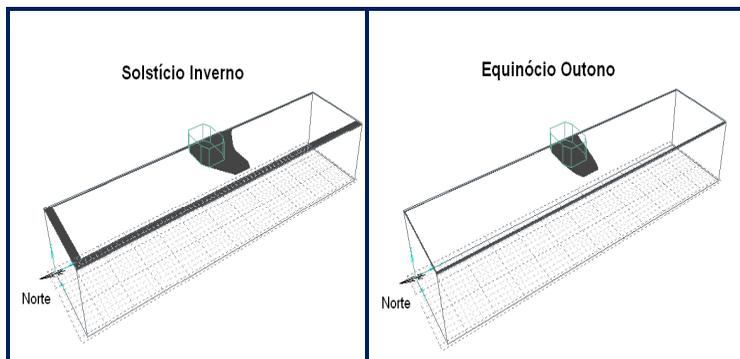
### 4.3.2.2.1. Estudo do Sombreamento no Prédio Administrativo (B)

Para a edificação (B), Prédio Administrativo, realizou-se as simulações de sombreamento para identificação das áreas atingidas pelo mesmo, pois essas áreas reduzem significativamente a capacidade da potência instalada. A análise consistiu na verificação global do sombreamento anual verificado sobre a cobertura da estrutura externa da caixa do elevador.

A Terra em seu movimento de translação segue uma trajetória elíptica em um plano inclinado com relação ao plano do equador, isto faz com que quantidades diferenciadas de irradiação solar incidem na superfície terrestre ao longo do ano e definem-se assim os solstícios de verão e inverno e os equinócios de primavera e outono (LAMBERTS *et, al.*, 1997).

Através do programa *Ecotect* avaliou-se o sombreamento global nas quatro estações do ano como mostra a Figura 39.

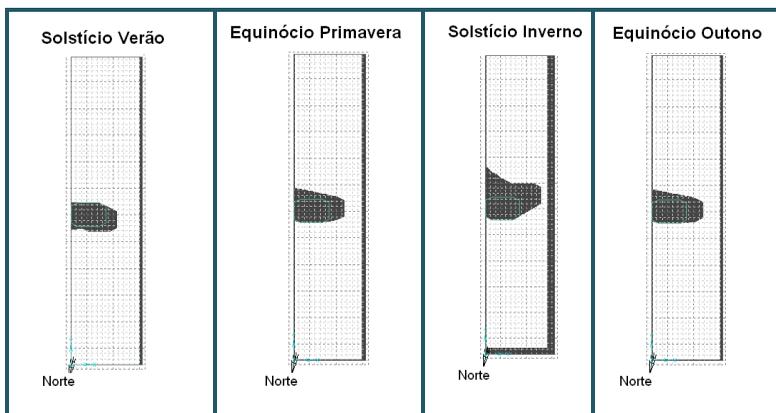




**Figura 39** - Simulação do sombreamento em três dimensões.

O solstício de inverno apresentou a maior parcela de sombreamento na cobertura da edificação devido à posição do sol neste período.

Para estimar o valor final da área disponível para a implantação dos módulos FV de maneira simplificada, foram sobrepostas as quatro simulações apresentada na Figura 40 e calculou-se a nova área útil disponível para implantação dos módulos FV na cobertura da edificação (B).



**Figura 40** - Simulação das quatro estações do ano.

A

Tabela 15 fornece os novos valores da geração da potência FV (kWp) com os módulos na horizontal depois da simulação do sombreamento global ao longo do ano.

**Tabela 15** - Quantificação dos módulos e da potência FV.

<b>Tecnologia</b>	<b>Sistema 1 (c-Si)</b>	<b>Sistema 2 (p-Si)</b>
Nº de módulos	724	406
Potência FV (kWp)	86,88	85,28

Comparando-se essa análise em relação à anterior realizada no item 4.3.2.2, houve uma redução de aproximadamente 20% de área útil disponível para a implantação dos módulos FV, o que resultou em um valor de aproximadamente 87 kWp de potência FV instalada para as duas tecnologias estudadas.

O número de módulos a serem alocados na horizontal, mediante o cálculo do novo valor de potência FV, apresentou uma diminuição 132 e 58 módulos para as tecnologias de c-Si e p-Si, respectivamente.

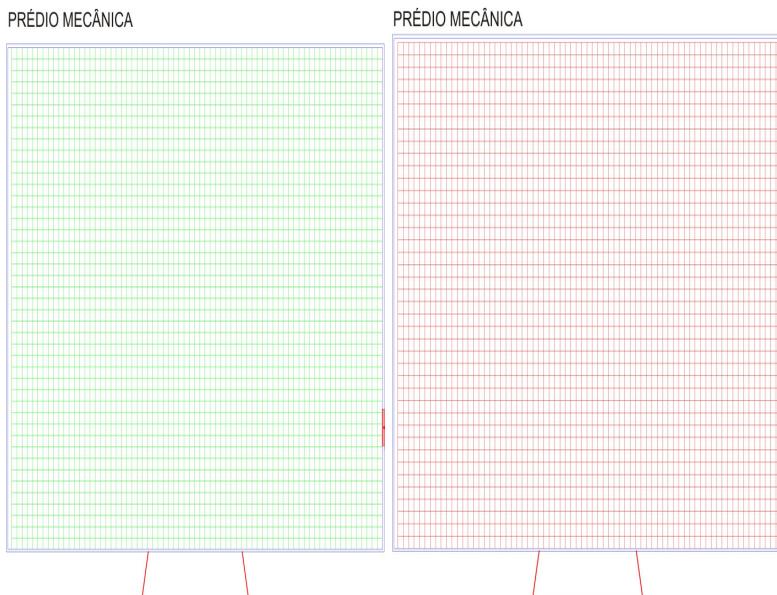
Este estudo mostrou a importância em se calcular à projeção do sombreamento ao longo do ano, pois se deve agregar a avaliação, todos os fatores que possuam influência direta e/ou indireta, na potência FV a ser instalada, uma vez que, a implantação dessa tecnologia ainda é considerada uma energia cara quando comparada com a energia convencional.

### **4.3.2.3. Estudo do Prédio da Mecânica (C) - (Inclinação 20 e zero grau).**

Para a edificação do Prédio da Mecânica (C) foram elaboradas a Tabela 16 e a Tabela 17, que mostram a quantificação dos módulos FV para cada inclinação e tecnologia selecionada. Na Figura 41(a) e (b) pode-se visualizar a distribuição dos módulos FV.

**Tabela 16** - Levantamento da potência FV do Prédio da Mecânica com inclinação de 20 graus.

<b>Inclinação 20 grau</b>	<b>Sistema 1 (c-Si)</b>	<b>Sistema 2 (p-Si)</b>
Número de módulos	5460	3408
Área utilizada m <sup>2</sup>	4641,00	4322,83
kWp	654,20	698,64



**Figura 41 (a) e (b)** - Distribuição dos módulos FV (20 e zero graus) de p-Si.

**Tabela 17** - Levantamento da potência FV do Prédio da Mecânica com horizontal e com 33 graus de inclinação.

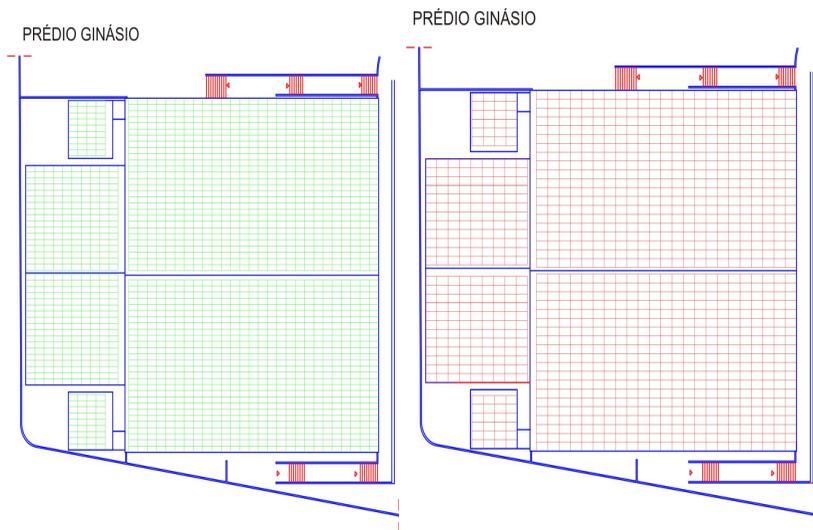
<b>Inclinação 0 grau</b>		
<b>Sistema</b>	<b>Sistema 1 (c-Si)</b>	<b>Sistema 2 (p-Si)</b>
Número de módulos	5136	2911
Área utilizada m <sup>2</sup>	4372,79	4322,83
kWp	616,32	596,75
<b>Inclinação 33 graus</b>		
Número de módulos	4022	2266
Área utilizada m <sup>2</sup>	3508,44	3370,68
kWp	482,64	464,53

### 4.3.2.4. Estudo do Prédio do Ginásio (D) - (Inclinação 20 e zero grau).

Finalmente, a Tabela 18 apresenta o levantamento dos módulos FV para a inclinação de 20 e de zero grau e a Figura 42 (a) e (b) mostra a distribuição dos módulos de p-Si na cobertura.

**Tabela 18** - Levantamento da potência FV do Prédio do Ginásio para inclinação de 20 e 0 graus.

Inclinação 20 graus		
Sistema	Sistema 1 (c-Si)	Sistema 2 (p-Si)
Número de módulos	2080	1208
Área utilizada m <sup>2</sup>	1656,08	1665,19
kWp	249,60	247,64
Inclinação 0 grau		
Número de módulos	1880	1129
Área utilizada m <sup>2</sup>	1665,58	1662,17
kWp	225,6	231,45



**Figura 42 (a) e (b)** - Distribuição dos módulos (p-Si) a 20 e zero graus.

As Figuras 35 a 38 e 41 e 42 apresentaram a distribuição dos módulos FV de p-Si, KD205GX-LP, do fabricante *Kyocera*.

Nas duas situações: inclinação de 20 graus e zero grau para o gerador FV, os valores encontrados de potência FV (kWp) ficaram próximos não havendo comprometimento significativo de uma maior ou menor potência quando, utilizam-se um ou o outro ângulo de inclinação analisado, no entanto, a geração dos sistemas FV implementados na cobertura será diferente devido à alguns fatores como por exemplo o valor do  $G_{poa}$ .

Verifica-se que, para uma melhor adequação arquitetônica das edificações, a escolha pela inclinação dos módulos nesse trabalho deve ser considerada, uma vez que temos uma área suficiente para implantação dos módulos FV.

Pode-se notar que a escolha pelo módulo de maior potência não garante um maior valor de potência instalada em kWp do que quando se utiliza um módulo com uma potência nominal inferior.

Esse fato ocorre devido à diferença das características físicas dos mesmos, ou seja, a quantificação dos módulos se altera em função da opção de tecnologia escolhida, considerando-se que, para um determinado modelo de módulo FV teremos variações de especificações físicas e elétricas e conseqüentemente modificação no valor da geração da potência instalada em kWp.

### 4.3.2.5. Quantificação da Potência FV por sistema

A Tabela 19 apresenta a quantificação da potência instalada em kWp para os sistemas 1, 2.

**Tabela 19** - Quantificação da potência em kWp para as tecnologias.

Sistema	Edificação	Potência Instalada a zero grau (kWp)	Potência Instalada a 20 graus (kWp)
Sistema 1: Tecnologia c-Si	A	351,36	409,92
	B	102,72	106,08
	C	616,32	654,32
	D	225,60	249,60
	Total	<b>1296,00</b>	<b>1419,92</b>
Sistema 2:	A	332,10	399,75

## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

Tecnologia p-Si	B	58,22	95,12
	C	596,75	698,64
	D	231,45	247,64
	Total	<b>1218,52</b>	<b>1441,15</b>

Com base na primeira simulação, o valor de potência FV que leva ao suprimento do consumo de energia elétrica médio diário com base no ano de 2009 calculado foi de  $P_{cc} = 674,9$  kWp. Verifica-se que, para os sistemas analisados se obtêm um valor de potência FV que induz uma geração de energia FV superior ao consumo médio diário do Campus I - CEFET-MG. Isso permite uma visão futurista com a pretensão de poder vender toda, ou uma parcela dessa energia excedente, para a rede pública local.

### 4.3.2.6. Análise dos Sistemas para as Tecnologias Seleccionadas

Foram considerados no estudo das simulações, três sistemas para o levantamento da potência FV a ser instalados na cobertura, considerando-se duas situações de posicionamento para os módulos FV.

Em uma primeira apreciação, verificou-se que a escolha da tecnologia é determinante na parcela de energia solar FV a ser gerada pelo sistema, podendo para uma área disponível obter valores de potência FV e conseqüentemente geração bem diferenciados.

Analisando-se a influência de uma melhor inclinação (20 graus ou zero grau) para a implantação dos módulos FV, a diferença no valor da potência FV para os diferentes tipos de tecnologia pode ser visualizada na Tabela 20.

**Tabela 20** - Apresentação dos sistemas por tecnologia.

Inclinação de 20 graus			
Sistemas	1 (c-Si)	2 (p-Si)	3 (a-Si)
kWp	<b>1419,92</b>	<b>1441,15</b>	<b>740,72</b>
Inclinação 0 grau			
kWp	<b>1296,00</b>	<b>1218,52</b>	<b>678,2</b>

No sistema 3 (a-Si), desconsiderando-se a análise do sombreamento, o valor da potência em kWp para 100% da área disponível foi praticamente a metade do valor encontrado para as tecnologias de c-Si e p-Si.

### 4.3.3. Cálculo da Geração Solar FV

Para os sistemas 1 e 2, calculou-se a sua geração FV, contrastando-a com o consumo de energia elétrica mensal das edificações. Desta forma, obteve-se o percentual de suprimento de energia que a geração solar FV representa para o Campus I do CEFET-MG ao longo do ano.

Foram calculados os valores de contribuição da geração FV, utilizando-se de duas tecnologias (c-Si e p-Si), sistema 1 e 2, respectivamente.

Os valores da geração solar FV foram calculados considerando os módulos posicionados a 20 graus (latitude local). A Tabela 21, apresenta os valores obtidos na simulação do sistema hipotético proposto no estudo.

**Tabela 21** - Geração de energia anual dos sistemas FV

<b>Mês Ano 2009</b>	<b>Consumo (kWh/mês)</b>	<b>Sistema 1 (c-Si)</b>	<b>Sistema 2 (p-Si)</b>
Janeiro	82.800	193.017,79	195.906,43
Fevereiro	78.000	191.654,67	194.522,91
Março	91.200	188.519,49	191.340,82
Abril	91.200	182.180,97	184.907,44
Mai	85.200	168.290,01	170.726,37
Junho	97.800	166.436,95	168.927,79
Julho	97.800	177.546,38	180.203,48
Agosto	84.000	194.040,13	196.944,07
Setembro	102.600	197.516,08	200.472,05
Outubro	105.600	197.311,62	200.264,52
Novembro	101.200	193.290,41	196.183,14
Dezembro	92.700	181.703,89	184.423,21
<b>Total anual (kWh)</b>	<b>1.110.100,00</b>	<b>2.231.508,39</b>	<b>2.264.822,23</b>

Observa-se que, haverá meses com maior geração, ou seja, meses de maior incidência solar e, conseqüentemente, meses que apresentaram um maior valor de geração solar FV em relação os demais meses do ano.

## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

Conforme a simulação estudada, verificou-se que haverá uma considerável parcela de energia excedente para as tecnologias de c-Si e p-Si. A Tabela 22 apresenta o percentual de contribuição a ser injetado na rede elétrica local.

**Tabela 22 - Contribuição energética excedente dos sistemas FV**

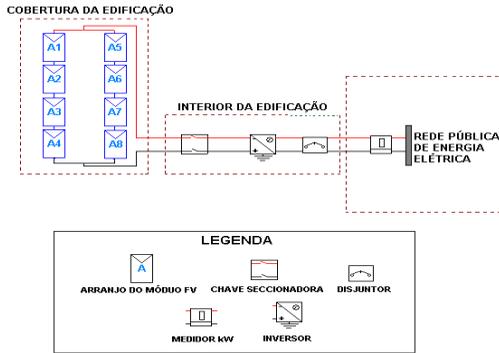
Contribuição de energia elétrica (kWh) excedente dos sistemas FV para ser disponibilizada à rede pública local		
<b>Mês Ano 2009</b>	<b>Energia Excedente Sistema 1</b>	<b>Energia Excedente Sistema 2</b>
Janeiro	110.217,79	113.106,43
Fevereiro	113.654,67	116.522,91
Março	97.319,49	100.140,82
Abril	90.980,97	93.707,44
Maiο	83.090,01	85.526,37
Junho	68.636,95	71.127,79
Julho	79.746,38	82.403,48
Agosto	110.040,13	112.944,07
Setembro	94.916,08	97.872,05
Outubro	91.711,62	94.664,52
Novembro	92.090,41	94.983,14
Dezembro	89.003,89	91.723,21
<b>Total</b>	<b>1.103.408,39</b>	<b>1.154.722,23</b>
<b>Excedente (kWh)</b>		
<b>Contribuição Excedente</b>	<b>99,39%</b>	<b>104,04%</b>

É importante observar a sazonalidade entre geração solar FV e consumo de energia elétrica, assim como o fato de que quando ocorrer à coincidência temporal dos mesmos haverá uma diminuição do consumo de energia elétrica da Instituição.

Esse sistema FV hipotético tem como pretensão ser um mini-gerador de energia distribuída interligado à rede elétrica local que, além de atender o Campus I - CEFET-MG gere também uma parcela excedente de energia, podendo, desse modo, auxiliar de forma complementar a capacidade energética da concessionária local, o que dispensaria a utilização de acumuladores (baterias) e requeria pouca manutenção.

O sistema solar FV é composto de: módulos FV associados a um arranjo; inversor de CC para CA; caixa de conexão;

sistema de manobra e proteção; conforme pode ser visualizado no esquema apresentado na Figura 43.



**Figura 43** - Esquema de ligação do sistema FV integrado à edificação e interligado a rede. **Fonte:** Adaptado de Santos, 2009.

### 4.3.4. Avaliação Econômica

Na análise econômica verificou-se a viabilidade para uma possível implantação dos sistemas FV hipotéticos propostos no estudo. Realizou-se uma estimativa simplificada para se ter uma ideia do tempo de retorno do investimento inicial.

O valor do custo do kWp instalado foi considerado o mesmo para os três sistemas (a-Si, c-Si e p-Si). Essa análise justifica-se uma vez que as tecnologias são comercializadas por potência e não por eficiência.

Conforme os estudos apresentados da análise de investimento dos sistemas de geração FV, adotou-se o valor de 4.500,00 euros para cada kWp instalado (Rüther, Salamoni *et al.*, 2008), considerando para a tecnologia uma redução média de preço de 5% ao ano de acordo com a curva de aprendizagem da tecnologia sendo somados os custos e componentes da instalação. A Tabela 23 apresenta os valores de investimento para os sistemas FV, considerando a cotação média do euro de R\$2,42 (valor médio em 16 de agosto de 2010).

## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

**Tabela 23** - Custos dos sistemas FV levantados no estudo.

Tecnologia	Módulo	Potência (kWp)	Custo sist. FV (euros)	Custo do sistema FV (reais)
a-Si	120M	740,72	3.333.240,00	7.533.122,40
c-Si	PLV 144	1419,92	6.389.640,00	14.440.586,40
p-Si	KD205GX	1441,15	6.485.175,00	14.656.495,50

As tarifas médias praticadas pela concessionária de energia CEMIG verificadas na fatura de energia elétrica da Instituição conforme a modalidade horo-sazonal verde foi de R\$ 16,7619/kW e de R\$ 0,174684/kWh com uma demanda de contrato de 320 kW.

A primeira análise contemplou o sistema *net-metering*, considerando o preço do kWh gerado pelo sistema FV igual ao valor da energia elétrica da concessionária. O tempo de retorno do investimento foi estimado para uma taxa interna de retorno ao investidor de 7% ao ano para os cenários de reajuste tarifário da energia convencional de 4 e 7% ao ano para um período de 25 anos (RÜTHER, SALAMONI *et al.*, 2008).

Conforme o estudo anual de geração e contribuição FV apresentado nas Tabelas 21 e 22, obteve-se a economia média em reais alcançada pelos três sistemas FV propostos considerando os valores apresentados na fatura de energia elétrica, conforme mostra a Tabela 24.

**Tabela 24** - Economia média anual dos sistemas FV.

Consumo médio anual (kWh)	Valor médio do consumo (R\$)	Geração anual (a-Si) (kWh)	Geração anual (c-Si) (kWh)	Geração anual (p-Si) (kWh)
1110,100,00	193.916,70	1.169.289,96	2.231.508,39	2.264.822,23
<b>Receita anual FV (R\$)</b>		204.158,03	389.631,36	395.437,96
<b>Receita FV - consumo (R\$)</b>		10.241,32	195.714,66	201.521,26

Para um estudo financeiro simplificado dos três sistemas selecionados, a economia média anual gerou uma receita anual

de energia FV sendo: R\$ 204.158,03 (a-Si), R\$389.631,36 (c-Si) e de R\$395.437,96 (p-Si) respectivamente. Se retirarmos desta receita FV o valor médio do consumo anual teremos os valores mostrados na Tabela 24 (Receita FV subtraída do consumo médio anual).

Para os cálculos apresentados na Tabela 25 (a-Si), de energia FV sendo: R\$ 204.158,03 (a-Si), R\$389.631,36 (c-Si) e de R\$395.437,96 (p-Si) respectivamente. Se retirarmos desta receita FV o valor médio do consumo anual teremos os valores mostrados na Tabela 24 (Receita FV subtraída do consumo médio anual).

Para os cálculos apresentados na Tabela 26 (c-si) e Tabela 27 (p-si), a economia foi corrigida anualmente pela taxa de 4% (reajuste da tarifa), considerado para o cálculo do valor futuro uma TIR de 7%.

O saldo devedor referente ao valor inicial do investimento foi corrigido pelo prazo de 25 anos com a TIR de 7%. O montante corrigido para os sistemas foi de R\$22.253.225,27 (a-Si), R\$42.145.808,38 (c-Si) e de R\$43.145.808,38 (p-Si) respectivamente.

Este montante foi sendo decrescido pelo valor da economia (receita FV) gerada corrigida até o valor final de 25 anos.

De acordo com os dados proporcionados pelas tabelas apresentadas para os três sistemas de tecnologias no modelo *net-metering*, verificou-se que restaria ainda um saldo devedor após os 25 anos de análise, ou seja, não possibilitaria ao investidor a recuperação do investimento inicial.

## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

**Tabela 25 - Cálculo financeiro para o sistema (a-Si) - Net-metering.**

Tempo (ano)	Nº de anos	Receita FV (R\$)	Valor final (R\$)	Saldo devedor (R\$)
1	24	204.158,03	1.035.564,44	21.217.660,83
2	23	212.324,35	1.006.529,93	20.211.130,90
3	22	220.817,33	978.309,46	19.2328.21,44
4	21	229.650,02	950.880,22	18.281.941,21
5	20	238.836,02	924.220,03	17.357.721,18
6	19	248.389,46	898.307,32	16.459.413,86
7	18	258.325,04	873.121,13	15.586.292,72
8	17	268.658,04	848.641,10	14.737.651,62
9	16	279.404,36	824.847,43	13.912.804,20
10	15	290.580,54	801.720,86	13.111.083,33
11	14	302.203,76	779.242,71	12.331.840,62
12	13	314.291,91	757.394,78	11.574.445,84
13	12	326.863,58	736.159,41	10.838.286,43
14	11	339.938,13	715.519,43	10.122.767,00
15	10	353.535,65	695.458,14	9.427.308,86
16	9	367.677,08	675.959,31	8.751.349,55
17	8	382.384,16	657.007,18	8.094.342,37
18	7	397.679,53	638.586,42	7.455.755,95
19	6	413.586,71	620.682,13	6.835.073,82
20	5	430.130,18	603.279,82	6.231.794,00
21	4	447.335,38	586.365,44	5.645.428,56
22	3	465.228,80	569.925,28	5.075.503,27
23	2	483.837,95	553.946,07	4.521.557,20
24	1	503.191,47	538.414,87	3.983.142,33
25	0	523.319,13	523.319,13	<b>3.459.823,20</b>

## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

**Tabela 26-** Cálculo financeiro para o sistema (c-Si) - *Net-metering*.

Tempo (ano)	Nº de anos	Receita FV (R\$)	Valor final (R\$)	Saldo devedor (R\$)
1	24	389.631,39	1.976.353,39	40.169.454,99
2	23	405.216,65	1.920.941,61	38.48.513,38
3	22	421.425,31	1.867.083,43	36.381.429,95
4	21	438.282,32	1.814.735,30	34.566.694,65
5	20	455.813,62	1.763.854,87	32.802.839,78
6	19	474.046,16	1.714.401,00	31.088.438,78
7	18	493.008,01	1.666.333,68	29.422.105,11
8	17	512.728,33	1.619.614,04	27.802.491,06
9	16	533.237,46	1.574.204,30	26.228.286,76
10	15	554.566,96	1.530.067,73	24.698.219,03
11	14	576.749,64	1.487.168,64	23.211.050,39
12	13	599.819,62	1.445.472,32	21.765.578,07
13	12	623.812,41	1.404.945,06	20.360.633,01
14	11	648.764,91	1.365.554,08	18.995.078,93
15	10	674.715,50	1.327.267,51	17.667.811,42
16	9	701.704,12	1.290.054,41	16.377.757,01
17	8	729.772,29	1.253.884,66	15.123.872,35
18	7	758.963,18	1.218.729,01	13.905.143,34
19	6	789.321,70	1.184.559,04	12.720.584,30
20	5	820.894,57	1.151.347,10	11.569.237,20
21	4	853.730,36	1.119.066,34	10.450.170,85
22	3	887.879,57	1.087.690,65	9.362.480,20
23	2	923.394,75	1.057.194,65	8.305.285,55
24	1	960.330,54	1.027.553,68	7.277.731,87
25	0	998.743,76	998.743,76	<b>6.278.988,10</b>

## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

**Tabela 27-** Cálculo financeiro sistema (p-Si) - *Net-metering*.

Tempo (ano)	Nº de anos	Receita FV (R\$)	Valor final (R\$)	Saldo devedor (R\$)
1	24	395.437,96	2.005.806,44	41.140.001,94
2	23	411.255,48	1.949.568,88	39.190.433,06
3	22	427.705,70	1.894.908,07	37.295.525,00
4	21	444.813,93	1.841.779,80	35.453.745,19
5	20	462.606,48	1.790.141,12	33.663.604,07
6	19	481.110,74	1.739.950,24	31.923.653,83
7	18	500.355,17	1.691.166,59	30.232.487,24
8	17	520.369,38	1.643.750,71	28.588.736,53
9	16	541.184,15	1.597.664,24	26.991.072,29
10	15	562.831,52	1.552.869,91	25.438.202,38
11	14	585.344,78	1.509.331,51	23.928.870,87
12	13	608.758,57	1.467.013,80	22.461.857,07
13	12	633.108,91	1.425.882,57	21.035.974,50
14	11	658.433,27	1.385.904,56	196.50.069,94
15	10	684.770,60	1.347.047,42	183.03.022,52
16	9	712.161,43	1.309.279,73	16.993.742,79
17	8	740.647,88	1.272.570,96	15.721.171,83
18	7	770.273,80	1.236.891,40	14.484.280,44
19	6	801.084,75	1.202.212,20	13.282.068,24
20	5	833.128,14	1.168.505,31	12.113.562,92
21	4	866.453,27	1.135.743,48	10.977.819,44
22	3	901.111,40	1.103.900,21	9.873.919,23
23	2	937.155,85	1.072.949,74	8.800.969,49
24	1	974.642,09	1.042.867,03	7.758.102,46
25	0	1.013.627,77	1.013.627,77	<b>6.744.474,69</b>

Os próximos valores apresentados na Tabela 28 correspondem ao Modelo *feed-in tariff*.

**Tabela 28 -** Cálculo financeiro sistema (a-Si) - Modelo: *feed-in tariff*.

## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

Tempo (ano)	Nº de anos	Receita gerada FV (R\$)	Valor final - 25 anos (R\$)	Saldo devedor (R\$)
1	24	1.052.360,96	5.337.960,96	16.915.264,31
2	23	1.126.026,23	5.337.960,96	11.577.303,36
3	22	1.204.848,06	5.337.960,96	6.239.342,40
4	21	1.289.187,43	5.337.960,96	901.381,44
<b>5</b>	<b>20</b>	<b>1.379.430,55</b>	<b>5.337.960,96</b>	<b>-4.436.579,51</b>
6	19	1.475.990,69	5.337.960,96	-9.774.540,47
7	18	1.579.310,03	5.337.960,96	-15.112.501,43
8	17	1.689.861,74	5.337.960,96	-20.450.462,38
9	16	1.808.152,06	5.337.960,96	-25.788.423,34
10	15	1.934.722,70	5.337.960,96	-31.126.384,30
11	14	2.070.153,29	5.337.960,96	-36.464.345,25
12	13	2.215.064,02	5.337.960,96	-41.802.306,21
13	12	2.370.118,50	5.337.960,96	-47.140.267,16
14	11	2.536.026,80	5.337.960,96	-52.478.228,12
15	10	2.713.548,67	5.337.960,96	-57.816.189,08
16	9	2.903.497,08	5.337.960,96	-63.154.150,03
17	8	3.106.741,88	5.337.960,96	-68.492.110,99
18	7	3.324.213,81	5.337.960,96	-73.830.071,95
19	6	3.556.908,77	5.337.960,96	-79.168.032,90
20	5	3.805.892,39	5.337.960,96	-84.505.993,86
21	4	4.072.304,86	5.337.960,96	-89.843.954,82
22	3	4.357.366,20	5.337.960,96	-95.181.915,77
23	2	4.662.381,83	5.337.960,96	-100.519.876,73
24	1	4.988.748,56	5.337.960,96	-105.857.837,69
25	0	5.337.960,96	5.337.960,96	-111.195798,64

## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

**Tabela 29** - Cálculo financeiro sistema (c-Si) - Modelo: *feed-in tariff*.

Tempo (ano)	Nº de anos	Receita FV (R\$)	Valor final (R\$)	Saldo devedor (R\$)
1	24	2.008.357,55	10.187.126,47	31.958.681,91
2	23	2.148.942,58	10.187.126,47	21.771.555,45
3	22	2.299.368,56	10.187.126,47	11.584.428,98
4	21	2.460.324,36	10.187.126,47	1.397.302,51
<b>5</b>	<b>20</b>	<b>2.632.547,06</b>	<b>10.187.126,47</b>	<b>-8.789.823,96</b>
6	19	2.816.825,36	10.187.126,47	-18.976.950,42
7	18	3.014.003,13	10.187.126,47	-29.164.076,89
8	17	3.224.983,35	10.187.126,47	-39.351.203,36
9	16	3.450.732,19	10.187.126,47	-49.538.329,82
10	15	3.692.283,44	10.187.126,47	-59.725.456,29
11	14	3.950.743,28	10.187.126,47	-69.912.582,76
12	13	4.227.295,31	10.187.126,47	-80.099.709,23
13	12	4.523.205,98	10.187.126,47	-90.286.835,69
14	11	4.839.830,40	10.187.126,47	-100.473.962,16
15	10	5.178.618,53	10.187.126,47	-110.661.088,63
16	9	5.541.121,83	10.187.126,47	-120.848.215,10
17	8	5.929.000,35	10.187.126,47	-131.035.341,56
18	7	6.344.030,38	10.187.126,47	-141.222.468,03
19	6	6.788.112,50	10.187.126,47	-151.409.594,50
20	5	7.263.280,38	10.187.126,47	-161.596.720,96
21	4	7.771.710,01	10.187.126,47	-171.783.847,43
22	3	8.315.729,71	10.187.126,47	-181.970.973,90
23	2	8.897.830,79	10.187.126,47	-192.158.100,37
24	1	9.520.678,94	10.187.126,47	-202.345.226,83
25	0	10.187.126,47	10.187.126,47	-212.532.353,30

## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

Tabela 30 - Cálculo financeiro sistema (p-Si) - Modelo: *feed-in tariff*.

Tempo (ano)	Nº de anos	Receita FV (R\$)	Valor final (R\$)	Saldo devedor (R\$)
1	24	2.038.340,00	10.339.208,46	32.806.599,92
2	23	2.181.023,80	10.339.208,46	22.467.391,47
3	22	2.333.695,47	10.339.208,46	12.128.183,01
4	21	2.497.054,15	10.339.208,46	1.788.974,56
<b>5</b>	<b>20</b>	<b>2.671.847,94</b>	<b>10.339.208,46</b>	<b>-8.550.233,90</b>
6	19	2.858.877,29	10.339.208,46	-18.889.442,35
7	18	3.058.998,71	10.339.208,46	-29.228.650,81
8	17	3.273.128,61	10.339.208,46	-39.567.859,27
9	16	3.502.247,62	10.339.208,46	-49.907.067,72
10	15	3.747.404,95	10.339.208,46	-60.246.276,18
11	14	4.009.723,30	10.339.208,46	-70.585.484,63
12	13	4.290.403,93	10.339.208,46	-80.924.693,09
13	12	4.590.732,20	10.339.208,46	-91.263.901,54
14	11	4.912.083,46	10.339.208,46	-101.603.110,00
15	10	5.255.929,30	10.339.208,46	-111.942.318,46
16	9	5.623.844,35	10.339.208,46	-122.281.526,91
17	8	6.017.513,46	10.339.208,46	-132.620.735,37
18	7	6.438.739,40	10.339.208,46	-142.959.943,82
19	6	6.889.451,15	10.339.208,46	-153.299.152,28
20	5	7.371.712,74	10.339.208,46	-163.638.360,74
21	4	7.887.732,63	10.339.208,46	-173.977.569,19
22	3	8.439.873,91	10.339.208,46	-184.316.777,65
23	2	9.030.665,08	10.339.208,46	-194.655.986,10
24	1	9.662.811,64	10.339.208,46	-204.995.194,56
25	0	10.339.208,46	10.339.208,46	-215.334.403,01

Os valores apresentados para os três sistemas selecionados no trabalho apontam uma receita gerada no primeiro ano de R\$1.052.360,96 (a-Si), R\$2.008.357,55 (c-Si) e

## Capítulo 04 – Apresentação e discussão dos Resultados

---

R\$2.038.340,00 (p-Si), respectivamente. Esta receita seria então corrigida anualmente a uma taxa de reajuste de 7%.

Pelo estudo da avaliação econômica mostrada nas tabelas acima mediante os cálculos apresentadas para os três sistemas de tecnologias no modelo *feed-in tariff*, verificou-se que foi possível o retorno do investimento inicial que foi corrigido em 25 anos.

Neste estudo, o investidor já no quinto ano estaria obtendo o retorno do investimento feito inicialmente sendo de R\$4.436.579,51 para a tecnologia do a-Si, R\$8.789.823,96 para a tecnologia do (c-Si) e de R\$8.550.223,90 para a tecnologia do p-Si.



### 5. CONCLUSÕES

Este trabalho enfocou aspectos relativos à avaliação do potencial de geração de energia solar FV considerando sua aplicação em quatro edificações do Campus I do CEFET-MG e o fato de que a instalação do sistema seria interligado à rede elétrica pública local.

Para isso, foi realizado um levantamento de dados constituído por estudo do perfil do consumo de energia elétrica da Instituição, ao longo de um período de 16 anos, para consolidar-se uma visão do padrão histórico da demanda de energia elétrica. Em seguida fez-se o estudo das plantas arquitetônicas das edificações para verificação da possibilidade de instalação dos módulos solares e estudo dos níveis de irradiação solar incidente em Belo Horizonte, a fim de avaliar-se a viabilidade do projeto.

A partir desses estudos preliminares, foi simulada a implantação de algumas das tecnologias FV disponíveis comercialmente.

Nas simulações apresentadas, trabalhou-se com três tipos de tecnologias FV, cuja aplicação é grande em países que já consolidaram o uso da energia solar FV. A escolha pelas tecnologias de silício amorfo (a-Si), silício monocristalino (c-Si) e silício policristalino (p-Si) se deu, em função de serem as que apresentam maior emprego no campo das aplicações em sistemas experimentais a nível nacional.

Considerou-se, neste trabalho, que a instalação dos módulos FV seria feita apenas na cobertura das edificações. Foram estudados dois tipos de situação: no primeiro caso, procurou-se projetar um sistema que pudesse atender 100% do consumo de energia médio diário total. Nessa primeira avaliação, observou-se que a área de cobertura disponível é suficiente, levando-se em conta qualquer uma das tecnologias utilizadas.

Mais que isso, se forem consideradas as tecnologias de p-Si e c-Si, a necessidade de utilização da área de cobertura para o atendimento do consumo de energia, tendo como base o ano de 2009, seria de aproximadamente 50%, o que significa que há espaço para suprir a expansão do consumo de energia elétrica em longo prazo.

No segundo caso, avaliou-se a colocação de módulos FV em 100% das áreas de cobertura disponíveis, para o caso do uso das tecnologias de p-Si e c-Si. Verificou-se que, nessa situação, haveria um excedente de energia solar FV gerado da ordem de mais de 100 %, que poderia ser repassado à concessionária de energia elétrica por meio de acerto contratual.

Deste modo, as edificações do Campus I do CEFET-MG poderiam gerar uma parcela significativa da energia elétrica consumida, diminuindo-se os gastos mensais com as faturas de energia elétrica. É importante destacar que o atendimento da carga por parte da energia FV se concentra no período diurno e que há a necessidade de alimentação de energia elétrica pela concessionária pública local, sendo a energia FV complementar à energia convencional (pelo fato de não haver acumuladores de energia para fornecimento noturno).

Além disso, é fundamental a existência de critérios claros para o estabelecimento de projetos de geração alternativa de energia de forma distribuída.

A partir do conteúdo exposto e discutido neste trabalho, algumas conclusões devem ser salientadas.

A solução de implantação de energia solar FV como complementar à energia convencional é viável do ponto de vista do suprimento de energia elétrica para as edificações estudadas.

Do ponto de vista econômico, a maior contribuição dos sistemas solares FV propostos seria a redução do valor da conta de energia elétrica a ser paga à concessionária com a aplicação dos modelos de *net-metering* e *feed-in tariff*.

Entretanto, no primeiro modelo *net-metering* estudado na análise de investimento foi possível verificar que não haveria o retorno do capital investido, se utilizado uma taxa interna de retorno de 0,7% ao ano.

Em contrapartida, para o segundo modelo *feed-in tariff* a análise de investimento foi promissora, pois com tarifas subsidiadas para a venda de uma energia renovável e limpa, os cálculos apresentaram um retorno de investimento no quinto ano. Nesse sentido, a existência de mecanismos regulatórios será indispensável para o seu fomento.

É importante ressaltar que são necessários incentivos governamentais para a disseminação dessa energia renovável em novos projetos e que, atualmente, não há regulamentação que promova e nem programa de incentivo para que a energia solar FV no Brasil tenha aplicação interligada à rede elétrica pública, havendo, até o momento, somente estudos experimentais.

Não há necessidade de implantação, por parte da Instituição, de sistema auxiliar de energia elétrica para o horário de ponta, pois a demanda de energia nesse período apresentou menos de 10% do valor no horário fora de ponta.

Os níveis de irradiação solar em Belo Horizonte são favoráveis ao emprego de tecnologia FV. Um exemplo disso é que atualmente, suas edificações urbanas novas já incorporam projetos de utilização de energia solar para aquecimento de água e as antigas sofrem adaptação nesse sentido.

Os dados apresentados poderão auxiliar na exposição dos benefícios e do potencial das edificações urbanas do Brasil para a utilização desta fonte de energia de caráter renovável, sustentável, silenciosa e limpa.

A implantação dos sistemas solares FV nas áreas de cobertura das edificações do Campus I poderá ser uma vitrine para a divulgação dessa nova tecnologia, despertando na comunidade acadêmica da Instituição o interesse por projetos e trabalhos de pesquisa aplicados nesta área, além de difundir a aplicação dos sistemas FV interligados à rede elétrica.

Em suma, a implantação desse sistema solar FV poderia gerar energia elétrica suficiente para o suprimento da Instituição em alguns períodos do dia e também servir como uma mini usina geradora de energia elétrica de forma distribuída.

### **5.1. LIMITAÇÕES DO TRABALHO**

A disponibilização de informações (dados reais de irradiação solar de Belo Horizonte ) provenientes de entidades de pesquisa e órgãos públicos foi o principal fator dificultador para a realização desse trabalho. Quando se tornou possível, após longas negociações, o acesso a esses dados, percebeu-se que havia inconsistências e que os mesmos não possuíam informa-

ções coletadas em tempo suficiente para o apropriado desenvolvimento do trabalho (série histórica de curta duração).

Em linhas gerais, o estudo realizado deixou claro a necessidade de um banco de dados mais extenso para todas as análises que foram apresentadas, de maneira que se possa garantir o aproveitamento do potencial de geração solar FV ao longo de todo ano considerando suas estações.

### 5.2. CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

As principais contribuições deste trabalho de pesquisa são:

- O estímulo à discussão sobre a aplicação de energia solar FV como fonte complementar à geração elétrica convencional.
- O incentivo às instituições públicas, principalmente de ensino, a realizarem estudos para adequação de suas instalações atuais e possíveis expansões futuras, contemplando a utilização da energia FV.
- A apresentação desse estudo de caso mostra a energia solar FV se configurando como uma real alternativa complementar no abastecimento de energia elétrica.
- O estudo simplificado da área de sombreamento sobre o Prédio Administrativo assinalou a importância deste estudo em projetos de implantação dos sistemas FV, mostrando uma redução de módulos e conseqüentemente uma redução dos custos do sistema.
- A disseminação dos conceitos e benefícios que favoreçam a utilização de fontes renováveis de energia em edificações públicas.
- O levantamento e a avaliação do consumo energético do Campus I do CEFET-MG ao longo de um período de 16 anos (1994 a 2009).
- A constatação futura da necessidade de contratação de um novo valor de demanda pela Instituição, pelo fato de o seu máximo, 320kW (considerando a variação de 10%), já ter sido ultrapassado em alguns dos dias analisados.

- O levantamento do perfil da carga demandada pela Instituição.

### 5.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo de avaliação do potencial de energia FV realizado neste trabalho permite que sejam feitas análises de outras edificações de caráter público assim como as instituições de ensino que possuam características favoráveis à implantação sistemas FV nas áreas de coberturas para qualquer região do Brasil.

Ressalta-se ainda, que, geralmente, essas edificações apresentam um pico de demanda de energia diurno coincidindo com o horário de geração de energia solar FV.

Sugere-se que haja o desenvolvimento de modelos e programas computacionais que englobem o maior número de variáveis relacionadas ao melhor aproveitamento da energia solar FV.

E ainda, o levantamento de um adequado banco de dados de irradiação solar que possibilite uma análise ampla, projetos e execução em longo prazo.

A avaliação da viabilidade econômica mais aprofundada deve ser estudada com o objetivo de levantarem-se os custos específicos diretos e indiretos para a implantação dos sistemas solares FV.

É importante também avaliar-se a parte de regulamentação, de tarifação, de medições e de contratos a serem estabelecidos entre novos geradores de energia solar FV e concessionária local, para que a geração distribuída possa vir a se tornar uma realidade no nosso país.



## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **Energia Solar Fotovoltaica - Terminologia**. NBR 10899, 2006.

ANEEL. **Atlas da Energia Elétrica do Brasil**. 3ª ed. Brasília, 2006, 2008.

ANEEL. **Matriz de Energia Elétrica**. [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br), p. acesso em: 20/06/2009, 2005, 2007, 2009.

ANEEL. **Resolução nº 456/2000**. [www.aneel.gov/cedoc/res2000456](http://www.aneel.gov/cedoc/res2000456). acesso em: 10/04/2009.

AUTODESK. **Ecotect Analysis**, 2010.

BEN. Resultados preliminares. **Balço Energético Nacional 2008**: ano base 2007. Rio de Janeiro: EPE, 2008 a.

BENEDITO, R. S.; MACÊDO, W.N; ZILLES, R. **A Produção de Eletricidade com Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede**: barreira econômica, pontos de conexão e mecanismos de incentivo, 2008.

BUTZKE, I. C.; PEREIRA G. R.; NOEBAUER D. **Sugestão de Indicadores para Avaliação do Desempenho das Atividades Educativas do Sistema de Gestão Ambiental – SGA** da Universidade Regional de Blumenau. 2002.

CARETO, H.; VENDEIRINHO, R. **Sistemas de Gestão Ambiental em Universidades: Caso do Instituto Superior Técnico de Portugal**. Relatório Final de Curso, 2003. Disponível em: <http://meteo.ist.utl.pt/~jjdd/20artigo.pdf>. Acesso em: 10 mai. 2008.

CASTRO N, **Grupo de Estudos do Setor Elétrico do Instituto de Economia da UFRJ**, 2009.

CASTRO, R. M. G. “**Energias Renováveis e Produção Descentralizada**”. **Tese de Doutorado**. Lisboa. DEEC/Área Científica de Energia, 2008.

CEMIG, **Tarifas e Serviços**. Disponível em: <http://agenciavirtual.cemig.com.br/portal/avisos/> Acesso em: jan. 2009.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Conta de Energia Elétrica**. Janeiro de 1994 a Dezembro de 2009 - Centro

Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Belo Horizonte: CEMIG, 2009.

CRESESB/CEPEL. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica** Sérgio de Salvo Brito. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/tutorial/solar/apstenergiasolar.htm>, acesso em 09.07.2009, 2004, 2006.

DIAS, J. B. **Instalações Fotovoltaica Conectada à rede**: Estudo Experimental para a otimização do Fator de Dimensionamento. Tese. UFRGS, 2006.

DIAS, R. A. **A Conservação de Energia**. In: Impactos da substituição de equipamentos na conservação de energia. Guaratinguetá, 1999. P 18-19. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica – Transmissão e Conservação de Energia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 2006.

DOIG, A. **Off-grid Electricity for Developing Countries**, IEE Review, 45 (1): 25-28, 1999.

EPE. **Empresa de Pesquisa Energética** – disponível em [www.epe.gov.br](http://www.epe.gov.br). Acesso em: 05/07/09.

ENERGY PARTNERS, **Innovation and the Learning Curve**: reducing costs and creating value, 2006.

EPE. **Balço energético Nacional 2008**: Ano base 2009. Relatório Final. Ministério de Minas e Energia, 2007, 2008, 2009.

EPIA. **European Photovoltaic Industry Association**: , *Greenpeace, Solar Generation V*, 2008.

ERGE, T.; HOFFMANN, V.U. & KIEFER, K. . **The German Experience with Gridconnected PV-Systems**. Solar Energy, Vol. 70. 2001.

FOUTO, A. R. F. **O Papel das Universidades Rumo ao Desenvolvimento Sustentável: das Relações Internacionais às Práticas Locais**. Dissertação. (Mestrado em Gestão e Políticas Ambientais Relações Internacionais do Ambiente), 2002. Disponível em:[http://campus.fct.unl.pt/campusverde/W\\_RIA\\_ARFF.doc](http://campus.fct.unl.pt/campusverde/W_RIA_ARFF.doc). Acesso em: 07 dez. 2008.

GREEN M. A. **Crystalline and Thin Film Silicon Solar Cells: State of the Art and Future Potential.** Solar Energy, n.74, p. 181-192, 2003.

HAMMOND, C. R. **The Elements Handbook of Chemistry and Physics**, ED. D.R. Lide, USA, CRC Press, 1998.

IBGE, Informações disponíveis no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - <http://www.ibge.gov.br/home/>, 2008, 2009.

IEA – PVPS – **International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme.** “IMPLEMENTING AGREEMENT ON PHOTOVOLTAIC POWER SYSTEMS” Report IEA – PVPS 18p.2008.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF UNIVERSITIES. **Educations for Sustainable Development.** 1993. Disponível em: <http://portal.unesco.org/education>. Acesso em: 20 nov. 2009.

IPCC. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – **Climate Change 2007: the scientific basis.** Paris, 2007.

JARDIM, C. S.. **A Inserção da Geração Solar Fotovoltaica em Alimentadores Urbanos Enfocando a Redução do Pico de Demanda Diurno.** Tese. Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

JARDIM, C. S.; RÜTHER, R.; SALAMONI, I, T.; VIANA, T.; REBECHI, S, H.; KNOB, P. **The strategic siting and the roofing área requirements of building-integrated photovoltaic solar energy generators in urban in Brazil.** Solar and Building, v 40, p.365-370, 2007.

KESHNER, M. S.; ARYA, R. **Study of potential cost reductions resulting from super-large-scale manufacturing of pv modules.** Final Subcontract Report, NREL/SR-520-36846, U.S. Department of Energy, Golden, CO, 2004.

KNOB, P., RÜTHER, R. **Optimum Siting of Building-Integrated Photovoltaics in Urban Environments in Brazil: The Potencial of PV in Assisting Day Time Peaking Feeders.** In: 21<sup>st</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference. Munich, Alemanha:WIP - München, 2006.

KRAEMER, MARIA E. P. **Gestão Ambiental: Um Enfoque no Desenvolvimento Sustentável**, 2004. Disponível em <http://www.gestaoambiental.com.br/kraemer.php>. Acesso em 28 de novembro de 2008

KUROKAWA, K. **PV Systems in Urban Environment**. Solar Energy Materials & Solar Cells, n.67, p.629-637, 2001.

LABEEE, **Laboratório de Eficiência Energética em Edificações**. Energia Solar Fotovoltaica. Disponível em: [http://www.labeee.ufsc.br/linhas\\_pesquisa/energia\\_solar/index.html](http://www.labeee.ufsc.br/linhas_pesquisa/energia_solar/index.html). Acesso em junho 2008.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**: PW Editores. São Paulo, 1997.

MARTINS, F. R.; RÜTHER, R.; PEREIRA, E. B.; ABREU, S. L.. **Solar Energy Scenarios in Brazil**. Part two: Photovoltaics applications. Energy Policy. Vol 36, pg 2855-2867, 2008.

MAYCOCK, P. D. **PV News Annual Survey of PV Module Production**, PV News, Vol.22 (3), 2003.

MAYOR, F. **Preparar um Futuro Viável**: ensino superior e desenvolvimento sustentável. *In*: Conferência mundial sobre o ensino superior. Tendências de educação superior para o século XXI. **Anais**. Paris: 1998.

MINISTERIO DA CIÊNCIA TECNOLOGIA. **Efeito Estufa e a Convenção sobre Mudança do Clima**. Ministério da Ciência e Tecnologia – disponível em: [www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br). - 2007.

MINISTERIO DAS MINAS DE ENERGIA. **Balço Energético Nacional**. Disponível em: <http://WWW.mme.gov.br>. Acesso em: Março de 2010.

MINTS, P., **Review of Global Incentive Programs**. Navigant Consulting, 1–72, 2008.

MOOR, H. D.; SCHAEFFER, G. J.; SEEBREGTS, A.; BEURSKENS, L.; DURSTEWITZ, M.; ALSEMA, E.; SARK, W. V.; LAUKAMP, H.; BOULANGER, P.; ZUCCARO, C. **Experience Curve Approach for More Effective Policy Instruments**. *In*:

Proceedings of the 3rd World Conference on Photovoltaic Solar Energy Conversion, 2003. Anais. Osaka, Japan, 2003.

NEIJ, L. **Cost development of future technologies for power generation** – A study based on experience curves and complementary bottom-up assessments. Energy Policy. Suécia, 2008.

OLIVEIRA, S. H. F. **Geração Distribuída de Eletricidade**: inserção de edificações fotovoltaicas conectadas à rede no estado de São Paulo. Tese de Doutorado. São Paulo, 2002.

ONS. **Operador Nacional do Sistema**: Disponível em: <[www.ons.org.br](http://www.ons.org.br)> 2008.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. D.; RÜTHER, R. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**: INPE. São José dos Campos, 2008.

PEREIRA, E. M. **Energia Solar Térmica**. In: “Fontes Alternativas de Energia no Brasil”. Rio de Janeiro: Ed. Ciência Moderna. 2004.

PEREZ, R.; COLLINS, B.. **Solar Energy Security**: Could Dispersed PV Generation Have Made a Difference in the Massive North American Blackout?. Refocus; Elsevier; July/August, p. 24-29, 2004.

PEREZ, R.; SEALS, R.; STRWART, R. **Matching Utility Peak Loads with Photovoltaics**: Renew-94. NESEA’s Annual Meeting, 1994.

PHOTON-INTERNATIONAL. **PV Market Survey**, The Photovoltaic Magazine Aachen, Germany, 2006.

PHOTON-INTERNATIONAL. **Surprise, Surprise**, The Photovoltaic Magazine Aachen, Germany, p.176-196. Março, 2010.

PLASTOW, J.W. **Energy Services for an Electricity Industry Based on Renewable Energy**, IEE Power Engineering Journal, 15(5): 239-247, 2001.

PNE. **Plano Nacional de Energia 2030**.MME/EPE. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PNE/Forms/Empreendimento>, 2008.

PNE V.9. Plano Nacional de Energia 2030 – Volume 9: **Geração de Energia Elétrica a partir de Outras Fontes**, MME/EPE. Disponível em [http://www.epe.gov.br/PNE/20080512\\_5.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_5.pdf), 2008.

**PNMC. Plano Nacional sobre Mudança do Clima.** Governo Federal – Comitê Interministerial sobre Mudança do Clima, Brasília. Disponível em:  
[http://www.cogensp.com.br/cogensp/publicacao/2008/PNMC\\_dezembro\\_2008.pdf](http://www.cogensp.com.br/cogensp/publicacao/2008/PNMC_dezembro_2008.pdf), 2008.

REIS, L. B. D.; FADIGAS, E. A. A.; CARVALHO, C. E. **Energia, Recursos Naturais e a Prática do Desenvolvimento Sustentável** Ed. Manole. 2005.

**REN21 Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.** Renewables – Global Status Report, disponível em [www.ren21.net](http://www.ren21.net), 2007.

RIBEIRO, A. L. **Avaliação de Barreiras para Implementação de um Sistema de Gestão Ambiental na UFRGS.** In: XXV Encontro Nacional de Engenharia de Produção, Porto Alegre, RS, 2005.

RODRIGUES, C. **Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída:** o caso dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Dissertação. Universidade Estadual de Campinas, 2002.

RÜTHER, R.; DACOREGIO, M. **Performance Assessment of a 2 kWp Grid-Connected, Building-integrated, Amorphous Silicon Photovoltaic Installation in Brazil.** Progress in Photovoltaics Research and Applications, v.8, p.257-266, 2000.

RÜTHER, R.; MONTENEGRO, A. **Mapas de Irradiação Solar para o Brasil:** Resultados do Projeto SWERA. In: International Conference on Passive and Low-energy Architecture. Anais.: PLEA 2001.v.p. 243-248, 2001.

RÜTHER, R.; TAMIZH-MANI, G.; CUETO, J. D.; ADELSTEIN, J.; MONTENEGRO, A. A.; ROEDEM, B. V. **Performance Test of Amorphous Silicon Modules in Different Climates:** higher minimum operating temperatures lead to higher performance levels: 3rd World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Osaka, Japão, 2003.

RÜTHER, R. **Edifícios Solares Fotovoltaicos:** O Potencial da Geração Solar Fotovoltaica Integrada a Edificações Urbanas e Interligada à Rede Elétrica Pública. Editora da UFSC. LABSOLAR. Florianópolis, 2004.

RÜTHER, R.;REGUSE, W.;DACOREGIO, M. M.;RICARDO, R. V.;JARDIM, C.; PARECY, E. **Avaliação do Impacto da Geração Distribuída Utilizando Sistemas Solares Fotovoltaicos Interligados à Rede de Distribuição**. In: Seminário de pesquisa e desenvolvimento - CELESC, Anais. Florianópolis - SC, 2004.

RÜTHER, R.; DACOREGIO, M.; SALAMONI, I.; KNOB, P. **Performance of the First Gridconnected BIPV Installation in Brazil Over Eight Years of Continuous Operation**. In: Proceedings of the 21st European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2006. Anais. Dresden, Germany,v.p. 2761-2764, 2006.

RÜTHER, R.;KNOB, P.;JARDIM, C.; REBECHI, S. **The Potential of Building-Integrated Photovoltaic Solar Energy Generators in Assisting Daytime Peaking Feeders in Urban Areas in Brazil**. Energy Conversion & Management, v.Manuscript submitted for publication, 2007.

RÜTHER, R.; BRAUN, P. **Energetic Contribution Potential of Building-Integrated Photovoltaics on Airports in Warm Climates**. Solar Energy, 83, 1923-1931, 2009.

SALAMONI, I. T. **Metodologia para cálculo de geração fotovoltaica em áreas urbanas aplicada a Florianópolis e Belo Horizonte**. Dissertação. UFSC. 2004

SALAMONI, I. T. **O paradigma do alto custo da energia fotovoltaica no Brasil e a paridade tarifária**. In: Eco\_Lógicas: Concurso Catarinense de Monografias sobre Energias Renováveis e Eficiência Energética, Santa Catarina: Instituto Ideal, 2008.

SANTOS, I.P. **Integração de painéis solares fotovoltaicos em edificações residenciais e sua contribuição em um alimentador de energia de zona urbana mista**. Dissertação. UFSC, 2009.

SANTOS, I.P; URBANERTZ J.J; RUTHER, R. **Energia solar fotovoltaica como fonte complementar de energia elétrica para residências na busca da sustentabilidade**. In: Encontro Nacional de tecnologia do Ambiente Construído, 12, Fortaleza, 2008.

SANYO SOLAR ARK. 2007. Disponível em: <<http://www.sanyo.com/industrial/solar/>>. Acesso em: Julho de 2009.

SEMASP - **Secretaria de Estado do Meio Ambiente do Estado de São Paulo Unidade de Energia e Meio Ambiente** - São Paulo – SP. Disponível em: [www.ambiente.sp.gov.br](http://www.ambiente.sp.gov.br), 2009.

SICK, F. et al. **Photovoltaics in Buildings: A Design Handbook for Architects and Engineers**. London, 1996.

SILVA, M. M. **Sistemas de Iluminação Artificial**: análise de implantação e manutenção de sistemas eficientes. Dissertação (Mestrado), CEFET-MG, DPPG, 210p. 2006.

TIBA, C. **Atlas Solarimétrico do Brasil** - banco de dados terrestres: Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000.

VARELLA, F. K. O. M. **Estimativa do Índice de Nacionalização dos Sistemas Fotovoltaicos no Brasil**. Tese (Doutorado) Universidade Estadual de Campinas, SP, p.148, 2009.

VIANA, T. D. S.; ZOMER, C. D.; NASCIMENTO, L.; RUTHER, R. Centro de eventos da UFSC: **Integração de Sistemas Fotovoltaicos à Arquitetura**: IX Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Ouro Preto, 2007.

WADE. WADE-THE WORLD ALLIANCE FOR DECENTRALIZED ENERGY. **Worldly Survey of Decentralized Energy**: 2008. Disponível em: Dezembro 2008.

WEA. **World Energy Assessment “Overview”**, 2004. 48p WENZEL, B. What electricity from renewable energies costs. Federal Ministry for the Environment, Nature conservation and Nuclear safety. Berlin, 2007.

ZAHEDI, A. **Solar Photovoltaic (PV) Energy**; latest developments in the building integrated and hybrid PV systems. Renewable Energy. Issue 5, v.31, p.711-718, 2006.

ZILLES, R.; OLIVEIRA, S.D.; MACÊDO, W.; DINIZ, A.S.C. **Sistemas Fotovoltaicos e a Geração Distribuída de Eletricidade**: Aspectos Econômicos e Barreiras para a sua inserção na Matriz Elétrica: III CITENEL – Florianópolis, Brasil, 2005.

ZOMER, C. D. **Usina solar fotovoltaica integrada a uma edificação urbana**: o maior gerador solar do hemisfério sul. In: Eco\_Logicas: Concurso de Monografias sobre Energias Renováveis e Eficiência Energética, Santa Catarina: Instituto Ideal, 2008.