



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

**SIMULAÇÃO DE GERADOR SOLAR FOTOVOLTAICO
INTEGRADO À EDIFICAÇÃO E CONECTADO À REDE
ELÉTRICA PARA SUPRIR A DEMANDA ENERGÉTICA DO
AEROPORTO INTERNACIONAL TANCREDO NEVES -
UM ESTUDO DE CASO**

Autor: Célio Sérgio Vieira

Orientador: Ricardo Rüther, Ph.D

Florianópolis, julho de 2010

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

**SIMULAÇÃO DE GERADOR SOLAR FOTOVOLTAICO
INTEGRADO À EDIFICAÇÃO E CONECTADO À REDE
ELÉTRICA PARA SUPRIR A DEMANDA ENERGÉTICA DO
AEROPORTO INTERNACIONAL TANCREDO NEVES -
UM ESTUDO DE CASO**

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.

Autor: Célio Sérgio Vieira

Orientador: Ricardo Rüther, Ph.D

Florianópolis, julho de 2010

Vieira, C. S.. SIMULAÇÃO DE GERADOR SOLAR FOTVOLTAICO INTEGRADO À EDIFICAÇÃO E CONECTADO À REDE ELÉTRICA PARA SUPRIR A DEMANDA ENERGÉTICA DO AEROPORTO INTERNACIONAL TANCREDO NEVES - UM ESTUDO DE CASO

Esta dissertação foi julgada adequada e aprovada 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).

Profa. Dr^a. Janaíde Cavalcante Rocha

Prof. PhD. Ricardo Rütther (Orientador – UFSC)

Profa. PhD. Antônia Sônia Alves Cardoso Diniz – PUC MG

Profa. Dr^a. Janaíde Cavalcante Rocha

Prof. Dr. Jorge Coelho - UFSC

Florianópolis, julho de 2010

**À minha mãe,
À minha esposa,
À minha filha.**

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar meus sinceros agradecimentos a todos que me ajudaram, direta ou indiretamente, em particular.

A minha mãe pelas orações e apoio.

A minha esposa pela dedicação, incentivo e motivação.

A minha filha pela atenção, carinho e compreensão.

Ao CEFET-MG, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, à coordenação do curso técnico de eletrotécnica, aos diretores e demais colegas pela cooperação e apoio.

Ao meu orientador, professor Ricardo Rütger, pela paciência, compreensão e apoio no desenvolvimento desta dissertação.

Ao CPEI/CEFET-MG, Centro de Pesquisa em Energia Inteligente, em nome da professora Patricia Romeiro da Silva Jota, pela ajuda e cooperação na liberação dos dados de radiação solar.

À UFSC, Universidade Federal de Santa Catarina, em nome dos professores e colegas, pela orientação e ajuda no conhecimento ministrado.

À INFRAERO, sediada no Aeroporto Internacional Tancredo Neves, que na pessoa do superintendente geral, autorizou meu acesso às instalações do aeroporto e liberou os dados utilizados nesta pesquisa.

À CEMIG, Companhia Energética de Minas Gerais, no fornecimento de dados de memória de massa dos alimentadores.

E, de forma muito especial a DEUS que me iluminou e inspirou minhas ações na execução deste trabalho.

**“Nenhuma mente que se abre para uma nova
idéia voltará a ter o tamanho original”**

Albert Einstein

RESUMO

A geração solar fotovoltaica é apresentada como uma tecnologia apropriada para integração do envelope de edificações para gerar eletricidade junto ao ponto de consumo. Uma grande parte da demanda de energia elétrica de edificações comerciais é devida à utilização de ar-condicionado. Nesse cenário, os aeroportos se destacam por possuírem grandes áreas ensolaradas e livres de sombreamentos, possuindo um grande potencial para aplicação de sistemas solares fotovoltaicos. O Aeroporto Internacional Tancredo Neves, em Confins - Minas Gerais, localizado numa região com altos níveis de radiação solar, durante todo o ano, tem sua curva de carga coincidente com os meses de maior movimento de passageiros. Neste estudo, as tecnologias fotovoltaicas comercialmente disponíveis no mercado foram analisadas e comparadas, a fim de determinar o percentual de redução de consumo de energia elétrica. A metodologia utilizada neste estudo compreendeu as fases de obtenção de informações sobre o consumo energético do aeroporto, as plantas de arquitetura e a irradiação solar. O cálculo da geração fotovoltaica considerou a aplicação de módulos fotovoltaicos na cobertura do aeroporto e comparou tecnologias com diferentes eficiências. Neste estudo, observamos forte correlação entre a demanda e a temperatura ambiente e mesmo usando a tecnologia menos eficiente foi possível atender toda a demanda do ar condicionado.

Palavras-chave: Energia Solar Fotovoltaica; Fontes Renováveis, Painéis Fotovoltaicos Integrados a Edificação (BIPV).

ABSTRACT

The photovoltaic conversion of solar energy is presented as an ideal technology for integration on the building envelope, where electrical power can be generated at point of use. A large part of the demand for electrical energy in commercial buildings is due to the use of air conditioning. In this scenario airport buildings provides large sunny areas free of shadings, having great potential for application of photovoltaic solar systems. Tancredo Neves international airport in Confins-Minas Gerais, located in a region with high levels of solar radiation, throughout the year, has its load curve coincide with the months of greater movement of passengers. In this study, the photovoltaic technologies commercially available on the market were analyzed and compared in order to determine the percentage of reduction in consumption of electric power. The methodology used in this study understood phases to obtain information on energy consumption in the airport, the architectural blueprints and solar irradiation. The calculation of photovoltaic generation considered the application of photovoltaic modules in coverage of the airport and compared technologies with different efficiencies. In this study, we see strong correlation between the demand and the ambient temperature and even using technology less efficient could meet all the demand of air conditioning.

Keywords: solar photovoltaic; renewable sources, building-integrated photovoltaic (BIPV)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	25
1.1 Justificativa	26
1.2 Objetivo Principal e Objetivos Específicos.....	30
1.3 Estrutura do Trabalho	30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
2.1 Introdução	33
2.2 Contexto da energia solar no Brasil	40
2.3 O Consumo de energia elétrica em edifícios.....	41
2.4 O Consumo de energia em aeroportos	43
2.5 Tecnologias Fotovoltaicas.....	45
2.5.1 Introdução	45
2.5.2 Silício monocristalina e policristalina (c-Si e p-Si)	47
2.5.3 Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si)	47
3 METODOLOGIA	49
3.1 Introdução	49
3.2 Objeto de estudo	49
3.3 Coleta de dados.....	55
3.3.1 Pesquisa documental.....	56
3.3.2 Processamento de variáveis de entrada.....	56
3.3.2.1 Aeroporto Internacional Tancredo Neves.....	56
3.3.2.2 Pesquisa Bibliográfica.....	57
3.3.2.3 Software utilizado.....	57
3.3.2.4 CEFET-MG.....	57
3.3.2.5 Caracterização da coleta de dados.....	58
3.4 A Estimativa de áreas de cobertura.....	58
3.5 O Cálculo das Áreas Requeridas para sistema FV	59
3.6 O Cálculo da irradiação solar e da geração de energia FV	61
3.7 A eficiência das tecnologias fotovoltaicas	63

2.6	Varição da temperatura x Geração fotovoltaica.....	66
3.8	Avaliação Econômica	67
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	69
4.1	Introdução	69
4.2	Arquitetura do aeroporto.....	69
4.3	Conexão Elétrica dos Módulos solares fotovoltaicos	75
4.4	Irradiação solar horária global	78
4.5	Demanda do Aeroporto Internacional de Confins	80
4.6	Demanda dos alimentadores do Aeroporto Internacional de Confins	87
4.7	Cálculo da Geração FV e Área Requerida.....	89
4.8	Influências da temperatura na demanda.....	94
4.9	Análise Financeira e Viabilidade Econômica.....	96
5	CONCLUSÕES.....	111
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Radiação solar no plano inclinado média anual.....	34
Figura 2 - Matriz de oferta de energia no Brasil em TWh por fonte em 2008.	38
Figura 3 - Oferta interna de energia	38
Figura 4 - Consumo da eletricidade no mundo em 1973 e 2007.....	43
Figura 5 - Relação dos 20 aeroportos sob a responsabilidade da INFRAERO com maior número de passageiros em 2008. ...	44
Figura 6 - Aeroporto Internacional Tancredo Neves em Confins – MG.....	45
Figura 7 - Mapa de acesso ao Aeroporto Internacional de Confins	50
Figura 8 - Mapa da cobertura do TPS e estacionamento.....	51
Figura 9 -TPS e ADM lado direito.....	52
Figura 10 - TPS e ADM lado esquerdo.....	52
Figura 11 - TPS e ADM vista central.....	53
Figura 12 - EST. lado direito.....	53
Figura 13 - EST. lado direito.....	54
Figura 14 - EST. lado esquerdo.....	54
Figura 15 - Fluxograma da metodologia para aquisição dos dados usados nesta pesquisa.....	56
Figura 16 - Planta baixa do terminal de passageiros (TPS), do estacionamento (EST) e do administrativo (ADM) do Aeroporto Internacional de Confins.....	60
Figura 17 - Vista da cobertura da casa de máquinas e restaurante do Aeroporto Internacional de Confins. (Setor E).	61
Figura 18 - Irradiação Média Mensal no Aeroporto Internacional de Confins.....	62
Figura 19 - Layout dos módulos KD210GH (Kyocera) distribuídos no TPS, ADM e EST.	73
Figura 20 - Layout dos módulos PVL144 (Uni-Solar) distribuídos no TPS, ADM e EST.	74
Figura 21 - Diagrama esquemático do sistema solar fotovoltaico de 9,45 kWp usando a tecnologia p-Si.....	76

Figura 22 - Diagrama esquemático do sistema solar fotovoltaico de 8,63 kWp usando a tecnologia a-Si.	77
Figura 23 - Curva de irradiação solar em quatro dias de céu limpo de 2008, medida no CPEI do CEFET-MG na cidade de Belo Horizonte, considerando a superfície horizontal.	78
Figura 24 - Curva de irradiação solar para um dia 25/10 obtida através do aplicativo Radiasol para a cidade de Belo Horizonte, considerando superfície plana.	79
Figura 25 - Consumo histórico de energia no Aeroporto Internacional de Confins no período de 2003 a 2008, com destaque para o ar condicionado central (cor azul).	81
Figura 26 - Demanda Máxima registrada no período de jun/08 a mai/09.	83
Figura 27 - Curvas de demanda em dias com pico diurno.	84
Figura 28 - Demanda máxima dos alimentadores comparados com a demanda do aeroporto.	88
Figura 29 - Energia consumida e energia solar fotovoltaica estimada usando as tecnologias a-Si e p-Si com sistemas FV instalados nas coberturas do aeroporto, cobrindo toda a área disponível.	92
Figura 30 - Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no Aeroporto Internacional de Confins, considerando como potência instalada 1866 kWp usando 12959 módulos FV de a-Si (PVL 144).	93
Figura 31 - Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no Aeroporto Internacional de Confins, considerando como potência instalada 3922 kWp usando 18678 módulos FV de p-Si (KD210GH).	94
Figura 32 - Influência da temperatura no consumo de energia elétrica no Aeroporto Internacional Tancredo Neves. Demanda média horária com temperatura ambiente maior ou igual a 25°C o círculo é marcado em vermelho e demanda média horária inferior a 25°C o círculo fica vazio.	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 : Empreendimentos em operação no Brasil.	37
Tabela 2 : Custos da geração elétrica para diferentes fontes de energia e as perspectivas de redução de custos ao longo dos anos.	41
Tabela 3 : Valores das eficiências das tecnologias utilizadas, considerando uma temperatura padrão de 25°C(STC), 1.000 W/m ² e 1,5 A.M.....	64
Tabela 4 : Especificações Elétricas dos módulos a-Si e p-Si dos fabricantes Uni-Solar e Kyocera.....	65
Tabela 5 : Valores de eficiência e potência corrigidos para os módulos selecionados.....	67
Tabela 6 : Levantamento das áreas de cobertura do TPS, do estacionamento e do administrativo do aeroporto.	69
Tabela 7 : Relação dos locais e setores do aeroporto utilizados para simulação do gerador fotovoltaico	70
Tabela 8 : Quantidade de módulos FV para as tecnologias FV a-Si e p-Si aplicadas nas áreas disponíveis da cobertura do aeroporto. Potência CC para a tecnologia FV a-Si nas condições padrões (temperatura 25°C (STC), 1000 W/m ² e 1,5 A.M).	71
Tabela 9 : Especificações do inversor Sunny Boy SB 8000US da SMA	75
Tabela 10 : Quantitativos de módulos e sistemas FV estimado para o Aeroporto Internacional de Confins.....	75
Tabela 11 : Consumo histórico mensal e anual do Aeroporto Internacional de Confins em kWh.....	80
Tabela 12 : Energia consumida e demanda utilizada no Aeroporto Internacional de Confins no período de junho/08 a maio/09.....	82
Tabela 13 : Carga de iluminação acionada após as 18h - TPS (terminal de passageiros), TECA (transporte de carga), AVG (aviação do governo).	85
Tabela 14 : Picos de demanda histórico-mensal e horário identificado	86

Tabela 15 : Consumo de energia elétrica de cada alimentador que atende ao aeroporto e consumo do aeroporto.....	87
Tabela 16 : Pico de demanda histórica nos alimentadores.....	89
Tabela 17 : Consumo de energia elétrica do Aeroporto Internacional de Confinis e energia solar fotovoltaica estimada para as tecnologias a-Si e p-Si no horário fora de ponta (HFP).....	91
Tabela 18 : Análise comparativa das tecnologias FV a-Si e p-Si para atender o consumo médio diário do aeroporto e o percentual de contribuição.	92
Tabela 19 : Estimativa do investimento para aquisição e instalação do sistema fotovoltaico para as tecnologias a-Si e p-Si.	98
Tabela 20 : Gasto anual com o consumo da energia elétrica.	99
Tabela 21 : Novos gastos com o consumo de energia elétrica no HFP no cenário <i>net-metering</i>	100
Tabela 22 : Novos gastos com o consumo de energia no HFP no cenário <i>feed-in-tariff</i> com tarifa prêmio.....	100
Tabela 23 : Estudo financeiro para o gerador fotovoltaico baseado no KD210GH, no esquema de <i>net-metering</i> – para US\$7/Wp.	101
Tabela 24 : Estudo financeiro para o gerador fotovoltaico baseado no PVL-144, esquema de <i>net-metering</i> - para US\$7/Wp.	102
Tabela 25 : Estudo financeiro para o gerador fotovoltaico baseado no KD210GX, esquema de <i>feed-in tariff</i> - para US\$7/Wp... ..	103
Tabela 26 : Estudo financeiro para o gerador fotovoltaico baseado no PVL-144, esquema de <i>feed-in tariff</i> - para US\$7/Wp.....	104
Tabela 27 : Estimativa do investimento para aquisição e instalação do sistema fotovoltaico para as tecnologias a-Si e p-Si... ..	105
Tabela 28 : Estudo financeiro para o gerador fotovoltaico baseado no KD210GH, no esquema de <i>net-metering</i> – para US\$5/Wp.	106
Tabela 29 : Estudo financeiro para o gerador fotovoltaico baseado no PVL-144, esquema de <i>net-metering</i> - para US\$5/Wp.	107
Tabela 30 : Estudo financeiro para o gerador fotovoltaico baseado no KD210GX, esquema de <i>feed-in tariff</i> - para US\$5/Wp... ..	108
Tabela 31 : Estudo financeiro para o gerador fotovoltaico baseado no PVL-144, esquema de <i>feed-in tariff</i> - para US\$5/Wp.....	109

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas,
ADM - Administração
ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si - Silício amorfo hidrogenado
AVG - Aviação do Governo
BEN - Balanço Energético Nacional
BIPV - Energia solar fotovoltaica integrada à edificação
CdTe - Telureto de cádmio
CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais
CPEI - Centro de Pesquisa em Energia Inteligente
CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CNF Aeroporto Internacional de Confins
CO₂ - Dióxido de carbono
DG – Geração distribuída
EFCR - Edificações fotovoltaicas conectadas à rede
EFF - Eficiência da Célula Fotovoltaica
EPBD - Desempenho Energético dos Edifícios
EPE - Empresa de Pesquisa Energética
FECC - Fator efetivo de capacidade de carga
FP - Fator de Potência
FV - Fotovoltaico
G_{POA} - Irradiação no plano do painel
GW - Gigawatt
HFP - horário fora de ponta
HIT - Heterojunction with Intrinsic Thin Layer
HP - horário de ponta
HVAC – Aquecimento, ventilação e ar condicionado
IBGE- Informações disponíveis no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICMS - Imposto sobre Circulação de Mercadorias
IEA - Agência Internacional de Energia
INFRAERO- Empresa Brasileira de Infra-Estrutura Aeroportuária
INMET- Instituto Nacional de Meteorologia
IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
kV – Quilovolt
kWh - Quilowatt-hora
kWp – Quilowatt pico

MME - Ministério de Minas e Energia
m-Si - Silício monocristalino
MtCO₂ - Milhões de toneladas de dióxido de carbono
MWp – Megawatt pico
NOCT - Nominal Operating Cell Temperature
OECD Austrália, Áustria, Bélgica, Canadá, República Checa, Dinamarca, Finlândia, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Islândia, Irlanda, Itália, Japão, Coreia, Luxemburgo, México, Países Baixos, Nova Zelândia, Noruega, Polônia, Portugal, Eslováquia, Espanha, Suécia, Suíça, Turquia, Reino Unido e os Estados Unidos.
ONS - Operador Nacional do Sistema
ONU - Organização das Nações Unidas
P_{CC} - Potência em corrente contínua
PNE - Plano Nacional de Energia
PNMC - Plano Nacional sobre Mudança do Clima
p-Si - Silício poli-cristalino
REN21 - Rede de Energias Renováveis para o Século XXI
SGA - Sistema de Gestão ambiental
SIN - Sistema Interligado Nacional
STC - Standard Test Conditions
SWERA - Solar and Wind - Energy Resources Assessment
TECA - Terminal de carga
T&D - Transmissão e distribuição
TPS - Terminal de Passageiros
TWh – Terawatt-hora
UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina
USA – Estados Unidos da América

1 INTRODUÇÃO

A Terra recebe do Sol dez mil vezes mais energia que o atual consumo mundial de eletricidade. Painéis solares fotovoltaicos, que transformam a luz solar em energia elétrica, e coletores solares para aquecimento de água e outros fins são tecnologias disponíveis que permitem gerar calor e eletricidade de forma limpa, com baixos custos operacionais, facilidade e rapidez de instalação, entre muitas outras vantagens.

A tecnologia solar faz parte do futuro da energia da solução para a redução da queima de petróleo e outros combustíveis fósseis e para a estabilização do clima do planeta.

Já o Brasil, dada sua localização geográfica, é particularmente privilegiado por ter uma insolação média superior à das nações industrializadas.

Uma das aplicações dos sistemas fotovoltaicos, muito difundida em países industrializados, é a sua utilização em prédios de áreas urbanas, que já possuem fornecimento convencional de eletricidade. Vários governos de países como Alemanha, Espanha, Japão, USA, estão promovendo esses sistemas como uma maneira de incrementar a participação de tecnologias de geração de eletricidade que sejam não poluidoras do meio ambiente.

O estudo da energia fotovoltaica (FV) tem sido realizado desde a década de 1980, sendo um importante recurso energético renovável disponível. De acordo com a Renewable Energy Policy Network para o século XXI (REN21), tem havido um forte crescimento na utilização do FV (55%), e para a capacidade mundial de energia solar elétrica é esperado um aumento de 1.000 MW, em 2000, para 140.000 MW, até 2030 (ZAHEDI, 2006).

Energia solar é uma das formas sustentáveis e promissoras para o suprimento das necessidades energéticas do futuro da humanidade, uma vez que constitui um recurso de energia renovável e envolve muito menos poluição, incluindo as emissões de CO₂, que há na maioria das outras fontes de energia.

Um aspecto importante que se deve ressaltar sobre esses sistemas é a possibilidade de serem instalados para operar em paralelo com a rede de distribuição do sistema convencional de fornecimento. Isto é, o cliente consumirá eletricidade de ambas as fontes simultaneamente, e, se o consumo de energia dele for menor do que a energia gerada pelo sistema

fotovoltaico, o excedente de energia gerada poderá ser injetado à rede de distribuição.

A geração descentralizada de energia pelos grandes consumidores pode reduzir as perdas na transmissão e distribuição (T&D), reduzindo investimentos na construção de novas usinas. A geração de energia elétrica, utilizando painéis fotovoltaicos, é uma alternativa possível.

Com relação ao Brasil, pode-se dizer que o país está localizado no hemisfério sul e seu território encontra-se em regiões de baixa latitude e altos níveis de radiação solar (PEREIRA et al., 1996), o que contribui para que uma maior quantidade de energia possa ser aproveitada em sistemas fotovoltaicos (RÜTHER, 2004).

Especialmente em climas quentes, uma fração considerável da demanda por eletricidade em edifícios comerciais é devido ao uso intensivo de sistemas de ar-condicionado. Aeroportos em regiões ensolaradas e quentes apresentam uma combinação perfeita entre demanda e disponibilidade de recursos de energia solar (RÜTHER e BRAUN, 2009). Estudo comparando a integração de sistemas fotovoltaicos no Aeroporto Internacional de Florianópolis, mostrou que a geração fotovoltaica pode reduzir a demanda da rede (BRAUN et al., 2007).

As construções aeroportuárias são tipicamente grandes e ensolaradas, livres de sombreamentos. As fachadas, pátios e telhados podem acomodar os módulos fotovoltaicos. Por isso, os aeroportos, por possuírem tal característica, aparecem com um grande potencial para aplicação dos sistemas fotovoltaicos (RÜTHER e BRAUN, 2005).

Edifícios aeroportuários são exemplos de aplicação ideal de sistemas fotovoltaicos interligados à rede, onde picos de geração solar e consumo são, na maioria das vezes, coincidentes com a utilização de ar-condicionado (BRAUN e RÜTHER, 2009)

A construção de sistemas fotovoltaicos integrados na edificação é a que apresenta o mais rápido crescimento do segmento no mercado mundial de fotovoltaicos. A integração dos módulos de energia solar fotovoltaica em edifícios de aeroportos é uma das aplicações mais indicadas. Além dos espaços na cobertura os módulos podem ser aplicados nas fachadas e serem utilizados como parte da arquitetura.

1.1 Justificativa

O petróleo é um elemento de influência nas relações geopolíticas contemporâneas, desde quando se tornou a matriz energética básica da

sociedade industrial, além de ser o elemento fundamental para o funcionamento da economia moderna (BARROS, 2007).

Uma crescente preocupação mundial é com a questão ambiental, pois não se admite poluir indiscriminadamente. A busca por fontes renováveis de energia vem ganhando cada vez mais espaço no mercado mundial, uma vez que além de evitar emissões de gases poluentes, provenientes das fontes térmicas convencionais de energia, essas fontes diversificam a matriz energética (JARDIM, 2007).

Segundo relata Melo Filho (2008), o mercado mundial de fotovoltaico trabalha na estimativa de produção, em 2015, de 52.000 MWp, o que pode gerar 4,5 milhões de empregos em todo mundo. Esta avaliação foi feita junto a fabricantes de células fotovoltaicas nos países como: Estados Unidos, Japão e Comunidade Européia.

Sistemas solares fotovoltaicos podem ser configurados basicamente em duas categorias: autônomos ou interligados à rede elétrica local. Os sistemas autônomos se caracterizam pela necessidade de um sistema acumulador de energia, normalmente um banco de acumuladores químicos (baterias), onde a energia gerada pelos painéis solares é armazenada e distribuída aos pontos de consumo. Sistemas interligados à rede elétrica, por outro lado, dispensam o uso de acumuladores, pois atuam como usinas geradoras de energia elétrica em paralelo às grandes centrais geradoras. Podem ser do tipo central fotovoltaica, ou integrada a prédio urbano. No primeiro tipo, a planta fotovoltaica está normalmente situada em áreas relativamente afastadas dos centros urbanos como ocorre com usinas geradoras de eletricidade convencionais, pois as relativamente grandes superfícies envolvidas requerem áreas de baixo custo para que a instalação seja economicamente viável. Áreas desertas são muitas vezes utilizadas neste tipo de instalação. Os sistemas integrados a prédios urbanos, por outro lado, são incorporados à fachada ou ao telhado do prédio, de modo que virtualmente não ocupa espaço algum, sendo o único pré-requisito uma orientação solar favorável

A relação entre a geração solar e o consumo energético contribui para a viabilização de sistemas fotovoltaicos interligados à rede elétrica, uma vez que o investimento pode ser considerado como um custo evitado de ampliação de linhas de transmissão, subestações e outros equipamentos necessários para o aumento do fornecimento de energia elétrica (BRAUN et al., 2008).

Painéis solares fotovoltaicos integrados à edificação (Building-Integrated Photovoltaics – BIPV em inglês) são pequenas usinas geradoras de energia solar, e fazem parte do envelope do edifício gerando energia no ponto de utilização.

A utilização mais generalizada das tecnologias ligadas à energia fotovoltaica (FV) é dificultada por uma série de razões que incluem: a redução de custos de instalação, a diminuição dos custos ainda elevados do quilowatt-hora e a falta de conhecimento sobre os benefícios da geração distribuída com FV no ambiente urbano. Porém, quando estrategicamente localizados, geradores FV integrados em fachadas e telhados, em áreas urbanas aumentam os níveis de penetração e auxiliam os alimentadores locais, que se beneficiam com a geração distribuída (JARDIM et al., 2007; HOFF et al., 1995)

Se uma redução importante de preço for finalmente conseguida, provavelmente, um crescimento exponencial do mercado FV irá ocorrer (SCHOEN, 2001). Um modelo de aumento esperado nas vendas de módulos fotovoltaicos prevê um crescimento muito rápido, o que irá abrandar quando um determinado nível de vendas anuais for alcançado (LUQUE, 2001). O exame inicial desta tecnologia, entretanto, não depende apenas das soluções técnicas disponíveis no mercado, mas também das disposições que regulam as relações entre as concessionárias de energia e seus clientes, especialmente em relação a aspectos como o preço da energia FV vendida à rede (CASTRO et al., 2005)

Um fator importante dos sistemas FV na demanda diurna é a comparação entre os valores de pico de carga no inverno e no verão. Quanto maior a demanda no verão, em comparação com o período de inverno, maior a possibilidade de a carga coincidir com a disponibilidade do recurso solar (PEREIRA et al, 2006).

Segundo Salamoni, 2007, a energia solar FV revela-se uma fonte promissora, tanto para as áreas distantes e ainda não eletrificadas, como também para os grandes centros urbanos, onde demandas de ar condicionado elevam as curvas de carga, apresentando uma excelente sincronicidade com a geração solar.

Tipicamente, as edificações comerciais possuem 44% de seu consumo energético destinado à iluminação e 20%, ao sistema de ar condicionado (LAMBERTS e WESTPAL, 2000).

Segundo recomendação da ABNT, norma NBR 6401/1980, a temperatura de conforto para ambientes com grande carga de calor (estação de verão), deve oscilar entre 24 e 26 °C, temperatura de bulbo seco (TBS).

Curvas de demanda das áreas urbanas de todo o país mostram diferenças entre as regiões onde predominam prédios comerciais, apresentam picos de demanda no período diurno, e em regiões residenciais, onde os valores de pico de demanda ocorrem ao anoitecer. Para fazer melhor proveito da geração distribuída, é importante saber a capacidade FV

e o consumo energético do sistema de condicionamento de ar, de maneira a dimensionar o porte da geração fotovoltaica que melhor atende ao consumidor.

Para determinar o potencial benefício dos sistemas FV é necessário conhecimento da distribuição da irradiação solar numa base horária. Tal informação pode ser acessada em todo o território brasileiro, por meio da base de dados gerada pelo projeto SWERA¹.

O Centro de Pesquisa em Energia Inteligente (CPEI) do CEFET-MG coleta dados de irradiação solar global desde o mês de janeiro de 2008, na base horária de 1 minuto, os quais serão utilizados nesta pesquisa, a fim de subsidiar os estudos para redução do consumo energético e do pico de demanda diurno.

A integração de módulos FV na arquitetura de aeroportos valoriza a estética da edificação e ressalta os princípios de conservação de energia e do meio ambiente. Nas latitudes baixas, onde o sol é sempre elevado no céu, as inclinações pequenas do telhado dos aeroportos favorecem a instalação de módulos FV na cobertura (RÜTHER e BRAUN, 2009).

Este trabalho visa avaliar a contribuição do gerador solar fotovoltaico, na redução da demanda diurna, do sistema central de condicionamento de ar do terminal de passageiros do Aeroporto Internacional Tancredo Neves, baseando-se no histórico de consumo de seis anos consecutivos (2003 a 2008) e nos dados de memória de massa do aeroporto, presentes ao período de junho de 2008 a maio de 2009.

Este estudo abrange o levantamento das áreas de cobertura das edificações do complexo aeroportuário próximo ao terminal de passageiros, para colocação dos painéis solares fotovoltaicos.

Os dados de irradiação solar global foram obtidos do projeto SWERA e serão trabalhados no aplicativo Radiasol. (UFRGS, 2002), portanto este trabalho se justifica pela relevância do tema, pela contribuição da energia solar fotovoltaica na redução do consumo, pela diversificação da matriz energética brasileira, pelos benefícios diretos nos alimentadores da concessionária e pela visibilidade que o aeroporto proporciona em defesa do meio ambiente.

1 O projeto *Solar and Wind Energy Resource Assessment* (SWERA), financiado pelo Programa do Meio Ambiente da ONU, vem desenvolvendo informação de alta qualidade sobre energia solar e os recursos de energia eólica em 14 países em desenvolvimento. Atualmente dados horários de ano típicos estão disponíveis para 156 locais em Belize, Brasil, China, Cuba, El Salvador, Etiópia, Gana, Guatemala, Honduras, Quênia, Maldivas, Nicarágua e Sri Lanka.

1.2 Objetivo Principal e Objetivos Específicos

Neste trabalho, o objetivo principal é avaliar e quantificar a contribuição potencial de geradores fotovoltaicos na redução do pico de demanda diurna de energia elétrica do sistema central de condicionamento de ar do terminal de passageiros do Aeroporto Internacional Tancredo Neves, bem como avaliar o potencial de contribuição energética destes geradores solares.

Os seguintes objetivos específicos também foram estabelecidos:

- Analisar os dados históricos de consumo de energia elétrica no aeroporto no período de 2003 a 2008;

--Analisar as curvas de carga no horário de ponta, procurando identificar os picos de demanda diurna;

--Identificar as coberturas das edificações através de plantas e fotografias, a fim de determinar possíveis sombreamentos e intervenções arquitetônicas;

--Analisar as curvas de irradiação solar, bem como a orientação mais favorável, de forma a maximizar a quantidade de energia gerada pelo sol, em função da área disponível para utilização do sistema FV;

--Comparar o horário de pico de demanda diurna com o horário de geração FV na área estudada;

--Avaliar as tecnologias fotovoltaicas disponíveis comercialmente, analisar a viabilidade econômica e o tempo de retorno do investimento.

1.3 Estrutura do Trabalho

Esta dissertação foi concebida em cinco capítulos visando atender às normas da UFSC.

O primeiro capítulo, intitulado Introdução, aborda o problema que motivou esta pesquisa e os limites deste estudo.

O segundo capítulo, a Revisão Bibliográfica, traça o cenário local e mundial do uso da energia elétrica e os avanços na produção e instalação de painéis fotovoltaicos, dedicando-se, especialmente, aos sistemas conectados à rede elétrica e integrados às edificações.

O terceiro capítulo, a Metodologia, relata os procedimentos adotados na elaboração da pesquisa.

No quarto capítulo, Resultados e Discussões são apresentados os resultados dos procedimentos adotados na metodologia e promove discussões sobre os valores encontrados.

O quinto capítulo, conclusões, é destinado ao fechamento do trabalho com indicações do uso da tecnologia fotovoltaica.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

A previsão do total de emissões de CO₂ (dióxido de carbono) chega a 42,3 bilhões de toneladas em 2030, com crescimento anual médio de 1,7%, no período de 2005 a 2030 (BEN, 2008). As emissões de CO₂ apresentam projeção de taxa de crescimento superior ao crescimento na demanda de energia (1,6%), representando aumento na participação de fontes fósseis na matriz energética mundial.

Para o Brasil, a taxa de crescimento projetada de 2,3% é superior à mundial, sendo o valor previsto para 2030 igual a 693 milhões de toneladas de CO₂, contra 356 MtCO₂, em 2005 (BEN, 2008).

Segundo os relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), órgão vinculado à Organização das Nações Unidas (ONU) e que reúne cientistas de várias nacionalidades, há uma certeza, quase absoluta, de que as elevações de temperatura verificadas ultimamente decorrem das atividades humanas. Ou seja, os gases de efeito estufa que a humanidade joga na atmosfera estão causando as mudanças climáticas (WWF-Brasil, 2008).

O Brasil é o quarto colocado no ranking dos maiores emissores mundiais de gases causadores do aquecimento do planeta, principalmente, por causa do desmatamento da Amazônia e das queimadas. No mundo, a principal causa de emissão de gases de efeito estufa é o setor de energia, responsável por 37% de todas as emissões de gás carbônico, o que significa 23 bilhões de toneladas de CO₂ por ano, mais de 700 toneladas por segundo (WWF-Brasil, 2008).

Atualmente, a matriz energética brasileira é considerada uma das mais limpas do planeta. Atualmente, 75,9% da energia gerada, no país, é proveniente de hidrelétricas. Entretanto, com os recentes leilões nacionais de energia, as termelétricas movidas a gás têm ganhado espaço. Se o Brasil optar por seguir o modelo energético das nações industrializadas, isso pode se tornar um problema para o clima mundial (WWF-Brasil, 2008).

O aumento do consumo de energia e o rápido crescimento do mundo geram preocupações sobre dificuldades de abastecimento, esgotamento dos recursos energéticos e pesados impactos ambientais (destruição da camada de ozônio, aquecimento global, alterações climáticas, etc.). A contribuição global na construção de edifícios consumidores de energia, tanto residencial quanto comercial, tem aumentado considera-

velmente, atingindo valores entre 20% e 40% nos países desenvolvidos, tendo ultrapassado os outros setores principais: industrial e transporte (PÉREZ-LOMBARD et al., 2008).

O Brasil apresenta vantagens para a utilização da energia fotovoltaica, pois possui, além de elevados níveis de radiação solar durante, praticamente, o ano todo, grande extensão territorial. Na Figura 1 vemos o mapa de irradiação solar em um plano inclinado no valor da latitude local que demonstram a possibilidade de utilização do FV por todo país.

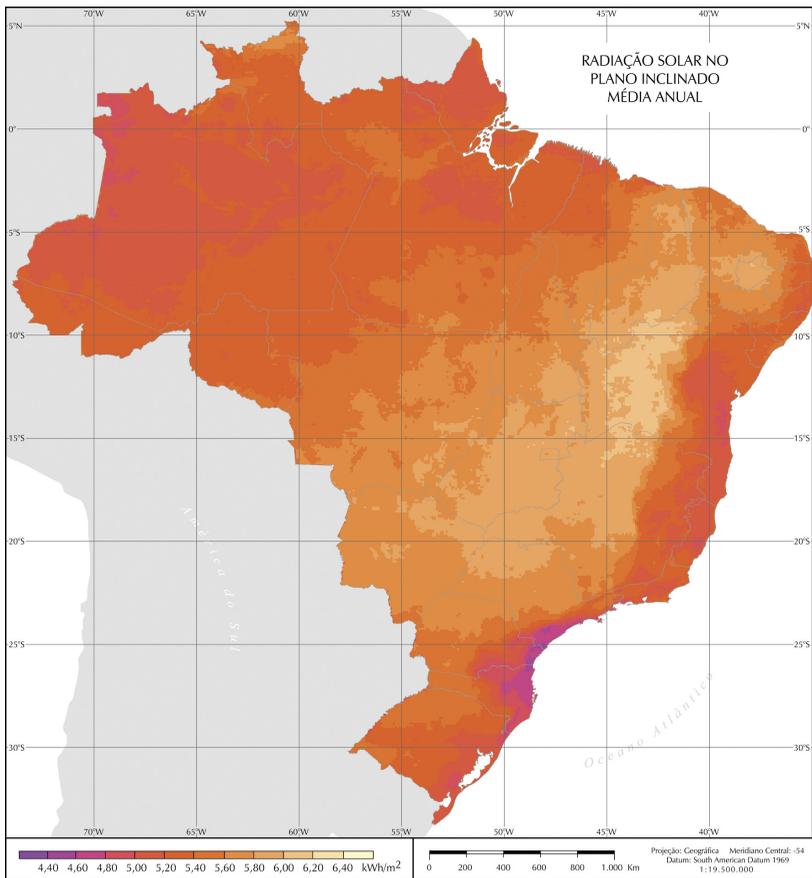


Figura 1 - Radiação solar no plano inclinado média anual.

Fonte: Atlas Brasileiro de Energia Solar, 2006.

Os sistemas solares fotovoltaicos no Brasil têm sido utilizados de forma integrada à rede pública. Estas instalações podem apresentar duas configurações distintas: instaladas de forma integrada à edificação (no telhado ou fachada), e, portanto próximo ao ponto de consumo; ou de forma centralizada, como em uma usina geradora convencional; neste caso, distante do ponto de consumo.

A geração de energia elétrica convencional é centralizada e distante do ponto de consumo; isso faz com que o sistema gere perdas na transmissão e distribuição de energia (T & D), aumentando os custos de produção da energia e causando danos às concessionárias e ao meio ambiente.

Segundo as projeções da demanda de energia do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em seu relatório de fevereiro de 2010, o Sistema Interligado Nacional (SIN) registrou uma carga média de energia em 2009 de 52.272 MW, significando um acréscimo de 0,8% em relação à média de 2008 (51.873 MW). Neste período, foi observada uma demanda máxima instantânea de 65.586 MW, em setembro de 2008. A projeção da demanda instantânea para 2014 é de 88.034 MW, cabendo às regiões Sudeste e Centro-Oeste a parcela de 62% desta demanda (PEN-2010).

Edifícios são normalmente responsáveis por 40% do consumo total de energia primária nos EUA, na União Européia e também nos países em desenvolvimento como o Brasil (BADEN et al., 2006; GELLER, 2002). Já, edifícios residenciais são responsáveis por 23% da demanda nacional de eletricidade. Em geral, em 30% do ano, os sistemas fotovoltaicos geram mais energia do que a demanda, ou seja, durante este período ele poderia estar fornecendo o excesso de energia à rede elétrica pública (ORDENES et al., 2007).

Em países como o Brasil, edifícios de escritórios em áreas urbanas, apresentam, muitas vezes, cargas de ar-condicionado consideravelmente elevado, com exigências de eletricidade que dificilmente podem ser geradas no local, com geração de sistemas de energia renovável.

Um edifício típico é um envelope vertical, de vidro, com uma curva de demanda geralmente com boa sincronicidade com o perfil de irradiação solar, mas, que muitas vezes, não possui as áreas necessárias (e, convenientemente, orientadas e inclinadas) para acomodar suficientes sistemas de gerador de energia solar ativa, que poderiam produzir energia suficiente no local. Edifícios de aeroportos em particular, especialmente em climas quentes e ensolarados, apresentam as mais altas demandas de energia, devido às unidades de ar condicionado (RÜTHER e BRAUN., 2009).

O crescimento da população, a demanda crescente de serviços e a elevação dos níveis de conforto, juntamente com o aumento do tempo gasto no interior de edifícios, garantem a tendência de crescimento na demanda de energia no futuro.

Por esta razão, a eficiência energética nos edifícios é hoje um objetivo prioritário para a política energética, sob as perspectivas regional, nacional e internacional. O crescimento do consumo de energia e as emissões de CO₂ no ambiente construído fizeram da eficiência energética e das estratégias de racionalização o objetivo prioritário para as políticas de energia na maioria dos países. Um exemplo claro é o europeu conhecido por Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD).

Especialmente importante foi à intensificação do consumo de energia em sistemas de climatização, que tem se tornado quase indispensável, paralelamente à expansão da demanda de conforto térmico, considerado um luxo, não há muito tempo. Este é o maior uso final de energia, tanto no setor residencial e não residencial, pois inclui aquecimento, ventilação e ar-condicionado (Heating, Ventilation and Air Conditioning, HVAC em inglês). Estas taxas, até 2020, serão maiores nas economias emergentes, em comparação com os países desenvolvidos (PÉRZ-LOMBARD et al., 2008).

O Brasil tem uma grande área e possui baixa latitude, além de um recurso de grande radiação solar e uma baixa variabilidade do conteúdo de distribuição de energia solar (COLLE et al, 1996), o que leva a um potencial considerável para o uso da energia solar fotovoltaica integrada à edificação (BIPV) (RÜTHER, 2004). No Brasil, residências, edifícios comerciais e públicos em áreas urbanas correspondem a mais de 44,0% da demanda de eletricidade no país, sendo o setor comercial responsável por 14,2% (BEN, 2008).

Segundo Ordenes et al. (2007), embora a utilização de sistemas de BIPV no Brasil ainda não seja considerável, esta tecnologia apresenta um potencial interessante para a geração descentralizada em áreas urbanas com redução da demanda de energia.

O sistema elétrico interligado brasileiro é um dos maiores e mais complexos do mundo, com uma capacidade instalada de mais de 107 GW (ANEEL, 2010). A Tabela 1 apresenta os empreendimentos em operação fiscalizado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) onde aproximadamente 79 GW são geradas pelas 848 hidrelétricas distribuídas no território nacional.

Tabela 1 : Empreendimentos em operação no Brasil.

Fonte: Banco de informações de Geração (BIG)

Tipo	Quantidade	Potência (kW)	%
Central Geradora Hidrelétrica - CGH	316	180.500	0,17
Central Geradora Eolielétrica - EOL	43	760.584	0,71
Pequena Central Hidrelétrica - PCH	365	3.080.338	2,86
Central Geradora Solar Fotovoltaica - SOL	1	20	0,00
Usina Hidrelétrica de Energia - UHE	167	75.727.799	70,21
Usina Termelétrica de Energia - UTE	1.330	26.099.938	24,20
Usina Termonuclear - UTN	2	2.007.000	1,86
TOTAL	2.224	107.856.179	100

O relatório Estatístico da IEA 2009 relata que o Brasil produziu, em 2008, o equivalente a 365,1 TWh, usando a energia vinda das hidroelétricas, ou seja 11,7% de toda energia gerada no mundo por este tipo de fonte primária.

A Figura. 2 mostra a oferta de energia em TWh em 2008. Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME) a hidroeletricidade é responsável por 73,2% de toda energia gerada no Brasil em 2008.

Segundo a edição de 2007 do International Energy Outlook dos Estados Unidos, a geração hidroelétrica e outras fontes renováveis crescerão cerca de 56%, nos próximos 24 anos. A geração hidroelétrica atualmente é responsável por, aproximadamente, 19% da oferta elétrica mundial, sendo que a oferta de outras energias renováveis ainda é diminuta.

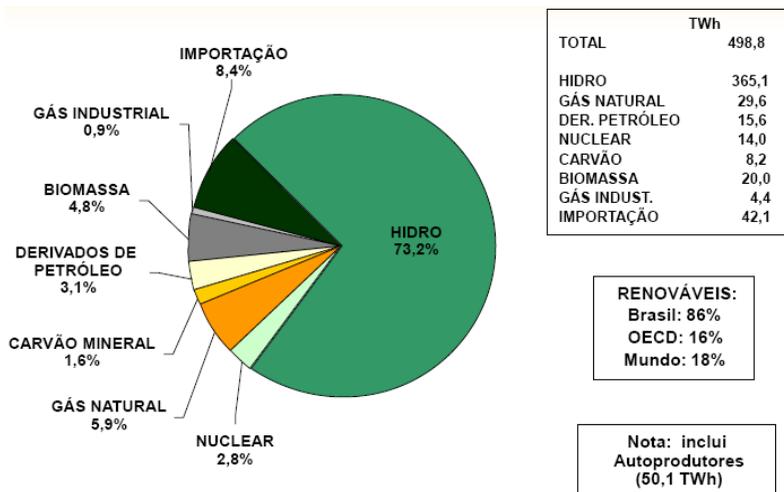


Figura 2 - Matriz de oferta de energia no Brasil em TWh por fonte em 2008.

Fonte: MME, 2008.

A oferta de energia no Brasil é apresentada na Figura 3, na qual 54,7% vêm de fontes não renováveis (petróleo e derivados, gás natural, carvão mineral e derivados, urânio e derivados) e 45,4% vem de fontes renováveis (hidráulica, biomassa).

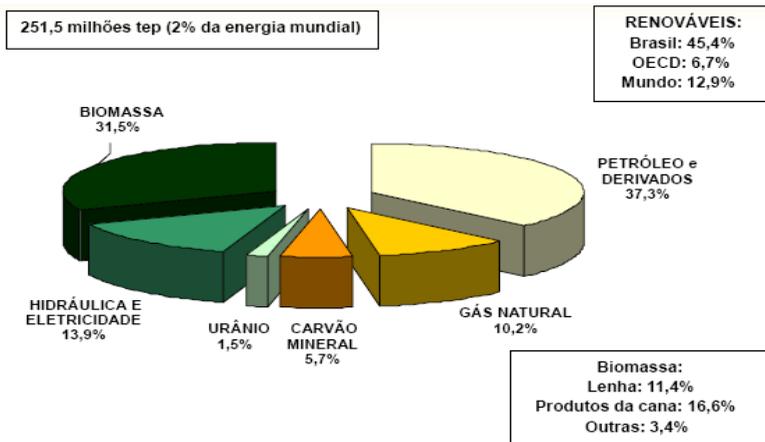


Figura 3 - Oferta interna de energia

Fonte: MME, 2008.

Por outro lado, conforme relata Rodrigues (2002), a geração distribuída oferece inúmeras vantagens ao setor elétrico, uma vez que a disposição da geração está próxima da carga. Além disso, permite maior diversificação das tecnologias empregadas para a produção de energia.

A construção de sistemas BIPV utiliza o envelope do edifício para integrar células solares, que convertem a luz solar diretamente em eletricidade, não apenas com o objetivo de mostrar uma tecnologia limpa, renovável e benigna de geração de energia, mas também de apresentar uma perfeita aplicação de produção de energia local.

As áreas comerciais dos centros urbanos, entretanto, apresentam perfis de carga de pico durante o dia que, normalmente, são conduzidos por ar-condicionado, e que são bastante coincidentes com os perfis de geração de energia solar e sazonalidade (perfis de uso que variam das 9 às 17 horas, com pico em torno do meio-dia ou início da tarde nos meses de verão). Nestas situações, BIPV, nos centros urbanos, pode auxiliar no corte de picos, entregando energia, quando ela é mais necessária e no ponto de utilização, minimizando T&D das perdas e aumento da capacidade da rede (JARDIM et al, 2008).

O efeito fotovoltaico decorre da excitação dos elétrons de alguns materiais, na presença da luz solar (ou outras formas apropriadas de energia). Entre os materiais mais adequados para a conversão da irradiação solar em energia elétrica, os quais são usualmente chamados de células solares ou fotovoltaicas, destaca-se o silício. A eficiência de conversão das células solares é medida pela proporção da radiação solar incidente sobre a superfície da célula, que é convertida em energia elétrica. Atualmente, as melhores células apresentam um índice de eficiência de 25% (GREEN et al., 2000).

Eiffert e Kiss (2000) comentam que a integração dos painéis fotovoltaicos com a edificação apresenta vantagens de custos que torna este conceito atrativo tanto para regiões urbanizadas, quanto para regiões menos densamente populosas. O sistema pode ser implantado nas edificações, ao longo de estradas ou em áreas terrestres, com a possibilidade de combinar produção de energia com outra função da edificação.

Segundo Knob e Rütther (2004), devido à natureza intermitente do recurso de irradiação solar fotovoltaica de geração de energia solar, ela é considerada uma fonte não despachável. No entanto, sob algumas condições, nas áreas urbanas ensolaradas, com curva de demanda característica de ar-condicionado, há uma alta correlação entre geração FV e o tipo de cargas elétricas alimentadas. Nessas situações, uma fração considerável de um dado gerador fotovoltaico pode ser considerada energia despachável.

Nos últimos dez anos, a opção dominante da tecnologia passou dos sistemas fotovoltaicos isolados para os pequenos geradores fotovoltaicos, conectados à rede; primeiramente a partir de grandes centrais e, posteriormente, de forma distribuída, por meio de sistemas menores.

Segundo as previsões do Prometheus Institute, 2009, a produção global de módulos FV vai crescer de 5,7 GWp em 2007 para 27,5 GWp em 2012. Módulos de película fina terão uma quota de mercado de 34% em 2012, sendo que em 2007 estes módulos representavam apenas 13% da produção mundial. A absorção rápida de filmes finos criará novos líderes de mercado (PROMETHEUS INSTITUTE, 07/03/2009).

2.2 Contexto da energia solar no Brasil

Na área da energia solar, há os sistemas fotovoltaicos, isolados ou integrados à rede, e os sistemas heliotérmicos. Os sistemas fotovoltaicos isolados tiveram ampla penetração no Brasil por intermédio de vários programas, totalizando, em 2004, mais de 30 mil sistemas instalados (MATRIZ ENERGÉTICA 2030, MME, 2010). O direcionamento para esses nichos de mercado – comunidades e cargas isoladas – deverá permanecer ao longo do horizonte do plano, até porque a expansão, em muitos casos, depende ainda de incentivos, o que poderá ser reduzido na medida do aumento de escala da geração fotovoltaica e conseqüente queda nos preços.

Já a energia solar fotovoltaica integrada à rede surge como uma grande promessa para a geração distribuída, sendo que questões técnicas para seu emprego parecem equacionadas. Porém, um dos aspectos importantes será normalizar questões essenciais relacionadas à geração distribuída, referentes a aspectos de qualidade, segurança e proteção.

O PNE 2030 considera que a geração FV vai se tornar competitiva quando seu custo chegar a 3.000 US\$/kW, tomando como base de comparação a tarifa de fornecimento. Nessa situação, o custo do watt deveria ser de US\$ 1,50, o que a curva de aprendizagem sugere ser possível de atingir, nos Estados Unidos, somente após 2020. Nessas condições, o PNE 2030 considerou que o aproveitamento da energia solar FV, integrada à rede, seria marginal no horizonte de estudo (SALAMONI, 2009).

Segundo Salamoni, 2009, apesar de os custos da energia FV ainda serem altos, quando comparados a outras fontes de geração, esse quadro vem se revertendo. Os custos de produção dessa tecnologia vêm mostrando um decréscimo significativo desde o início de sua utilização

para aplicações terrestres, em 1970 (POPONI, 2003); (KESHNER e ARYA, 2004); (HOFFMANN, 2006).

Segundo dados da European Photovoltaic Industry Association (EPIA, 2008), apresentados na Tabela 2, a tecnologia FV, embora seja uma das mais caras nos dias de hoje, é a que apresenta uma maior estimativa de redução de custos ao longo dos anos.

Tabela 2 : Custos da geração elétrica para diferentes fontes de energia e as perspectivas de redução de custos ao longo dos anos.

Fonte: EPIA, 2008

Custo da geração elétrica (€ct/kWh)	2005	2030	2040
Combustíveis Fósseis (carvão, gás)	4-4.5	6-7	6.5-9
Nuclear	4-6	3.5-7	3.6-6
Eólica	9-7.5	6-5	3-4
Solar Térmica	17	6	3
Solar FV	20-40	5-10	3-6

Com relação à geração heliotérmica, embora haja estudos que apontem uma redução do custo de instalação de uma usina, a mesma não se mostra ainda competitiva (MME, 2007).

2.3 O Consumo de energia elétrica em edifícios

Edifícios comerciais e de escritórios são particularmente adequadas para sistemas FV conectados a rede. Nestes edifícios, o consumo máximo ocorre geralmente em torno do meio dia (ar-condicionado, por exemplo, é um dos maiores consumidores de energia elétrica) quando a radiação solar e as capacidades de geração fotovoltaica estão no máximo. Atualmente, os preços elevados parecem ser a principal desvantagem para limitar a expansão desta tecnologia. Os incentivos financeiros para reduzir os custos de investimento e a disseminação de informação são fatores fundamentais para uma maior divulgação dos sistemas fotovoltaicos (HAAS et al., 1999).

Usando os painéis fotovoltaicos como componentes da construção, enquanto o prédio ainda está em construção, poderá conduzir a re-

duções no preço total do equipamento FV superiores a 20% (DINWOODIE, 1994).

Ao se usar módulos FV sem molduras, como materiais de construção, pode-se encontrar uma maneira interessante de reduzir o período chamado "retorno energético" (tempo que um módulo FV precisa para gerar energia equivalente à que é utilizada para produzi-lo). O mercado reagiu em resposta a estes fatos, oferecendo produtos FV especialmente concebidos para serem integrados em edifícios. Ou seja, elementos que geram eletricidade FV também podem ser utilizados como material de construção, aumentando as possibilidades de se incorporarem na arquitetura do edifício.

Além de todas as características comuns à rede de sistemas fotovoltaicos conectados, a tecnologia BIPV oferece várias vantagens adicionais, tais como a estética moderna e a geração distribuída (FRANKL et al., 1998).

A formulação de políticas para o êxito no desenvolvimento de mercados de energia renovável depende muito da avaliação do potencial de consumo e da geração de energia, além de seus limites economicamente viáveis. Um segmento interessante desses mercados é a que corresponde à construção de arranjos fotovoltaicos integrados (tais como as energias solar fotovoltaica e térmica), que requerem uma estimativa da área de superfície disponível (telhados e fachadas) para instalação do equipamento e para avaliar com precisão as suas potencialidades.

O consumo de energia final geralmente pode ser dividido em três setores principais: indústria, transportes e 'outros', sendo este último composto pela agricultura, setor de serviços e residencial. O consumo de energia em edifícios, que não sejam habitações, constitui uma fração dos serviços partilhados no setor 'outros'. Dada a sua importância global nos países desenvolvidos, os edifícios representam de 20 a 40% do consumo final total de energia (PÉREZ-LOMBARD et al., 2008).

O crescimento da população, a melhoria dos serviços na construção e nos níveis de conforto, juntamente com o aumento do tempo gasto no interior de edifícios, tem elevado o consumo de energia para os níveis de transportes e na indústria.

A Figura 4 mostra o consumo de eletricidade no mundo nos setores indústria, transporte e 'outros', em 1973 e 2007.

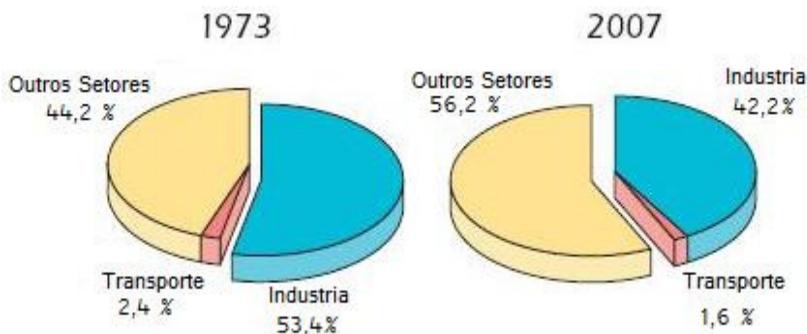


Figura 4 - Consumo da eletricidade no mundo em 1973 e 2007.

Fonte: RELATÓRIO DE ESTATÍSTICAS DO MUNDO - IEA, 2009.

2.4 O Consumo de energia em aeroportos

O consumo de energia nos aeroportos depende de um grande número de fatores, de modo que qualquer tentativa de definir critérios gerais para aumentar a eficiência requer uma análise criteriosa de todos os fatores envolvidos.

A demanda de energia depende tanto de superfície (estrutural, volume de isolamento, orientação do edifício, telhado térmico, janelas de vidros duplos, etc.), quanto das variáveis operacionais (o número de passageiros por ano, os níveis de ocupação média nas áreas com ar-condicionado, as flutuações sazonais no número de passageiros, etc.), relacionadas ao tamanho do aeroporto.

Além disso, as condições climáticas têm papel principal, em função de aquecimento e de refrigeração de cargas sobre as flutuações de temperatura externa. Um acréscimo significativo para a demanda global de energia deriva das facilidades usualmente situadas na área do aeroporto, como restaurantes, shoppings, lojas de bagagem, etc. (CARDONA et al., 2006).

As viagens aéreas contribuem muito para o aquecimento global. Segundo Rùther (2005), os gases de escape da aviação geram 3,5% das emissões globais, e tal situação deverá duplicar nos próximos 15 anos. Aeroportos de todo o mundo estão constantemente sendo ampliados e atualizados. A Airbus estima um mercado potencial de mais de 1200 aviões até 2020, com mais de 4,6 milhões vôos.

Amplio, moderno, arejado e funcional, o Aeroporto Internacional Tancredo Neves, conhecido também por Aeroporto Internacional de

Confins, é o principal portal de entrada para o Estado de Minas Gerais e foi projetado para cinco milhões de passageiros por ano. Localizado na região metropolitana de Belo Horizonte, o aeroporto foi inaugurado em março de 1984, recebendo, em média, quatrocentos mil passageiros por ano.

A partir de março de 2005, por decisão do governo estadual e da INFRAERO, passou a receber vôos domésticos que operavam no Aeroporto da Pampulha em Belo Horizonte e aumentou os voos internacionais, elevando o número de passageiros para três milhões e quinhentos mil por ano, sendo que, em 2007, atingiu a cifra de quatro milhões e trezentos e cinquenta mil passageiros (INFRAERO, 2009), tendo ultrapassada a marca dos cinco milhões de passageiros em 2008.

A Figura 5 mostra o rank dos vinte aeroportos que mais receberam passageiros em 2008.

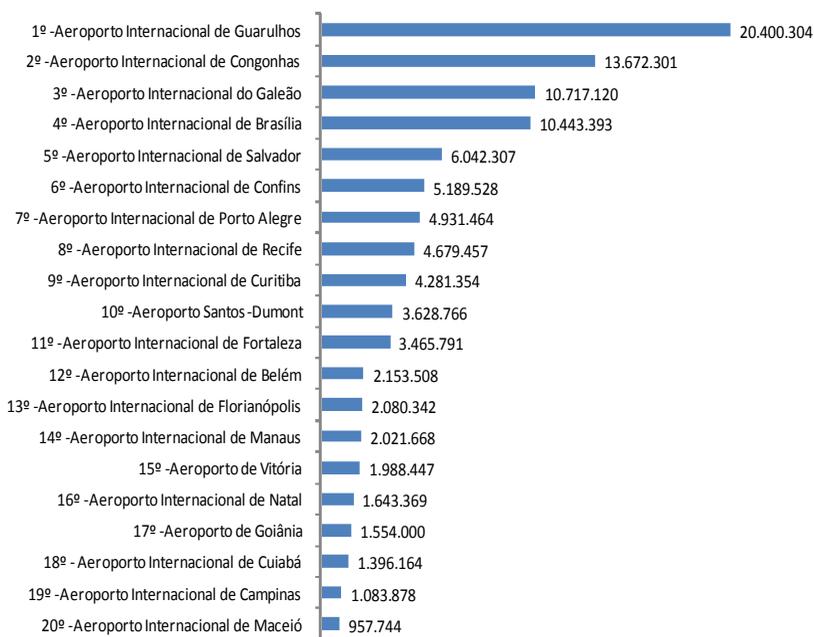


Figura 5 - Relação dos 20 aeroportos sob a responsabilidade da INFRAERO com maior número de passageiros em 2008.

Fonte: INFRAERO, 2009.

A Figura 6 mostra a vista panorâmica do Aeroporto Internacional Tancredo Neves, com destaque para a cobertura do terminal de passageiros.



Figura 6 - Aeroporto Internacional Tancredo Neves em Confins – MG.
Fonte: Google Earth, 2008.

2.5 Tecnologias Fotovoltaicas

2.5.1 Introdução

O efeito fotovoltaico² é um fenômeno físico no qual se dá a conversão direta da energia das radiações óticas em energia elétrica. Em uma célula solar fotovoltaica iluminada³, tipicamente constituída por uma junção p-n (Silício dopado com P e B, difusão de 0,2 a 0,5 μ), contendo uma grade metálica com “dedos” de contato e uma camada anti-

² Quando os fótons contidos na radiação solar incidem sobre um material semiconductor (ex: silício) com determinadas características elétricas (junção elétrica p-n ou p-i-n), a energia de uma fração desses fótons pode excitar elétrons no semiconductor, que, por sua vez, poderão dar origem a uma corrente elétrica (Rüther, 2004a)

³ Mais de 98% da radiação solar se encontra na faixa espectral entre 0,3 μ e 3,0 μ . Em energia solar esta faixa (ondas curtas) é denominada radiação solar. A radiação de ondas longas, $\lambda > 3\mu$, é originária de fontes a temperaturas próximas à temperatura ambiente.

refletora para reduzir a reflexão e aumentar a percentagem de energia absorvida pela célula, os fótons que penetram o volume do semicondutor e que têm energia superior a E_{gap} ⁴ poderão ser absorvidos por e^- da banda de valência que passarão à banda de condução, gerando assim um par $e^- /$ lacuna. Os portadores foto-gerados têm um tempo de vida determinado antes de se recombinarem, devendo atingir a zona da junção antes disso para que possa haver a separação pelo campo elétrico e conseqüentemente a geração de foto-corrente. Os fótons não absorvidos sairão novamente ao exterior pela face não iluminada e, como os refletidos, não serão úteis para a foto-geração. Desta forma, a foto-geração se baseia em 3 fenômenos físicos principais:

- ✓ Absorção de luz pelo semicondutor e geração de pares $e^- /$ lacuna;
- ✓ Movimentação dos portadores gerados até a zona da junção;
- ✓ Separação dos portadores gerados pelo campo elétrico ($V_{built-in}$) da zona da junção
- ✓ Existe ainda um 4º fenômeno, o da recombinação de portadores no volume e superfícies do dispositivo e que atua no sentido de reduzir a corrente gerada.

A geração solar fotovoltaica se dá através do efeito fotovoltaico em materiais semicondutores, os principais materiais utilizados são: silício cristalino (c-Si); silício amorfo hidrogenado (a-Si:H) ou simplesmente a-Si); silício policristalino (p-Si); o telureto de cádmio (CdTe); disseleneto de cobre (gálio) e índio (CuInSe₂ ou CIS e Cu(InGa)Se₂ ou CIGS, sendo que o silício corresponde por mais de 95% da produção mundial de painéis solares fotovoltaicos (PHOTON INTERNATIONAL, 2007).

As tecnologias fotovoltaicas CdTe e CIS caracterizam-se como sendo elementos altamente tóxicos (Cd, Se e Te), ou muito raros (Te, Se, In e Cd). O silício é o segundo elemento mais abundante na superfície terrestre - mais de 25% da crosta é silício (HAMMOND, 1992) -, sendo 100 vezes menos tóxico que qualquer um dos outros elementos citados acima (SHAH, 1992).

⁴ Bandas de energia adjacentes nem sempre se superpõem. Assim, uma descontinuidade de energia pode estar presente. Esta descontinuidade é também conhecida como banda proibida (E_{gap}), já que não está disponível para nenhum elétron.

Segundo Castro et al.(2005), o mercado mundial para a tecnologia FV tende a ser classificada em três categorias principais: sistemas pequenos FV (1-5 kW) para casas particulares, geradores de sistemas FV integrado médio em setores comerciais, industriais e edifícios de escritórios (geralmente 10-250 kW) e sistema FV centralizada em plantas geradoras de energia (100 kW até 40 MW).

2.5.2 Silício monocristalina e policristalina (c-Si e p-Si)

O silício cristalino é o mais tradicional das tecnologias fotovoltaicas e que ainda hoje apresenta a maior escala de produção na esfera comercial (80%), em 2002 (MAYCOCK, 2003). O c-Si consolidou a sua presença no mercado fotovoltaico internacional devido ao fato de possuir uma robustez extrema e uma elevada confiabilidade.

O custo de produção destes painéis solares é ainda bastante elevado. Embora o silício seja abundante, o seu processamento e purificação são complexos e dispendiosos, incluindo o consumo de energia. O tempo necessário para que o painel gere uma quantidade de energia equivalente à utilizada na sua produção é superior a três anos.no (p-Si)

Em termos de eficiência, as células de silício cristalino (c-Si) individuais testadas em laboratório apresentam, atualmente, um rendimento de 24%, bastante próximo do máximo rendimento teórico, sendo que os melhores painéis, atualmente disponíveis, no mercado apresentam uma eficiência em redor dos 15% (GREEN, 1998).

No que se refere ao silício policristalino (p-Si), este apresenta uma menor eficiência de conversão, sendo que os valores obtidos em testes de laboratório apresentam um rendimento de 18,6% e, os melhores painéis, atualmente disponíveis no mercado, apresentam uma eficiência máxima de 14%.

2.5.3 Silício Amorfo Hidrogenado (a-Si)

O a-Si apresenta uma resposta espectral mais voltada para o azul, uma vez que as células se mostraram extremamente eficientes sob iluminação artificial (principalmente sob lâmpadas fluorescentes), com eficiência nestes casos superior à do c-Si.

Como se trata de uma tecnologia em filmes finos (películas delgadas), ela tem forte expansão em aplicações arquitetônicas, visto apresentar uma estética mais atraente e poder substituir materiais utilizados na construção civil.

A eficiência observada em células de a-Si individuais, em laboratório, é inferior a 15% e, os melhores painéis de a-Si, disponíveis no mercado, estão na faixa de eficiência da ordem dos 6-8%.

3 METODOLOGIA

3.1 Introdução

A presente pesquisa tem por finalidade apresentar a metodologia e avaliar o potencial de geração de energia solar fotovoltaica no Aeroporto Internacional Tancredo Neves, visando apontar os possíveis benefícios do sistema fotovoltaicos conectados à rede elétrica. Desta forma, tanto o consumidor quanto a concessionária serão contempladas, pois haverá redução no pico diurno nos alimentadores, e conseqüente liberação de potência na rede.

Para atingir este objetivo, foram consideradas as contas de energia no período de março de 2003 a dezembro de 2008, além do consumo específico do condicionamento de ar do terminal de passageiros. Para a análise temporal da demanda, foram utilizados os dados da memória de massa do aeroporto, no período de junho de 2008 a maio de 2009, na base horária de 15 minutos.

O estudo considera que todas as áreas úteis⁵ das edificações possam ser cobertas por módulos fotovoltaicos, além de analisar as diferentes tecnologias de módulos FV disponíveis comercialmente que adotam as tecnologias a-Si e p-Si, pois o uso do a-Si tem demonstrado alto desempenho em climas quentes (RÜTHER 1999; RÜTHER et al., 2003, 2008).

Desse modo, a escolha será pela tecnologia que venha suprir a maior parte do consumo diário diurno, visando preferencialmente a central de ar-condicionado no terminal de passageiros, assim como oferecer uma alternativa viável em investimentos na ampliação do complexo aeroportuário.

3.2 Objeto de estudo

O aeroporto encontra-se na região metropolitana de Belo Horizonte, 30 km do centro da capital (latitude 19°38'01" S e longitude 43°57'51" W) e apresenta as seguintes características, próprias deste tipo de edificação: prédios longos e ensolarados livre de sombreamento, alto consumo de ar-condicionado e baixa inclinação dos telhados.

⁵ Considera-se área útil, toda cobertura disponível para a implantação de um sistema FV, considerando a orientação e sombreamento das mesmas.

A Figura 7 apresenta o mapa de acesso ao aeroporto através da rodovia MG-10, recentemente revitalizada, conhecida como linha verde.

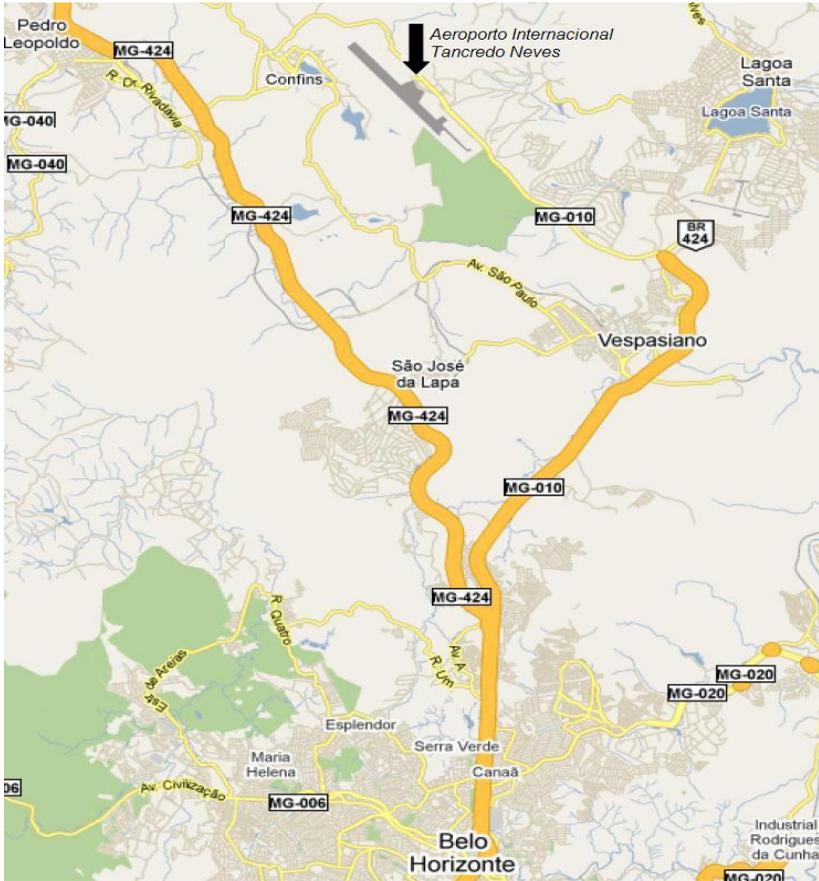


Figura 7 - Mapa de acesso ao Aeroporto Internacional de Confins
Fonte: Google Earth, março/2010.

A Figura 8 mostra o mapa das coberturas do aeroporto:

- Estacionamento (EST)
- Administração (ADM)
- Terminal de passageiros (TPS)

O terminal de passageiros ocupa uma área de 53.950 m² e dispõe de uma cobertura com 21.600 m², constituída com telha metálica ondulada com inclinação variando de 2 a 4%.

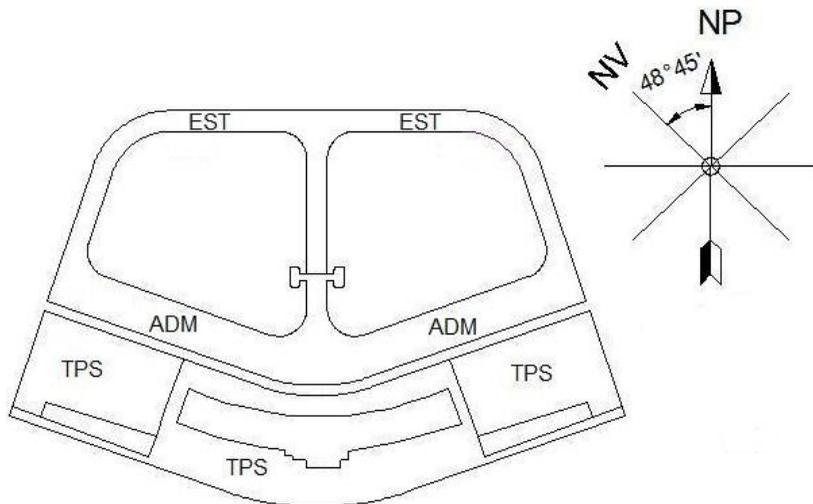


Figura 8 - Mapa da cobertura do TPS e estacionamento.

Fonte: INFRAERO, 2008

As Figuras 9, 10 e 11 mostram detalhes da cobertura do terminal de passageiros (TPS) e administração (ADM) do Aeroporto Internacional de Confins. Podemos observar a presença de clara-bóias e as torres de iluminação do pátio das aeronaves. O telhado tem pouca inclinação e recebe a radiação solar durante todo dia.

As Figuras 12, 13 e 14 mostram a vista panorâmica do estacionamento com detalhe a área plana de marquise sem a presença de obstáculos para os raios solares.



Figura 9 -TPS e ADM lado direito.
(Foto tirada pelo autor em 31/03/2009)



Figura 10 - TPS e ADM lado esquerdo.
Fonte: Foto tirada pelo autor em 31/03/2009



Figura 11 - TPS e ADM vista central.
Fonte: Foto tirada pelo autor em 31/03/2009



Figura 12 - EST. lado direito.
Fonte: Foto tirada pelo autor em 31/03/2009



Figura 13 - EST. lado direito.

Fonte: Foto tirada pelo autor em 31/03/2009



Figura 14 - EST. lado esquerdo.

Fonte: Foto tirada pelo autor em 31/03/2009

A medição de energia consumida em kWh no aeroporto é centralizada em duas subestações, sendo que a medição do consumo do sistema de ar-condicionado central é feita em cada subestação. A CEMIG utiliza dois alimentadores não exclusivos identificados por PLOT11 e NOG6.

O consumo anual de energia elétrica, no período de 2008, foi de 13.394 MWh sendo que, destes, 1.574 MWh (11,8%) foram utilizados pelo sistema de ar-condicionado central.

3.3 Coleta de dados

A coleta de dados, referentes a dados construtivos de consumo energético e de radiação solar, para a realização da pesquisa, foi dividida em duas etapas. Primeiramente foi feita formalmente a solicitação à Superintendência local da INFRAERO, em Confins, para que fosse autorizado o fornecimento das faturas de consumo energético, memória de massa dos medidores e alimentadores junto à CEMIG; o histórico de temperaturas, junto a Aeronáutica e as fotografias e as plantas arquitetônicas do aeroporto, junto à Gerência de Engenharia de Manutenção da INFRAERO. A segunda etapa foi trabalhar com os dados de irradiação solar da estação instalada no CPEI do CEFET-MG.

A estação meteorológica utilizada nesta pesquisa para coleta da irradiação solar diária possui um sensor solar com resolução de 1 W/m^2 e faixa de 0 a 1800 W/m^2 . A transferência de dados se dá deste o fotodiódodo de silício a um console dedicado ao microcomputador e armazenado em disco rígido. A resolução temporal é de 1 minuto.

A Figura 15 mostra o fluxograma utilizado para obter os dados utilizados nesta pesquisa.

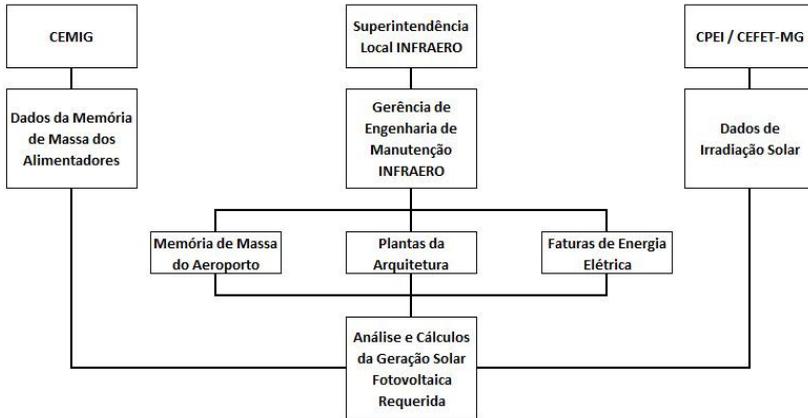


Figura 15 - Fluxograma da metodologia para aquisição dos dados usados nesta pesquisa.

3.3.1 Pesquisa documental

A pesquisa documental realizada na Gerência de Engenharia de Manutenção da INFRAERO em Confins visou obter documentos da implantação da edificação, plantas da reforma dos telhados e detalhes sobre o tráfego de passageiros ao longo dos seis anos avaliados.

Informações sobre consumo energético das edificações e do entorno do aeroporto foram obtidas por meio das faturas de energia cedidas pela INFRAERO e as curvas de carga dos alimentadores foram cedidas pela CEMIG.

3.3.2 Processamento de variáveis de entrada

3.3.2.1 Aeroporto Internacional Tancredo Neves

As fatura de energia elétrica foram utilizadas para fornecer dados de consumo e demanda mensal em kWh em dois períodos previamente definidos: horário de ponta (entre 19h e 22h) e horário fora de ponta (às 21 horas restantes do dia). Os meses considerados nesta pesquisa são correspondentes aos anos de 2003 a 2008 e constitui uma série histórica de consumo do aeroporto.

Os arquivos de memória de massa do aeroporto e dos alimentadores no período de junho de 2008 a maio de 2009 forneceram dados de potência e demanda em kW na resolução temporal de 15 minutos e ser-

viram na construção da curva de carga e na identificação do pico de demanda.

As plantas arquitetônicas em formato digital em papel auxiliaram na precisão das medidas de cobertura, nos detalhes dos espaços destinados a iluminação artificial e natural e no layout do arranjo dos painéis fotovoltaicos.

O histórico das temperaturas médias diárias e mensais foi obtido a partir dos dados fornecidos pelo Ministério da Aeronáutica para o período de 2004 a 2008. As médias diárias na resolução temporal de 1 hora no período de junho de 2008 a maio de 2009 vieram da estação climatológica da Pampulha do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2010) em Belo Horizonte, órgão do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento.

3.3.2.2 Pesquisa Bibliográfica

- Periódicos indexados, nacionais e internacionais, pesquisas em bibliotecas e universidade;
- Atlas Brasileiro de Energia Solar: contendo mapas e informações da distribuição da irradiação solar na horizontal e plano inclinado em todas as regiões do Brasil.

3.3.2.3 Software utilizado

- Radiasol: Programa de simulação das médias diárias mensais e anuais da radiação solar no plano do módulo, desenvolvido pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul;
- Excel: Programa de tratamento de dados e gerador de gráficos do fabricante Microsoft.
- AutoCad: Programa de desenho auxiliado pelo computador do fabricante AutoDesk.

3.3.2.4 CEFET-MG

- Histórico dos dados de irradiação solar, medidos pela estação Vantage Pro2, instalada no Centro de Pesquisa em Energia Inteligente do CEFET-MG (CPEI), no período de junho de 2008 a dezembro de 2008 com resolução temporal de 1 minuto.

3.3.2.5 Caracterização da coleta de dados

Para esta etapa foram utilizados:

- Dados diários de irradiação solar coletados em intervalos de 1 minuto e integrados a cada 15 minutos;
- Levantamento das áreas de cobertura no terminal de passageiros e estacionamento;
- Percentual da área de cobertura útil para implantação do sistema fotovoltaico. Devido a forma retangular dos módulos FV e da arquitetura dos telhados das edificações do Aeroporto Internacional de Confins, foi necessário adequar o arranjo dos painéis fotovoltaicos a disponibilidade física da cobertura.
- Determinação do percentual de energia consumida pelo condicionamento de ar a ser atendido pelo sistema fotovoltaico;
- Estudo do potencial de geração solar, por meio da utilização dos diferentes módulos e tecnologias FV comercialmente disponíveis.

3.4 A Estimativa de áreas de cobertura

Várias considerações devem ser feitas, a fim de que possa ser calculada a área de cobertura disponível. O número e a altura dos edifícios, a densidade populacional e a influência da área urbana de superfície nas tipologias de construção são alguns exemplos. Além disso, outras limitações, tais como orientação, inclinação, localização, sombreamento, considerações históricas e outros usos concorrentes (como as instalações de climatização, elevadores, terraços ou coberturas) determinam a relação entre construção e a área do telhado disponível.

Em vários estudos sobre aplicações da energia solar integradas às edificações, a quantidade de área disponível é um dado de entrada (CASTRO et al., 2005; SORENSEN, 2001), porque nenhum modelo ou método deve ser desenvolvido sem antes serem estimadas as áreas disponíveis.

Idealmente, o método (ou modelo) para se calcular a superfície disponível do telhado deve: (a) ser exato, (b) ser confiável, com a possibilidade de uso da informática para delimitar o erro da estimativa de área de telhado; (c) ser de baixo custo, (d) ser eficiente (menor tempo de cálculo), (e) exigir poucos dados de entrada, globais, disponíveis e pa-

dronizados (f) produzir resultados georeferenciados; (g) ser escalável de locais para escalas globais, e (h) ser estruturado e flexível, de modo que novos elementos imprevistos possam ser introduzidos, e que o método possa ser usado para a estimativa da evolução, em longo prazo, da superfície do telhado disponível (IZQUIERDO et al., 2008).

Assim, um dos aspectos mais importantes a ser considerado é o tamanho da área a ser estudada, pois muitas vezes, as mesmas técnicas não podem ser aplicadas a nível local e regional ou escalas mundiais. Por exemplo, pode ser possível quantificar os efeitos de sombreamento entre edifícios com um modelo tridimensional de uma cidade (ROBINSON, 2006).

Este trabalho adota uma metodologia para calcular a estimativa da área de cobertura da superfície disponível para aplicações solares. Fachadas não são consideradas neste trabalho, mas a sua estimativa também pode ser integrada diretamente no processo de várias maneiras.

O estudo limita-se a edifícios que abrigam aeroportos em zonas urbanas (consoante a sua utilização: comercial e serviços públicos).

3.5 O Cálculo das Áreas Requeridas para sistema FV

O critério para determinar a área disponível foi a utilização das plantas baixas fornecidas pela INFRAERO, em formato digital e impresso e fotografias da cobertura obtidas do local da implantação.

Com a planta baixa digital utilizamos o aplicativo AutoCAD® e dividimos a área total de 33.404,42 metros quadrados em três grandes locais identificados por terminal de passageiros (TPS), estacionamento (EST) e administrativo (ADM), sendo que cada local foi dividido em vários setores, conforme mostra a Figura 16.

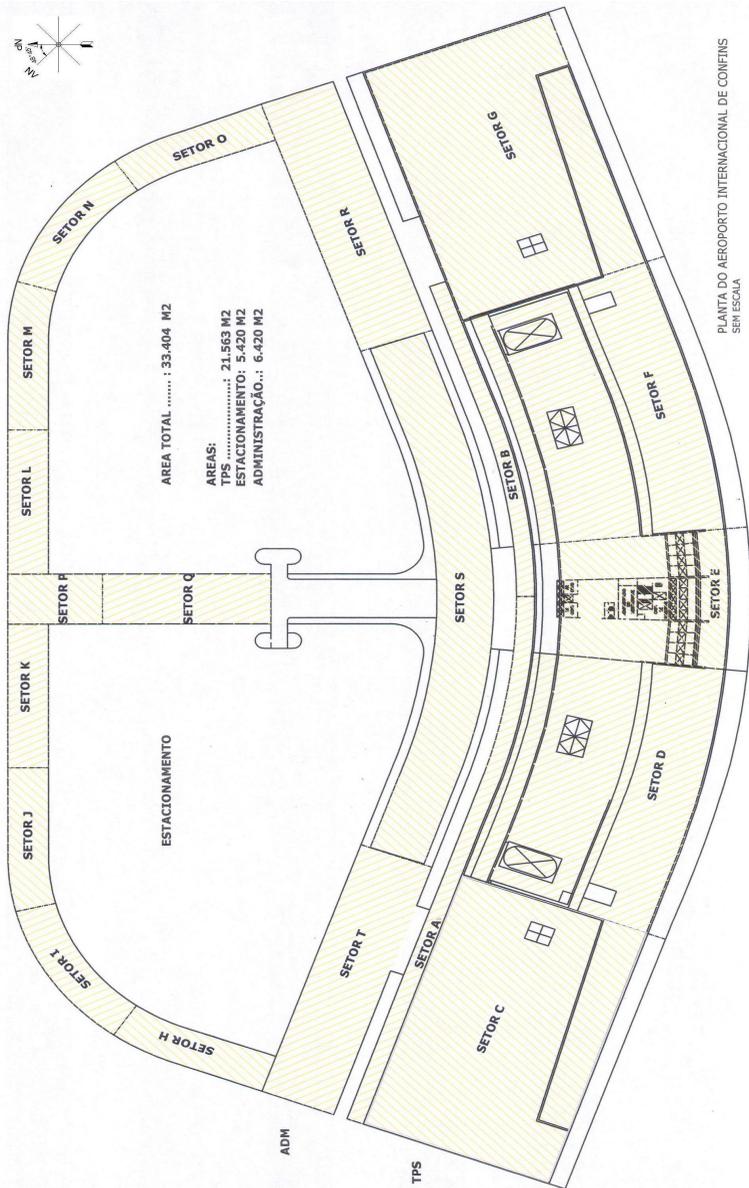


Figura 16 - Planta baixa do terminal de passageiros (TPS), do estacionamento (EST) e do administrativo (ADM) do Aeroporto Internacional de Confins.

Fonte: Planta baixa fornecida pela INFRAERO

Dos setores identificados, foi calculada a área de cobertura real e, desta, subtraídas as áreas ocupadas por detalhes e intervenções arquitetônicas, tais como: torre de iluminação, clarabóias e placas solares para aquecimento d'água.

O setor E não foi considerado disponível para utilização de elementos fotovoltaicos, pois toda a cobertura serve ao sistema de aquecimento de água destinada ao restaurante e casa de máquinas, conforme mostra a Figura 17.



Figura 17 - Vista da cobertura da casa de máquinas e restaurante do Aeroporto Internacional de Confins. (Setor E).

Fonte: Foto retirada em 31/03/2009.

3.6 O Cálculo da irradiação solar e da geração de energia FV

A determinação da quantidade de irradiação solar incidente na superfície horizontal foi obtida a partir do programa Radiasol, desenvolvido pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS, 2002). Os valores de irradiação obtidos por meio do programa são valores médios do total diário em kWh/m²/dia, e calculados a partir do banco de dados do projeto SWERA, disponibilizado pelo LABSOLAR.

A Figura 18 mostra a irradiação média solar incidente no plano horizontal na cidade de Belo Horizonte, a partir dos dados disponibilizados no aplicativo Radiasol. A média anual de irradiação solar global no plano dos painéis (G_{POA}) é de 5,4 kWh/m²/dia.

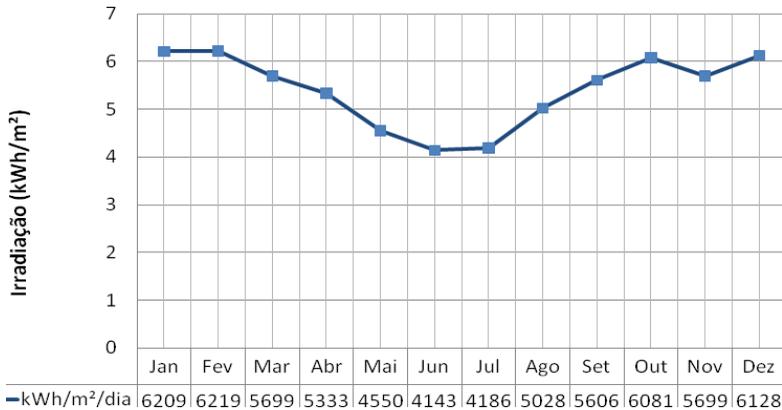


Figura 18 - Irradiação Média Mensal no Aeroporto Internacional de Confins

Fonte: Banco de dados do SWERA, 2009

Para cálculo da energia solar foto-gerada considera-se a área efetiva ocupada por módulos solares (em m²), a eficiência do módulo da tecnologia escolhida (E_{FF} em fração), a média do total diário de irradiação solar incidente no plano do painel (G_{POA} dado em kWh/m²/dia) e a eficiência do sistema inversor, perdas na transformação de corrente contínua (CC) para corrente alternada (CA) mais perdas na fiação, com valor tipicamente de 80% ($P_R = 0,8$) (RÜTHER et al., 2004; 2006). A média mensal do total diário da irradiação solar incidente no plano do arranjo fotovoltaico (G_{POA}), em kWh/m²/dia, corresponde à área sob o gráfico irradiação (W/m²) x tempo (horas) Para tal, utilizou-se a equação (Eq. 1)

$$E_{FV} = A * E_{FF} * G_{POA} * P_R \quad \text{Eq. 1}$$

A área requerida para a instalação de um sistema FV é obtida em função da potência instalada (P_{CC} em kWp) e da eficiência do módulo (E_{FF} em fração). (Eq. 2)

$$A_{REQUERIDA} = P_{CC} / E_{FF} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde, $A_{REQUERIDA}$ corresponde à área de cobertura para a implantação do sistema FV (m^2), P_{CC} corresponde à potência em corrente contínua instalada (kWp) e E_{FF} corresponde à eficiência do módulo FV para a tecnologia considerada dada em fração.

A potência total do gerador solar fotovoltaico foi obtida pelo produto do número de módulos solares utilizados em cada tecnologia pela potência unitária informada pelo fabricante, neste caso, 144W para o módulo Uni-Solar e 210 W para o módulo Kyocera.

3.7 A eficiência das tecnologias fotovoltaicas

Para o valor da eficiência da célula fotovoltaica (EFF), foram selecionadas quatro diferentes tecnologias de módulos fotovoltaicas (Tabela. 3).

A eficiência do módulo representa o percentual máximo da energia total que atinge a superfície deste, na forma de radiação, que pode ser convertida pelas células fotovoltaicas. O valor da eficiência é fornecida pelos fabricantes para uma condição padrão de teste (STC - Standard Test Conditions), em que a potência nominal dos módulos atinge o respectivo valor, quando submetido a uma radiação de 1.000 W/m², 1,5 massa de ar (A.M.)⁶ e a uma temperatura de 25°C.

Os modelos escolhidos abrangem um intervalo que cobre, desde tecnologias consideradas de baixa eficiência, como é o caso do silício amorfo (6,67%), até tecnologias consideradas de alta eficiência como a HIT - Heterojunction with Intrinsic Thin Layer (17,40%).

⁶ Massa de Ar: Razão entre o caminho óptico percorrido pelos raios solares na atmosfera e o caminho vertical na direção de zênite ao nível do mar, simbolizada por "AM" (Air Mass), podendo ser aproximada pela equação: $AM = 1 / \cos \theta_z$, para $\theta_z \leq 70^\circ$ –
Fonte: NBR10899:2006 Energia solar fotovoltaica – Terminologia.

Tabela 3 : Valores das eficiências das tecnologias utilizadas, considerando uma temperatura padrão de 25°C(STC), 1.000 W/m² e 1,5 A.M
Fonte: SALOMONI, 2004.

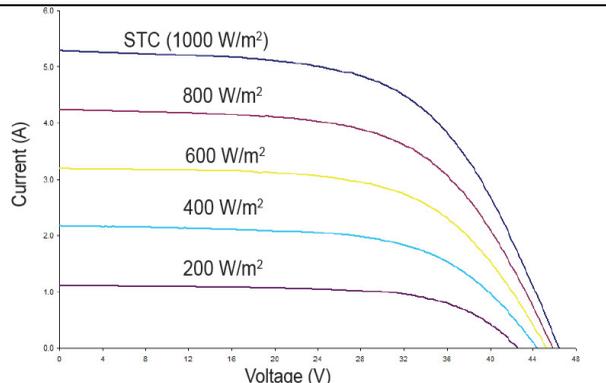
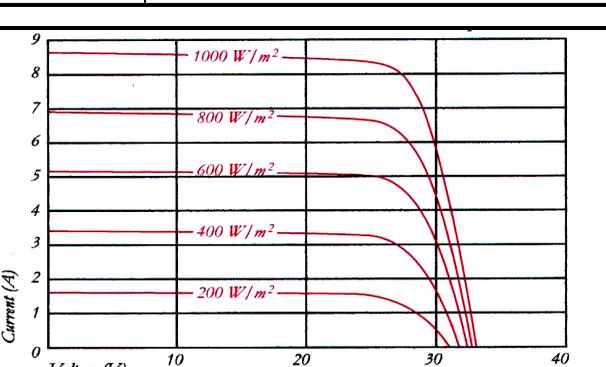
Tecnologia	Fabricante	Modelo	Potência (W)	Área (m²)	EFFSTC (%)
a-Si	Uni-Solar	PVL-144	144	2,16	6,67
HIT	Sanyo Solar	HIP-205BA3	205	1,18	17,40
c-Si	Shell Solar	Ultra 175-PC	175	1,32	13,30
	BP Solar	SX 3200 B	200	1,41	13,50
p-Si	Solon	Blue 220/07	220	1,61	13,41
	Sharp	ND-200U2	220	1,63	13,50
	kyocera	KD210GH	210	1,49	14,00

Segundo Rütther (2004), o silício policristalino (p-Si) apresenta a menor eficiência de conversão quando comparado ao c-Si, com a vantagem de um custo mais baixo de produção.

Nos últimos anos o p-Si tem crescido sua participação no mercado fotovoltaico mundial, em detrimento do c-Si, sendo que atualmente mais de 50% da produção mundial utiliza o p-Si (MAYCOCK, 2003).

Neste trabalho as tecnologias utilizadas são a-Si , módulos PVL-144 da fabricante Uni-Solar e p-Si módulos KD210GH da fabricante Kyocera, com as características técnicas mostradas na Tabela 4.

Tabela 4 : Especificações Elétricas dos módulos a-Si e p-Si dos fabricantes Uni-Solar e Kyocera

<p>Módulo: PVL-144 UNI-SOLAR Dimensões: (5486 x 384) mm</p>	
<p>Condições Teste Padrão (STC) 1000W/m², AM 1,5, 25°C temp. cell</p> <p>Potência Máxima = 144 W Tensão na Pot.máx.: 33,0 V Corrente na Pot. Max: 4,36 A Corrente Curto-Circuito: 5,3 A Tensão circuito aberto: 46,2 V</p>	<p>NOCT 800W/m²; AM 1,5, 1 m/s (veloc.do vento)</p> <p>Potência Máxima = 111 W Tensão na Pot.máx.: 30,8 V Corrente na Pot.máx.: 3,6 A Corrente Curto-Circuito: 4,3 A Tensão circuito aberto: 42,2 V NOCT: 46°C</p>
<p>Módulo: KD210GH-2PU KYOCERA Dimensões: (1500 x 999) mm</p>	
<p>Condições Teste Padrão (STC) 1000W/m², AM 1,5, 25°C temp. cell</p> <p>Potência Máxima = 210 W Tensão na Pot.máx.: 26,6 V Corrente na Pot. Max: 7,9 A Corrente Curto-Circuito: 8,58 A Tensão circuito aberto: 33,2 V</p>	<p>NOCT 800W/m²; AM 1,5, 1 m/s (veloc.do vento)</p> <p>Potência Máxima = 148 W Tensão na Pot.máx.: 23,5 V Corrente na Pot.máx.: 6,32 A Corrente Curto-Circuito: 6,98 A Tensão circuito aberto: 29,9 V NOCT: 49°C</p>

2.6 Variação da temperatura x Geração fotovoltaica

A maioria das tecnologias tem a eficiência da célula afetada pela temperatura de operação. A exceção fica para o silício amorfo (a-Si). As demais apresentam coeficientes de temperatura (TCOEFF) negativos, ou seja, que reduzem o valor efetivo da eficiência do módulo.

Considerando a temperatura de operação (NOCT - Nominal Operating Cell Temperature) fornecida pelos fabricantes, juntamente com o valor do TCOEFF, através da Eq. (3), pode-se obter o valor da eficiência corrigida (EFFNOCT), onde ΔT é a diferença da temperatura entre a condição de teste (STC) e a temperatura de operação (NOTC) do módulo em graus Celsius (SALAMONI, 2004).

$$E_{FFNOCT} = E_{FFSTC} * \left(\frac{100 - (T_{COEFF} * \Delta T)}{100} \right) \quad \text{Eq. 3}$$

A Tabela. 5 apresenta os valores de eficiência corrigidos (E_{FFNOCT}) para os respectivos valores T_{COEFF} e NOCT, bem como os valores da área Beta (β), calculados segundo a Eq. (4), com o objetivo de se determinar a área corrigida sob os novos valores de eficiência dos módulos selecionados, em que RSTC corresponde à radiação em condição padrão de teste (1.000 W/m²) e P à potência dos módulos selecionados em (W).

$$\beta = P / ((E_{FFNOCT} / 100) * R_{STC}) \quad \text{Eq. 4}$$

Tabela 5 : Valores de eficiência e potência corrigidos para os módulos selecionados

Tecnologia	Modelo	T_{COEFF} (% / °C)	NOCT (°C)	E_{FFNOCT} (%)	β (m ²)
a-Si	PVL-144	0,00 ⁽¹⁾	45,0	6,67	2,16
HIT	HIP-205BA3	-0,29 ⁽³⁾	45,0	16,39	1,25
c-Si	Ultra 175-PC	-0,43 ⁽³⁾	45,0	12,16	1,44
	SX 3200 B	-0,45 ⁽³⁾	45,0	12,29	1,62
p-Si	Blue 220/07	-0,44 ⁽³⁾	45,0	12,23	1,79
	ND-200U2	-0,40 ⁽²⁾	45,0	12,42	1,77
	KD210GH-2PU	-0,40 ⁽²⁾	45,0	12,88	1,63

(1) Coeficiente de temperatura, segundo RÜTHER et al. (2004)

(2) Coeficiente de temperatura, segundo NANN; EMERY (1992)

(3) Coeficiente de temperatura, segundo os fabricantes SANYO, SHELL SOLAR, BPSOLAR, SOLON (2008).

3.8 Avaliação Econômica

Neste trabalho foi estudado o impacto econômico na fatura de energia do aeroporto, tendo como base a modalidade tarifária vigente, horosazonal azul, considerando o consumo no horário fora de ponta e o potencial de geração fotovoltaica do sistema, na tecnologia a-Si e p-Si.

A análise foi feita a partir de uma média de consumo e geração, e considerou o custo de aquisição do sistema fotovoltaico (módulos, inversores, fiação e mão-de-obra) e o potencial de exportação da energia gerada para a rede pública. Para análise do valor pago pela energia gerada a partir da planta FV foram utilizados dois modelos de tarifação em uso em outros países, o *net-metering* e o *feed-in-tariff*. No modelo *net-metering* utilizamos um medidor de kWh bidirecional, com tarifa igual para compra e venda de energia elétrica. Neste modelo o consumidor paga apenas pela diferença entre o consumo e a geração solar fotovoltaica.

ca. No modelo *feed-in-tariff*, o consumidor possui dois medidores, sendo um para o consumo usando a rede da concessionária e outro para medir a energia solar foto-gerada exportada a rede pública. Neste modelo a energia gerada recebe incentivo através da tarifa prêmio e com isto, reduz o tempo de retorno no investimento.

A análise econômica foi feita para um programa de 25 anos, e considerou o valor inicial de aquisição do sistema e a estimativa do tempo de retorno pelo cálculo do valor presente líquido do investimento e da receita gerada pela planta FV.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos potenciais de geração de energia fotovoltaica obtidos no Aeroporto Internacional de Confins. Desse modo, considerando a metodologia aplicada, o estudo restringe o uso de módulos fotovoltaicos aplicados exclusivamente nas coberturas dos prédios nas edificações do TPS, ADM e EST. Os módulos FV nas tecnologias a-Si e p-Si foram distribuídos, acompanhando a inclinação real dos telhados das edificações.

4.2 Arquitetura do aeroporto

Como descrito anteriormente, o aeroporto se caracteriza por apresentar arquitetura horizontal e alongada, o que possibilita ausência de sombreamento causado por edificações vizinhas. A área é pouco arborizada e nas regiões entre as pistas de pouso e decolagem, conhecida por área de escape, existe plantio de gramas e vegetação rasteira, não sendo permitido nenhum outro uso.

Considerando a forma retangular dos módulos fotovoltaicos e as tecnologias FV empregadas neste estudo, foi possível a utilização máxima de 28.029 m² dos 33.404 m² existentes, representando 84% deste total. A Tabela. 6 mostra a distribuição dos setores e as áreas disponíveis com os percentuais de utilização.

Tabela 6 : Levantamento das áreas de cobertura do TPS, do estacionamento e do administrativo do aeroporto.

Fonte: Dados da pesquisa

Local	Setor	Área de Cobertura (m ²)	Área Livre de Intervenções Arquitetônicas	Área Reservada (m ²)	Área Disponível (m ²)	% de Utilização
TPS	A - G	21563,06	18304,47	1235,37	17069,11	79%
EST	H - Q	5420,42	4994,62	-	4994,62	92%
ADM	R - T	6420,94	5965,16	-	5965,16	93%
Total		33404	29264	1235	28029	84%

ÁREA DISPONÍVEL PARA OS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS : 28029

A Tabela 7 foi elaborada considerando o local, o setor, a área de cobertura, as áreas livres e reservadas, as áreas disponíveis e o percentual de utilização.

Tabela 7 : Relação dos locais e setores do aeroporto utilizados para simulação do gerador fotovoltaico

Fonte: Dados da pesquisa.

Local	Setor	Área de Cobertura (m ²)	Área Livre de Intervenções Arquitetônicas	Tipos de Intervenções	Área Reservada (m ²)	Área Disponível (m ²)	% de Utilização
TPS	A	881,14	698,90	Inclinada		698,90	79%
	B	523,91	407,29	Inclinada		407,29	78%
	C	4686,82	4535,33	Clarabóia e Torre de Iluminação	105,10	4430,23	95%
	D	4494,95	4116,06	Clarabóia e Torre de Iluminação	502,93	3613,13	80%
	E	1910,83	0,00	Casa de Máquinas e Restaurante	1910,83	0,00	NT
	F	4358,47	4091,01	Clarabóia e Torre de Iluminação	522,24	3568,77	82%
	G	4706,93	4455,89	Clarabóia e Torre de Iluminação	105,10	4350,79	92%
EST	H	508,34	471,08	NT		471,08	93%
	I	524,40	458,54	NT		458,54	87%
	J	523,42	469,47	NT		469,47	90%
	K	536,49	511,50	NT		511,50	95%
	L	538,48	511,50	NT		511,50	95%
	M	533,19	480,05	NT		480,05	90%
	N	524,87	430,29	NT		430,29	82%
	O	523,32	462,19	NT		462,19	88%
	P	435,33	432,41	NT		432,41	99%
Q	772,58	767,59	NT		767,59	99%	
ADM	R	1835,46	1763,23	NT		1763,23	96%
	S	2759,63	2437,78	NT		2437,78	88%
	T	1825,85	1764,15	NT		1764,15	97%
Total		33404	29264		3146	28029	84%

ÁREA DISPONÍVEL PARA OS MÓDULOS FOTOVOLTAICOS :

28029

NT = Não Tem

Na Tabela 8 temos os quantitativos de cada módulo FV empregado neste estudo, agrupados por local e setores conforme a metodologia adotada. A maior quantidade de módulos FV ficou para o modelo KD210GH-2PU (Kyocera), com 18.678 unidades, seguido dos módulos PVL144 (Uni-Solar) com 12.959 unidades.

Assim, considerando a potência especificada pelos fabricantes de cada tecnologia, nas condições padrões de teste (STC), irradiação solar de 1.000 W/m², temperatura da célula de 25°C e massa de ar igual a 1,5 AM, o modelo PVL144 representa 1866 kWp e o modelo KD210GH-2PU sugere 3922 kWp.

Tabela 8 : Quantidade de módulos FV para as tecnologias FV a-Si e p-Si aplicadas nas áreas disponíveis da cobertura do aeroporto. Potência CC para a tecnologia FV a-Si nas condições padrões (temperatura 25°C (STC), 1000 W/m² e 1,5 A.M).

Fonte: Dados da pesquisa.

Local	Setor	Área Disponível (m ²)	Quant. Módulo PVL 144 Uni-Solar	Quant. Módulo KD210GH Kyocera
TPS	Setor A	699	323	465
	Setor B	407	188	271
	Setor C	4430	2049	2953
	Setor D	3613	1671	2408
	Setor E	NT	NT	NT
	Setor F	3569	1651	2379
	Setor G	4351	2012	2900
EST	Setor H	471	217	314
	Setor I	459	212	305
	Setor J	469	217	312
	Setor K	512	236	341
	Setor L	512	236	341
	Setor M	480	222	320
	Setor N	430	199	286
	Setor O	462	213	308
	Setor P	432	200	288
ADM	Setor Q	768	355	511
	Setor R	1763	815	1175
	Setor S	2438	1127	1625
	Setor T	1764	816	1176
Total		28029	12959	18678
Potência Máxima Gerada (KWpcc)			1866	3922

Devido ao formato arredondado da edificação e a presença de clarabóias e torres de iluminação na cobertura do aeroporto, a área disponível para abrigar os módulos FV foi reduzida em 84% de 33404 m² para 28029 m². Na distribuição dos módulos o modelo KD210GH da Kyoceera obteve melhor aproveitamento devido ao seu formato e a relação largura/comprimento (66%). Quanto ao módulo da Uni-Solar PLV 144, sua distribuição foi prejudicada devido ao seu formato alongado e estreito e a baixa relação larg./comp. (7,2%).

A Figura 19 apresenta o layout da distribuição dos painéis fotovoltaicos distribuídos horizontalmente na cobertura do TPS, ADM e EST. A tecnologia FV utilizada é a p-Si utilizando módulos KD210GH nas dimensões (150 x 99) cm.

A Figura 20 apresenta o layout da distribuição dos painéis fotovoltaicos distribuídos horizontalmente na cobertura do TPS, ADM e EST. A tecnologia FV utilizada é a a-Si utilizando módulos PVL144 nas dimensões (548,6 x 39,4) cm.

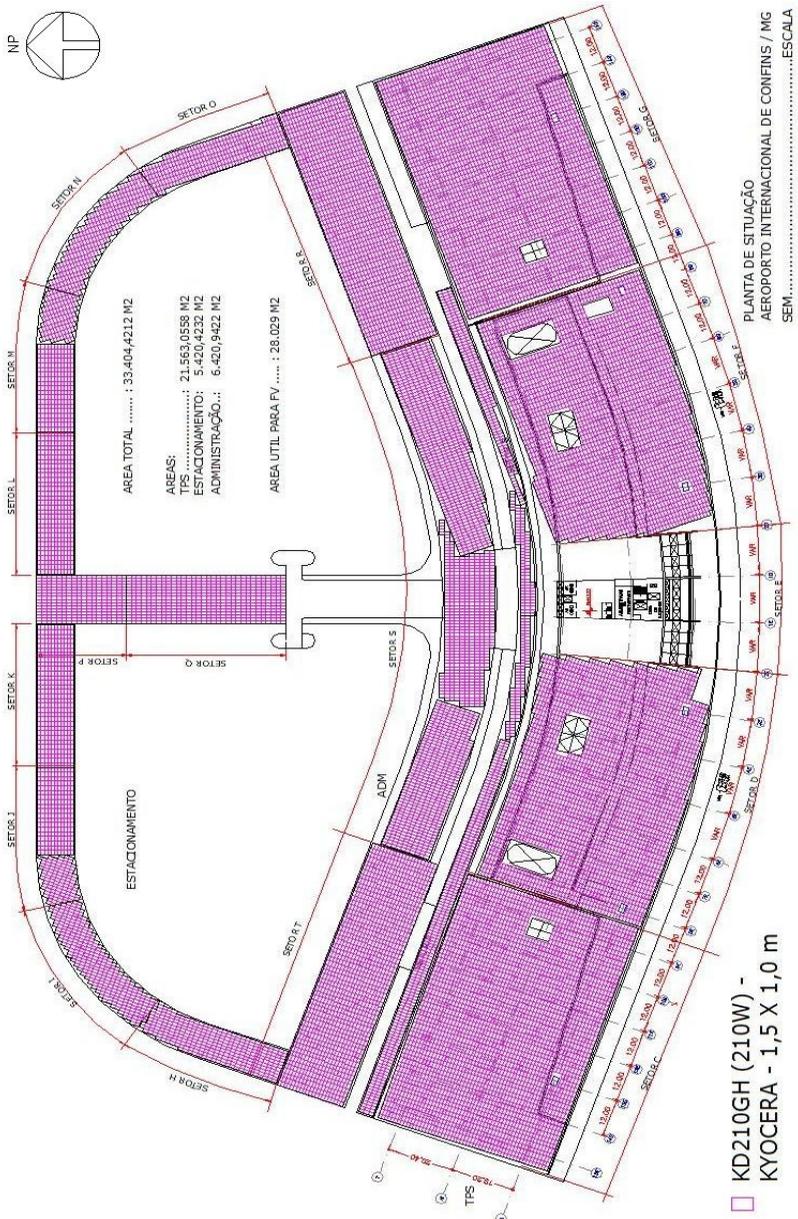


Figura 19 - Layout dos módulos KD210GH (Kyocera) distribuídos no TPS, ADM e EST.

Fonte: Dados da pesquisa.

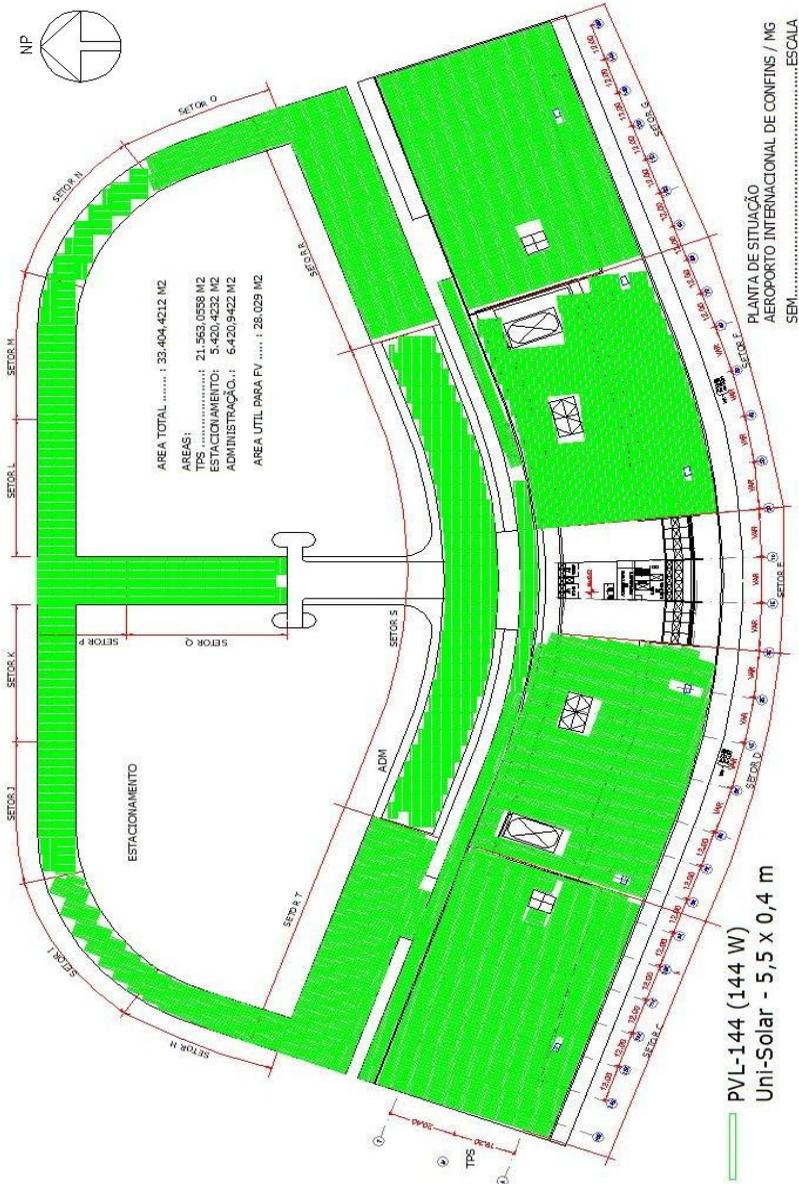


Figura 20 - Layout dos módulos PVL144 (Uni-Solar) distribuídos no TPS, ADM e EST.

Fonte: Dados da pesquisa.

4.3 Conexão Elétrica dos Módulos solares fotovoltaicos

Os módulos solares fotovoltaicos podem ser conectados em série ou em paralelo dependendo da tensão e da potência especificada pelos inversores. Estes dispositivos elétricos fazem a conversão da corrente contínua em corrente alternada e conectam o arranjo fotovoltaico com a rede pública na frequência da concessionária.

Neste estudo fizemos opção pelo inversor Sunny Boy modelo SB 8000US da fabricante SMA apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 : Especificações do inversor Sunny Boy SB 8000US da SMA
Fonte: Catálogo do fabricante.

Sunny Boy SB 8000 US		Máxima potência FV:	10.000 W
Máxima tensão de entrada:	600 VCC	Faixa de tensão desejada:	300-480 VCC
Corrente máxima de entrada:	30 ACC	Potência nominal de saída:	8.000 W
Faixa de tensão de saída:	211-264 VAC	Frequência nominal:	60 Hz
Fator de potência nominal:	0,99	Eficiência na Máx. Potência:	96,5 %

Dados técnicos do catálogo da SMA - USA

O número arranjos fotovoltaicos para atender as duas tecnologias, bem como o número de inversores exigidos para cada arranjo estão listados na Tabela 10.

Tabela 10 : Quantitativos de módulos e sistemas FV estimado para o Aeroporto Internacional de Confins.

Fonte: Dados da pesquisa.

Tecnologia	Número de Módulos	Número de Inversores SB 8000US	Número de Módulos por sistema FV	Potência Máxima por sistema FV Wp	Potência Total kWp
a-Si	12.959	216	60	8.640	1.866
p-Si	18.678	415	45	9.450	3.922

Na Figura 21 e Figura 22 estão ilustrados os arranjos FV contendo os componentes necessários para cada tecnologia. Além dos painéis FV e inversor foi, também incluído em cada esquema um medidor de energia elétrica (kWh), responsável pela medição da energia foto-gerada para futura inclusão em programas de incentivo ao uso da energia solar.

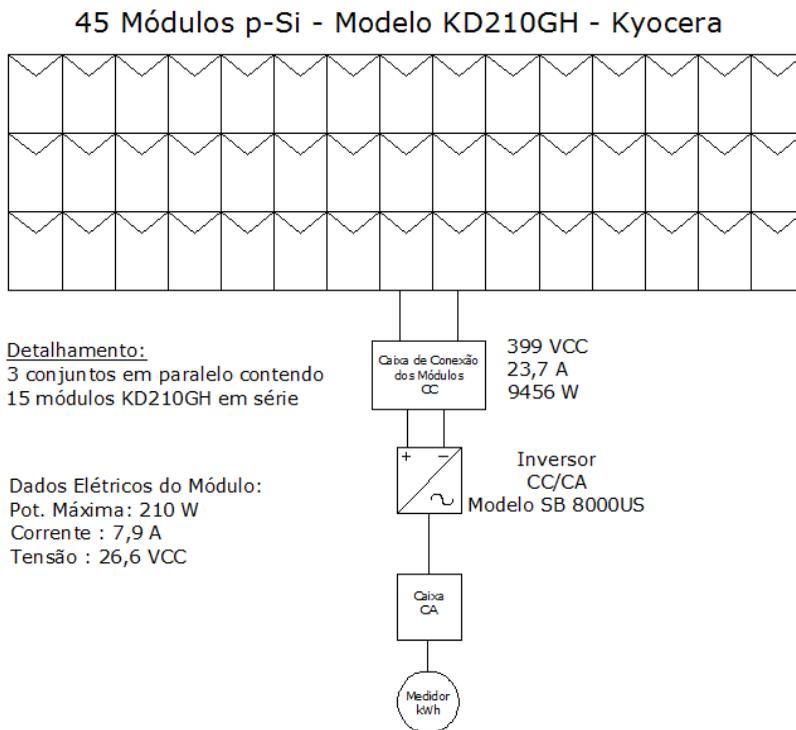


Figura 21 - Diagrama esquemático do sistema solar fotovoltaico de 9,45 kWp usando a tecnologia p-Si.

Fonte: Dados da Pesquisa

60 Módulos a-Si - Modelo PVL-144 - Uni-Solar

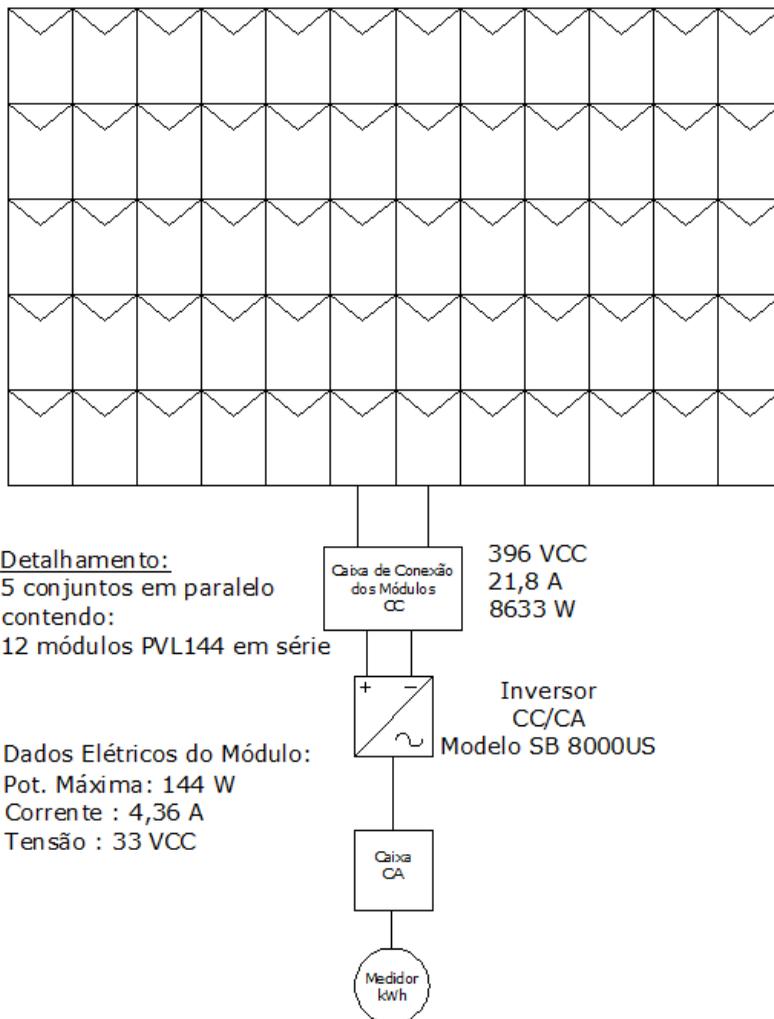


Figura 22 - Diagrama esquemático do sistema solar fotovoltaico de 8,63 kWp usando a tecnologia a-Si.

Fonte: Dados da Pesquisa

4.4 Irradiação solar horária global

Os dados coletados no CPEI permitiram conhecer os dias limpos ao longo do ano de 2008, por intermédio das curvas de irradiação solar.

A Figura 23 mostra alguns dias de geração solar fotovoltaica para um céu limpo nos meses de julho a outubro em Belo Horizonte. Nesta figura, observamos que no dia 25 de outubro a irradiação solar às 11h45min chegou a 982 W/m^2 e a energia fotovoltaica estimada para Belo Horizonte neste dia foi de $7,24 \text{ kWh/m}^2$.

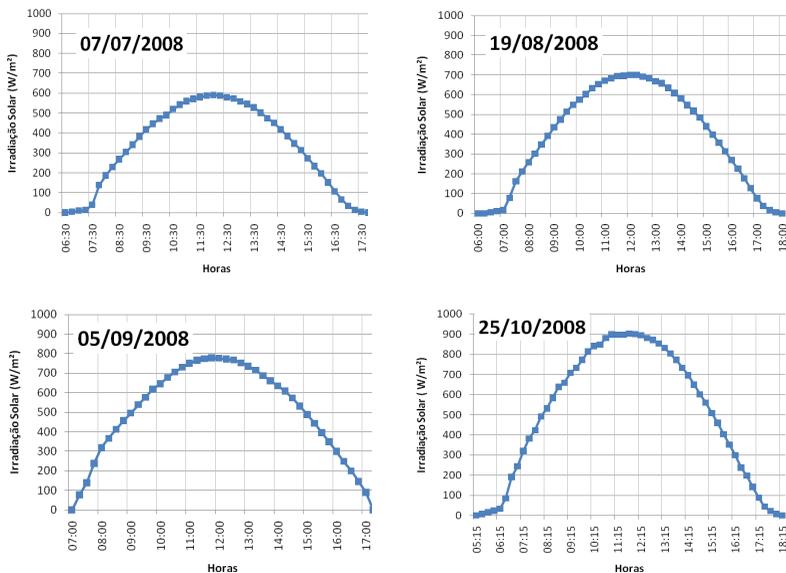


Figura 23 - Curva de irradiação solar em quatro dias de céu limpo de 2008, medida no CPEI do CEFET-MG na cidade de Belo Horizonte, considerando a superfície horizontal.

Fonte: Aplicativo Radasol.

A irradiação solar varia ao longo dia, variando sua intensidade devido a presença de nuvens e estações do ano, atingindo o valor máximo em torno do meio dia e declinando no final da tarde. Nos meses da estação do inverno, ocorre a menor irradiação solar e o número de horas disponíveis fica reduzido de 13 horas para 10 horas.

A Figura 24 mostra a curva de irradiação solar no dia 25/10. Os valores foram obtidos por meio de satélites para um dia de céu limpo. O valor de maior irradiação encontra-se no intervalo das 11h30min às 12h30min.

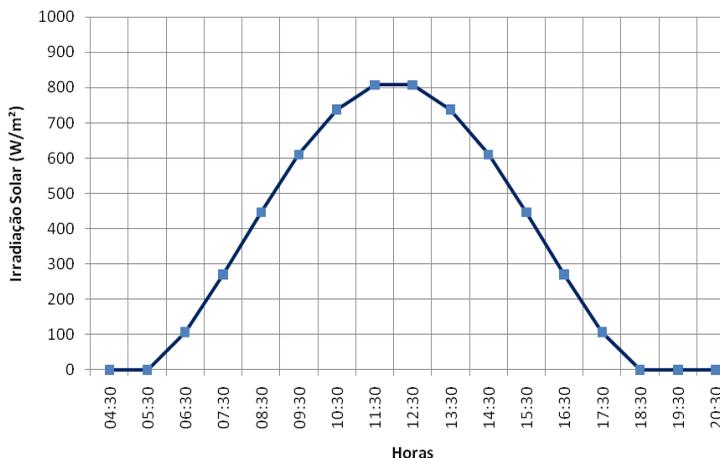


Figura 24 - Curva de irradiação solar para um dia 25/10 obtida através do aplicativo Radiasol para a cidade de Belo Horizonte, considerando superfície plana.

Fonte: Banco de dados SWERA.

Comparando os gráficos de irradiação solar com as medidas do CPEI (Figura 23) e o gráfico utilizando os dados do SWERA (Figura 24) para o dia 25/10 chegamos a resultados diferentes. Esta divergência pode ser explicada se considerarmos que os dados do CPEI são valores reais coletados junto dos painéis solares para o dia 25/10/2008. Contudo ao utilizarmos o SWERA estamos utilizando uma base dados históricos, coletados em vários anos e proveniente de satélites, sendo o valor apresentado uma estimativa para o dia 25/10, não importando o ano de análise.

Assim sendo, devemos dar preferência, na medida do possível, por dados coletados localmente por uma estação estabelecida na região de estudo. Neste trabalho, devido à escassez de um banco de dados histórico de irradiação solar, optamos por usar, também, dados vindos do SWERA.

4.5 Demanda do Aeroporto Internacional de Confin

O histórico do consumo de energia no aeroporto no período de 2003 a 2008 é apresentado na Tabela 11, e foi obtido através das faturas de energia da concessionária CEMIG após liberação da INFRAERO. Observou-se que no período de 2005 a 2008 houve um aumento de 32,5% no consumo de energia elétrica, impulsionada pela transferência de vôos do Aeroporto da Pampulha e à criação de novas rotas internacionais em Confin.

Outro fato importante que influenciou o consumo de energia elétrica no período avaliado, refere-se à preferência da população pelo transporte aéreo, a melhoria do poder aquisitivo dos usuários e a construção de vias de acesso rápido ao aeroporto para ônibus e traslado. Fatores ligados à infra-estrutura da capital, com programação de eventos nacionais e internacionais, contribuíram para a divulgação e circulação de turistas pelas dependências do aeroporto.

Tabela 11 : Consumo histórico mensal e anual do Aeroporto Internacional de Confin em kWh.

Fonte: Faturas da CEMIG, período jan/2003 a dez/2008

Meses	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Janeiro	653.295	687.542	734.264	948.797	1.059.962	1.147.191
Fevereiro	737.618	688.049	657.196	956.662	1.073.232	1.094.374
Março	625.333	610.465	683.454	874.940	929.264	1.090.598
Abril	612.092	679.653	936.227	1.043.476	1.009.286	1.142.453
Mai	571.157	672.738	877.276	854.796	1.028.034	1.136.045
Junho	535.412	508.371	800.988	809.102	943.978	979.161
Julho	494.270	466.142	772.696	898.958	871.335	1.038.226
Agosto	507.624	478.359	879.004	858.896	985.764	1.058.353
Setembro	552.691	619.360	863.153	877.748	988.730	1.164.278
Outubro	603.263	667.940	934.242	958.404	1.003.839	1.071.600
Novembro	680.595	746.911	911.193	990.702	1.051.805	1.328.473
Dezembro	638.608	638.910	847.101	968.904	1.114.659	1.143.970
Total	7.211.958	7.464.440	9.896.794	11.041.385	12.059.888	13.394.722
Média Mensal	600.997	622.037	824.733	920.115	1.004.991	1.116.227
Média Diária	20.033	20.735	27.491	30.671	33.500	37.208

Na Figura 25 é apresentado o gráfico do consumo de energia do período de 2003 a 2008, com destaque para o ar-condicionado central. Devido ao uso intenso do TPS, o gasto com refrigeração representa historicamente 12% do consumo anual de energia. Estes dados foram coletados pela INFRAERO a partir de um medidor de kWh exclusivo para o sistema de ar condicionado.

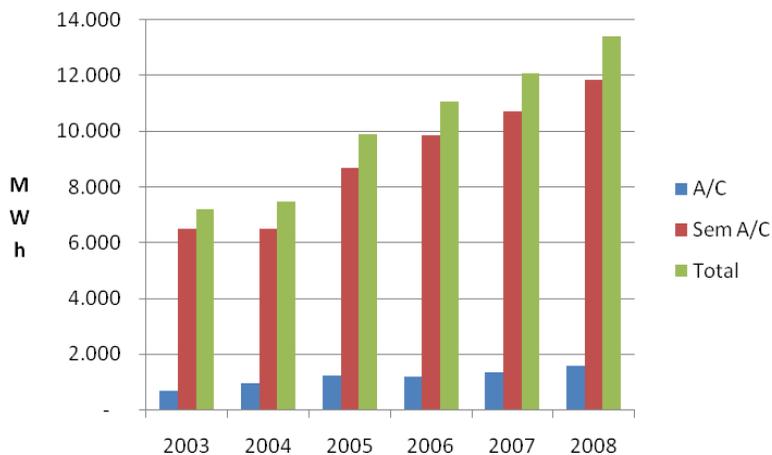


Figura 25 - Consumo histórico de energia no Aeroporto Internacional de Confins no período de 2003 a 2008, com destaque para o ar condicionado central (cor azul).

Fonte: Dados da Pesquisa.

Neste trabalho, foram utilizados dados de memória de massa dos medidores do aeroporto fornecidos pela INFRAERO e os dados dos alimentadores fornecidos pela CEMIG, no período de junho de 2008 a maio de 2009. Neste período, o consumo foi de 14035 MWh/ano, com uma média mensal de 1170 MWh/mês, conforme representado na Tabela 12. O sistema de ar-condicionado foi responsável por 1685 MWh/ano (12%).

Tabela 12 : Energia consumida e demanda utilizada no Aeroporto Internacional de Confins no período de junho/08 a maio/09.

Fonte: Memória de Massa do Aeroporto.

Mês/Ano	Demanda (kW)		Consumo (kWh)		Consumo Total HP + HFP
	Horário de Ponta	Horário Fora de Ponta	Horário de Ponta	Horário Fora de Ponta	
	HP	HFP	HP	HFP	
jun/08	2.061	2.056	179.356	840.164	1.019.520
jul/08	2.036	2.086	174.530	821.560	996.091
ago/08	2.091	2.152	191.991	909.237	1.101.229
set/08	2.172	2.227	185.035	895.723	1.080.758
out/08	2.227	2.278	200.726	1.019.307	1.220.033
nov/08	2.182	2.293	189.374	1.001.744	1.191.118
dez/08	2.192	2.268	193.321	1.050.277	1.243.598
jan/09	2.177	2.233	196.637	1.071.852	1.268.489
fev/09	2.208	2.283	177.770	934.224	1.111.995
mar/09	2.202	2.288	181.327	1.184.568	1.365.894
abr/09	2.202	2.374	195.304	1.033.026	1.228.330
mai/09	2.207	2.258	195.570	1.011.950	1.207.520
Total	-	-	2.260.940	11.773.633	14.034.573
Média	2.163	2.233	188.412	981.136	1.169.548

No período de junho de 2008 a maio de 2009, a demanda máxima foi de 2374 kW. O contrato firmado entre a INFRAERO e a CEMIG classifica o consumidor na tarifa horo-sazonal azul⁷, sendo que a demanda contratada⁸ no horário de ponta (HP)⁹ (das 19 às 22 horas), e no

⁷ Tarifa horo-sazonal azul: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de tarifas diferenciadas de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia. (Redação dada pela Resolução ANEEL nº 090, de 27.03.2001)

⁸ Demanda contratada: demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela concessionária, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência fixados no contrato de fornecimento e que deverá ser integralmente paga, seja ou não utilizada durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW).

⁹ Horário de ponta (HP): período definido pela concessionária e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira

horário fora de ponta (HFP)¹⁰ (são às 21 horas restantes do dia) é de 2230 kW tanto para o período seco (maio a novembro), como para o período úmido (dezembro a abril).

O contrato estabelece que a INFRAERO possa ultrapassar este limite em até 10% (223 kW), podendo chegar a 2453 kW, conforme mostra a Figura 28 a demanda em abril/09 esteve prestes a ultrapassar esta tolerância, provavelmente pelo uso intensivo do ar condicionado.

A demanda máxima verificada no aeroporto no período avaliado de junho/08 a maio/09 foi de 2227 kW (outubro/2008) no HP e 2374 kW (abril/2009) no HFP. Na Figura 26, observa-se que os meses, nos quais foram registradas as maiores demandas, coincidem com o período de férias escolares e na estação de verão. A demanda máxima foi atingida no dia 06 de abril de 2009 às 16h45min, durante 15 minutos. Estes dados foram obtidos pela memória de massa do aeroporto.

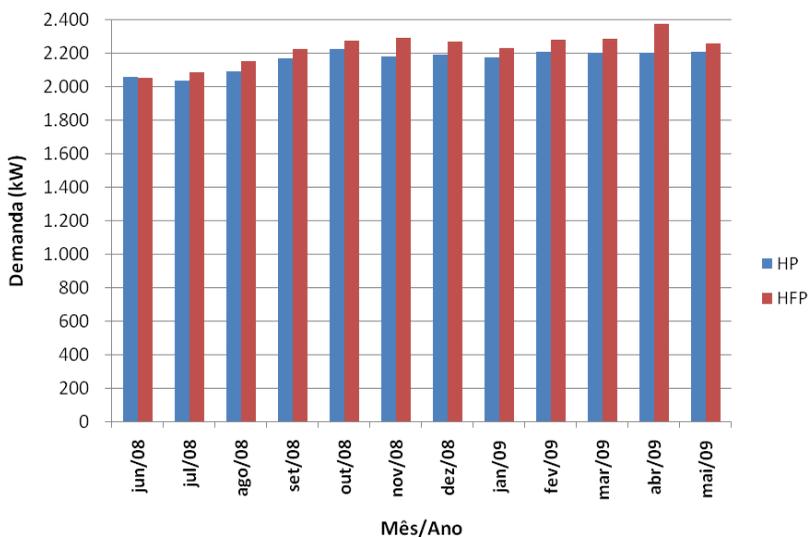


Figura 26 - Demanda Máxima registrada no período de jun/08 a mai/09.

Fonte: Dados da Pesquisa

da Paixão, “Corpus Christi”, dia de finados e os demais feriados definidos por lei federal, considerando as características do seu sistema elétrico.”

¹⁰ Horário fora de ponta (HFP): período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta.

A Figura 27 apresenta algumas curvas de carga com pico de demanda diurno. Nesta pesquisa foram identificados 42 dias com pico diurno, coincidindo com o horário de maior radiação solar. Observa-se também uma redução brusca da demanda após as 16:00 h devido ao desligamento programado de algumas máquinas que compõem o sistema de condicionamento de ar.

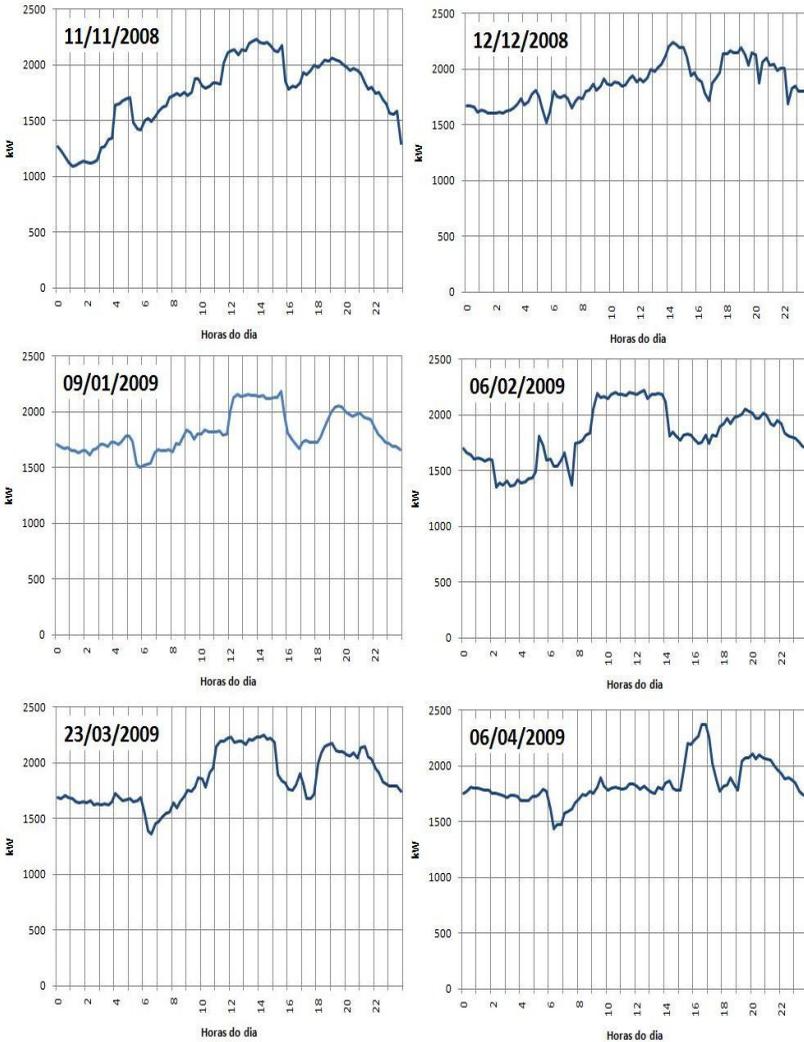


Figura 27 - Curvas de demanda em dias com pico diurno.

Fonte: Dados da pesquisa.

Analisando os gráficos nota-se que logo após as 18 horas ocorre um pico de demanda noturno, devido à ligação das lâmpadas das torres de iluminação do pátio das aeronaves e dos postes de iluminação do eixo viário de acesso ao aeroporto. O total de potência adicionado é de 207,15 kW, atendendo a uma carga de 307 lâmpadas de vapor de sódio, conforme mostrado na Tabela 13.

Tabela 13 : Carga de iluminação acionada após as 18h - TPS (terminal de passageiros), TECA (transporte de carga), AVG (aviação do governo).

Fonte: Dados da Pesquisa

Local	Vapor de Sódio		Reator VS 50W	Total kW
	250 W	400 W		
TPS 6 (torres)		108	108	47,52
TECA (2 torres)		48	48	21,12
AVG (2 torres)		24	24	10,56
Eixo Viário (222 postes)	68	239	307	127,95
TOTAL				207,15

Na Tabela 14 observa-se a demanda máxima para cada mês do ano pesquisado, bem como o horário onde ocorreu o pico de demanda, podendo ser no horário de ponta (HP) ou no horário fora de ponta (HFP).

Tabela 14 : Picos de demanda histórico-mensal e horário identificado

Fonte: Dados da Pesquisa

Meses	Dia	Hora	kW	Faixa
jun/08	19	19:15	2061	HP
	17	18:15	2056	HFP
jul/08	28	19:15	2006	HP
	30	18:30	2087	HFP
ago/08	8	19:15	2092	HP
	29	18:15	2152	HFP
set/08	8	19:15	2172	HP
	15	15:15	2228	HFP
out/08	6	19:15	2228	HP
	28	15:00	2278	HFP
nov/08	4	20:45	2182	HP
	5	14:30	2293	HFP
dez/08	12	19:15	2192	HP
	3	13:30	2268	HFP
jan/09	13	20:30	2177	HP
	14	11:15	2233	HFP
fev/09	4	20:00	2208	HP
	11	13:45	2283	HFP
mar/09	20	21:15	2202	HP
	16	17:00	2288	HFP
abr/09	8	21:30	2202	HP
	6	16:45	2374	HFP
mai/09	8	19:15	2142	HP
	15	18:15	2258	HFP

O fator de potência (FP) médio mensal tem característica indutiva (L) e está próximo de 100%. O fator de potência aceito pela CEMIG é no mínimo de 92% indutivo das 5 às 23 horas e 92% capacitivo das 23 às 5 horas da manhã do dia seguinte.

4.6 Demanda dos alimentadores do Aeroporto Internacional de Confins

Os alimentadores¹¹ da CEMIG que atendem ao complexo aeroportuário não são exclusivos. Da energia total fornecida pelos alimentadores, em média 49% do total é destinada ao aeroporto. Nos meses de março de 2009 a utilização da energia dos alimentadores chegou a 81% de toda energia transportada pelos alimentadores, conforme demonstrado na Tabela 15.

A Tabela 15 mostra a relação entre os picos de demanda mensal do aeroporto e do total dos alimentadores, representado pela soma dos alimentadores PLOT11 e NOG6. Observa-se que a partir de fevereiro de 2009 foi crescente a participação do aeroporto no consumo total dos alimentadores. Tal fato é atribuído ao aumento do número de passageiros no terminal de embarque e desembarque.

Tabela 15 : Consumo de energia elétrica de cada alimentador que atende ao aeroporto e consumo do aeroporto.

Fonte: Dados da Pesquisa

Mês/ano	Alimentador (kWh/mês)		Consumo Aeroporto	
	PLOT11	NOG06	kWh/mês	%
jun/08	1.711.277	1.274.661	1.019.520	34%
jul/08	1.700.896	1.313.949	996.090	33%
ago/08	1.903.119	1.368.748	1.101.228	34%
set/08	1.176.846	1.360.787	1.080.757	43%
out/08	1.182.468	1.414.922	1.220.033	47%
nov/08	1.143.733	1.374.042	1.191.118	47%
dez/08	1.210.425	1.370.718	1.243.598	48%
jan/09	1.210.425	1.370.718	1.266.807	49%
fev/09	1.040.695	786.589	1.108.953	61%
mar/09	1.244.045	466.233	1.383.561	81%
abr/09	1.135.853	479.421	1.228.330	76%
mai/09	1.132.445	491.172	1.207.520	74%
Média Mensal	1.316.019	1.089.330	1.170.626	49%
Total Anual	15.792.226	13.071.959	14.047.515	49%

¹¹ Alimentadores são cabos elétricos, geralmente de alumínio, responsável pelo transporte da energia elétrica das usinas geradoras até as subestações e destas até aos transformadores do usuário final. Nesta pesquisa os alimentadores PLOT11 e NOG6 são para tensões de 13,8 kV.

A demanda máxima mensal dos alimentadores PLOT11 e NOG6, no período de junho de 2008 a maio de 2009, é mostrada na Figura 28, comparando com a demanda do aeroporto no mesmo período.

Devido ao fato dos alimentadores não serem exclusivos do aeroporto, a diferença apresentada no gráfico é a potência destinada aos consumidores vizinhos ao complexo aeroportuário.

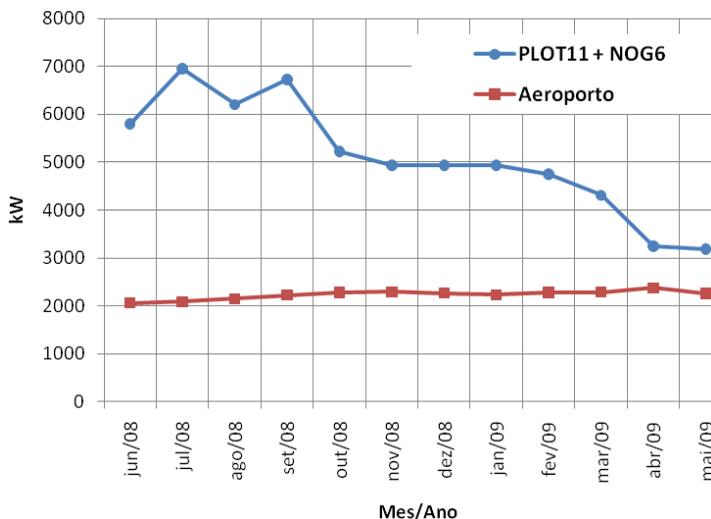


Figura 28 - Demanda máxima dos alimentadores comparados com a demanda do aeroporto.

Fonte: Dados da Pesquisa.

A Tabela 16 mostra os picos de demanda histórico dos alimentadores PLOT11 e NOG6. A máxima demanda registrada, em agosto de 2008 no alimentador PLOT11, foi de 5.324 kW (no dia 5, às 10h30min) e, no NOG6, foi de 3.468 kW (no dia, 09 às 18h30min).

Tabela 16 : Pico de demanda histórica nos alimentadores.

Fonte: Dados da Pesquisa

Mês/Ano	PLOT11			NOG6		
	kW	Horário	Dia	kW	Horário	Dia
jun/08	3664	08:45	12	2501	18:15	20
jul/08	4856	14:00	22	2473	18:30	26
ago/08	5324	10:30	05	3468	18:30	09
set/08	4716	15:45	01	2828	23:00	25
out/08	3580	13:15	27	2828	23:00	25
nov/08	2407	20:00	01	2529	20:00	01
dez/08	3604	06:00	14	2688	21:00	07
jan/09	2678	22:30	06	2697	20:30	02
fev/09	2575	19:45	23	2547	10:30	04
mar/09	3917	10:00	06	1243	19:45	06
abr/09	2416	16:45	06	1197	04:00	05
mai/09	2318	18:00	02	935	20:15	15

Observam-se na Tabela 16 que os picos de demanda diurnos estão presentes 66% no PLOT11 contra 16% do NOG6. Devido a este perfil, o alimentador PLOT11 apresenta características da presença de cargas de ar condicionado, o que pode ser beneficiado pela geração descentralizada de energia solar fotovoltaica e contribuir para adiar investimentos na rede.

4.7 Cálculo da Geração FV e Área Requerida

Foram calculados os valores da potência fotovoltaica instalada e da geração fotovoltaica utilizando as tecnologias a-Si e p-Si, comercialmente disponíveis. Para isso, foram utilizadas as equações descritas na metodologia, às áreas disponíveis de cobertura, os valores de eficiência dos módulos (EFFNOCT), os dados da memória de massa do aeroporto e o banco de dados do SWERA (2009).

Utilizando os quantitativos de módulos fotovoltaicos da Tabela 7 para cada tecnologia, podemos estimar a potência instalada (P_{cc}) para a tecnologia a-Si (1866 kWp) e p-Si (3922 kWp).

Ou seja,

para a-Si $P_{CC} = 12959 \text{ módulos} \times 144 \text{ W} = 1866 \text{ kWp}$

para p-Si $P_{cc} = 18678 \text{ módulos} \times 210 \text{ W} = 3922 \text{ kWp}$

Aplicando a equação (2) da metodologia, podemos verificar a eficiência de cada tecnologia:

$$E_{FF} = P_{CC}/A_{requerida} = 1866 / 28029 = 0,0666 \text{ ou } 6,67 \% \text{ para o a-Si}$$

$$E_{FF} = P_{CC}/A_{requerida} = 3922 / 28029 = 0,1399 \text{ ou } 14 \% \text{ para o p-Si}$$

A geração solar fotovoltaica (E_{FV}) estimada para cada tecnologia pode ser determinada pela equação (1) da metodologia

$$E_{FV} = A * E_{FF} * G_{POA} * P_R$$

Nesta equação a área adotada foi de 28029 m² para as duas tecnologias, a eficiência na conversão da energia solar em energia elétrica foi de 0,0667 para a-Si e de 0,14 para p-Si, o G_{POA} médio do total diário foi obtido a partir do banco de dados do SWERA para o Aeroporto Internacional de Confins e as perdas do inversor e fiação foi considerado a fração 0,8.

Neste trabalho, o comparativo entre a geração solar fotovoltaica e o consumo privilegiou o horário fora de ponta (HFP), devido o fato de que a energia gerada só ocorre na presença da luz vinda do sol. O resultado destes cálculos é mostrado na Tabela 17.

Tabela 17 : Consumo de energia elétrica do Aeroporto Internacional de Confins e energia solar fotovoltaica estimada para as tecnologias a-Si e p-Si no horário fora de ponta (HFP).

Fonte: Dados da Pesquisa

Mês/Ano	Irradiação Solar Média do total Diário ^(*)	Energia solar FV Estimada a-Si		Energia solar FV Estimada p-Si		Energia Consumida no Aeroporto (HFP)
	kWh/m ² /dia	kWh	%	kWh	%	kWh
jun/08	4,14	185.892	22	390.177	46	840.164
jul/08	4,19	187.821	23	394.227	48	821.560
ago/08	5,03	225.600	25	473.524	52	909.237
set/08	5,61	251.535	28	527.959	59	895.723
out/08	6,08	272.847	27	572.693	56	1.019.307
nov/08	5,70	255.707	26	536.717	54	1.001.744
dez/08	6,13	274.956	26	577.119	55	1.050.277
jan/09	6,21	278.591	26	584.748	55	1.071.852
fev/09	6,22	279.039	30	585.689	63	934.224
mar/09	5,70	255.707	22	536.717	45	1.184.568
abr/09	5,33	239.285	23	502.248	49	1.033.026
mai/09	4,55	204.153	20	428.507	42	1.011.950
Média	5,40	242.595	25	509.194	52	981.136

(*) Dados projeto SWERA para Confins/MG

O mês de fevereiro foi o que apresentou a maior média do total diário de irradiação solar global, ou seja 6,22 kWh/m²/dia. Desta forma, as duas tecnologias FV estudadas foram diretamente beneficiadas, gerando 30% do consumo do aeroporto na tecnologia a-Si e 63 % do consumo do aeroporto na tecnologia p-Si.

Nestas condições, as tecnologias analisadas a-Si e p-Si contribuíram com 25% e 52%, respectivamente, conforme mostra a Tabela 18.

A Figura 29 apresenta o consumo de energia elétrica nos meses analisados e a contribuição da geração fotovoltaica mensal das tecnologias a-Si e p-Si.

Tabela 18 : Análise comparativa das tecnologias FV a-Si e p-Si para atender o consumo médio diário do aeroporto e o percentual de contribuição.

Fonte : Dados da Pesquisa.

Tecnologia FV	Máxima Potência FV instalada	% Contribuição Média Anual
Silício-amorfo (a-Si)	1866 kWp	25%
Silício-policristalino (p-Si)	3922 kWp	52 %

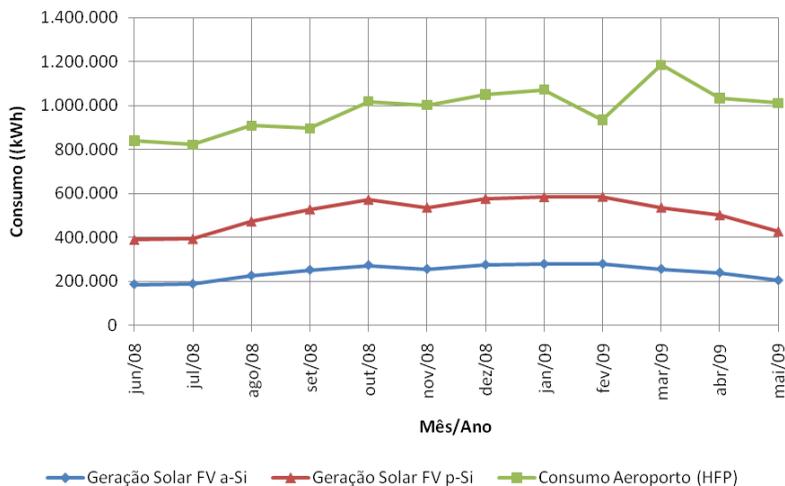


Figura 29 - Energia consumida e energia solar fotovoltaica estimada usando as tecnologias a-Si e p-Si com sistemas FV instalados nas coberturas do aeroporto, cobrindo toda a área disponível.

Fonte: Dados da Pesquisa

A maior geração solar FV ocorreu no mês de fev/2009 para as duas tecnologias analisadas, contribuindo com 30% na tecnologia a-Si e de 63% no p-Si. Em fevereiro, devido o menor número de dias, o consumo de energia elétrica mensal sofreu uma queda, conforme mostra a Figura 31, contudo foi o mês com maior media diária de irradiação solar (6,22 kWh/m²), o que influenciou na maior geração FV do período avaliado.

A Figura 30 apresenta a curva de carga do aeroporto nas 24 horas (linha cor azul), a curva de geração solar fotovoltaica para uma planta de 1866 kWp na tecnologia a-Si (linha cor vermelha) e a nova curva de carga do aeroporto com a utilização da planta solar FV (linha cor verde). Os três dias úteis escolhidos foram 28, 29 e 30 de out/2008 e a irradiação solar utilizada veio dos dados coletados no CPEI do CEFET-MG. O período apresenta pico de demanda diurno, porém no céu havia nuvens, o que prejudicou a análise do FECC.

A Figura 31 mostra as curvas de carga do aeroporto durante 24 horas (linha cor azul), a curva de geração solar fotovoltaica para uma planta de 3922 kWp na tecnologia p-Si (linha cor vermelha) e a nova curva de carga do aeroporto com a utilização da planta solar FV (linha cor verde). Nesta tecnologia a contribuição da planta FV para a redução do pico de demanda foi maior se comparada com a tecnologia a-Si.

Outra análise da grande diferença entre as contribuições de cada planta FV na redução do pico de demanda deve-se a eficiência das tecnologias a-Si e p-Si. A tecnologia p-Si oferece eficiência de 14% contra 6,67% na tecnologia a-Si.

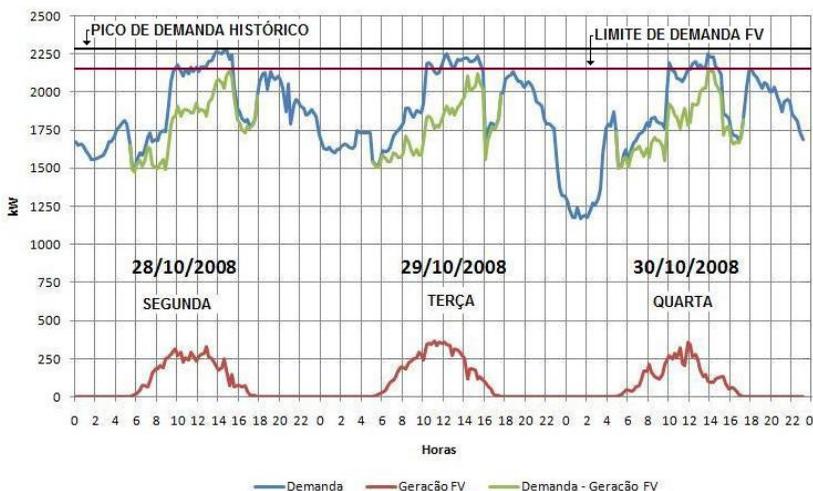


Figura 30 - Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no Aeroporto Internacional de Confins, considerando como potência instalada 1866 kWp usando 12959 módulos FV de a-Si (PVL 144).

Fonte: Dados da Pesquisa.

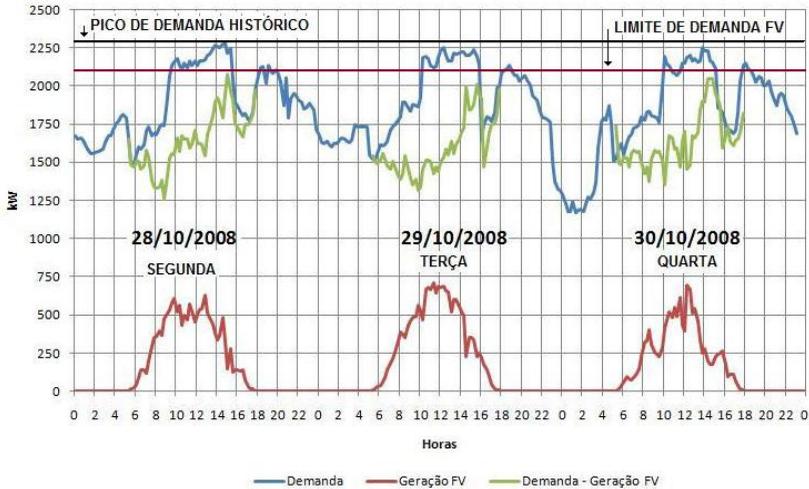


Figura 31 - Curvas de demanda, geração solar e demanda menos geração, no Aeroporto Internacional de Confins, considerando como potência instalada 3922 kWp usando 18678 módulos FV de p-Si (KD210GH).
Fonte: Dados da Pesquisa.

Segundo Braun (2008), a coincidência temporal entre geração e demanda torna a aplicação desse tipo de tecnologia ideal para aeroportos em sistemas conectados a rede elétrica. O correto dimensionamento pode reduzir o consumo nas horas de maior demanda e ainda gerar excedente de produção.

A sazonalidade entre geração e consumo reforça o conceito de energia despachável, e estimula as empresas a investir na co-geração local, neste caso a fotovoltaica, a fim de adiar investimentos da concessionária.

4.8 Influências da temperatura na demanda

A demanda anual horária do complexo aeroportuário está representada nos gráficos da Figura 32. Estes gráficos foram construídos na base horária de 1 hora, sendo observada a demanda média e a temperatura ambiente. Os dados de demanda foram obtidos através da memória de massa do aeroporto e as temperaturas vieram da estação climatológica da Pampulha do Instituto Nacional de Meteorologia, em Belo Horizonte

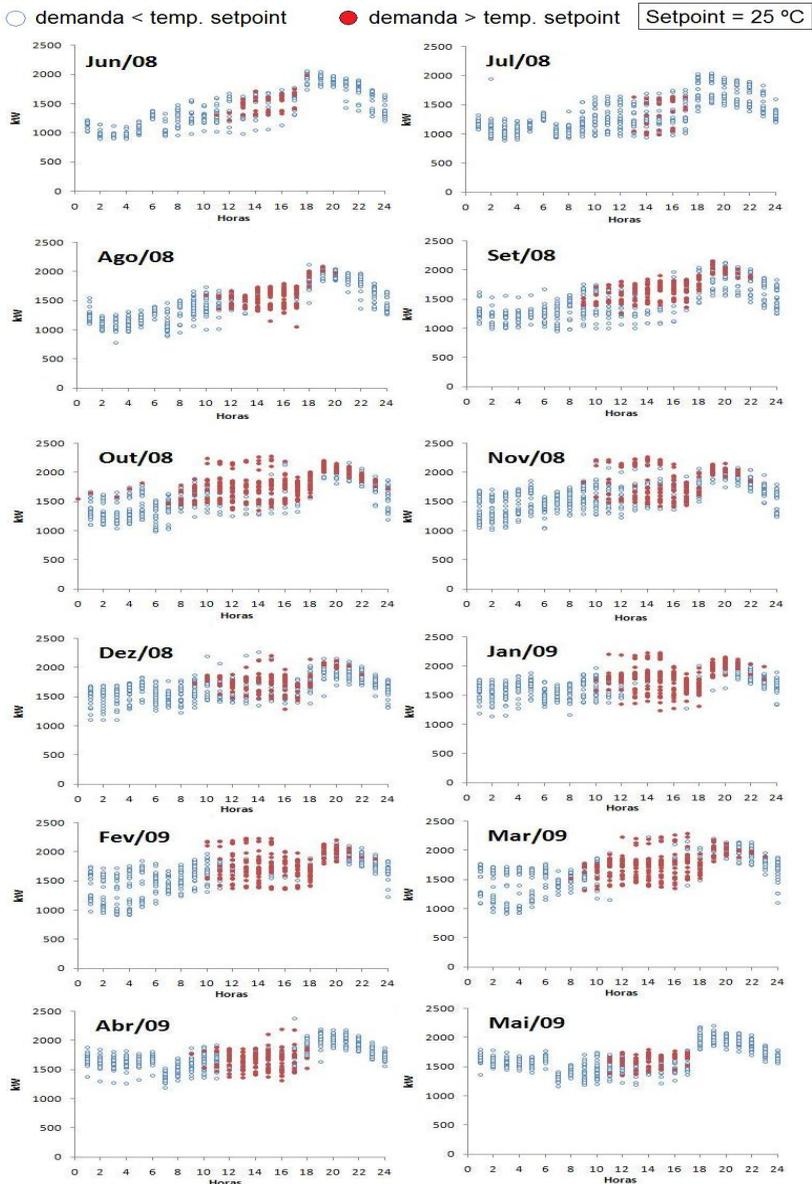


Figura 32 - Influência da temperatura no consumo de energia elétrica no Aeroporto Internacional Tancredo Neves. Demanda média horária com temperatura ambiente maior ou igual a 25°C o círculo é marcado em vermelho e demanda média horária inferior a 25°C o círculo fica vazio.

Observa-se que existe uma forte correlação entre a alta da demanda e o crescimento da temperatura nos meses do verão, onde os dias são mais ensolarados. As altas demandas com temperaturas iguais ou acima de 25°C ocorrem, predominantemente, no período diurno entre 12 e 17 horas, momento em que há maior disponibilidade de radiação solar e, conseqüentemente, maior geração de energia fotovoltaica destinada a atender o sistema de ar-condicionado.

Cada valor da demanda foi representado por um círculo azul vazio para a temperatura inferior a 25°C e, para a demanda com temperatura igual ou superior a 25°C, o círculo foi preenchido na cor vermelha.

Nestes gráficos os meses maio, junho e julho apresentaram baixa relação entre consumo e temperatura. Por se tratar da estação de inverno, a época mais fria do ano, o uso de ar condicionado é reduzido. Associa-se ainda o fato da irradiação solar ser também reduzida neste período, conforme mostrado na Figura 18. A geração solar fotovoltaica foi a menor registrada para as duas tecnologias. O consumo de energia elétrica no aeroporto significou em média 33% do total transportado pelos alimentadores (Tabela 15)

Os meses de maior consumo estão compreendidos no período de outubro a março de 2009, com a presença de altas temperaturas seguidas de picos de demandas diurno. Esta correlação está identificada com o uso do sistema de ar condicionado, com a estação do verão, as férias escolares e com o aumento do número de passageiros.

4.9 Análise Financeira e Viabilidade Econômica

Nos sistemas conectados à rede pode haver vários tipos de medição e tarifação da energia que é gerada pelo sistema fotovoltaico. Assim dependendo do sistema e da tarifa empregada, a contribuição financeira do sistema pode ser ainda maior que a contribuição energética. Para exemplificar os cenários possíveis de tarifação forma considerados dois sistemas já em uso em outros países o net-metering e o feed-in tariff.

O sistema tipo *net-metering* é utilizado nos programas de incentivo do Japão e dos EUA. Neste sistema a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos é consumido primeiramente pelo morador, e se houver excedente é então injetado na rede. Neste modelo há um único medidor que atua nos dois sentidos, de geração e consumo. Assim sempre que há consumo além da geração fotovoltaica ele contabiliza os kWh consumido, e quando há geração excedente ele gira no outro sentido, descontando os kWh gerados. Ao final do mês o morador paga somente pela diferença entre o consumo e sua geração. Neste sistema os kWh gerados

pelo sistema fotovoltaico e consumidos pelas residências têm o mesmo valor e o medidor gira nos dois sentidos, descontando do consumo quando há geração excedente. Neste caso os percentuais de contribuição financeira são o mesmo da contribuição energética.

No sistema tipo *feed-in-tariff*, como utilizado na Alemanha, a energia gerada pelos sistemas fotovoltaicos é tarifada com preço maior que a energia consumida da rede pública. Neste sistema a concessionária compra toda a energia fotovoltaica gerada por um valor superior daquela que é vendida na rede pública. O consumidor continua pagando à concessionária toda a energia que consome, sendo assim continua com o papel de consumidor e adquire também a função de minigerador. Ao final do mês haverá a conta de energia a ser paga normalmente, mas também haverá um crédito com a concessionária, assim o percentual de contribuição financeira do sistema fotovoltaico pode ser maior que a contribuição energética, ocasionado pela diferença de tarifação.

Com os valores de energia gerada pelo sistema fotovoltaico e pela demanda do aeroporto é possível estimar o tempo de retorno do investimento no sistema fotovoltaico. Para isto foi considerado o valor de aquisição dos módulos e inversores e também estimado as despesas com a mão de obra e fiação para as tecnologias fotovoltaicas estudadas. De posse dos valores foi feito um estudo da tarifação para chegar no modelo que recompensaria o investimento.

Neste trabalho foi feita uma estimativa simplificada para ter uma idéia do tempo de retorno, sabendo que para estimar o verdadeiro retorno, demandaria um trabalho criterioso, detalhando todos os custos com impostos e obrigações trabalhistas previstos nas leis brasileiras.

Para a estimativa da aquisição dos módulos fotovoltaicos foram utilizados dois valores: um de US\$7/Wp, preço praticado atualmente no Brasil e outro de US\$5/Wp, preço praticado no mercado internacional, independente da tecnologia utilizada. Esta análise se justifica, pois na medida em que o Brasil adotar esta tecnologia em grande escala, os preços tenderão a se equiparar com os preços internacionais, visto que a tecnologia passa a ser uma *commodity*.

Para aquisição dos inversores CC/CA foi adotado o valor de US\$15.000,00 para cada 10 kWp de potência fotovoltaica instalada, conforme informação verbal da CEMIG. O valor dos serviços de mão de obra e fiação empregadas na instalação dos sistemas totalizou 20% da soma dos gastos com módulos e inversores. Todos os valores praticados nas tabelas seguintes estão em dólares americanos. Iniciaremos o levantamento do investimento a partir do preço do módulo na base de US\$7/Wp, conforme a Tabela 19.

Tabela 19 : Estimativa do investimento para aquisição e instalação do sistema fotovoltaico para as tecnologias a-Si e p-Si.

Tecnologia	Equipamento / Serviço	Especificação	Quant	Valor Unitário US\$	Total US\$
p-Si	Módulo	Kyocera KD 210GH- 2PU	18678	1.470,00 ⁽¹⁾	27.456.660,00
	Inversor	10 kW	415	15.000,00 ⁽²⁾	6.225.000,00
	Material / Serviço Instalação	20% do total (Módulo + Inversor)		6.736.332,00	
	Total			40.417.992,00	
a-Si	Módulo	Uni-Solar PVL-144	12959	1.008,00 ⁽¹⁾	13.062.672,00
	Inversor	10 kW	216	15.000,00 ⁽²⁾	3.240.000,00
	Material / Serviço Instalação	20% do total (Módulo + Inversor)		3.260.534,40	
	Total			19.563.206,40	

⁽¹⁾ O valor do Wp usado foi de US\$7,00

⁽²⁾ O valor do inversor para cada 10 kWp de potência FV foi de US\$15.000,00, conforme informação verbal da CEMIG.

Os gastos com o consumo de energia elétrica no período de junho de 2008 a maio de 2009 no aeroporto estão apresentados na Tabela 20. Devido à estrutura tarifária horo-sazonal azul vigente em 2009 os valores foram convertidos em dólares americanos na taxa de câmbio de US\$1,00 = R\$2,00. Este valor foi arbitrado porque em 2009, ano da pesquisa desta dissertação, o dólar oscilou entre R\$2,33 e R\$1,74.

Tabela 20 : Gasto anual com o consumo da energia elétrica.

Fonte: Memória de Massa do Aeroporto e Faturas de Energia.

Mês/Ano	Ponta		Fora da Ponta		TOTAL MENSAL US\$
	Seco	Úmido	Seco	Úmido	
	0,1336 US\$/kWh	0,12048 US\$/kWh	0,0821 US\$/kWh	0,0745 US\$/kWh	
jun/08	23.961,96		68.943,87		92.905,84
jul/08	23.317,23		67.417,24		90.734,47
ago/08	25.650,02		74.612,02		100.262,05
set/08	24.720,65		73.503,00		98.223,65
out/08	26.816,94		83.644,33		110.461,27
nov/08	25.300,39		82.203,11		107.503,51
dez/08		23.291,30		78.219,41	101.510,71
jan/09		23.690,80		79.826,17	103.516,96
fev/09		21.417,78		69.576,36	90.994,14
mar/09		21.846,23		88.220,67	110.066,90
abr/09		23.530,20		76.934,62	100.464,82
mai/09	26.128,10		83.040,62		109.168,72
TOTAL ANUAL	175.895,30	113.776,31	533.364,20	392.777,23	1.215.813,04

O cenário 1, *net-metering*, apresenta o sistema conectado à rede de modo que o valor da energia é o mesmo para a energia consumida da rede e para a energia gerada pelo arranjo fotovoltaico.

O cenário 2, *feed-in-tariff*, tem necessidade de 2 medidores, isto porque os valores de energia são diferentes, a energia solar fotovoltaica gerada sendo paga com tarifa prêmio em relação à tarifa normal paga pelo consumo. Um dos medidores contabiliza toda energia gerada é exportada à rede, e o outro contabiliza toda a energia consumida a partir da rede. Para este estudo foi utilizado o valor da tarifa prêmio de 1,54 vezes a tarifa comum (RÜTHER, SALAMONI et al., 2008b).

Para estimar o montante gasto com a energia elétrica escolhemos o horário fora de ponta, tanto para o período úmido quanto para o período seco, desta forma estão privilegiando o consumo ocorrido quando há disponibilidade solar. O consumo anual de energia elétrica no HFP foi

de 11.774 MWh, representando um montante de US\$926.141,43 a um custo médio de US\$78,66/MWh consumido.

Considerando o cenário 1, *net-metering*, a Tabela 21 mostra a economia anual para as duas tecnologias.

Tabela 21 : Novos gastos com o consumo de energia elétrica no HFP no cenário *net-metering*.

Tecnologia FV	Geração FV Estimada MWh/ano	Diferença entre Consumo e Geração MWh/ano	Novo Gasto Anual com Energia 78,66 US\$ / MWh	Economia (Anual) US\$
p-Si	6110	5664	445.530,24	480.612,60
a-Si	2911	8863	697.163,58	228.979,26

Considerando o cenário 2, *feed-in-tariff*, a Tabela 22 apresenta o novo gasto com a energia utilizando a tarifa prêmio.

Tabela 22 : Novos gastos com o consumo de energia no HFP no cenário *feed-in-tariff* com tarifa prêmio.

Tecnologia FV	Geração FV Estimada MWh/ano	Tarifa Prêmio (1,54 X 78,66US\$) US\$/Ano	Novo Gasto Anual com Energia 78,66 US\$ / MWh
p-Si	6110	740.143,40	185.998,03
a-Si	2911	352.628,06	573.513,37

Para estimar o tempo de retorno do investimento foi feita uma análise econômica baseada nos estudos de Rüther, 2008b, para o programa de 25 anos. Para a análise foram considerados dois cenários: cenário 1 sem tarifa prêmio, com Taxa Interna de Retorno (TIR) de 7% ao ano e acréscimo da tarifa de 4% ao ano; e cenário 2 com tarifa prêmio de 1,54 vezes a tarifa de referência, TIR = 7% e acréscimo da tarifa de 7%.

A partir destas definições foi obtido o valor futuro da economia proporcionada pela geração do sistema e do saldo devedor conforme a equação 5.

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

sendo

F = Valor futuro

P = Valor presente

i = taxa de crescimento (TIR = 0,07 e inflação tarifária de 0,04 e 0,07)

n = número de anos até o futuro (25)

De acordo com os valores calculados, o cenário 1, *net-metering*, se comportaria conforme a Tabela 23 para o sistema de 3922 kWp com tecnologia p-Si adotando o valor do Wp igual a US\$7 e conforme a Tabela 24 para o sistema de 1866 kWp na tecnologia a-Si.

Tabela 23 : Estudo financeiro para o gerador fotovoltaico baseado no KD210GH, no esquema de *net-metering* – para US\$7/Wp.

Tempo	Número de anos até o final	Economia US\$	Valor fim 25 anos US\$	Saldo Devedor
ano 1	24	480.612,06	2.437.840,73	37.980.151,27
ano 2	23	499.836,54	2.369.490,06	35.610.661,21
ano 3	22	519.830,00	2.303.055,76	33.307.605,46
ano 4	21	540.623,20	2.238.484,10	31.069.121,36
ano 5	20	562.248,13	2.175.722,86	28.893.398,50
ano 6	19	584.738,06	2.114.721,29	26.778.677,21
ano 7	18	608.127,58	2.055.430,04	24.723.247,18
ano 8	17	632.452,68	1.997.801,16	22.725.446,02
ano 9	16	657.750,79	1.941.788,04	20.783.657,98
ano 10	15	684.060,82	1.887.345,38	18.896.312,60
ano 11	14	711.423,26	1.834.429,16	17.061.883,44
ano 12	13	739.880,19	1.782.996,57	15.278.886,87
ano 13	12	769.475,39	1.733.006,01	13.545.880,86
ano 14	11	800.254,41	1.684.417,05	11.861.463,81
ano 15	10	832.264,58	1.637.190,41	10.224.273,40
ano 16	9	865.555,17	1.591.287,87	8.632.985,53
ano 17	8	900.177,37	1.546.672,32	7.086.313,21
ano 18	7	936.184,47	1.503.307,68	5.583.005,53
ano 19	6	973.631,85	1.461.158,87	4.121.846,66

ano 20	5	1.012.577,12	1.420.191,80	2.701.654,86
ano 21	4	1.053.080,21	1.380.373,33	1.321.281,53
ano 22	3	1.095.203,42	1.341.671,28	- 20.389,75
ano 23	2	1.139.011,55	1.304.054,33	-1.324.444,08
ano 24	1	1.184.572,01	1.267.492,06	-2.591.936,13
ano 25	0	1.231.954,90	1.231.954,90	- 3.823.891,03

Tabela 24 : Estudo financeiro para o gerador fotovoltaico baseado no PVL-144, esquema de *net-metering* - para US\$7/Wp.

Tempo	Número de anos até o final	Economia US\$	Valor fim 25 anos US\$	Saldo Devedor
ano 1	24	228.979,26	1.161.466,83	18.401.739,17
ano 2	23	238.138,43	1.128.902,34	17.272.836,83
ano 3	22	247.663,97	1.097.250,87	16.175.585,95
ano 4	21	257.570,53	1.066.486,83	15.109.099,12
ano 5	20	267.873,35	1.036.585,33	14.072.513,79
ano 6	19	278.588,28	1.007.522,19	13.064.991,60
ano 7	18	289.731,81	979.273,90	12.085.717,70
ano 8	17	301.321,09	951.817,63	11.133.900,07
ano 9	16	313.373,93	925.131,15	10.208.768,92
ano 10	15	325.908,89	899.192,89	9.309.576,03
ano 11	14	338.945,24	873.981,88	8.435.594,15
ano 12	13	352.503,05	849.477,71	7.586.116,43
ano 13	12	366.603,17	825.660,58	6.760.455,85
ano 14	11	381.267,30	802.511,22	5.957.944,63
ano 15	10	396.517,99	780.010,91	5.177.933,73
ano 16	9	412.378,71	758.141,44	4.419.792,29
ano 17	8	428.873,86	736.885,14	3.682.907,15
ano 18	7	446.028,81	716.224,81	2.966.682,34
ano 19	6	463.869,97	696.143,74	2.270.538,60
ano 20	5	482.424,77	676.625,69	1.593.912,91
ano 21	4	501.721,76	657.654,88	936.258,04
ano 22	3	521.790,63	639.215,95	297.042,08
ano 23	2	542.662,25	621.294,01	- 324.251,93
ano 24	1	564.368,74	603.874,55	- 928.126,48
ano 25	0	586.943,49	586.943,49	- 1.515.069,97

De acordo com a Tabela 23 o sistema 3922 kWp possibilitaria ao investidor a recuperação do investimento a partir do ano 22 do programa. No entanto no caso do sistema 1866 kWp mostrado na Tabela 24 o retorno começaria a partir do ano 23 do programa. O investimento inicial de US\$40.417.992,00 na tecnologia p-Si é o dobro do investimento na tecnologia a-Si, contudo devido a melhor eficiência dos módulos de silício policristalino o retorno financeiro se dá num prazo menor.

Para o cenário 2, *feed-in-tariff*, foi estimado que para o kWh fotogerado a energia seria paga com uma tarifa prêmio no valor de 1,54 vezes o valor da tarifa normal, conforme a Tabela 22. Deste modo o tempo de retorno do investimento se tornaria mais atrativo, tendo o comportamento de acordo com a Tabela 25, para a tecnologia p-Si, e a Tabela 26, para a tecnologia a-Si.

Tabela 25 : Estudo financeiro para o gerador fotovoltaico baseado no KD210GX, esquema de *feed-in tariff* - para US\$7/Wp.

Tempo	Número de anos até o final	Economia US\$	Valor fim 25 anos US\$	Saldo Devedor
ano 1	24	740.143,40	3.754.278,92	36.663.713,08
ano 2	23	769.749,14	3.649.018,77	33.014.694,31
ano 3	22	800.539,10	3.546.709,83	29.467.984,48
ano 4	21	832.560,67	3.447.269,37	26.020.715,12
ano 5	20	865.863,09	3.350.616,95	22.670.098,16
ano 6	19	900.497,62	3.256.674,42	19.413.423,74
ano 7	18	936.517,52	3.165.365,79	16.248.057,94
ano 8	17	973.978,22	3.076.617,22	13.171.440,72
ano 9	16	1.012.937,35	2.990.356,92	10.181.083,80
ano 10	15	1.053.454,84	2.906.515,14	7.274.568,66
ano 11	14	1.095.593,04	2.825.024,06	4.449.544,60
ano 12	13	1.139.416,76	2.745.817,78	1.703.726,81
ano 13	12	1.184.993,43	2.668.832,24	- 965.105,42
ano 14	11	1.232.393,17	2.594.005,16	- 3.559.110,58
ano 15	10	1.281.688,89	2.521.276,05	- 6.080.386,63
ano 16	9	1.332.956,45	2.450.586,06	- 8.530.972,70
ano 17	8	1.386.274,71	2.381.878,04	- 10.912.850,74
ano 18	7	1.441.725,70	2.315.096,42	- 13.227.947,16
ano 19	6	1.499.394,72	2.250.187,17	- 15.478.134,33

ano 20	5	1.559.370,51	2.187.097,81	- 17.665.232,14
ano 21	4	1.621.745,33	2.125.777,31	- 19.791.009,45
ano 22	3	1.686.615,15	2.066.176,08	- 21.857.185,53
ano 23	2	1.754.079,75	2.008.245,91	- 23.865.431,44
ano 24	1	1.824.242,94	1.951.939,95	- 25.817.371,38
ano 25	0	1.897.212,66	1.897.212,66	- 27.714.584,04

Tabela 26 : Estudo financeiro para o gerador fotovoltaico baseado no PVL-144, esquema de *feed-in tariff* - para US\$7/Wp.

Tempo	ano gasto	Economia US\$	Valor fim 25 anos US\$	Saldo Devedor
ano 1	24	352.628,06	1.788.658,92	17.774.547,08
ano 2	23	366.733,18	1.738.509,60	16.036.037,48
ano 3	22	381.402,51	1.689.766,34	14.346.271,14
ano 4	21	396.658,61	1.642.389,72	12.703.881,42
ano 5	20	412.524,95	1.596.341,41	11.107.540,01
ano 6	19	429.025,95	1.551.584,17	9.555.955,84
ano 7	18	446.186,99	1.508.081,81	8.047.874,03
ano 8	17	464.034,47	1.465.799,14	6.582.074,89
ano 9	16	482.595,85	1.424.701,97	5.157.372,92
ano 10	15	501.899,68	1.384.757,06	3.772.615,86
ano 11	14	521.975,67	1.345.932,09	2.426.683,77
ano 12	13	542.854,70	1.308.195,68	1.118.488,09
ano 13	12	564.568,89	1.271.517,29	- 153.029,21
ano 14	11	587.151,64	1.235.867,28	- 1.388.896,48
ano 15	10	610.637,71	1.201.216,79	- 2.590.113,28
ano 16	9	635.063,21	1.167.537,82	- 3.757.651,09
ano 17	8	660.465,74	1.134.803,11	- 4.892.454,20
ano 18	7	686.884,37	1.102.986,20	- 5.995.440,41
ano 19	6	714.359,75	1.072.061,36	- 7.067.501,76
ano 20	5	742.934,14	1.042.003,56	- 8.109.505,32
ano 21	4	772.651,50	1.012.788,51	- 9.122.293,83
ano 22	3	803.557,56	984.392,57	- 10.106.686,40
ano 23	2	835.699,87	956.792,78	- 11.063.479,18
ano 24	1	869.127,86	929.966,81	- 11.993.445,99
ano 25	0	903.892,97	903.892,97	- 12.897.338,96

No cenário 2 com a inclusão da tarifa prêmio o tempo de retorno ficaria dentro dos 25 anos do programa. Os sistemas fotovoltaicos nas tecnologias p-Si e a-Si teriam o mesmo tempo de retorno estimado em 13 anos. Apesar da diferença no investimento inicial a aplicação da tarifa prêmio contribuiu para redução do tempo de retorno. Os altos custos da tecnologia p-Si foram compensados pela maior eficiência dos módulos nesta tecnologia (14%), melhor relação W/m² o que permitiu acomodar 18678 módulos aproveitando melhor a arquitetura da cobertura do aeroporto.

Consideremos em nossa análise econômica o preço do Wp igual a US\$5, sendo assim os custos para aquisição dos módulos, inversores e mão-de-obra estão representados na Tabela 27

Tabela 27 : Estimativa do investimento para aquisição e instalação do sistema fotovoltaico para as tecnologias a-Si e p-Si.

Tecnologia	Equipamento / Serviço	Especificação	Quant	Valor Unitário US\$	Total US\$
p-Si	Módulo	Kyocera KD 210GH- 2PU	18678	1.050,00 ⁽¹⁾	19.611.900,00
	Inversor	10 kW	415	15.000,00 ⁽²⁾	6.225.000,00
	Material / Serviço Instalação	20% do total (Módulo + Inversor)			5.167.380,00
	Total				31.004.280,00
a-Si	Módulo	Uni-Solar PVL-144	12959	720,00 ⁽¹⁾	9.330.480,00
	Inversor	10 kW	216	15.000,00 ⁽²⁾	3.240.000,00
	Material / Serviço Instalação	20% do total (Módulo + Inversor)			2.514.096,00
	Total				15.084.576,00

⁽¹⁾ O valor do Wp usado foi de US\$5,00

⁽²⁾ O valor do inversor para cada 10 kWp de potência FV foi de US\$15.000,00, conforme informação verbal da CEMIG.

Os gastos com a energia elétrica são os mesmos apresentados na Tabela 21, para o cenário *net-metering*, e Tabela 22, cenário *feed-in-tariff*, e adotaremos a mesma metodologia para as tecnologias a-Si e p-Si.

De acordo com os valores calculados, o cenário 1, *net-metering*, se comportaria conforme a Tabela 28 para o sistema de 3922 kWp com tecnologia p-Si e conforme a Tabela 29 para o sistema de 1866 kWp com a tecnologia a-Si.

Tabela 28 : Estudo financeiro para o gerador fotovoltaico baseado no KD210GH, no esquema de *net-metering* – para US\$5/Wp.

Tempo	ano gasto	Economia US\$	Valor fim 25 anos US\$	Saldo Devedor
ano 1	24	480.612,06	2.437.840,73	28.566.439,27
ano 2	23	499.836,54	2.369.490,06	26.196.949,21
ano 3	22	519.830,00	2.303.055,76	23.893.893,46
ano 4	21	540.623,20	2.238.484,10	21.655.409,36
ano 5	20	562.248,13	2.175.722,86	19.479.686,50
ano 6	19	584.738,06	2.114.721,29	17.364.965,21
ano 7	18	608.127,58	2.055.430,04	15.309.535,18
ano 8	17	632.452,68	1.997.801,16	13.311.734,02
ano 9	16	657.750,79	1.941.788,04	11.369.945,98
ano 10	15	684.060,82	1.887.345,38	9.482.600,60
ano 11	14	711.423,26	1.834.429,16	7.648.171,44
ano 12	13	739.880,19	1.782.996,57	5.865.174,87
ano 13	12	769.475,39	1.733.006,01	4.132.168,86
ano 14	11	800.254,41	1.684.417,05	2.447.751,81
ano 15	10	832.264,58	1.637.190,41	810.561,40
ano 16	9	865.555,17	1.591.287,87	- 780.726,47
ano 17	8	900.177,37	1.546.672,32	- 2.327.398,79
ano 18	7	936.184,47	1.503.307,68	- 3.830.706,47
ano 19	6	973.631,85	1.461.158,87	- 5.291.865,34
ano 20	5	1.012.577,12	1.420.191,80	- 6.712.057,14
ano 21	4	1.053.080,21	1.380.373,33	- 8.092.430,47
ano 22	3	1.095.203,42	1.341.671,28	- 9.434.101,75
ano 23	2	1.139.011,55	1.304.054,33	- 10.738.156,08
ano 24	1	1.184.572,01	1.267.492,06	- 12.005.648,13
ano 25	0	1.231.954,90	1.231.954,90	- 13.237.603,03

Tabela 29 : Estudo financeiro para o gerador fotovoltaico baseado no PVL-144, esquema de *net-metering* - para US\$5/Wp.

Tempo	ano gas- to	Economia US\$	Valor fim 25 anos US\$	Saldo Devedor
ano 1	24	228.979,26	1.161.466,83	13.923.109,17
ano 2	23	238.138,43	1.128.902,34	12.794.206,83
ano 3	22	247.663,97	1.097.250,87	11.696.955,95
ano 4	21	257.570,53	1.066.486,83	10.630.469,12
ano 5	20	267.873,35	1.036.585,33	9.593.883,79
ano 6	19	278.588,28	1.007.522,19	8.586.361,60
ano 7	18	289.731,81	979.273,90	7.607.087,70
ano 8	17	301.321,09	951.817,63	6.655.270,07
ano 9	16	313.373,93	925.131,15	5.730.138,92
ano 10	15	325.908,89	899.192,89	4.830.946,03
ano 11	14	338.945,24	873.981,88	3.956.964,15
ano 12	13	352.503,05	849.477,71	3.107.486,43
ano 13	12	366.603,17	825.660,58	2.281.825,85
ano 14	11	381.267,30	802.511,22	1.479.314,63
ano 15	10	396.517,99	780.010,91	699.303,73
ano 16	9	412.378,71	758.141,44	- 58.837,71
ano 17	8	428.873,86	736.885,14	- 795.722,85
ano 18	7	446.028,81	716.224,81	- 1.511.947,66
ano 19	6	463.869,97	696.143,74	- 2.208.091,40
ano 20	5	482.424,77	676.625,69	- 2.884.717,09
ano 21	4	501.721,76	657.654,88	- 3.542.371,96
ano 22	3	521.790,63	639.215,95	- 4.181.587,92
ano 23	2	542.662,25	621.294,01	- 4.802.881,93
ano 24	1	564.368,74	603.874,55	- 5.406.756,48
ano 25	0	586.943,49	586.943,49	- 5.993.699,97

Os resultados obtidos a partir do novo valor do Wp, contribuíram para que o tempo de retorno do investimento passa-se dos 23 anos calculados para 16 anos nas duas tecnologias, para o cenário *net-metering*.

Com a aplicação da tarifa prêmio, cenário *feed-in-tariff*, os benefícios são mais atrativos, conforme mostrado na Tabela 30 para a tecnologia p-Si e na Tabela 31 para a-Si.

Tabela 30 : Estudo financeiro para o gerador fotovoltaico baseado no KD210GX, esquema de *feed-in tariff* - para US\$5/Wp.

Tempo	ano gasto	Economia US\$	Valor fim 25 anos US\$	Saldo Devedor
ano 1	24	740.143,40	3.754.278,92	27.250.001,08
ano 2	23	769.749,14	3.649.018,77	23.600.982,31
ano 3	22	800.539,10	3.546.709,83	20.054.272,48
ano 4	21	832.560,67	3.447.269,37	16.607.003,12
ano 5	20	865.863,09	3.350.616,95	13.256.386,16
ano 6	19	900.497,62	3.256.674,42	9.999.711,74
ano 7	18	936.517,52	3.165.365,79	6.834.345,94
ano 8	17	973.978,22	3.076.617,22	3.757.728,72
ano 9	16	1.012.937,35	2.990.356,92	767.371,80
ano 10	15	1.053.454,84	2.906.515,14	- 2.139.143,34
ano 11	14	1.095.593,04	2.825.024,06	- 4.964.167,40
ano 12	13	1.139.416,76	2.745.817,78	- 7.709.985,19
ano 13	12	1.184.993,43	2.668.832,24	- 10.378.817,42
ano 14	11	1.232.393,17	2.594.005,16	- 12.972.822,58
ano 15	10	1.281.688,89	2.521.276,05	- 15.494.098,63
ano 16	9	1.332.956,45	2.450.586,06	- 17.944.684,70
ano 17	8	1.386.274,71	2.381.878,04	- 20.326.562,74
ano 18	7	1.441.725,70	2.315.096,42	- 22.641.659,16
ano 19	6	1.499.394,72	2.250.187,17	- 24.891.846,33
ano 20	5	1.559.370,51	2.187.097,81	- 27.078.944,14
ano 21	4	1.621.745,33	2.125.777,31	- 29.204.721,45
ano 22	3	1.686.615,15	2.066.176,08	- 31.270.897,53
ano 23	2	1.754.079,75	2.008.245,91	- 33.279.143,44
ano 24	1	1.824.242,94	1.951.939,95	- 35.231.083,38
ano 25	0	1.897.212,66	1.897.212,66	- 37.128.296,04

Tabela 31 : Estudo financeiro para o gerador fotovoltaico baseado no PVL-144, esquema de *feed-in tariff* - para US\$5/Wp.

Tempo	ano gasto	Economia US\$	Valor fim 25 anos US\$	Saldo Devedor
ano 1	24	352.628,06	1.788.658,92	13.295.917,08
ano 2	23	366.733,18	1.738.509,60	11.557.407,48
ano 3	22	381.402,51	1.689.766,34	9.867.641,14
ano 4	21	396.658,61	1.642.389,72	8.225.251,42
ano 5	20	412.524,95	1.596.341,41	6.628.910,01
ano 6	19	429.025,95	1.551.584,17	5.077.325,84
ano 7	18	446.186,99	1.508.081,81	3.569.244,03
ano 8	17	464.034,47	1.465.799,14	2.103.444,89
ano 9	16	482.595,85	1.424.701,97	678.742,92
ano 10	15	501.899,68	1.384.757,06	- 706.014,14
ano 11	14	521.975,67	1.345.932,09	- 2.051.946,23
ano 12	13	542.854,70	1.308.195,68	- 3.360.141,91
ano 13	12	564.568,89	1.271.517,29	- 4.631.659,21
ano 14	11	587.151,64	1.235.867,28	- 5.867.526,48
ano 15	10	610.637,71	1.201.216,79	- 7.068.743,28
ano 16	9	635.063,21	1.167.537,82	- 8.236.281,09
ano 17	8	660.465,74	1.134.803,11	- 9.371.084,20
ano 18	7	686.884,37	1.102.986,20	- 10.474.070,41
ano 19	6	714.359,75	1.072.061,36	- 11.546.131,76
ano 20	5	742.934,14	1.042.003,56	- 12.588.135,32
ano 21	4	772.651,50	1.012.788,51	- 13.600.923,83
ano 22	3	803.557,56	984.392,57	- 14.585.316,40
ano 23	2	835.699,87	956.792,78	- 15.542.109,18
ano 24	1	869.127,86	929.966,81	- 16.472.075,99
ano 25	0	903.892,97	903.892,97	- 17.375.968,96

No cenário *feed-in-tariff*, o tempo de retorno do investimento ocorrerá num prazo de 10 anos, independente da tecnologia adotada. Segundo os resultados obtidos, o investimento na energia solar fotovoltaica se torna mais atrativa quando ocorre simultaneamente a redução no preço do Wp comercializado e quando existe por parte das concessionárias e do governo adoção de um programa com tarifa prêmio, como ocorre na Alemanha, recompensando o cliente com um valor maior o kWh foto-gerado.

5 CONCLUSÕES

Os edifícios aeroportuários são construções tipicamente horizontais de grande porte, livre de sombra e representam uma aplicação ideal de construção para integração de sistemas fotovoltaicos (BIPV). As altas demandas de energia ocorrem, principalmente, devido ao uso intensivo de ar-condicionado em grandes áreas abertas.

Existe uma correlação muito forte entre a disponibilidade de radiação solar e demanda de eletricidade. Este estudo mostrou que as coberturas de edifícios de grande porte, como os aeroportos, podem abrigar grandes geradores FV, os quais podem representar importantes contribuições para os serviços públicos de distribuição como os de geração distribuída (DG) em áreas urbanas.

Devido a pouca inclinação das coberturas do terminal de passageiros (TPS), administração (ADM) e do estacionamento (EST) é possível acomodar grandes geradores solares fotovoltaicos e toda energia gerada pode ser utilizada no próprio local. Os benefícios diretos imediatos seria a redução dos gastos com a energia elétrica, chegando a 52% do gasto anual no horário fora de ponta, usando a tecnologia p-Si, e indiretamente a Companhia Energética de Minas Gerais, CEMIG, com a liberação da capacidade de carga dos alimentadores que atendem ao complexo aeroportuário.

O Aeroporto Internacional de Confins é privilegiado pela sua arquitetura e está localizado numa região de altos níveis de radiação solar. O posicionamento dos painéis solares não interfere no seu projeto original e não há sombreamentos sobre os arranjos fotovoltaicos, garantindo geração solar durante todo o ano.

A metodologia utilizada para a determinação do número de módulos, na cobertura do aeroporto, tomou como ponto de partida as dimensões de dois módulos a-Si e p-Si, comercialmente disponíveis, e permitiu traçar sobre uma planta digitalizada, uma grade com as medidas em escala, privilegiando a arquitetura, espaços destinados a ventilação e iluminação e com isso obter o maior número de módulos. A quantidade para cada tecnologia foi de 12959 (1866 kWp) para a-Si e de 18678 (3922 kWp) para o p-Si. Conhecendo a eficiência das tecnologias utilizadas, a irradiação solar e área disponível, conseguimos estimar a geração solar fotovoltaica diária, mensal e anual.

Faz parte do objetivo principal desta pesquisa a quantificação do sistema solar fotovoltaico destinado a suprir o consumo do sistema cen-

tral de ar-condicionado que possui uma média histórica de 12% do consumo anual de energia, ou seja, 1685 MWh/ano. Adotando-se a tecnologia de menor eficiência, a-Si, estima-se uma geração FV de 2911 MWh/ano e na tecnologia p-Si a energia será de 6110 MWh/ano. Estes valores variam ao longo do ano, tendo em vista a sazonalidade da irradiação solar.

A contribuição da geração solar fotovoltaica na redução da demanda e energia nos alimentadores que atendem ao complexo aeroportuário (PLOT11 e NOG6) chegam a média anual de 25% a 52%, variando segundo a tecnologia aplicada, sendo que no mês de fevereiro/2009 a média oscilou entre 30 e 63%, devido a média do total diário da irradiação ter atingido 6,22 kWh/m².

Analisando os picos históricos dos alimentadores, conclui-se que o PLOT11 possui característica diurna, enquanto o NOG6 possui predominância noturna.

Também analisamos o comportamento da demanda e da temperatura no período de junho de 2008 a maio de 2009. O estudo demonstrou uma forte correlação entre demanda e temperatura. Nos meses de verão, onde as temperaturas são mais elevadas, os picos de demanda ocorrem no período diurno, coincidindo com a maior utilização do ar condicionado. A coincidência temporal destes fatores reforça o conceito de sincronicidade entre o consumo de energia e disponibilidade de radiação solar.

O investimento inicial para aquisição dos painéis, inversores, fiação e mão-de-obra, tiveram o dólar americano como moeda padrão, assim como os gastos realizados no mesmo período com o pagamento das faturas. Estima-se que aquisição e instalação do sistema FV na tecnologia a-Si seria de US\$19.563.206,40 e na tecnologia p-Si seria US\$40.417.992,00, para um valor atualmente praticado no Brasil de US\$7/Wp.

Considerando que se o Brasil adotar a tecnologia FV em grande escala, os preços tenderão a se equiparar com os preços internacionais, visto que a tecnologia passa a ser uma *commodity*, o novo valor do Wp será de US\$5, portanto o custo para aquisição dos sistemas FV seria de US\$15.084.576,00 para a tecnologia a-Si, e de US\$ 31.004.280,00 para a tecnologia p-Si

O gasto anual com o pagamento das faturas correspondente ao consumo no horário fora de ponta foi de US\$926.141,43, corrigidos segundo as tarifas vigentes em 2009.

Para calcular o tempo de retorno do investimento, adotamos dois cenários atualmente presentes nos EUA e Alemanha. No cenário *net-*

metering, adotado nos EUA, a medição do consumo e da geração solar fotovoltaica é feita através de um único medidor, bidirecional, sendo o custo do kWh igual nas duas situações. Já na Alemanha, o sistema é *feed-in-tariff*, onde a energia foto-gerada recebe uma tarifa prêmio. Neste caso existem dois medidores, sendo um para o consumo e outro para a geração solar. Estes programas tem duração de 25 anos.

Adotando o valor de US\$7/Wp e o cenário *net-metering* o tempo de retorno se daria em 23 anos após a implantação do sistema FV para a tecnologia a-Si e de 22 anos para a tecnologia p-Si.

Quando analisamos o cenário *feed-in-tariff*, com tarifa prêmio, para as duas tecnologias, o tempo de retorno do investimento reduz para 13 anos.

Para o valor de US\$5/Wp, o cenário *net-metering* reduziria o tempo de retorno para 16 anos e no cenário *feed-in-tariff* para 10 anos, independente da tecnologia adotada.

Apesar da tecnologia p-Si exigir o dobro de investimentos do que a tecnologia a-Si o tempo de retorno é praticamente o mesmo nos dois cenários analisados. A explicação desta coincidência se deve ao fato de que o módulo p-Si é mais eficiente do que o módulo a-Si, e desta forma conseguem gerar mais energia e abater no capital investido inicialmente.

Esta análise demonstrou que a utilização da tecnologia a-Si é mais indicada, pois os investimentos iniciais são menores e o tempo de retorno é o mesmo conseguido com a tecnologia p-Si.

Como ficou demonstrada nesta pesquisa, a adoção da tecnologia solar fotovoltaica em aeroportos depende de incentivos do governo, reduzindo os impostos e incentivando a produção dos painéis FV, e por parte das concessionárias de energia elétrica, a criação da tarifa prêmio para o kWh foto-gerado. O Brasil é rico em recursos minerais e dispõe de altos índices de radiação solar em praticamente todas as regiões, o que iria contribuir para a diversificação da nossa matriz energética.

A adoção da energia solar fotovoltaica como geração distribuída no aeroporto traria benefícios estéticos, econômicos e técnicos, valorizando sua imagem ecologicamente correta, reduzindo os custos da fatura mensal de energia e reduzindo os picos de demanda nas subestações do aeroporto e alimentadores da CEMIG.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), Matriz de Energia Elétrica. Disponível em: www.aneel.gov.br/15.htm. Acesso em 25 de Janeiro de 2010.

BADEN, S.; FAIREY, P.; WAIDE, P.; LAUSTSEN, J. Barreiras financeiras Hurdling aos edifícios de baixa energia: experiências dos Estados Unidos da América e da Europa sobre incentivos financeiros e monetizar construção de poupança de energia nas decisões de investimento privado. In: Estudo de Processos de Verão 2006 ACEEE sobre a eficiência energética e edifícios. Conselho Econômico Americano para uma Eficiência Energética, Washington DC, EUA, 2006.

BARROS, E. V. A matriz energética mundial e a competitividade das nações: bases de uma nova geopolítica. *Journal Engevista*. 9: pp.47-56, 2007.

BRAUN, P.; JARDIM, C. S.; RÜTHER, R. Análise da Contribuição Energética de Sistemas Fotovoltaicos Integrados em Edificações: Aeroporto Internacional de Florianópolis, um estudo de caso. In: IX ENCONTRO NACIONAL E V LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Ouro Preto, MG, Anais... Porto Alegre, RS: Anais do ENCAC 2007, 2007. pp. 260-269.

BRAUN, P.; SANTOS, I. P.; ZOMER, C. D.; RÜTHER, R. A Integração dos Sistemas Solares Fotovoltaicos em seis Aeroportos Brasileiros utilizando diferentes tecnologias de células solares. In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR E III CONFERÊNCIA REGIONAL LATINO-AMERICANA DA ISES, 2008, Florianópolis, SC, Anais...

CARDONA, E.; PIACENTINO, A.; CARDONA, F. Poupança de energia nos aeroportos por trigeração. Parte I: Avaliar o potencial econômico e técnico. *Applied Thermal Engineering*, 2006. 26 p. pp.1427–1436.

CASTRO, M.; DELGADO, A.; ARGUL, F.; COLMENAR, A.; YEVES, F.; PEIRE, J. Grid-connected PV buildings: analysis of future scenarios with an example of southern Spain, *Solar Energy* 79 pp. pp.86–95, 2005.

COLLE, S.; PEREIRA, E. B. Atlas de Irradiação Solar do Brasil. Florianópolis: LABSOLAR-INMET, 1996.

DINWOODIE, T.L., SHUGAR, D.S. Optimizing roof-integrated photovoltaics: a case study of the powerguard roofing tile. In: Proceedings of IEEE First World Conference on Photovoltaic Energy Conversion. Wai-koloa, HI, 1994. pp. 1004–1007.

EPIA - European Photovoltaic Industry Association, 2009. Disponível em: <http://www.epia.org> Acessado em março/2010

EIFFERT, P.; KISS, J. G. Building-Integrated Photovoltaic Designs for Commercial and Institutional Structures: A sourcebook for Architects. US Department of Energy's (DOE's). NREL, Fevereiro, 2000.

FRANKL, P.; MASINI, A.; GSMBERALE, M.; TOCCACELI, D. Simplified life-cycle analysis of PV systems in buildings: present situation and future trends, Progress in Photovoltaics. Research and Applications v. 6, n. 2, pp. 137–146, 1998.

GELLER, H.S. Revolução energética: Políticas para um futuro sustentável. Island Press, Boulder, CO, EUA, p. 165. ISBN 1-55963-965-2, 2002.

GREEN M.A. Photovoltaics: technology overview. Energy Police, n.28, p. 989-998, 2000.

GREENPEACE. Relatório do cenário brasileiro sobre 'Revolução energética - perspectivas para uma energia global sustentável'. www.greenpeace.org.br. Acesso em 10/03/2010.

GOOGLE EARTH, Disponível em: <http://earth.google.com/intl/pt-BR/>. Acesso março/2010.

HAAS, R.; ORNETZEDER, M.; HAMETNER, K.; WROBLWSKI, A.; HÜBNER, M. Socio-economic aspects of the Austrian 200 kWp-photovoltaic rooftop programme . Solar Energy v. 66, n. 3, pp. 183–191, 1999.

HAMAKAWA, Y. Solar PV Energy Conversion and the 21st Century's Civilization. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, n. 74, p. 13-23, 2002.

HAMMOND, C. R. The elements. Handbook of chemistry and physics. Ed. D.R. Lide, CRC Press, 1992.

HOFF, SHUGAR, D.S. The value of grid-support photovoltaics in reducing distribution system losses. *IEEE - Transactions on Energy Conversion*, v. 10, n. 9, pp. 569–576, 1995.

HOFFMANN, W. PV solar electricity industry: Market growth and perspective. *Solar Energy Materials & Solar Cells* v. 90, p. 3285–3311, 2006.

IEA - Key World Energy Statistics. Disponível em: http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2009/key_stats_2009.pdf, Acesso em março/2010.

INMET. INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/sonabra/dspDadosCodigo.php?QTUyMQ>, acesso em 07/03/2010, 2010

JARDIM, C. S., A inserção da geração solar fotovoltaica em alimentadores urbanos enfocando a redução do pico de demanda diurno. Tese aprovada na UFSC, 2007.

JARDIM, C. S.; RÜTHER, R.; SALAMONI, I.; VIANA, T.; REBECHI, S.; KNOB, P. The strategic siting and the roofing area requirements of building-integrated photovoltaic solar energy generators in urban areas in Brazil. *Energy and Buildings*, v. 40, issue 3, pp 365-370, 2008.

INFRAERO. EMPRESA BRASILEIRA DE INFRA-ESTRUTURA AEROPORTUÁRIA. Disponível em <<http://www.infraero.gov.br/>> . Acesso em Fevereiro 2009.

IZQUIERDO, S.; RODRIGUES, M.; FUEYO, N. A method for estimating the geographical distribution of the available roof surface area for large-scale photovoltaic energy-potential evaluations. *Solar Energy*. n. 82, 929–939, 2008.

KESHNER, M. S., ARYA, R. 2003. Study of potential cost reductions resulting from super large scale manufacturing of PV modules. Disponível em: < <http://www.nreal.gov>> Acessado em abril/2010.

KNOB, P., RÜTHER, R., JARDIM, C., BEYER, H. Investigating the peak demand reduction capability of PV: a case study in Florianópolis, South Brazil. 19th European Photovoltaic. Solar Energy Conference and Exhibition, p. 7-11 June, Paris, 2004.

LAMBERTS, R., WESTPAL, F. Energy Efficiency in Buildings in Brazil. Disponível em http://www.labeee.ufsc.br/arquivos/publicacoes/CIB2000_lamberts.pdf, 2000

LUQUE, A. Photovoltaic market and costs forecast based on a demand elasticity model, Progress in Photovoltaics: Research and Applications, v. 9, n. 4, pp. 303–312, 2001.

MAYCOCK, P.D. PV News annual survey of PV module production, PV News, v. 22, 2003.

MELO FILHO, J. B., FRAIDENRAICH, N., VILELA, O. C. Visão do Mercado de Fotovoltaico para o ano de 2015. In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR E III CONFERÊNCIA REGIONAL LATINO-AMERICANA DA ISES, 2008, Florianópolis, SC, Anais...

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço Energético Nacional (BEN), 2008. pp 248.

MME - MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA Matriz Energética Nacional 2030/Ministério de Minas Energia. Colaboração: Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME, EPE, 2007.

MME - Ministério das Minas de Energia. Plano Nacional de Energia Elétrica 2030, 2007. – Acesso em abril/2010
Disponível em: http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_1.pdf

NBR 6401/1980 – ABNT - Instalações centrais de ar-condicionado para conforto.

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.

ORDENES, M.; MARINOSKI, L.; BRAUN, P.; RÜTHER, R. The impact of building-integrated photovoltaics on the energy demand of multi-family dwellings in Brazil. *Energy and Buildings*, v. 39, 629-642, 2007.

PEN 2010. PROJEÇÃO DA DEMANDA DE ENERGIA ELÉTRICA DO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL PARA O PLANO ANUAL DA OPERAÇÃO ENERGÉTICA DE 2010. Nota Técnica ONS 010/2010. Disponível em <http://www.ons.org.br>, 2010. Acesso em: 05/04/10

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; ABREU, S. L. D.; RÜTHER, R. Atlas brasileiro de energia solar: INPE. São José dos Campos, 2006.

PEREZ, R.; SEALS, R.; AL., E. Geographical Distribution of PV Effective capacity in the United States. Proc. ASES-95 Annual Meeting. Minneapolis, MN: 6 p.p., 1995

PEREZ, R. Meeting Peak Demand with Photovoltaics. University of New York at Albany, 2001.

PÉREZ-LOMBARD, L.; ORTIZ, J., POUT; C. Revisão sobre informações de consumo de energia de edifícios. *Energy and Buildings*, n. 40, 394-398, 2008.

POPONI, D. Analysis of diffusion paths for photovoltaic technology base don experiences curves. *Solar Energy*, v. 74, p. 331-340, 2003.

PROMETHEUS INSTITUTE. Disponível em <<http://www.prometheus.org/>> , acesso em março, 2009

ROBINSON, D. Morfologia urbana e indicadores de disponibilidade de radiação. *Solar Energy*, n. 80, 1643-1648., 2006.

RODRIGUES, C. Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede, 2002. Universidade Estadual de Campinas, Campinas. Dissertação (Mestrado), 2002.

RÜTHER, R. Panorama atual da utilização da energia solar fotovoltaica e trabalho do Labsolar nesta área. Laboratório de energia solar. Departamento de engenharia mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.

RÜTHER, R.; DACOREGIO, M. Performance assessment of a 2 kWp grid-connected, building-integrated, amorphous silicon photovoltaic installation in Brazil. 8, 257-266, PROGRESS IN PHOTOVOLTAICS RESEARCH AND APPLICATIONS, 2000.

RÜTHER, R, KNOB, P, BEYER, H.G., DACOREGIO, M., MONTENEGRO, A. High performance ratios of a double-junction a-Si BIPV grid-connected installation after five years of continuous operation in Brazil, in: 3RD WORLD CONFERENCE ON PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERSION, Osaka, Japan, 2003.

RÜTHER, R.; BRAUN, P. Solar Airports: A future multi-billion euro PV Market? Refocus, v. 6, issue 4, pp 30-34 July-August 2005.

RÜTHER, R. Edifícios solares fotovoltaicos: O potencial da geração solar fotovoltaica integrada a edificações urbanas e interligada à rede elétrica pública no Brasil. Florianópolis: Editora UFSC/LABSOLAR, 2004.

RÜTHER, R.; BRAUN, P. Potencial da contribuição da energia fotovoltaica integrada à edificação de aeroportos em climas quentes. Solar Energy, 83, pp. 1923-1931, 2009.

SALAMONI, I. Metodologia para cálculo de geração fotovoltaica em áreas urbanas aplicadas a Florianópolis e Belo Horizonte Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFSC, 2004.

SALAMONI, I. Um programa residencial de telhados solares para o Brasil: diretrizes de políticas públicas para a inserção da geração fotovoltaica conectada à rede elétrica Tese (Doutorado em Engenharia Civil) –UFSC, 2009.

SCHOEN, J.N. Building-integrated PV installations in the Netherlands: examples and operational experiences, Solar Energy, 70, n. 6, pp. 467-477, 2001.

SHAH, A.; MEIER, J.; TSCHARNER, R.; WYRSCH, N. Photovoltaic Power Generation. Plasma Physics & Controlled Fusion, v. 37, 1992.

SORENSEN, B. GIS management of solar resource data. Solar Energy Materials and Solar Cells, v. 67, n.1-4, pp. 503-509, 2001.

UFRGS. Radasol. Porto Alegre, 2002. Disponível em < <http://www.solar.ufrgs.br/> >. Acesso em abril de 2008.

WWF-Brasil. Disponível em < <http://www.wwf.org.br/>>. Acesso em dezembro de 2009.

ZAHEDI, A., Solar photovoltaic (PV) energy; latest developments in the building integrated and hybrid PV systems. Energy and Buildings, v. 31, pp. 711-718, 2006.