

LUCIANO GIANNECCHINI NIGRO

SISTEMA SOLAR PARA ABASTECIMENTO ENERGÉTICO DA APAE CABREÚVA

São Paulo

2012

LUCIANO GIANNECCHINI NIGRO

SISTEMA SOLAR PARA ABASTECIMENTO ENERGÉTICO DA APAE CABREÚVA

Monografia apresentada ao
Programa de Educação Continuada
da Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Especialista em
Energias Renováveis, Geração
Distribuída e Eficiência Energética

São Paulo

2012

LUCIANO GIANNECCHINI NIGRO

SISTEMA SOLAR PARA ABASTECIMENTO ENERGÉTICO DA APAE CABREÚVA

Monografia apresentada ao
Programa de Educação Continuada da
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para a obtenção do título de
Especialista em Energias Renováveis,
Geração Distribuída e Eficiência
Energética

Área de concentração:
Engenharia Mecânica

Orientador: Prof. Dr. Racine Tadeu
Araujo Prado

São Paulo
2012

FICHA CATALOGRÁFICA

Nigro, Luciano Giannecchini
Sistema solar para abastecimento energético da APAE
Cabreúva / L.G. Nigro. -- São Paulo, 2012.
116 p.

**Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.**

1. Energia solar 2. Aquecimento de água 3. Energia fotovoltaica I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II. t.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a aqueles que fazem de seus esforços um meio de alcançar um mundo melhor para todos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero agradecer à minha família, que participou da elaboração e conclusão deste trabalho, seja de forma direta ou indireta. Sou sempre grato aos meus pais, Luiz e Eliana, pela educação e apoio de todas as formas que sempre me deram. Também agradeço aos meus avós, irmão, primos e tios e tias que com sua convivência fazem as coisas acontecerem na minha vida.

Agradeço muito à minha companheira, Rejane, pelo seu apoio, amor, paciência, incentivo e também pela motivação nos momentos de dúvida.

Quero agradecer à Associação de Pais e Amigos dos Excepcionais de Cabreúva, representados por Patrícia e lara, por me acompanharem nas visitas e permitirem a realização desta monografia. Também a Maria Helena Scavone por sua colaboração,

Agradeço também ao orientador deste trabalho e aos colegas do SISEA pelas discussões e ideias que contribuíram para o melhoramento do produto final.

Aos amigos e professores do curso que me proporcionaram maior conhecimento geral e certamente favoreceram o tema.

Aos amigos que entenderam a minha ausência enquanto fazia este trabalho, que sabem que a amizade vai além da presença em todos os momentos.

Por fim, agradeço ao Sol, porque sem ele nada disso seria possível.

“Cada sonho que você deixa para trás
é um pedaço do seu futuro que deixa
de existir.”

(Steve Jobs)

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo propor alternativas de geração local de energia renovável. O caso estudado foi uma organização assistencial sem fins lucrativos cuja demanda energética, tanto elétrica, como térmica, poderia ser abastecida por energia solar. Todas as alternativas contam com apoio de outro tipo de energia, para os dias em que a insolação não seja suficiente. Os casos foram separados em três possibilidades. A primeira foi geração de energia elétrica através de painéis fotovoltaicos. As outras duas formas compreendem aproveitamento térmico da radiação solar para aquecimento de banhos e piscina. Uma visita ao local revelou que há área disponível para tais fins. A metodologia seguida inclui cálculo das cargas elétricas e térmicas que devem ser abastecidas, levantamento de informações relativas à radiação solar, cálculo da radiação solar disponível nos planos dos coletores, rendimento dos equipamentos e cálculo da energia útil. O caso fotovoltaico resultou em uma instalação de cinco módulos, cuja energia total fornecida equipara-se ao consumo atual. Sugeriu-se que o sistema seja conectado à rede elétrica, que funcionaria como um banco de baterias para suprir energia nos momentos de geração local insuficiente e absorveria os momentos com excesso de geração. O aquecimento de água para banhos seguiu o método f-chart e o resultado sugere um sistema que proporciona fração solar anual de 80%, com frações solares mensais variando na faixa de 64% a 89%. O sistema de aquecimento de água da piscina seguiu o método da utilizabilidade, e a fração solar anual obtida foi de 77%, com frações solares mensais que variam de 34% a 134%. Todos os cálculos foram feitos em base mensal, dado que a intenção principal do estudo é dimensionar os sistemas de forma conceitual, em procedimentos que não requeiram muitos custos de engenharia, diferentemente de um projeto executivo. Portanto, os resultados obtidos visam auxiliar processo de tomada de decisão, baseados em viabilidade técnica.

Palavras-chave: Energia solar; aquecimento de água; energia fotovoltaica.

ABSTRACT

This work aimed to propose alternatives of local renewable energy generation. The object of study was a social and medical welfare organization, with non-profit purpose. It was then proposed to supply its demand of energy, both electric and thermal, by solar energy. All the previous alternatives rely on the support of others energy sources, for days with absence of sun. The study was separated in three possibilities. The first one was generation of electricity through photovoltaic panels. The other two consisted in use the thermal energy of the sun to heat water for showers and swimming pool. A visit to the site revealed available areas for the project. The methodology included electric and thermal loads calculations, literature reviews of solar radiation information, solar radiation on the plane of the collectors calculation, performance of the equipment and useful energy determination. The photovoltaic case suggested the installation of five modules which total generation is approximated the same as the current electric consumption. It is important to mention that this system must be connected to the utility grid, which would act as a large battery, that supplies energy in the moments without sun. It would also absorb energy surplus. The water heating for showers followed the f-chart method, and the results suggested a system capable to reach annual solar fraction of 80%, with monthly solar fractions in the range of 64% and 89%. The swimming pool water heating system followed the utilization method, and the annual solar fraction was 77%, with monthly solar fractions between 34% and 134%. All methods calculations considered a month period since the purpose of this study is design those systems in a conceptual way, avoiding excessive engineering costs. Therefore, the previous results assist the decision makers based on the technical viability.

Keywords: Solar energy; water heating; photovoltaic energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Segmentação da produção renovável de eletricidade, com (em cima) e sem (embaixo) hidroeletricidade.	22
Figura 2 - Segmentação do consumo de energia e bioenergia para produção de calor.	23
Figura 3 - Espectro de radiação.	26
Figura 4 - Espectro de radiação solar. Comparação com espectro de um corpo negro à temperatura de 5777K.	26
Figura 5 - Ângulos da geometria solar: latitude, declinação e ângulo solar.	27
Figura 6 - (a) Ângulos da geometria solar e superfície de incidência. (b) Vista planisférica mostrando o ângulo de azimute solar.	28
Figura 7 - Radiação solar global horizontal média anual.	29
Figura 8 - Radiação solar global horizontal média sazonal.	30
Figura 9 - Seção da Terra mostrando β , θ e Φ e $\Phi-\beta$ para superfícies voltadas para o sul.	31
Figura 10 - Radiação solar global em plano inclinado com a latitude do local de cada ponto, média sazonal.	31
Figura 11 - Percentual de chuveiros elétricos por residência por região no Brasil.	32
Figura 12 - Estrutura de consumo elétrico de uma residência típica.	33
Figura 13 - Curva diária da carga elétrica de uma residência típica.	34
Figura 14 - Princípio de funcionamento de aquecedor solar residencial de água.	36
Figura 15 - Corte lateral de um coletor de placa plana mostrando as perdas e os ganhos de calor.	37
Figura 16 - Volume de vendas por região em 2010.	38
Figura 17 - Evolução do mercado de aquecimento solar brasileiro, 2001 a 2010.	39
Figura 18 - Capacidade total instalada mundialmente, considerando os dez maiores países, ao final de 2010.	39
Figura 19 - Capacidade instalada mundial de aquecedores solares, 2000 a 2009.	40
Figura 20 - Visão estimada da energia gerada por sistemas solares de aquecimento.	40
Figura 21 - (a) Junção pn ilustrando acúmulo de carga na fronteira. (b) Campo elétrico resultante do acúmulo de carga na fronteira.	42

Figura 22 - Espectro da luz solar e seu efeito em células fotovoltaicas de silício amorfo.	43
Figura 23 - Esquema de ligação de sistema isolado.	44
Figura 24 - Esquema de ligação de sistema híbrido.	44
Figura 25 - Esquema de ligação de sistema conectado à rede.	44
Figura 26 - Capacidade fotovoltaica instalada mundial, 2005 a 2010.	45
Figura 27 - Redução dos custos da tecnologia fotovoltaica, 1976 a 2010.	46
Figura 28 - Posições solares angulares para latitude de + ou - 25º, 20º e 15º.	49
Figura 29 - Consumo de pontos de utilização de água quente.	50
Figura 30 - Dados climáticos do município de Itu.	51
Figura 31 - Perdas e ganhos de energia de uma piscina.	52
Figura 32 - Procedimento de cálculos do projeto conceitual do sistema fotovoltaico.	63
Figura 33 - Esquema de sistema padrão a líquido, com armazenamento.	67
Figura 34 - Esquema de sistema padrão a ar.	68
Figura 35 - Esquema de sistema padrão de apenas aquecimento de água.	68
Figura 36 - Gráfico de f para sistemas de fluidos líquidos e meios de armazenamento.	70
Figura 37 - Perfil normalizado de consumo horário de água quente.	71
Figura 38 - Procedimento de cálculo de aquecimento solar de água quente.	75
Figura 39 - Procedimento de cálculo de aquecimento solar de piscina.	76
Figura 40 - Localização da cidade de Cabreúva.	79
Figura 41 - Localização da APAE na cidade de Cabreúva.	79
Figura 42 - Áreas utilizadas pela APAE CABREÚVA.	81
Figura 43 - Sede da APAE CABREÚVA.	82
Figura 44 - Área disponível para construção de quadra, piscina e vestiários.	82
Figura 45 - Esquema mostrando a disposição das construções do projeto.	83
Figura 46 - Esquema das dimensões do telhado.	84
Figura 47 - Gráfico de insolação e sombreamento.	85
Figura 48 - Consumo elétrico na sede nova.	86
Figura 49 - Consumo elétrico nas demais áreas.	86
Figura 50 - Cobertura da sede.	87
Figura 51 - Perfis de consumo e geração com quatro módulos.	104
Figura 52 - Perfis de consumo e geração com cinco módulos.	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Economia e consumo final energético – 2011-2020.....	19
Tabela 2 - Potência unitária dos equipamentos da sede nova e potência total.....	87
Tabela 3 - Dados de entrada para banhos.....	88
Tabela 4 - Consumo energético média mensal em banhos.	88
Tabela 5 - Perdas de calor por evaporação.	90
Tabela 6 - Perdas de massa por evaporação.....	91
Tabela 7 - Perdas de calor por convecção.....	92
Tabela 8 - Perdas por radiação.	92
Tabela 9 - Perdas por reposição de água.	93
Tabela 10 - Perdas por condução.	94
Tabela 11 - Taxas de perdas e energia requerida mensal.	95
Tabela 12 - Valores iniciais de geometria solar.....	96
Tabela 13 - Valores mensais de energia solar disponível.	98
Tabela 14 - Frações horárias da radiação total.	99
Tabela 15 - Frações horárias da radiação difusa.	99
Tabela 16 - Valores de R _b para cada mês e faixa de horas.	100
Tabela 17 - Radiação diária e horária média mensal no plano inclinado.	101
Tabela 18 - Radiação no plano inclinado dos módulos fotovoltaicos.	102
Tabela 19 - Dados de fabricantes.	102
Tabela 20 - Resultados do dimensionamento do sistema fotovoltaico.	103
Tabela 21 - Dados dos coletores e sistema proposto.	106
Tabela 22 - Resultados do método f-chart.	107
Tabela 23 - Dados de entrada do dimensionamento.....	108
Tabela 24 - Utilizabilidade e resultados intermediários.	110
Tabela 25 - Energia solar útil para piscina.	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APAE - Associação de Pais e Amigos dos Excepcionais
IEA - Agência Internacional de Energia
OECD - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
BRICS - Bloco Econômico Brasil, Rússia, China, Índia e África do Sul
DASOL - Departamento Nacional de Aquecimento Solar
CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito
NOCT - Temperatura nominal de operação da célula
INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
FENAPAES - Federação Nacional das APAEs

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS	15
1.2 JUSTIFICATIVAS	16
2 REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 CONSUMO DE ENERGIA	17
2.1.1 Acesso à <i>energia moderna</i>	19
2.1.2 <i>Energias renováveis</i>	21
2.2 ENERGIA SOLAR	23
2.2.1 <i>O Sol</i>	23
2.2.2 <i>Energia solar térmica para aquecimento de água</i>	32
2.2.3 <i>Energia solar fotovoltaica</i>	41
3 MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL.....	47
3.2 LEVANTAMENTO DE CONSUMO ENERGÉTICO.....	49
3.2.1 <i>Aquecimento de água para banhos</i>	49
3.2.2 <i>Aquecimento de água para piscina</i>	51
3.2.3 <i>Energia elétrica</i>	56
3.3 DISPONIBILIDADE SOLAR.....	56
3.3.1 <i>Geometria solar</i>	57
3.3.2 <i>Radiação média mensal em plano inclinado</i>	58
3.3.3 <i>Radiação horária em plano inclinado</i>	60
3.3.4 <i>Temperatura de água fria</i>	61
3.3.5 <i>Dados reais de radiação no plano horizontal e inclinado</i>	62
3.4 DIMENSIONAMENTO SISTEMA FOTOVOLTAICO.....	63
3.5 DIMENSIONAMENTO SISTEMA TÉRMICO	65
3.5.1 <i>Método f-chart</i>	66
3.5.2 <i>Método da utilizabilidade</i>	72
3.5.3 <i>Dimensionamento do sistema solar de aquecimento de água para vestiários</i>	75
3.5.4 <i>Dimensionamento do sistema solar de aquecimento de água para piscina</i>	76
4 RESULTADOS.....	78

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL	78
4.2 LEVANTAMENTO DE CONSUMO ENERGÉTICO	88
4.2.1 Aquecimento de água para banho	88
4.2.2 Aquecimento de água para piscina	89
4.3 DISPONIBILIDADE SOLAR	95
4.3.1 Geometria solar	95
4.3.2 Radiação média mensal em plano inclinado	96
4.3.3 Radiação horária em plano inclinado	98
4.4 DIMENSIONAMENTO SISTEMA FOTOVOLTAICO	101
4.5 DIMENSIONAMENTO SISTEMA TÉRMICO	105
4.5.1 Dimensionamento do sistema solar de aquecimento de água para vestiários	105
4.5.2 Dimensionamento do sistema solar de aquecimento de água para piscina ...	107
5 CONCLUSÃO	112
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
ANEXO A – DADOS DA APAE	116

1 INTRODUÇÃO

O debate relacionado a energias renováveis vêm ganhando espaço nos mais diversos meios. Apesar de não ser um tema novo, novas preocupações favorecem a aceitação desse modelo de geração. As motivações que o impulsionam incluem eficiência energética, segurança energética, diversificação das matrizes, custos, criação de empregos, problemas ambientais decorrentes das tecnologias dominantes, e outros mais.

Entre as tecnologias destaca-se a energia solar. O Sol sempre foi o principal fornecedor de energia da Terra, e ainda o é. Porém a maior parte de sua energia não é aproveitada, ou é utilizada de formas indiretas. Apesar disso, grande entusiasmo da opinião pública espera que essa tecnologia tenha mais penetração no futuro.

Algumas aplicações têm vantagens que as fazem ser viáveis se comparadas com outras formas de geração. As mais famosas são coletores planos para aproveitamento da radiação na forma de calor ou conversão em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico. As indústrias desse setor têm apresentado crescimento expressivo nos últimos anos, corroborando a hipótese de futuro promissor dessas tecnologias.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é aplicar os conhecimentos adquiridos durante o curso em uma situação prática. A formação do especialista em “energias renováveis, eficiência energética e geração distribuída” deve satisfazer às necessidades de carreira, mercado e educação geral, de forma a poder contribuir para melhoramento da sociedade como um todo.

Levando em considerações as aplicações da energia solar, pretende-se fazer um estudo de viabilidade técnica de sistemas solares para abastecimento energético da Associação de Pais e Amigos dos Expcionais (APAE) da cidade de Cabreúva.

Esses sistemas devem abastecer parte das necessidades da sede, onde ocorrem as atividades da organização, e deve atender tanto aos alunos como aos funcionários.

1.2 JUSTIFICATIVAS

Dentre o vasto leque de possibilidades que o curso proporcionou, a escolha feita para esta monografia foi geração local de energia através de aproveitamento da fonte solar. Essa fonte tem benefícios, tais quais: baixa poluição, geração local ou próxima à demanda, economia na operação e manutenção e, principalmente, vasta disponibilidade e nenhum custo de combustível. Levando em conta a posição privilegiada do Brasil em relação à insolação, trata-se de uma fonte de futuro promissor, caso haja incentivos apropriados.

A motivação para a escolha do tema vem, por um lado, da possibilidade de retornar as competências adquiridas durante o curso à comunidade. De forma a alcançar satisfação pessoal no cumprimento das tarefas profissionais.

Organizações não governamentais, como é o caso da APAE Cabreúva, cooperativas de trabalho, instalações públicas e outras organizações podem fazer uso dos resultados e métodos referenciados neste trabalho. Como essas organizações não têm como sua finalidade projetar e instalar sistemas solares energéticos, conhecimento adquirido com o texto e parcerias podem conseguir patrocínios e investimentos sociais para suas causas. As economias de despesas energéticas podem ser convertidas em mais benefícios em suas atividades fim.

Por outro lado, a experiência de um caso real traz complemento às bases teóricas recebidas em aula. O dimensionamento desse projeto, mesmo que conceitual, permite tratar com problemas reais, pessoas reais e dados reais. E certamente contribui para enriquecimento profissional.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Nas sociedades modernas a energia é essencial e seu acesso é facilitado para os locais mais desenvolvidos. Não é necessário conhecer a ciência ou técnicas detalhadas para usá-la nas suas mais diversas formas. Basta acionar um interruptor de luz, acender um fogão a gás, apertar um botão no controle remoto ou até mesmo pedalar uma bicicleta. A energia é parte da relação dos seres humanos com o ambiente.

Mas uma definição universal de energia é algo difícil de obter. Goldemberg (2010) cita algumas, como a geral “capacidade de realizar trabalho mecânico, deslocando, por exemplo, um objeto de uma posição para outra por meio de aplicação de uma força”. Ele também define como “capacidade de produzir transformações em um sistema”. Isso envolve tanto as transformações mecânicas como físicas, químicas e biológicas. Ou seja, tudo que ocorre ao nosso redor envolve o conceito de energia.

No decorrer do desenvolvimento humano as descobertas de novas formas de energia propiciaram melhoria nas atividades diárias. Desde o fogo para preparar alimentos e armas do homem primitivo até as centrais nucleares de hoje, o uso controlado de energia traz inúmeras vantagens. No entanto implica em crescente consumo do montante de energia, à medida que a complexidade e necessidades das máquinas aumentam.

2.1 CONSUMO DE ENERGIA

O consumo de energia do homem primitivo era por volta de 2000 kcal por dia, ou seja, o equivalente às suas atividades corpóreas. Já o homem que dispõe das tecnologias mais atuais gasta, em média, 250000 kcal por dia. Isso é um aumento de mais de cem vezes (GOLDEMBERG, 2010).

Sobre o consumo de energia atual, a Agência Internacional de Energia (IEA, 2011a) reportou que, apesar da recuperação da economia desde 2009 ter sido irregular, e as prospecções futuras permanecerem incertas, a demanda de energia

primária recuperou-se a uma taxa de 5% em 2010. Subsídios ao consumo de combustíveis fósseis, sem preocupações com desperdício, passaram de US\$ 400 bilhões. Apesar de a prioridade de muitos países ser aumentar a eficiência energética, a intensidade energética global piorou pelo segundo ano consecutivo. Esses cenários contribuem para que as tendências do setor energético global distanciem-se dos planos de sustentabilidade propostos nas discussões internacionais.

Ainda no mesmo relatório da IEA, em seus cenários que consideram crescimento populacional de 1,7 bilhão de pessoas até 2035 e taxa média de crescimento da economia de 3,5%, a projeção do aumento da demanda de energia é de um terço a mais em relação à demanda atual. A cifra de investimentos desse período do suprimento de energia é da ordem de US\$ 38 trilhões.

A preocupação ambiental deve ser tema importante de debates nos rumos dos investimentos energéticos. Para manter as emissões de gases de efeito estufa em níveis que provoquem o aumento da temperatura média em 2°C, investimentos adequados em produção e consumo limpos devem ser feitos imediatamente. Para cada US\$ 1 evitado nesse tipo de investimento antes de 2020, um custo adicional de US\$4,3 será necessário para compensar o aumento de emissão. Conjuntamente com essa previsão, o custo de entrega de óleo aos mercados aumenta já que as companhias são forçadas a explorar áreas mais difíceis e distantes. Esses cenários são promissores para outras formas de geração, como gás natural e energias renováveis, que devem ter crescimento importante no futuro (IEA, 2011a).

Já as previsões brasileiras também projetam aumento de demanda. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2011), o cenário brasileiro segue os dados da Tabela 1. Com as projeções de PIB e população crescentes no período 2010-2020, 5% e 0,7% respectivamente, é compreensível que a demanda por energia também cresça, sendo sua taxa 5,3%. Porém destaca-se o fato de a intensidade energética crescer em um primeiro momento. Isso implica em menor racionalidade no uso da energia do país.

Tabela 1 - Economia e consumo final energético – 2011-2020

Discriminação	2011	2015	2020	Variação anual (%)		
				2010/2015	2015/2020	2010/2020
PIB (10^9 R\$ [2008])	3.360	4.084	5.212	5,0	5,0	5,0
População Residente (10^3 habitantes)	193.176	198.921	205.003	0,8	0,6	0,7
PIB per capita (R\$ [2008]/hab/ano)	17.393	20.531	25.426	4,2	4,4	4,3
Consumo Final Energético (10^3 tep)	237.697	292.418	372.004	5,6	4,9	5,3
Cons. Final energia per Capita (tep/hab/ano)	1,23	1,47	1,81	4,8	4,3	4,6
Intens. Energética da Econ. (tep/ 10^3 R\$ [2008])	0,071	0,072	0,071	-	-	-

Fonte: Adaptado de EPE, 2011.

2.1.1 Acesso à energia moderna

Muitos indivíduos não têm acesso a formas de energia mais avançadas, como é o caso da eletricidade, e nem mesmo a outras tecnologias mais básicas, como é o caso de formas mais limpas de cocção. Há populações inteiras que dependem de lenha para suas necessidades energéticas, muitas vezes de origem da derrubada de mata nativa, ou até mesmo queima de dejetos animais secos. Essas formas de queima de combustíveis trazem problemas respiratórios à saúde, prejudicando ainda mais comunidades já vulneráveis a outras ameaças.

Serviços energéticos modernos são cruciais para o bem-estar humano e para o desenvolvimento econômico de um país. A energia traz benefícios básicos como disponibilidade de água, luz, refrigeração e máquinas para atividades profissionais. A educação de muitas crianças pode ser impedida pelo simples fato de precisarem buscar água ou combustível para sobrevivência das famílias.

Por todo o globo, ainda há 1,3 bilhão de pessoas sem acesso à eletricidade e 2,7 bilhões de pessoas que não têm condições de cozinhar seus alimentos de forma limpa. Estima-se que em 2009 foram investidos US\$ 9,1 bilhões na expansão do acesso aos serviços modernos de energia. Na ausência de novas políticas mais ousadas, estima-se que serão investidos em média US\$ 14 bilhões por ano entre 2010 e 2030 para esse fim, principalmente em conexão à rede elétrica. Esse nível de investimento ainda deixaria 1 bilhão de pessoas sem eletricidade e, apesar de todo o progresso, o crescimento populacional faria com que 2,7 bilhões de pessoas ainda não tivessem condições de preparar seus alimentos de forma adequada. Para providenciar acesso universal às tecnologias modernas até 2030, a média anual de investimento precisaria ser US\$ 48 bilhões por ano (IEA, 2011b).

Pessoas que vivem na pobreza ou organizações pequenas de caráter assistencial são vulneráveis às práticas de financiamento de mercado para obterem empréstimos e desenvolverem suas atividades. Necessitam de diversificação de financiamentos para obterem serviços financeiros adequados à suas realidades. Pelo lado da energia, especialmente para comunidades em áreas rurais, os serviços energéticos podem não estar disponíveis porque as concessionárias de energia não as veem como mercado forte e viável. No entanto, instituições de microfinanciamento podem expandir o acesso à energia oferecendo créditos e juros especiais para produtos energéticos ou tornando-se parceiros das concessionárias locais para ajudar as comunidades ou organizações carentes (MORRIS et. al., 2007).

Empréstimos de instituições financeiras de microcrédito que tiveram sucesso na África, Ásia, América Latina e Caribe caracterizam-se por ter fortes parcerias entre essas instituições e uma ou mais empresas de energia ou fundações. Mas também outras parcerias são importantes como governos, doadores ou organizações não-governamentais especializadas. O setor cresceu 12% ao ano na última década e alcança por volta de 500 milhões de pessoas no mundo. Entretanto, a penetração nos mercados é baixa e concentrada na Ásia alcançando apenas 2,5% dos clientes potenciais estimados (MORRIS et. al., 2007).

Práticas de microcrédito e doações podem fomentar surgimento de mercados com importantes impactos no desenvolvimento local. Como exemplo, populações africanas desfrutam de iluminação gerada em lanternas alimentadas por pequenos sistemas solares caseiros. Esses sistemas surgiram como serviços de venda de

energia de pequenos negócios e também doações, como opção de eletrificação “off-grid”. À medida que o mercado se desenvolve, mecanismos de microfinanciamento e pequenos empreendedores tornam possível a consolidação da tecnologia (LIGHTING AFRICA, 2010).

2.1.2 Energias renováveis

As energias renováveis têm condições de exercer um papel importante na transformação dos padrões energéticos mundiais. Essas tecnologias são caracterizadas por basearem-se em ciclos de fenômenos naturais. O potencial de redução de poluição, principalmente do ar, é evidente com larga aplicação dessas tecnologias. Somado a isso, emissões de gases de efeito estufa podem ser evitadas sem prejudicar o consumo das populações. Investimentos mais concretos em desenvolvimento e melhoramento de tecnologias trariam benefícios econômicos.

Outra questão relevante é que energias renováveis também têm características de geração distribuída. Com o advento das melhorias da rede elétrica em busca de redes inteligentes, a geração distribuída de pequena escala torna-se tecnicamente viável, e as energias renováveis encaixam-se bem nessa estrutura.

Pensando em populações carentes, as energias renováveis podem garantir acessibilidade de regiões remotas onde a rede elétrica convencional não atinge. Há programas governamentais desse tipo, inclusive no Brasil. O Programa Luz Para Todos é um exemplo. Em regiões afastadas no sertão nordestino e comunidades ribeirinhas da floresta amazônica, sistemas solares e/ou híbridos solar-diesel foram instalados para abastecê-las.

Apesar de não serem tecnologias novas, investimentos nas tecnologias renováveis são mais expressivos nos países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD). A Figura 1 mostra a distribuição da produção de eletricidade por renováveis com e sem contribuição da hidroeletricidade (IEA, 2011c). É visível a participação do bloco Brasil, Rússia, China, Índia e África do Sul (BRICS). Apesar de os dois blocos dominarem a produção global, o bloco OECD conta com 80% da geração renovável, excetuando hidroeletricidade.

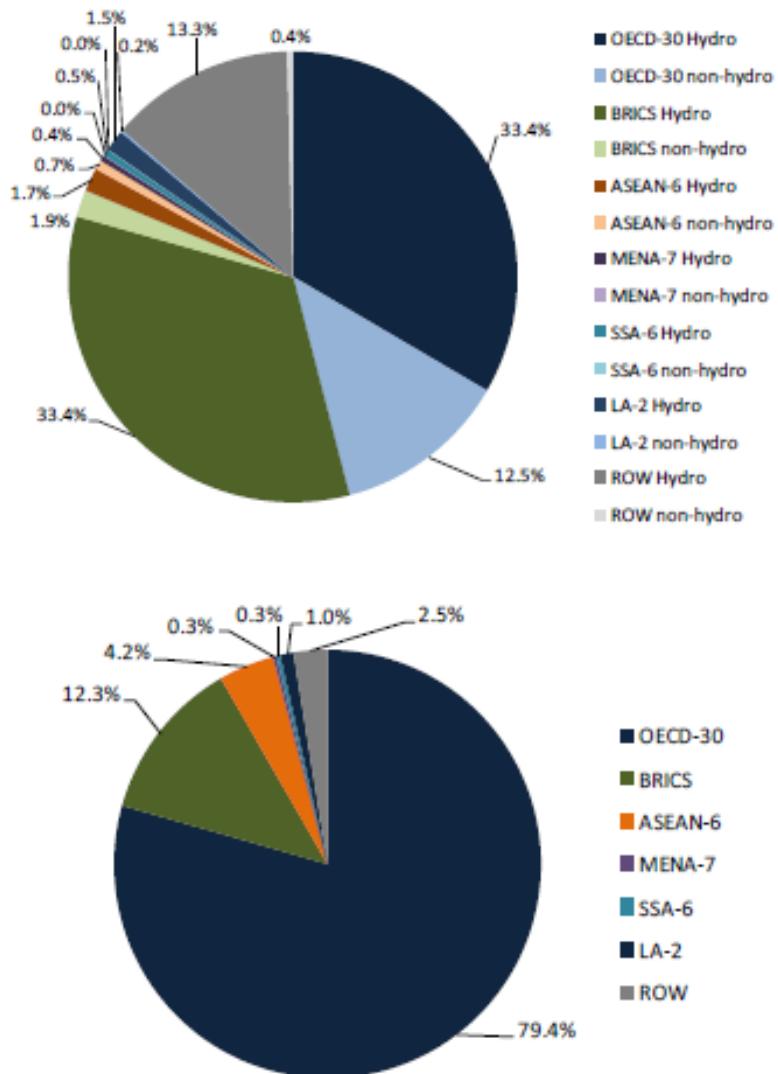


Figura 1 - Segmentação da produção renovável de eletricidade, com (em cima) e sem (embaixo) hidroeletricidade.

Fonte: (IEA, 2011c)

Já a Figura 2 mostra que a produção de calor com fontes renováveis é mais equilibrada entre os blocos mundiais. Isso é devido a dois aspectos. Primeiro, há forte contribuição da população nas atividades de aquecimento de água e preparo de alimentos. Segundo, pelo uso generalizado de biomassa em países menos desenvolvidos (IEA, 2011c). Isso demonstra a maior preocupação dos países mais desenvolvidos em relação a novas e promissoras tecnologias.

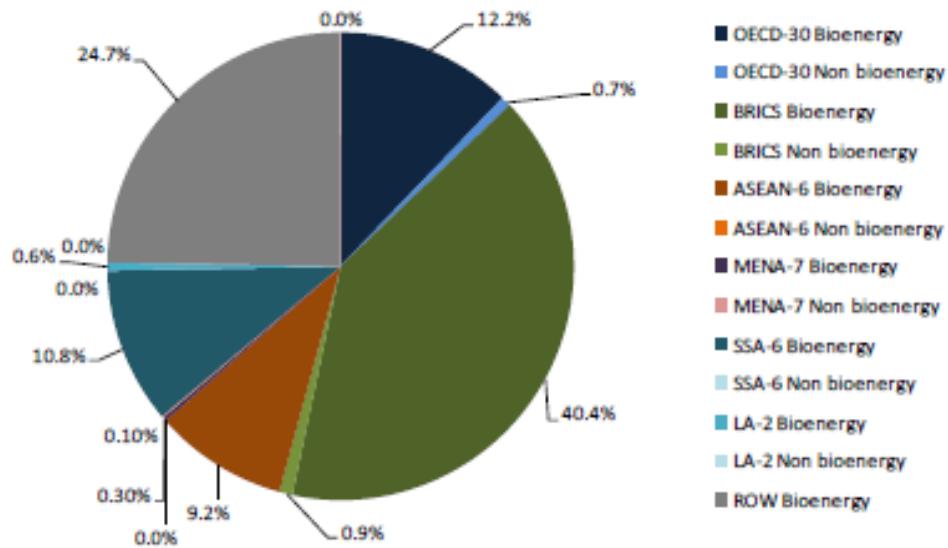


Figura 2 - Segmentação do consumo de energia e bioenergia para produção de calor.

Fonte: (IEA, 2011c)

Políticas governamentais em energias renováveis trazem benefícios para economia e segurança energética. De acordo com o relatório das perspectivas tecnológicas da Agência Internacional de Energia (IEA, 2012), eficiência energética e instalação de baixo carbono podem ajudar governos a cortar gastos com combustíveis e reduzir dependência de importação. Recursos renováveis e potenciais de eficiência energética existem praticamente em todo lugar, ao contrário de outras fontes energéticas, que são concentradas e limitadas a poucos países. Reduzir a intensidade energética, assim como diversidade tecnológica e geográfica da matriz pode resultar em substancial segurança energética e benefícios econômicos. Para cada dólar investido em energias renováveis a partir de 2020, três dólares futuros serão economizados a partir de 2050.

2.2 ENERGIA SOLAR

2.2.1 O Sol

O homem sempre teve interesse em entender os fenômenos e corpos celestes do espaço extraterrestre. A astronomia é uma ciência antiga e para ter

alguma noção dessa idade, basta saber que os marinheiros da Idade Antiga já se orientavam pela posição das estrelas.

Mais tarde, cientistas do campo astronômico da Idade Média ampliaram os conhecimentos dessa área. Grandes nomes como Galileu Galilei, Nicolau Copérnico e Johannes Kepler contribuíram para o entendimento de que a Terra segue uma trajetória cíclica e bem definida ao redor do sol. Outros mediram valores úteis que caracterizam o astro. Todas as descobertas passadas propiciaram informações e ferramentas para que a energia solar seja utilizada nos dias de hoje com propósitos de engenharia.

Duffie & Beckman (2006) caracterizam o sol como uma esfera de gases intensamente quentes, com diâmetro de $1,39 \times 10^9$ m e dista, em média, $1,5 \times 10^{11}$ m da Terra. É um contínuo reator nuclear cujo comportamento pode ser igualado a um corpo negro de temperatura 5777K.

Apesar de o uso humano da energia solar ser antigo, houve estudos referentes à radiação solar com objetivo de mensurar seu valor. De acordo com Cometta (1982), desde a década de 1880 até 1955 o Smithsonian Institute trabalhou nessa área e obteve dados importantes. Nesse período foi inventado o instrumento base para tais medidas, o pirheliômetro a fluxo d'água. Trata-se de um tubo externamente enegrecido, onde escoa água a uma velocidade conhecida e é aquecida pela radiação solar ou por corrente elétrica regulável. Ao determinar potência elétrica que provoca aquecimento igual ao provocado pela radiação solar pode-se chegar ao valor da intensidade radiante do sol naquele momento.

Segundo Abreu (2000), além do uso direto da energia solar, o conhecimento da radiação solar incidente na superfície terrestre é importante para entender sua influência no clima. Como há variação sazonal e anual da radiação, o monitoramento deve ser contínuo. Essas medições são feitas em estações solarimétricas, que nada mais são que estações meteorológicas com sensores de radiação. As diferenças entre estações solarimétricas ocorrem pelas variáveis que se quer medir e qualidade dos instrumentos utilizados.

As técnicas e métodos atuais para estimar irradiação solar na superfície terrestre incluem métodos numéricos, métodos estatísticos baseados em satélites e métodos baseados em modelos físicos. Os métodos estatísticos fornecem apenas médias em períodos e são originados em dados de longas séries anuais. Os modelos físicos podem fornecer dados horários e também podem incluir variações

climáticas relevantes (COLLE; PEREIRA, 2000). A confiabilidade de estimativas da radiação a partir de imagens de satélites é satisfatória apenas se houver dados de superfície confiáveis para validar e calibrar os modelos e equipamentos (ABREU, 2000).

Os principais instrumentos para medição de radiação são, de acordo com Abreu (2000):

- Heliógrafo de Campbell-Stokes. Determina radiação solar pelo método de Angstrom e horas de insolação;
- Piranômetro. Mede radiação solar global, resposta varia com o azimute e cosseno do ângulo de incidência;
- Pirheliômetro. Mede radiação solar direta, necessita de rastreamento do sol, e é utilizado como referência na calibração de piranômetros;
- Piranômetro sombreado. Mede radiação solar difusa, necessita de rastreamento do sol;
- Pirgeômetro. Mede radiação de onda longa, o domo protetor impede a entrada de radiação de outros comprimentos de onda;
- Albedômetro. Mede quanto o meio ambiente reflete de radiação solar.

No espaço, a Terra é constantemente bombardeada por radiação vinda do Sol. Essa radiação não sofre influência até entrar na atmosfera. Dessa forma, por conveniência, adotou-se um valor de radiação fora da atmosfera, nomeado constante solar (G_{sc}). De acordo com Duffie & Beckman (2006), esse valor passou por diversas revisões desde os primeiros trabalhos, e o valor adotado pelo Centro Mundial de Radiação é 1367 W/m².

A radiação eletromagnética é dividida em intervalos importantes de comprimentos de onda. A **Figura 3** mostra o espectro de radiação e seus intervalos. Além da quantidade de energia, é importante saber qual a distribuição espectral da radiação extraterrestre. A radiação solar tem 95% de sua energia em ondas curtas, ou seja, entre 0,3 e 3 μm. A **Figura 4** mostra a distribuição da irradiação solar em relação aos diferentes valores de comprimento de onda (ABREU, 2000).

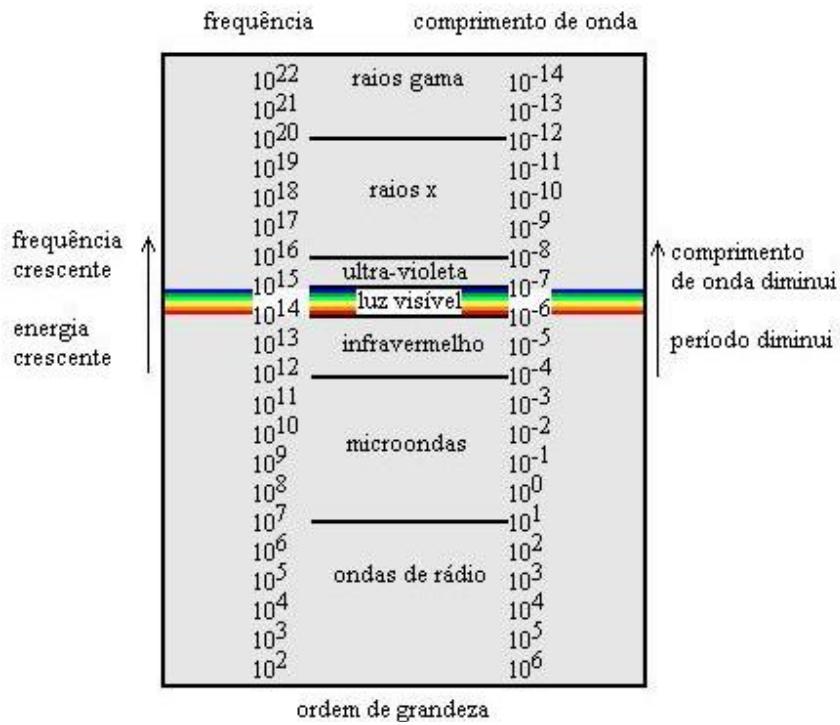


Figura 3 - Espectro de radiação.

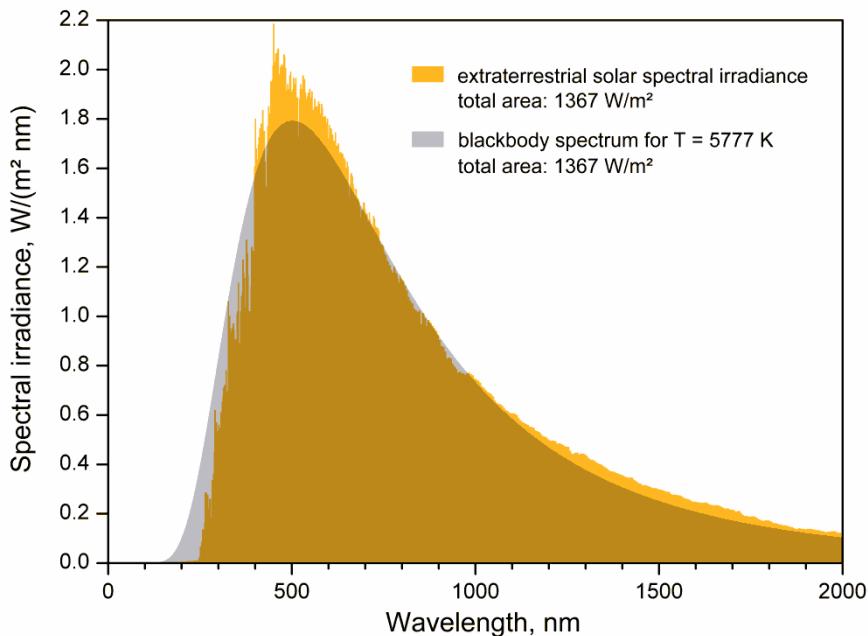
Fonte: <http://www.infoescola.com/fisica/radiacao-eletromagnetica/>

Figura 4 - Espectro de radiação solar. Comparação com espectro de um corpo negro à temperatura de 5777K.

Fonte: <http://www.thescienceforum.com/astronomy-cosmology/18924-why-pictures-sun-yellow.html>

Ao atingir uma superfície, os raios solares assumem uma geometria importante para fins de engenharia. Os ângulos formados pelos posicionamentos, mostrados na Figura 5 e Figura 6, são (DUFFIE; BECKMAN, 2006):

- Latitude (Φ). A localização angular ao norte ou sul do equador, sendo norte positivo; $-90^\circ \leq \Phi \leq 90^\circ$
- Declinação (δ). Posição angular do sol ao meio dia solar com respeito ao plano do equador, sendo norte positivo; $-23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$
- Inclinação da superfície (β). Ângulo entre o plano da superfície e a horizontal; $0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$
- Azimute da superfície (γ). Desvio entre a projeção da normal da superfície no plano horizontal em relação ao meridiano local, sendo zero o meridiano sul, leste negativo e oeste positivo. $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$
- Ângulo horário (ω). Desvio angular do sol para leste ou oeste em relação ao meridiano local devido à rotação da Terra em seu eixo a 15° por hora, sendo manhã negativo e tarde positivo.
- Ângulo de incidência (θ). Ângulo entre o feixe de radiação na superfície e a normal da superfície.
- Ângulo de zênite (θ_z). Ângulo entre a vertical e a linha do sol, ou seja, ângulo de incidência entre a radiação solar e a superfície horizontal.
- Ângulo de altitude solar (α_s). Ângulo entre a horizontal e a linha do sol, que é o complemento do ângulo zenital.
- Ângulo de azimute solar (γ_s). Desvio angular entre o norte e a projeção do feixe solar no plano horizontal, sendo leste negativo e oeste positivo.

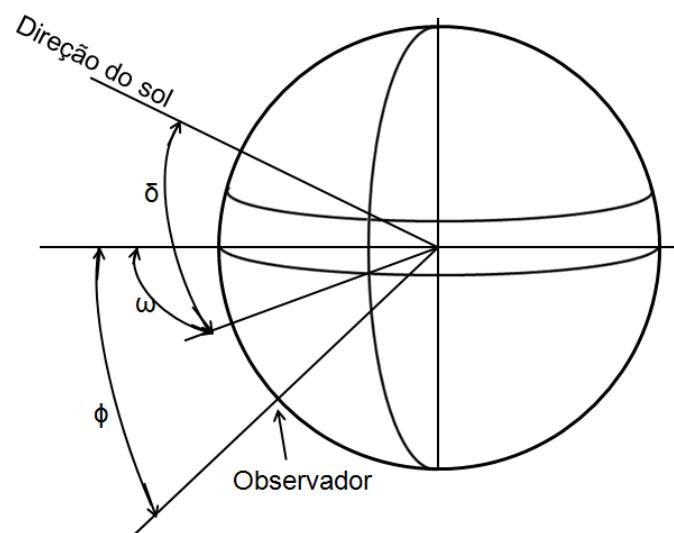


Figura 5 - Ângulos da geometria solar: latitude, declinação e ângulo solar.

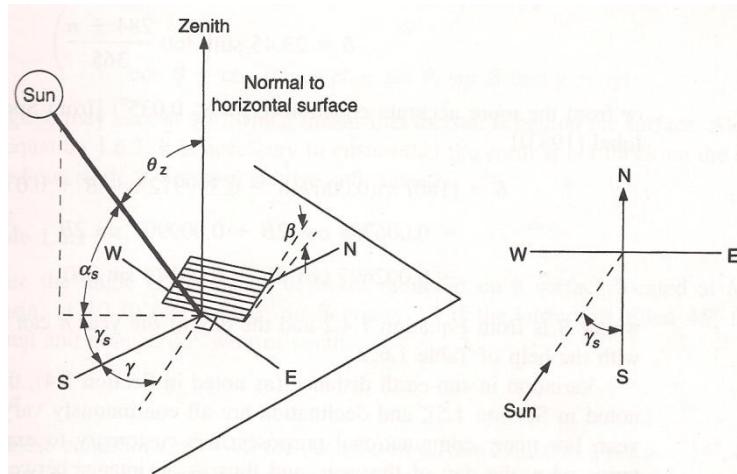


Figura 6 - (a) Ângulos da geometria solar e superfície de incidência. (b) Vista planisférica mostrando o ângulo de azimute solar.

Fonte: DUFFIE; BECKMAN, 2006.

Para fins práticos, utilizar o valor da constante solar nos cálculos de projetos não é aconselhável. Deve-se dar preferência aos levantamentos e medições de campo, ou dados de atlas solarimétricos. A quantidade de energia do sol varia de acordo com as particularidades de cada local. Variáveis como latitude, altitude, fenômenos meteorológicos e estações do ano alteram os valores de disponibilidade de radiação.

É comum encontrar dados de radiação medida em superfícies horizontais ou inclinadas. Além disso, as informações podem vir de diversas formas, em tabelas ou mapas, com valores de energia por área, ou potência por área, em períodos mensais, anuais ou até mesmo médias diárias. A Figura 7 mostra um exemplo de média anual do território nacional brasileiro, em superfícies horizontais. A Figura 8 mostra as médias periódicas das variações sazonais da radiação global no território brasileiro.

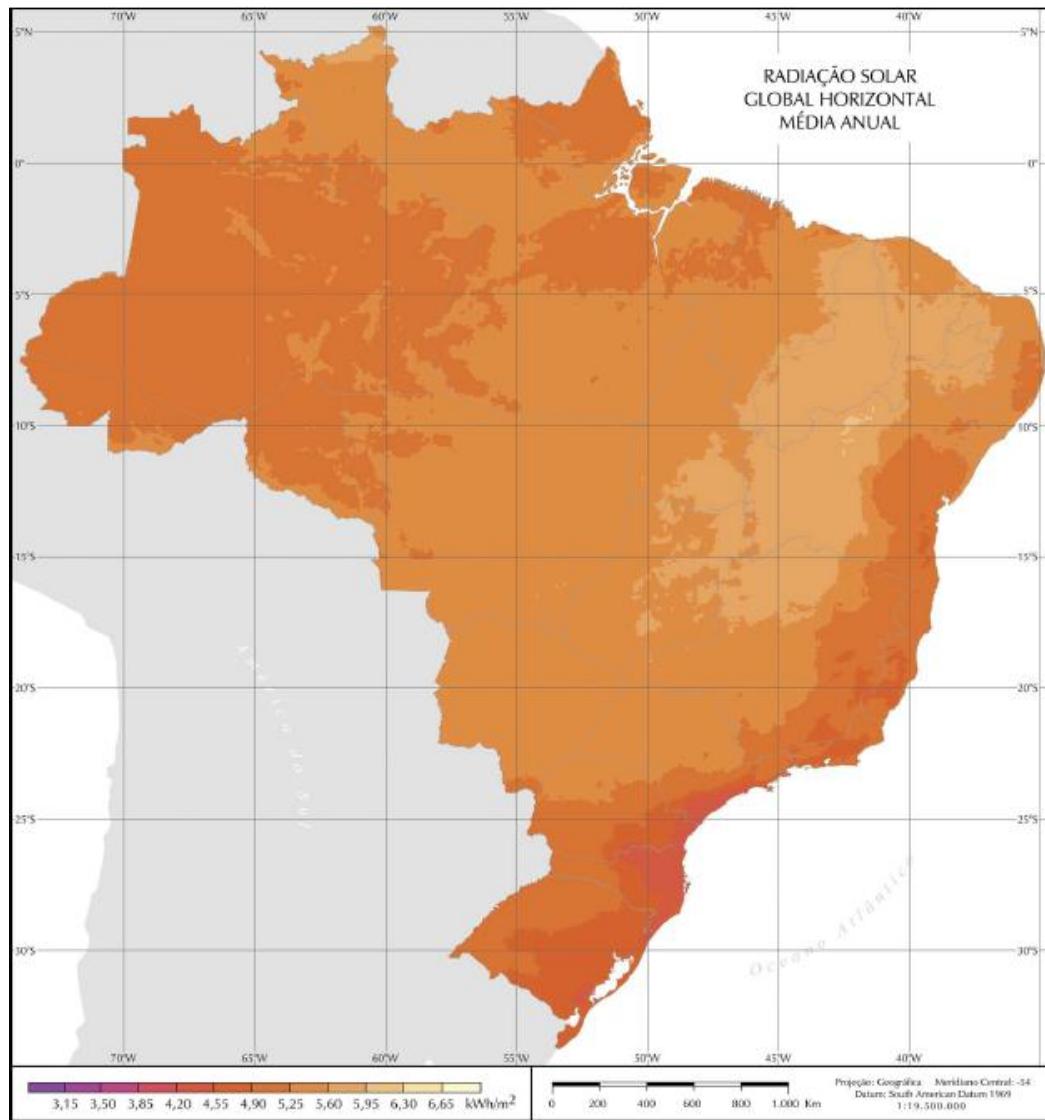


Figura 7 - Radiação solar global horizontal média anual.
Fonte: PEREIRA et. al., 2006.

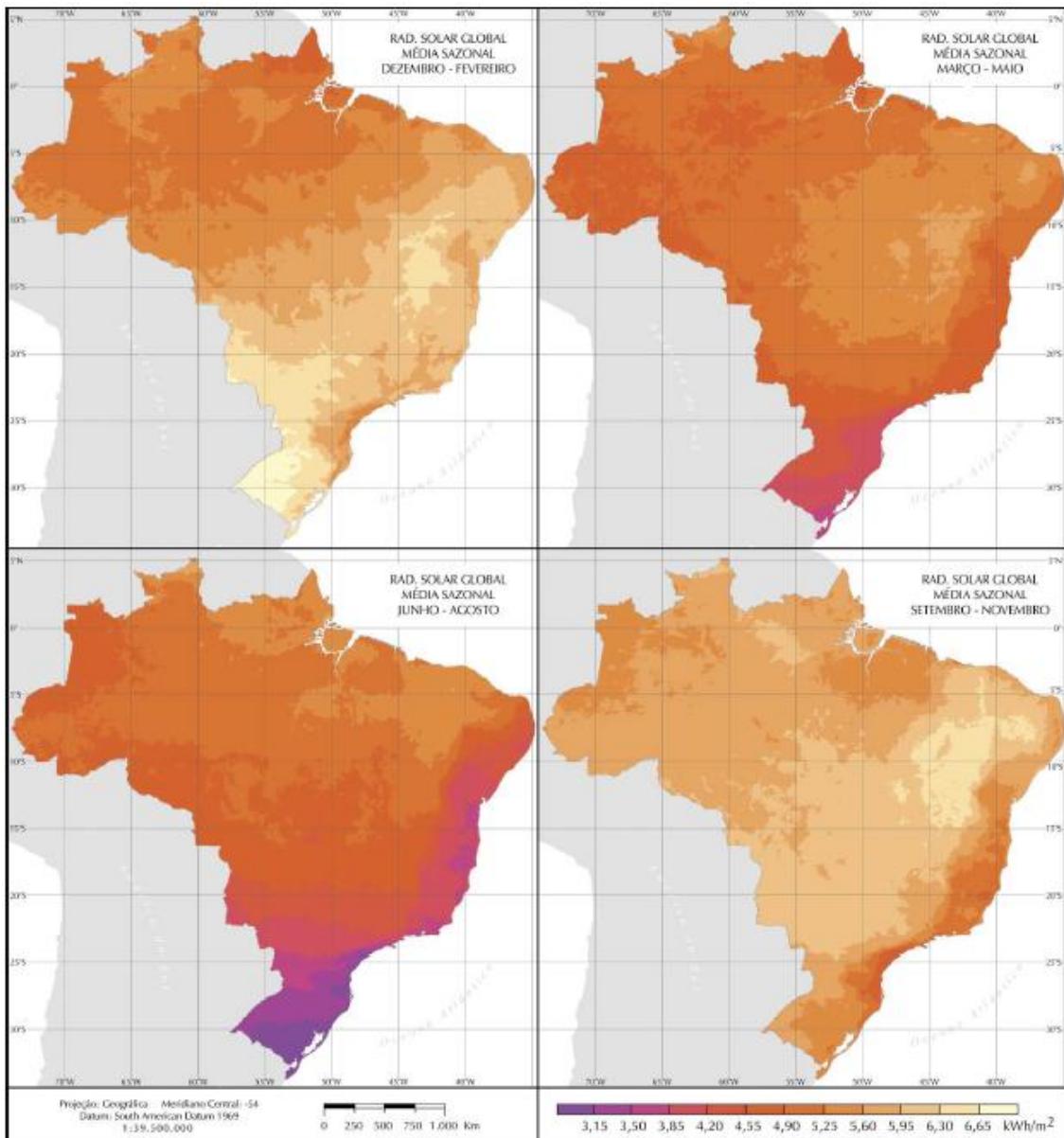


Figura 8 - Radiação solar global horizontal média sazonal.

Fonte: PEREIRA et. al., 2006.

Em muitas aplicações não é interessante manter a superfície coletora na posição horizontal. Os sistemas residenciais, por exemplo, costumam ser fixados nos telhados das casas com a inclinação de estrutura. Nesses casos a potência extraída da radiação incidente não é igual à radiação horizontal, pois varia com o ângulo entre o feixe de luz e a normal da superfície.

A inclinação da superfície modifica o ângulo de incidência do feixe de luz. A consequência útil disso é a aproximação da nova superfície a uma nova latitude artificial igual à latitude local menos a inclinação (DUFFIE; BECKMAN, 2006). Ou seja, inclinar a superfície em direção ao sol é o mesmo que “levar” a superfície a

uma latitude menor, como exemplificado na Figura 9. Dessa forma, há dados úteis de radiação em superfícies inclinadas, como se pode ver na Figura 10.

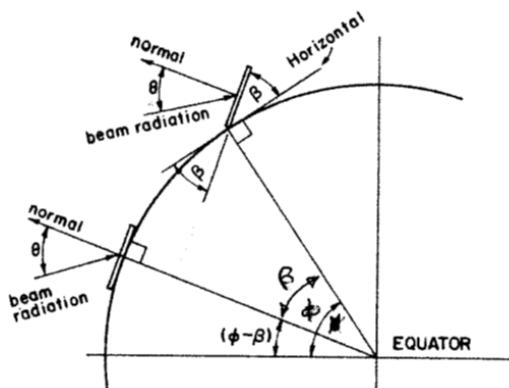


Figura 9 - Seção da Terra mostrando β , θ e Φ e $\Phi - \beta$ para superfícies voltadas para o sul.
Fonte: DUFFIE; BECKMAN, 2006.

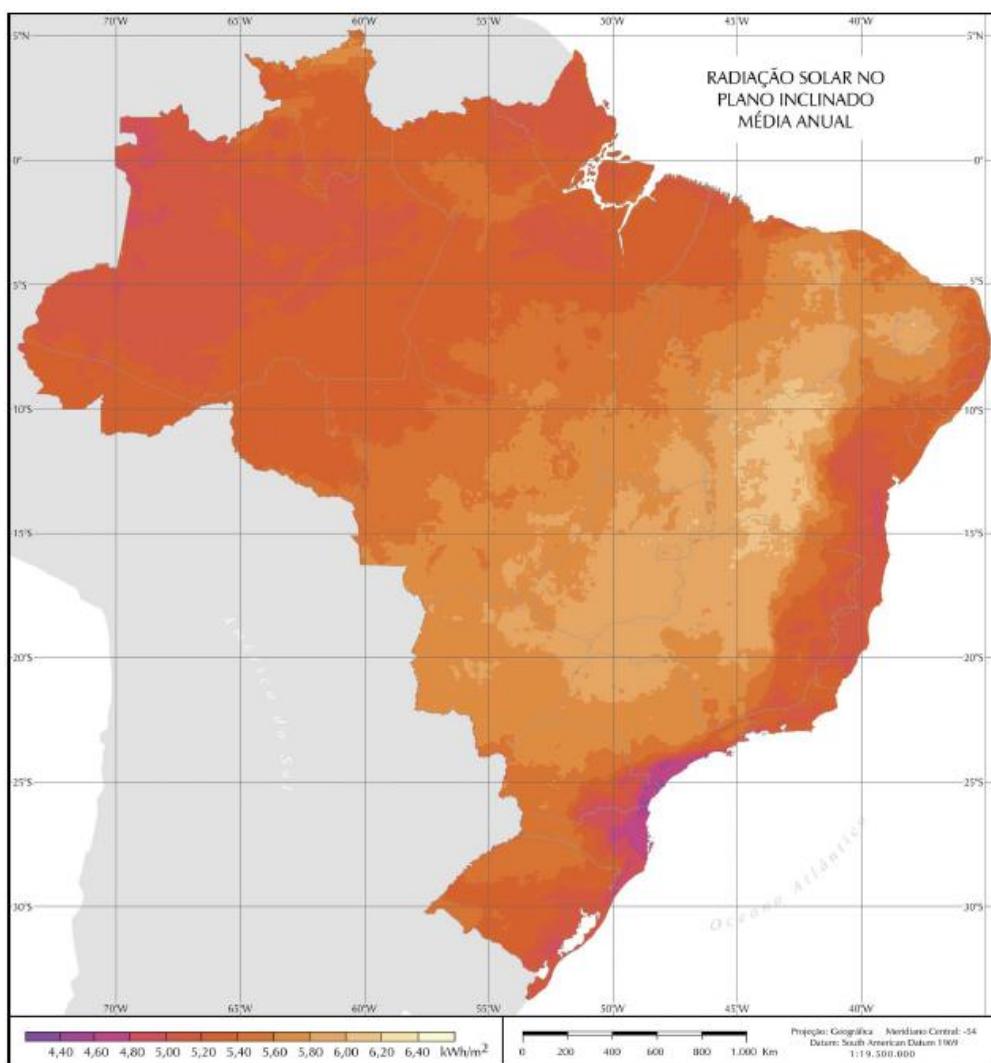


Figura 10 - Radiação solar global em plano inclinado com a latitude do local de cada ponto, média sazonal.
Fonte: PEREIRA et. al., 2006.

Estudos de locais com potencial de instalação de sistemas solares incluem, primeiramente, a quantidade de energia que chega a uma dada superfície. Porém esse não é o único fator importante. É de conveniência determinar qual é a fração da radiação incidente que corresponde à radiação direta, aquela que vem diretamente do círculo solar no céu, e à radiação difusa, que sofre interferência de moléculas e partículas da atmosfera. Em dias claros, a maioria da radiação solar origina-se da direção do sol. Enquanto que em dias mais nublados há predominância de radiação homogênea do céu.

Os instrumentos mais comuns para medição de insolação, os piranômetros, detectam a radiação total, ou seja, direta e difusa. Diferenciar a quantidade de cada fração é importante para decidir qual tipo de instalação é mais adequada para cada local. Dessa forma, é preciso calcular as frações para projetos mais elaborados.

2.2.2 Energia solar térmica para aquecimento de água

No Brasil, mais de 80% da população concentra-se em regiões urbanas, principalmente nas regiões Sul e Sudeste. Como se trata de um clima mais subtropical, há maior necessidade de aquecimento de água residencial para uso durante o ano inteiro. Construções residenciais, comerciais e edifícios públicos em áreas urbanas correspondem a 45,2% da demanda de energia do país, com o setor residencial responsável por 22,3% . A maioria dos domicílios na região Sul, Sudeste e Centro-Oeste utilizam chuveiros elétricos, com proporções de 98,6%, 90,7% e 85,1% respectivamente (ver **Figura 11**) (NASPOLINI; RUTTER, 2012).

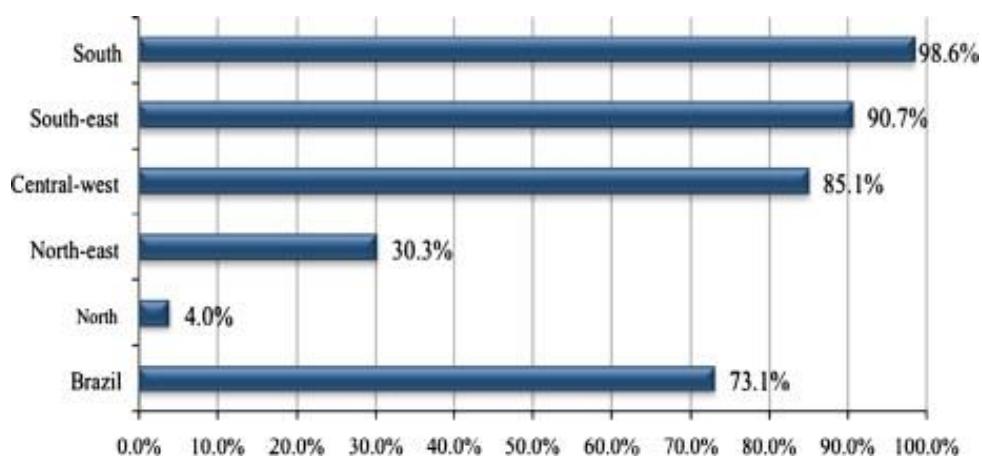


Figura 11 - Percentual de chuveiros elétricos por residência por região no Brasil.
Fonte: NASPOLINI; RUTTER, 2011.

Ainda de acordo com Naspolini e Rutter (2012), esses dispositivos ganharam melhorias eletrônicas recentes para obter banhos mais confortáveis sem alterar o fluxo d'água. Porém, há desvantagens técnicas como baixo fator de carga e altas correntes harmônicas, contribuindo para piora da qualidade da energia e aumento das cargas da rede urbana. Os chuveiros elétricos têm participação de 24% na carga elétrica de uma residência típica brasileira, como se pode ver na Figura 12 (NASPOLINI; RUTTER, 2012).

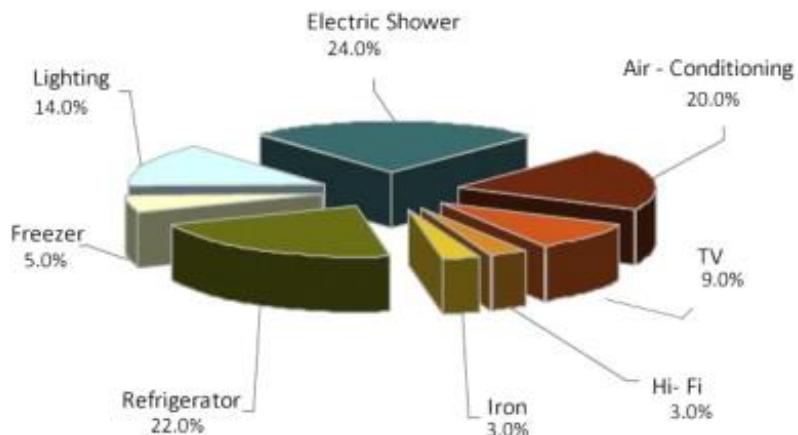
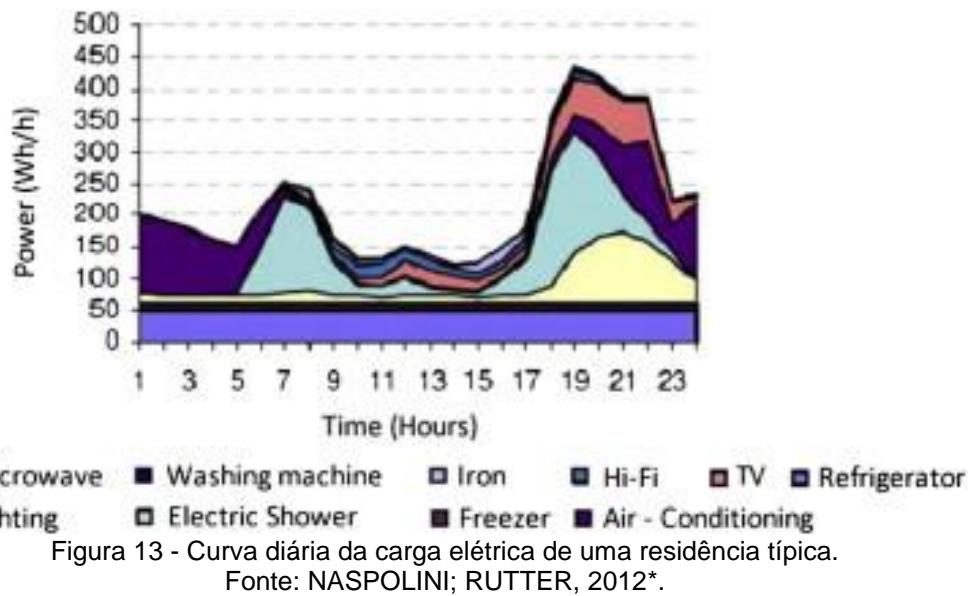


Figura 12 - Estrutura de consumo elétrico de uma residência típica.
Fonte: NASPOLINI; RUTTER, 2012.

A curva diária da carga elétrica da rede de distribuição brasileira apresenta um grande pico no horário compreendido entre 18:00 e 21:00, com o valor máximo por volta de 19:00*. O setor residencial é responsável por grande fração do pico elétrico da rede e os maiores contribuidores para isso são os chuveiros elétricos. A contribuição para o pico residencial de um chuveiro elétrico é da ordem de 60% (NASPOLINI; RUTTER, 2011). A Figura 13 mostra a carga média anual residencial no Brasil e quais aparelhos são mais significantes.



Essa situação impõe um peso muito grande nas companhias de distribuição, visto que apesar de os chuveiros elétricos apresentarem a maior potência dos aparelhos domésticos, têm a menor utilização. Como seu custo de instalação é baixo e a utilização é bastante difundida, causa um alto custo para o sistema elétrico suprir (NASPOLINI; RUTTER, 2011).

No país, tarifas de energia elétrica para classes da população com menor renda são subsidiadas. Para isso, os consumos devem ser inferiores a 80 kWh/mês, sem demonstrar baixa renda, ou abaixo de 220kWh/mês, se o consumidor já é beneficiado por algum programa social. Se uma família hipotética de cinco pessoas que tomam um banho diário de duração de 8 minutos cada for analisada, serão aproximadamente 70kWh/mês de consumo apenas para aquecimento de água. Dessa forma é difícil alcançar os níveis de consumo subsidiados pelo governo (NASPOLINI; RUTTER, 2011). Uma possibilidade de evitar esse gasto elétrico seria instalação de sistemas solares de aquecimento de água.

Esse panorama explica a adoção de políticas governamentais na eficiência energética, principalmente relacionadas aos chuveiros elétricos. No entanto, apesar de incentivos e redução de custos dos sistemas solares nos anos recentes, o alto investimento inicial ainda é um empecilho para adoção generalizada dessa tecnologia.

O aproveitamento térmico da energia solar para aquecimento de água envolve captar e absorver a radiação incidente para aumentar o conteúdo energético

de um fluido passante. Esse ganho é manifestado pelo aumento da temperatura do fluido ou por mudança de fase.

Os sistemas solares térmicos podem usar a energia adquirida para fins de aquecimento ou resfriamento, ou podem mover máquinas para gerar eletricidade. Outra diferenciação possível é quanto à mobilidade dos coletores, que podem ser tanto fixos quanto podem ter sistemas de rastreamento solar. Os coletores solares também podem ser do tipo concentradores, quando concentram radiação incidente em grandes áreas em uma pequena superfície, ou não. Os sistemas concentradores costumam atingir maiores temperaturas se comparados com os outros tipos.

O sistema mais comum para construções residenciais e comerciais é o coletor plano. É um sistema bastante simples se comparado com os anteriores. Por tratar-se de aplicações pequenas e que geralmente buscam abastecer o consumo sanitário humano, não necessita de alta tecnologia e altas temperaturas. Muitas vantagens decorrem da simplicidade: baixo custo, fácil instalação, pouca manutenção e aproveita todo tipo de radiação, direta, difusa e refletida por outras superfícies.

Funciona como um tipo especial de trocador de calor, onde energia radiante solar é transformada em calor. Por usar tanto radiação direta quanto difusa, não necessita de sistemas de rastreamento solar e requerem pouca manutenção. Outras aplicações dos coletores planos, além da já mencionada, são aquecimento de água de piscina, processos industriais e interiores de edifícios (DUFFIE; BECKMAN, 2006).

A Figura 14 mostra o funcionamento de um sistema de aquecimento de água simples. A água passa pelo coletor solar, geralmente posicionado no telhado, onde tem sua temperatura aumentada. A água quente é acumulada em um reservatório térmico, pois é geralmente utilizada em horários sem radiação solar. Exceto o coletor, o restante do sistema pode ser localizado no interior da casa.

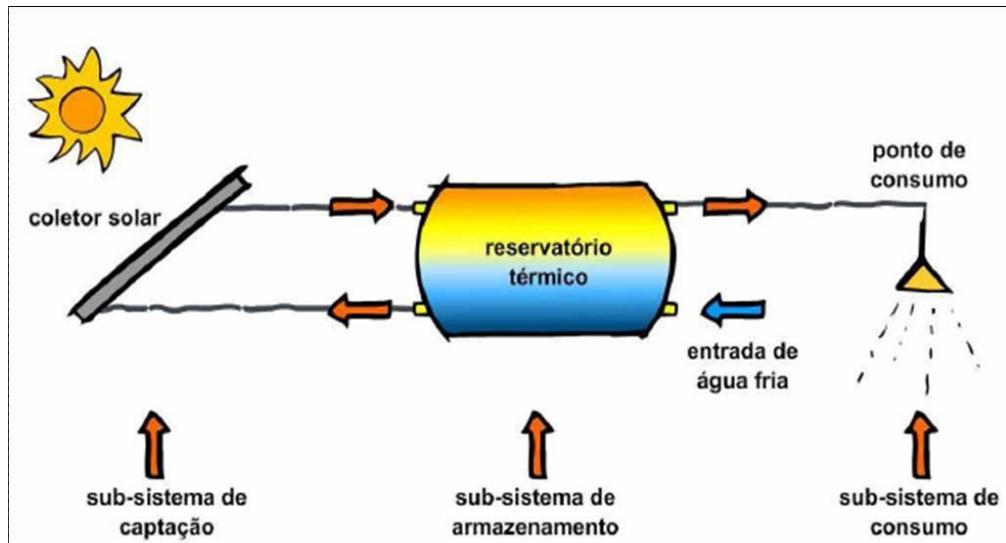


Figura 14 - Princípio de funcionamento de aquecedor solar residencial de água.

Fonte: DASOL, 2012.

O coletor solar é o componente principal do sistema. É por ele que há ganhos de energia da radiação do sol, mas também há perdas se não for fabricado de maneira correta. O mais comum em instalações residenciais é uma placa com tubos e aletas metálicas, geralmente com sua superfície tratada para absorver melhor a radiação solar. Esses coletores costumam ter placas de vidro para evitar que o calor irradiado pela superfície aquecida seja perdido para o ambiente.

O vidro da cobertura tem a propriedade de ser transparente para radiação eletromagnética de ondas curtas e opaco para aquelas de ondas longas. A radiação solar, cujo comprimento de onda é pequeno, entre 0,3 e 3 μm , e que não é refletida ou absorvida, atravessa o vidro e atinge a placa absorvedora. Essa geralmente é feita de material metálico, cobre ou alumínio, para melhor conduzir calor para o fluido interior. Os tubos são soldados nas aletas metálicas que costumam receber tratamento superficial para absorver a maior quantidade possível de luz do sol.

A aleta emite radiação por causa de seu aumento de temperatura e esse calor seria perdido se não houvesse a cobertura vítreia. Como o vidro é opaco para radiações de comprimento de onda maiores, como é o caso, o calor permanece dentro do sistema. Esse efeito é semelhante ao que acontece com estufas de jardim. Além disso, a placa de vidro também impede maiores perdas de calor do sistema por convecção. A Figura 15 mostra um corte lateral de um coletor padrão, com dupla cobertura de vidro, e os ganhos e perdas de energia associados.

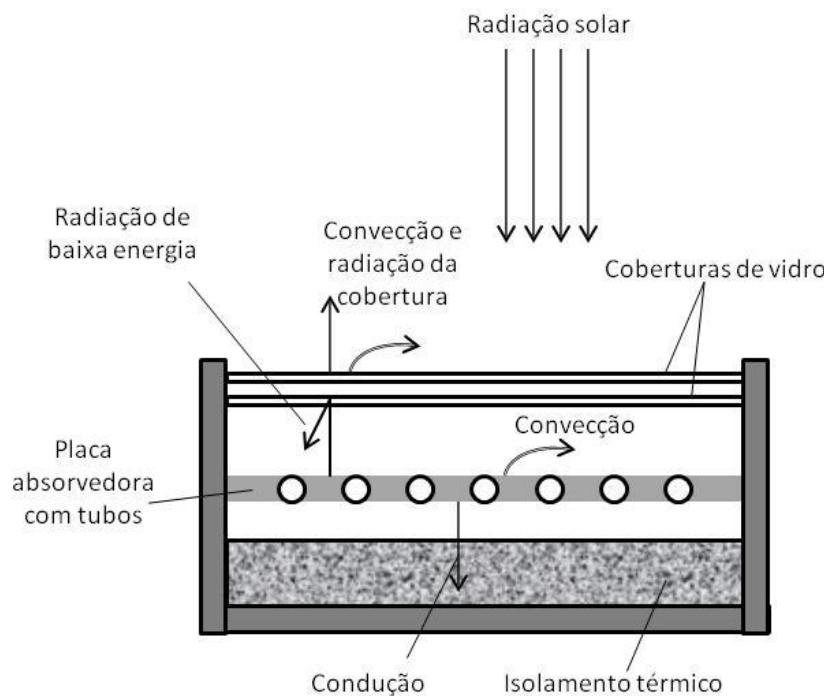


Figura 15 - Corte lateral de um coletor de placa plana mostrando as perdas e os ganhos de calor.
Fonte: Adaptado de HINRICHES; KLEINBACH, 2003.

O sistema pode ser, de acordo com sua configuração, auto movido ou não. Quando o reservatório é posicionado em um nível acima dos coletores e há altura suficiente, a água circula por gravidade, já que a água fria é mais densa que a água quente. Esse fenômeno é conhecido como termossifão. Alternativamente o fluido pode ser escoado por trabalho de uma bomba, quando a condição anterior de posição do reservatório não puder ser satisfeita.

Uma das inconveniências da energia solar é que se capta energia em momento diferente do uso. Com o propósito de banho, dificilmente um sistema solar conseguirá atender à demanda imediata de calor. Portanto, faz-se necessário armazenar o calor para uso posterior. Além do uso noturno o sistema de armazenamento deve ser capaz de reservar energia para dias nublados, para tanto, o estudo do clima local é aconselhável. Mesmo assim, sistemas auxiliares de aquecimento devem ser instalados. As tecnologias possíveis incluem elétrica, a gás, biomassa, entre outras.

No Brasil, de acordo com o Departamento Nacional de Aquecimento Solar (DASOL), órgão da Associação Brasileira de Refrigeração, Ar Condicionado, Ventilação e Aquecimento, há 200 empresas que atuam no setor e movimentam cerca de R\$500 milhões/ano. O mercado brasileiro tem crescido nos últimos anos, apesar do custo de investimento para o usuário, acumulando uma área superior a 6

milhões de m² de coletores solares instalados. E as perspectivas de crescimento são boas. No país há cidades e estados que tomaram a iniciativa de criar leis favorecendo os sistemas solares de aquecimento de água. Esse incentivo governamental também contribui para o sucesso do setor (DASOL, 2012a).

Pesquisa realizada pelo DASOL (2012b) apontou que a produção brasileira de coletores solares cresceu 21,1% em relação ao ano anterior, o equivalente a 967 mil m² de coletores. Além das placas foram fabricadas 123 mil unidades de reservatórios térmicos, que equivalem a um volume de armazenamento de 45,2 milhões de litros. As vendas foram maiores na região Sudeste, com 75,7%, seguida pelas regiões Sul e Centro-Oeste, com 10,5% e 9,3% do volume de vendas, respectivamente, conforme Figura 16. Os volumes históricos de produção podem ser vistos na Figura 17.

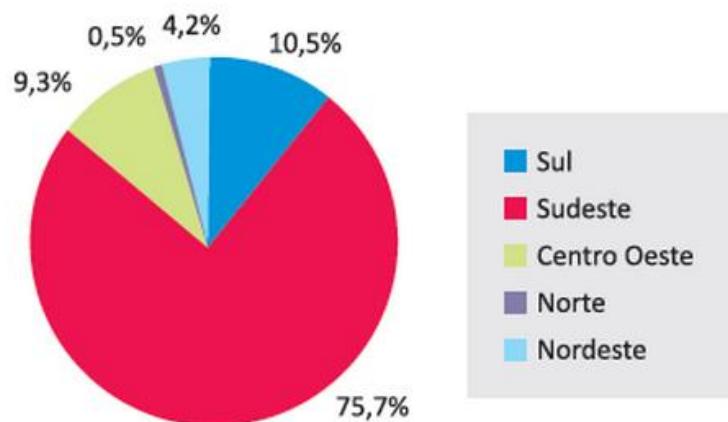


Figura 16 - Volume de vendas por região em 2010.
Fonte: <http://www.dasolabrava.org.br/informacoes/dados-de-mercado/>

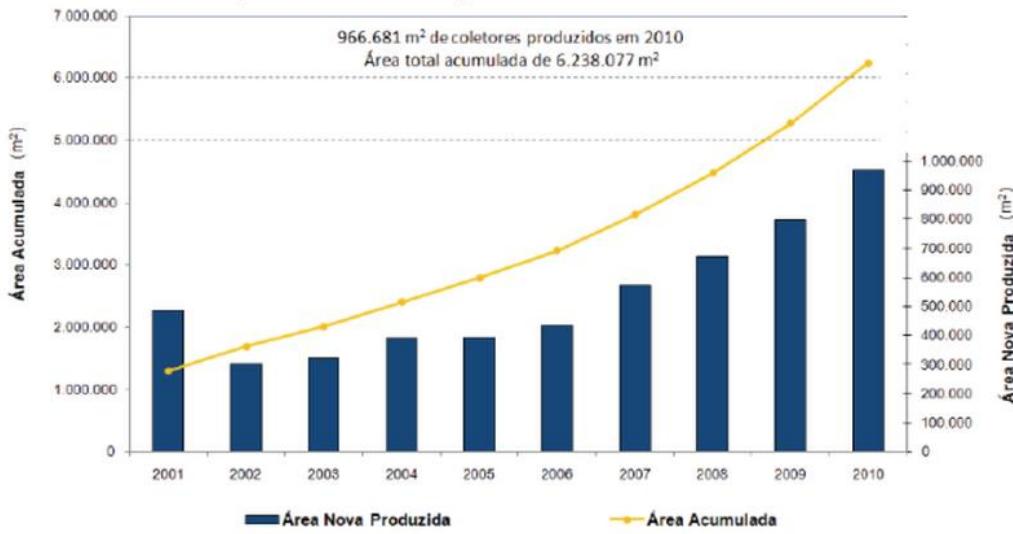


Figura 17 - Evolução do mercado de aquecimento solar brasileiro, 2001 a 2010.

Fonte: <http://www.dasolabrava.org.br/informacoes/dados-de-mercado/>

No mundo, ao final de 2010, a capacidade de aquecimento solar em operação equivalia a 195,8 GW_{th}, correspondendo a 279,7 milhões de metros quadrados. Ao final de 2011 houve crescimento estimado de 25%, alcançando 245 GW_{th}. Desses, 88,3% são coletores planos ou tubos evacuados, 11% coletores sem cobertura de vidro e 0,7% coletores para aquecimento de ar. Individualmente a liderança é chinesa, que juntamente com EUA, Europa e Canadá contam com a parcela de 86,6% (IEA, 2012). A Figura 18 mostra a capacidade instalada dos dez países com maior contribuição.

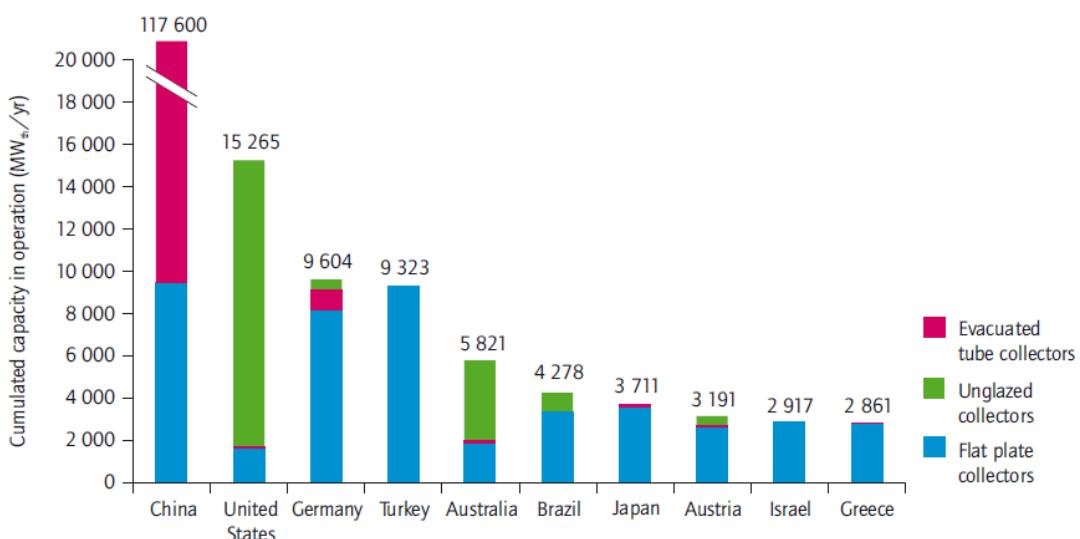


Figura 18 - Capacidade total instalada mundialmente, considerando os dez maiores países, ao final de 2010.

Fonte: IEA 2012b.

O crescimento dos últimos anos foi impulsionado pela China, sendo praticamente responsável pelas taxas de crescimento obtidas. A Figura 19 mostra o crescimento da instalação mundial, onde se pode observar todo o esforço em investimento chinês no setor.

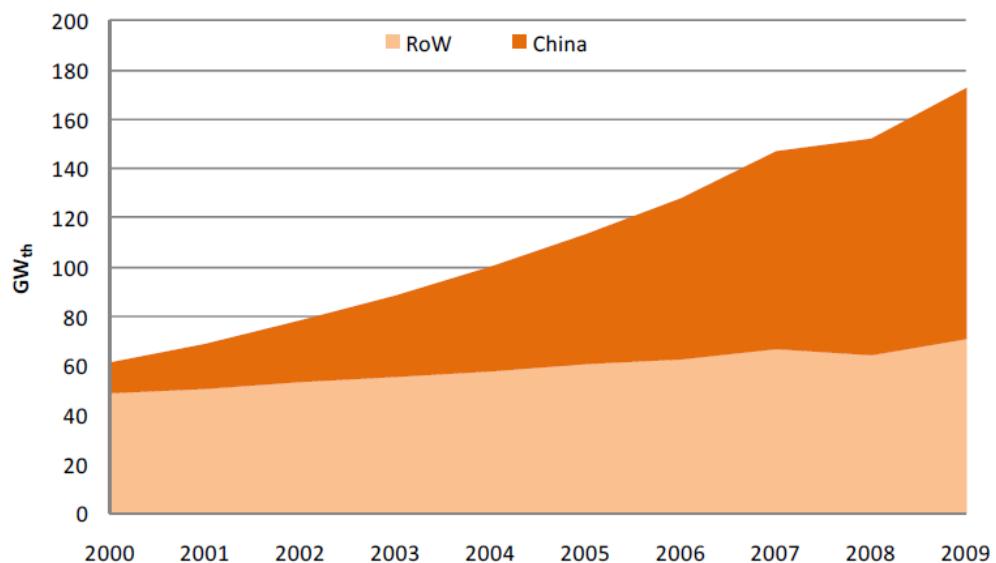


Figura 19 - Capacidade instalada mundial de aquecedores solares, 2000 a 2009.

Fonte: IEA, 2011d.

As perspectivas futuras de médio e longo prazo são promissoras para o setor. A Agência Internacional de Energia (IEA, 2012b) elaborou cenário onde a estimativa de crescimento alcança 7,1% ao ano, de 2010 a 2050, enquanto o uso total de energia para esse fim cresça apenas 1,8%. Em 2050, aquecimento solar de água contará com 25% da energia usada e também aquecimento de ar terá uma parcela de 7%. Essa tendência pode ser observada na Figura 20.

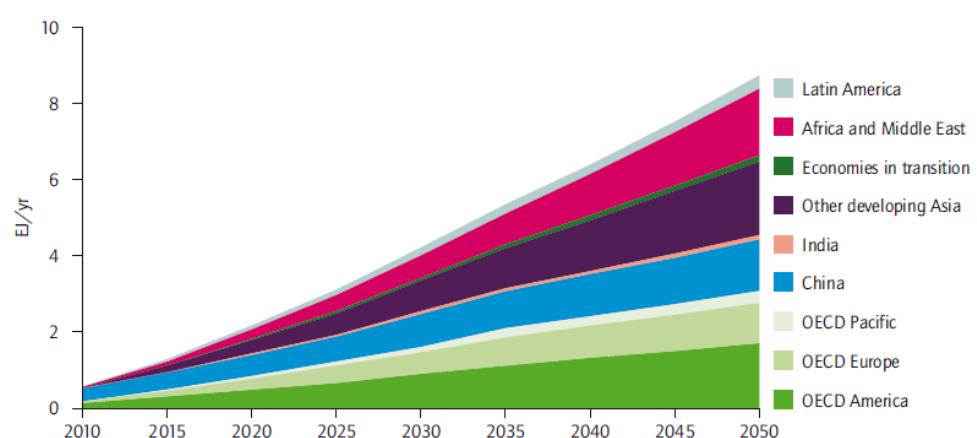


Figura 20 - Visão estimada da energia gerada por sistemas solares de aquecimento.

Fonte: IEA, 2012b.

2.2.3 Energia solar fotovoltaica

Outra aplicação comum é a geração de eletricidade pelas células fotovoltaicas. O princípio físico de funcionamento é o efeito fotovoltaico. Foi descoberto em 1887 por Heinrich Hertz e explicado em 1905 por Albert Einstein. A luz se comporta como uma partícula, o fóton, e sua energia depende da frequência da onda eletromagnética associada, ou seja, é igual a $h \times f$, onde h é a constante de Planck e f é a frequência da luz (HINRICH; KLEINBACH, 2003).

Materiais semicondutores, como o silício, caracterizam-se por ter bandas de energia de sua camada mais externa de elétrons da ordem de 1 elétron-Volt (eV). Essa propriedade possibilita que fótons na faixa do visível, com energia superior ao gap do material, excitem elétrons à banda de condução de células fotovoltaicas. Esse fenômeno por si só não é capaz de gerar energia em um semicondutor puro, dessa forma necessita-se preparar o material semicondutor, o que ocorre por um processo denominado dopagem (CRESESB, 1999).

O silício possui átomos que se caracterizam por ligar-se a quatro átomos vizinhos para formar a rede cristalina. Quando são introduzidos átomos diferentes como fósforo, com cinco elétrons de ligação, a rede é deformada, gerando excesso de elétron. Da mesma forma, a introdução de boro, com três elétrons de ligação, também deforma a rede cristalina por haver agora um elétron a menos. Essa falta de elétron gera uma lacuna. Um elétron vizinho a essa lacuna pode deslocar-se à sua posição, fazendo com que a lacuna se desloque. A adição desses dois elementos estranhos ao cristal de silício é o que constitui a dopagem, sendo o fósforo o dopante n e o boro o dopante p (CRESESB, 1999).

À temperatura ambiente praticamente todos os elétrons do reticulado cristalino têm energia suficiente para estarem livres. Com a dopagem p e n em lados diferentes de uma célula (dopagem pn), os elétrons livres se movimentam do lado negativo para o positivo a fim de compensar as cargas. Com o acúmulo das cargas opostas na fronteira entre os dois lados, o campo elétrico gerado torna-se uma barreira que impede a passagem de mais elétrons, atingindo equilíbrio. A Figura 21 mostra a variação do campo elétrico na direção perpendicular à junção pn (CRESESB, 1999).

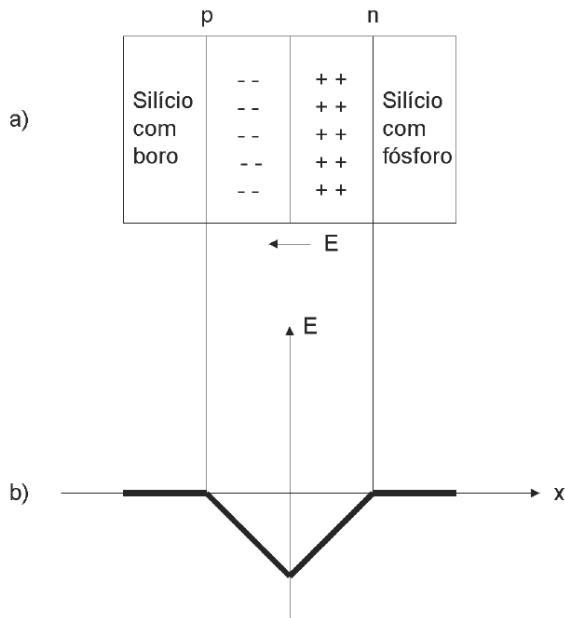


Figura 21 - (a) Junção pn ilustrando acúmulo de carga na fronteira. (b) Campo elétrico resultante do acúmulo de carga na fronteira.
Fonte: CRESESB, 1999.

Se a célula com a junção pn for exposta à luz, os fótons com energia superior ao gap removerão elétrons de seus lugares, formando novos pares elétron-lacuna. Se isso acontecer na região do campo elétrico, as cargas aceleradas geram potencial elétrico. Se a célula for conectada a um circuito haverá circulação de elétrons e corrente elétrica. Essa é a base do funcionamento de células fotovoltaicas (CRESESB, 1999).

Há limitações dessa tecnologia que contribuem para o baixo índice de eficiência das células atuais. Primeiro, apenas uma parte do espectro solar é capaz de excitar os elétrons. Esses fótons são aqueles com comprimento de onda inferior a aproximadamente 1 μm (ver Figura 22, para silício amorfo). Outro fator é que cada fóton excita apenas um elétron, se houver colisão. Logo os fótons que não excitarem elétrons, seja por ter energia superior ao gap, ou por não serem coletados na nuvem de elétrons, serão convertidos em calor. Portanto, as células de silício têm maior limite de eficiência teórico de 25% (CRESESB, 1999).

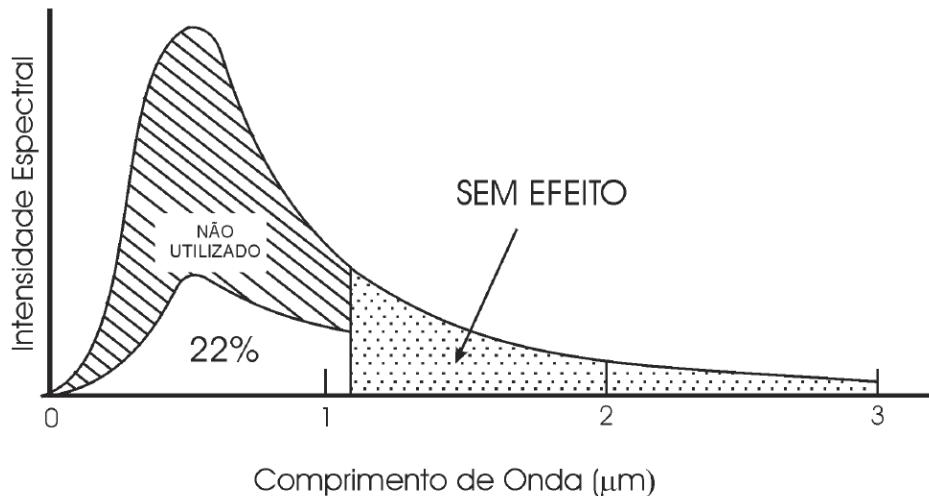


Figura 22 - Espectro da luz solar e seu efeito em células fotovoltaicas de silício amorfo.

Fonte: CRESESB, 1999.

Outros materiais além do silício são utilizados para fabricação de componentes fotovoltaicos. Eles incluem arseniato de gálio, telureto de cádmio, sulfeto de cádmio e biseleneto de cobre, índio e gálio. Essa nova tecnologia é fabricada em forma de filmes finos(HINRICHSH; KLEINBACH, 2003). A aposta do mercado nos filmes finos é o desenvolvimento do processo de fabricação para que o custo do equipamento seja mais baixo, já que sua eficiência é menor se comparada às células de silício .

As principais classificações dos tipos de sistemas fotovoltaicos são: sistemas isolados, híbridos e conectados à rede. Os sistemas obedecem a uma configuração básica onde o sistema deverá ter uma unidade de controle de potência e talvez uma unidade de armazenamento.

Sistemas isolados necessitam de armazenamento de energia, exceto em casos como irrigação, onde toda a água bombeada é diretamente consumida ou estocadas em reservatórios. Sistemas híbridos possuem mais de um tipo de fonte de geração para complementar à fonte solar. Algumas opções são geração eólica e geradores a diesel. Sistemas conectados à rede não utilizam armazenamento de energia, e toda a geração é entregue diretamente à rede, através de conexões com inversores. Estes inversores devem satisfazer as exigências de qualidade e segurança para que a rede não seja afetada (CRESESB, 2012). Figura 23, Figura 24 e Figura 25 mostram esquemas das configurações supracitadas.

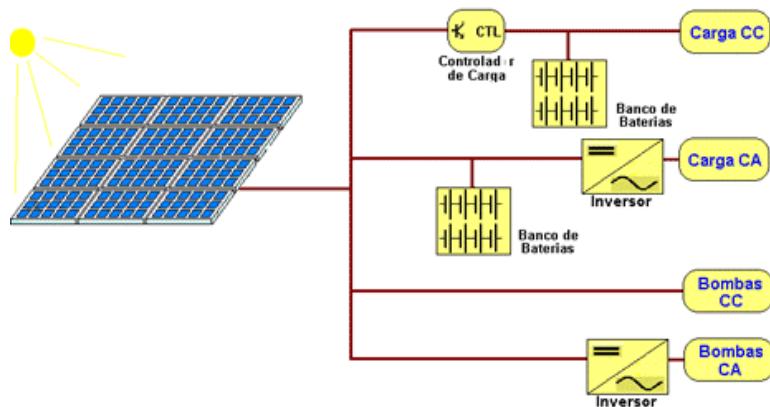


Figura 23 - Esquema de ligação de sistema isolado.
Fonte: CRESESB, 2012.



Figura 24 - Esquema de ligação de sistema híbrido.
Fonte: CRESESB, 2012.

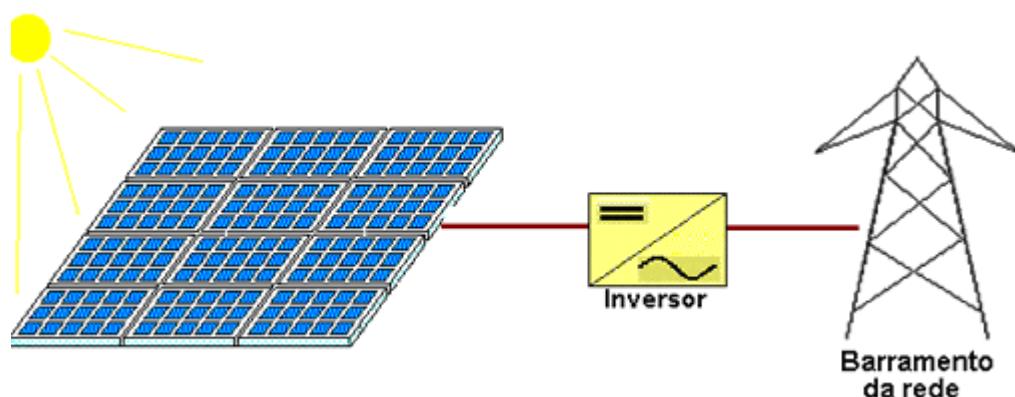


Figura 25 - Esquema de ligação de sistema conectado à rede.
Fonte: CRESESB, 2012.

De 2000 a 2010 a tecnologia solar fotovoltaica teve o mais rápido crescimento de mercado mundial entre as tecnologias de geração de energia. Estimativas sugerem que a capacidade instalada alcançou por volta de 40 GW no final de 2010,

frente aos 1,5 GW em 2000 (ver Figura 26). Pelo menos 17 GW foram instalados em 2010, sendo 7,4 GW somente na Alemanha. Baseado nos dados preliminares de 2010, a Alemanha mantém grande liderança no mercado. Itália e República Tcheca também tiveram crescimentos expressivos favorecidos por custos decrescentes. Os primeiros dados disponíveis de 2011 já sugerem a Itália como o novo maior mercado de tecnologias fotovoltaicas, superando a Alemanha, com capacidade instalada acima de 7 GW em 2011. Em 2009, último ano de dados completos, Alemanha, Espanha, Japão, Estados Unidos, Itália e Coréia do Sul somavam mais de 90% de toda capacidade acumulada (IEA, 2011d).

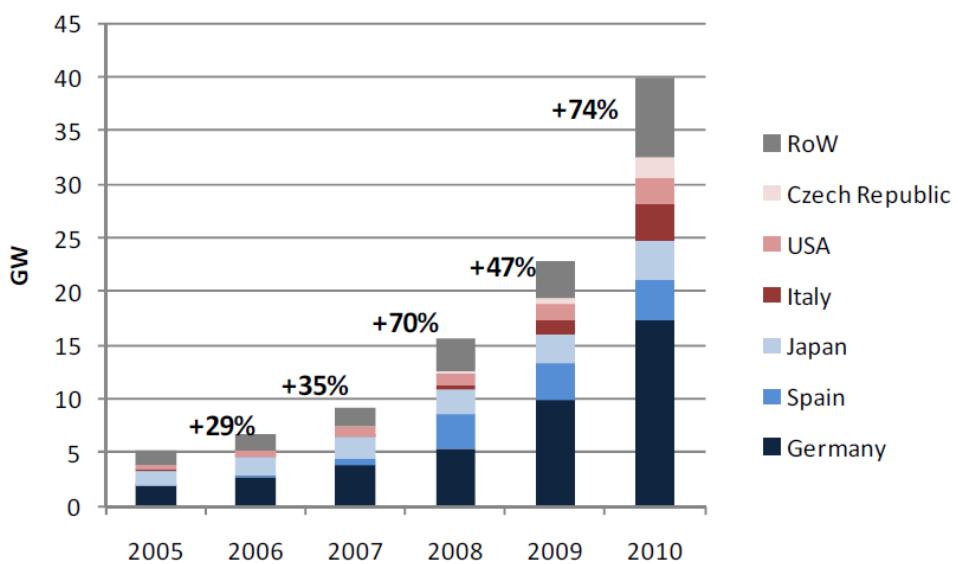


Figura 26 - Capacidade fotovoltaica instalada mundial, 2005 a 2010.

Fonte: IEA, 2011d.

Dependendo do nível de insolação, eletricidade de geração fotovoltaica é competitiva atualmente em muitas situações “off-grid” e locais remotos. Também está aproximando-se de ser competitiva com os preços praticados em mercados favoráveis, onde há alto grau de insolação e altos preços de pico da energia convencional. Entretanto em muitos mercados há diferenças entre os preços praticados e essa tecnologia emergente, dependendo essa de políticas de financiamento (IEA, 2011d).

Historicamente, os preços vêm caindo nas últimas três décadas, obtendo redução de custo de 19,3% para cada marca de dobro de capacidade instalada (Figura 27). É esperado que essa tendência continue dado o investimento em eficiência e melhorias de custo, assim como benefícios de economia de escala. Atualmente, os preços dos módulos encontrados no mercado internacional variam

de US\$ 1,80/W_p a US\$ 2,27/W_p para módulos cristalinos e US\$1,37/W_p a US\$1,65/W_p para filmes finos. Custos totais dos sistemas variavam, em junho de 2011, de US\$ 3000/kW_p a US\$5800/kW_p, para sistemas em telhados e de US\$2700/kW_p a US\$4100/kW_p para sistemas no solo (IEA, 2011d).

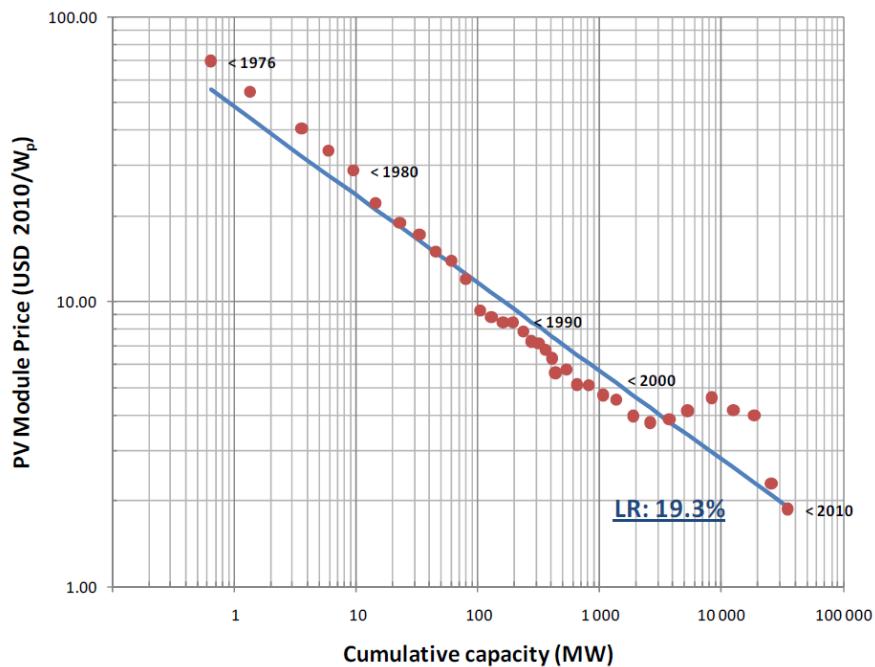


Figura 27 - Redução dos custos da tecnologia fotovoltaica, 1976 a 2010.
Fonte: IEA, 2011d.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

Antes de tudo, é preciso caracterizar o local onde se pretende fazer o estudo conceitual da viabilidade técnica dos sistemas de energia solar. O intuito não é fazer uma varredura detalhada de todos os parâmetros de uma instalação de grande porte, mas sim levantar os aspectos básicos do local, a fim de se ter ideia do porte e desempenho de geração local de energia útil.

Dessa forma não foram utilizados procedimentos detalhados ou medições precisas das variáveis de engenharia. Quis-se entender as necessidades locais, e com base nas informações disponíveis nos manuais de engenharia e institutos especializados, propõe-se um método de cálculo para satisfazer parcialmente as cargas energéticas da instituição beneficiada.

Para conhecer a instituição e o local pretendido para o projeto, foi feita uma visita técnica. A recepção foi feita por parte da responsável pela administração e com apoio dos profissionais especializados quando necessário. A ideia era percorrer os espaços de interesse e instalações da organização, com supervisão das pessoas condecoradoras dos detalhes. As informações foram coletadas por meios diferentes, como listados abaixo:

- Material informativo recebido;
- Entrevistas;
- Levantamento visual de informações;
- Projeto arquitetônico;
- Contas de energia elétrica

As entrevistas e material informativo recebido contribuíram para situar a organização em seu contexto social. Também foi possível saber aspectos básicos do funcionamento da associação, sua estrutura física e organizacional. Algumas informações pontuais, como temperatura da piscina e previsão de consumo de água quente, contribuíram para o dimensionamento do projeto.

Ao percorrer toda a área dos terrenos fez-se uma inspeção visual das áreas de interesse e possíveis interferências negativas ou positivas para a proposta. Fotografias foram tiradas das áreas para fins de esclarecimento e visualização

posterior. Também se fez um levantamento visual dos equipamentos que possam contribuir para o consumo energético da entidade.

Talvez uma das contribuições específicas mais importantes para o dimensionamento dos sistemas solares tenha sido o estudo do projeto arquitetônico das construções futuras. Esse projeto forneceu informações essenciais para os cálculos e sem eles dificilmente haveria confiabilidade nos resultados.

Existindo a possibilidade de parte da área destinada às superfícies coletoras ser sombreada, será seguido método de cálculo para determinar o melhor posicionamento das placas solares. Nesse caso, a área útil para aproveitamento direto do sistema solar pode ser calculada pelo método descrito na seção 1.9 de Duffie & Beckman (2006).

Em qualquer ponto no tempo e definida uma latitude, ϕ , δ e ω estão fixos. Pelas equações de geometria solar, o ângulo zenital θ_z ou o ângulo de altitude solar α_s e o ângulo de azimute solar γ_s podem ser calculados. Portanto, é possível plotar um gráfico de α_s versus γ_s . Linhas de declinação constante são marcadas pelas datas dos dias médios dos meses. Linhas de constante ângulos horários também são marcados em intervalos de horas completas. Esses gráficos podem ser encontrados no apêndice H de Duffie & Beckman (2006) e a Figura 28 mostra o exemplo para latitudes de mais ou menos 25, 20 e 15 graus. As posições angulares de construções, outros objetos e obstruções também podem ser plotadas no mesmo gráfico para comparação. As coordenadas angulares correspondentes à altitude angular e azimute angular do objeto, α_o e γ_o respectivamente, podem ser calculadas por considerações trigonométricas.

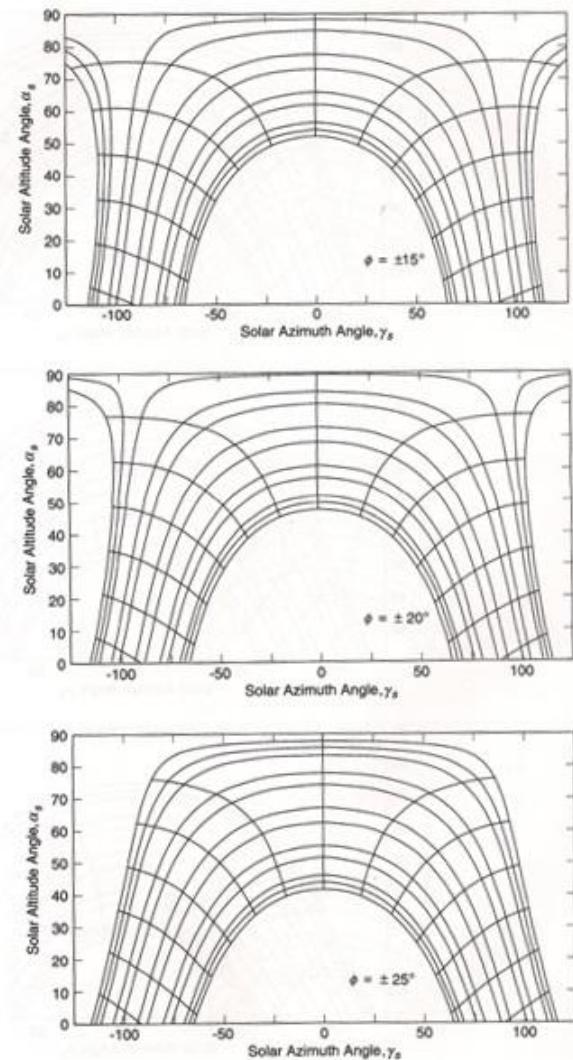


Figura 28 - Posições solares angulares para latitude de + ou - 25° , 20° e 15° .
Fonte: Duffie & Beckman, 2006.

3.2 LEVANTAMENTO DE CONSUMO ENERGÉTICO

O consumo energético da APAE que deverá ser suprido por energia solar segue três principais frentes: aquecimento de água para banhos, aquecimento de água para manter temperatura da piscina e energia elétrica da sede nova. Para poder estimar a quantidade de energia fornecida para suprir parte da demanda, este trabalho pretende seguir os métodos descritos.

3.2.1 Aquecimento de água para banhos

A demanda térmica total de energia é calculada como a energia requerida para levar a temperatura da situação de fornecimento da concessionária local,

chamada de temperatura de “água fria” ou T_f , à temperatura de consumo ou T_q . Portanto a energia necessária pode ser calculada por:

$$Q_{\text{dem}} = C_p \cdot \rho \cdot V_l \cdot (T_q - T_f) \quad (1)$$

onde V_l é a quantidade volumétrica de água em litros, C_p é a capacidade térmica da água (4200 (J/kg)/°C) e ρ é a densidade da água (1kg/L).

A quantidade de água quente utilizada é estimada pela norma NBR 15569 (ABNT, 2008). A Figura 29 mostra as faixas de utilização de água quente para cada peça sanitária. Para os banhos deste trabalho usar-se-ão os valores máximos aplicados.

Peças	Consumo mínimo	Consumo máximo	Ciclo diário (minuto/pessoa)	Temperatura de consumo °C
Ducha de banho	3,0 L/min	15,0 L/min	10	39 – 40
Lavatório	3,0 L/min	4,8 L/min	2	39 – 40
Ducha higiênica	3,0 L/min	4,8 L/min	2	39 – 40
Banheira	80 L	440 L	banho	39 – 40
Pia de cozinha	2,4 L/min	7,2 L/min	3	39 – 40
Lava-louças (12 pessoas)	20 L	20 L	ciclo de lavagem	39 – 50
Máquina de lavar roupa	90 L	200 L	ciclo de lavagem	39 – 40

Figura 29 - Consumo de pontos de utilização de água quente.

Fonte: ABNT, 2008

A última informação para esse cálculo refere-se à temperatura da água fria. Será admitida a temperatura da água igual à temperatura ambiente no local. Esses dados foram coletados do banco de dados climáticos do Brasil, mantido pela EMBRAPA¹. A Figura 30 mostra os dados para a cidade de Itu, que se mostrou a localidade mais próxima com resultados disponíveis.

¹ Disponível em: <http://www.bdclima.cnpm.embrapa.br/metodo.php>

Município: Itú - SP
Latitude: 23,36 S Longitude: 47,30 W Altitude: 650 m Período: 1953-1970

Mês	T (°C)	P (mm)	ETP	ARM (mm)	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC (mm)
Jan	24,4	219	125	100	125	0	94
Fev	24,6	206	116	100	116	0	90
Mar	24,0	142	115	100	115	0	27
Abr	21,7	66	82	85	81	1	0
Mai	19,3	58	60	83	60	0	0
Jun	17,9	46	47	82	47	0	0
Jul	17,7	40	47	77	45	1	0
Ago	19,3	44	59	66	55	4	0
Set	20,7	63	72	61	69	3	0
Out	22,0	144	91	100	91	0	13
Nov	22,9	107	103	100	103	0	4
Dez	23,6	196	118	100	118	0	78
TOTAIS	258,1	1.331	1.035	1.054	1.024	11	307
MÉDIAS	21,5	111	86	88	85	1	26

Figura 30 - Dados climáticos do município de Itu.

Fonte: EMBRAPA.

3.2.2 Aquecimento de água para piscina

A necessidade energética para uma piscina é estabelecida assumindo que o volume de água é mantido a uma temperatura fixa. Portanto, o modelo descrito a seguir não considera cálculos de armazenamento de energia pela piscina, nem tanto o aumento da temperatura desejada. O método escolhido é baseado no método utilizado pelo software RETScreen, do Ministério de Recursos Naturais do Canadá, para seus cálculos de previsão energética².

A energia requerida é calculada comparando as perdas de calor da piscina com os ganhos totais, como esquematiza a Figura 31. Perdas são devidas a evaporação, convecção, condução, radiação e adição de água de reposição. Os ganhos incluem ganhos solares passivos, ativos e ganhos por energia auxiliar. Na sequência os ganhos e perdas serão expressos como taxas, ou seja, por unidade de tempo. Para obter a energia mensal correspondente é feita a correção pela fórmula:

$$Q_{\text{mês}} = 86400 \cdot N_{\text{dias}} \cdot \dot{Q}_{\text{req}} \quad (2)$$

onde N_{dias} é o número de dias no mês e 86400 é o número de segundos em um dia.

² Disponível em: <http://www.retscreen.net/>

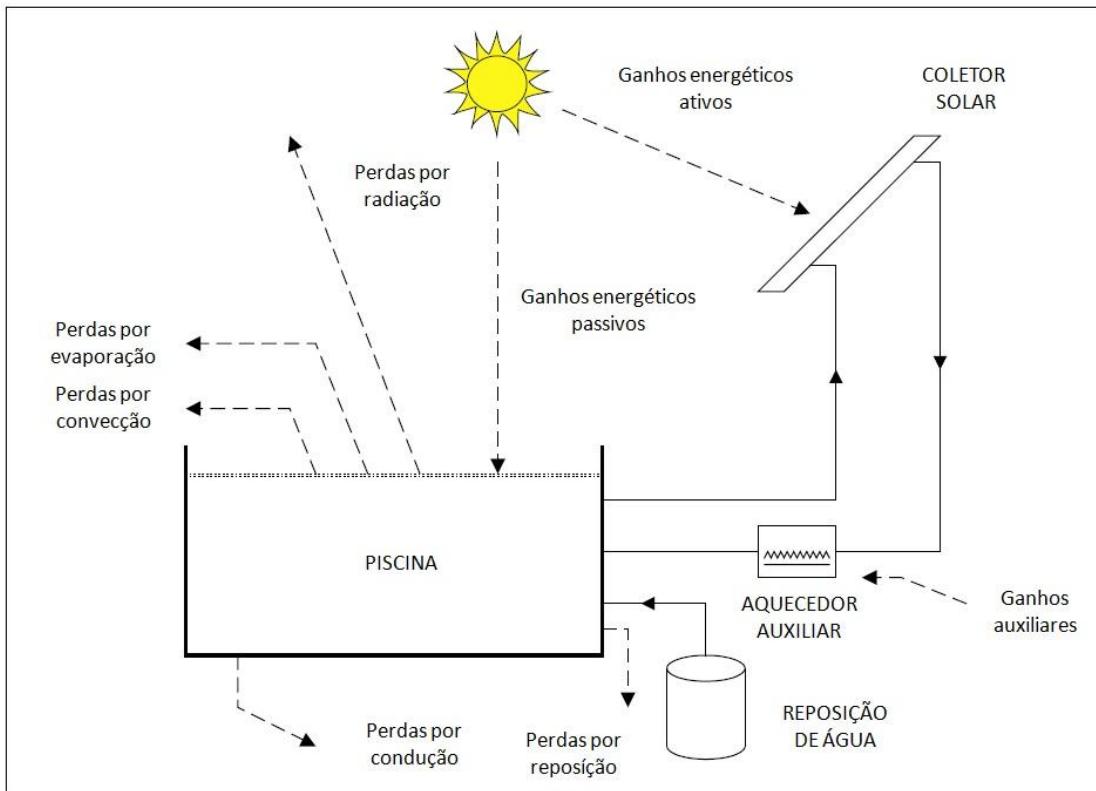


Figura 31 - Perdas e ganhos de energia de uma piscina.

A taxa de energia \dot{Q}_{req} requerida para manter a temperatura da água é dada como a soma de todas as perdas menos os ganhos passivos:

$$\dot{Q}_{req} = \max [\dot{Q}_{eva} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{reposit\ao} + \dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{pass}, 0] \quad (3)$$

Essa energia vem tanto do sistema solar quanto do auxiliar de aquecimento.

A taxa de energia realmente entregue pelo sistema solar, \dot{Q}_{sol} , é o mínimo entre a energia requerida e a energia entregue pelos coletores:

$$\dot{Q}_{sol} = \min [\dot{Q}_{req}, \dot{Q}_{ativo}] \quad (4)$$

Se a energia solar coletada é maior que a energia requerida pela piscina, então a temperatura da piscina será maior que o valor fixo desejado. Isso poderia significar menor necessidade de energia para o próximo mês. No entanto, isso não é contabilizado pelo modelo. A potência auxiliar, \dot{Q}_{aux} , que é preciso para suprir a eventual falta de energia, é a diferença entre a taxa necessária e a taxa entregue pelo sistema solar.

$$\dot{Q}_{aux} = \dot{Q}_{req} - \dot{Q}_{sol} \quad (5)$$

3.2.2.1 Condições climáticas

As condições climáticas no entorno da piscina dependem muito do fato de ser interna ou externa. No caso de piscinas internas, o modelo assume as seguintes condições:

- Umidade relativa: 60%;
- Velocidade do vento: 0,1 m/s;
- Temperatura do céu: computada a partir da temperatura ambiente.

3.2.2.2 Ganhos solares

Os ganhos energéticos solares podem vir de duas formas, passiva ou ativa. No caso em estudo, haverá cobertura sobre a piscina, portanto o ganho passivo é nulo nos cálculos. Já o ganho ativo, ou seja, proveniente do sistema de aquecimento solar, \dot{Q}_{ativo} , é determinado pelo método da utilizabilidade, assumindo que a temperatura da água é igual à temperatura desejada.

3.2.2.3 Perdas por evaporação

A perda de calor por evaporação é dada pela expressão (DUFFIE; BECKMAN, 2006):

$$\dot{Q}_{eva} = P[35V + 43(T_p - T_a)^{\frac{1}{3}}](\omega_p - \omega_a) \quad (6)$$

onde \dot{Q}_{eva} é a taxa (em W/m²) de energia dissipada como resultado da evaporação da água da piscina, V é a velocidade do vento em m/s, P é a pressão ambiente em kPa, ω_p é a umidade absoluta na temperatura da piscina e ω_a é a umidade absoluta na temperatura do ambiente acima da piscina. As umidades absolutas são dadas por (SIMÕES MOREIRA, 1999):

$$\omega = 0,62198 \frac{P}{P - P_v} \quad (7)$$

$$P_v = \phi \cdot P_{vs} \quad (8)$$

onde P_v é a pressão do vapor na mistura de ar, ϕ é a umidade relativa e P_{vs} é a pressão parcial de vapor em saturação, cujos valores são encontrados em tabelas de propriedades termodinâmicas. Foi usada a tabela disponível em Simões Moreira (1999).

A taxa de evaporação da água, \dot{m}_{eva} , em kg/s, é relacionada a \dot{Q}_{eva} por:

$$\dot{m}_{eva} = \frac{\dot{Q}_{eva}}{\lambda} \quad (9)$$

onde λ é o calor latente de vaporização (2454 kJ/kg).

Quando há cobertura do tipo manta sobre a piscina, é assumido que 90% da evaporação é evitada. Quando a cobertura é removida, perdas são multiplicadas por dois, pois é considerada a atividade das pessoas na água.

3.2.2.4 Perdas por convecção

As perdas por convecção, \dot{Q}_{con} , são estimadas pela equação:

$$\dot{Q}_{con} = A_p h_{con} (T_p - T_a) \quad (10)$$

onde \dot{Q}_{con} é dada em W, T_p é a temperatura da água da piscina, T_a a temperatura ambiente e h_{con} é o coeficiente convectivo de transferência de calor, expresso por:

$$h_{con} = 3,1 + 4,1V \quad (11)$$

3.2.2.5 Perdas por radiação

Perda por radiação para o ambiente na ausência de manta, $\dot{Q}_{rad,sem}$ (em W), é expressa por:

$$\dot{Q}_{rad,sem} = A_p \varepsilon_a \sigma (T_p^4 - T_{céu}^4) \quad (12)$$

onde ε_a é a emitância da água no infravermelho (0,96), σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,669 \times 10^{-8} (\text{W/m}^2)/\text{K}^4$), $T_{céu}$ é a temperatura do céu. Na presença de uma manta, assumindo 90% de cobertura, perdas por radiação se tornam:

$$\dot{Q}_{rad,manta} = A_p (0,1 \varepsilon_a + 0,9 \varepsilon_{manta}) \sigma (T_p^4 - T_{céu}^4) \quad (13)$$

onde ε_{manta} é a emissividade da manta (utilizado o valor médio de 0,4). Combinando a Eq 12 e Eq 13 com a quantidade de tempo que a piscina está coberta com a manta, a expressão resultante para as perdas por radiação é:

$$\dot{Q}_{rad} = A_p (0,96 N_{manta} + 0,456 (24 - N_{manta})) \sigma (T_p^4 - T_{céu}^4) \quad (14)$$

3.2.2.6 Perdas por reposição de água

Água nova é adicionada à piscina para compensar perdas por evaporação, água perdida por causa da atividade dos usuários e trocas voluntárias de água. Considerando que $f_{restituição}$ é a fração de água repostada pelo usuário, sem considerar a evaporação, expressa como a fração do volume da piscina renovada a cada semana, a taxa de água de reposição, em kg/s, pode ser expressa por:

$$\dot{m}_{restituição} = \dot{m}_{eva} + f_{restituição} \frac{\rho V_p}{7 \times 86400} \quad (15)$$

onde V_p é o volume útil da piscina. A taxa de energia usada no aquecimento de água nova, $\dot{Q}_{reposição}$, é:

$$\dot{Q}_{reposição} = \dot{m}_{reposição} C_p (T_p - T_f) \quad (16)$$

3.2.2.7 Perdas por condução

As perdas por condução são geralmente pequenas se comparadas às outras. Este método considera que seu valor é igual a 5% do total dos outros tipos de perdas:

$$\dot{Q}_{cond} = 0,05(\dot{Q}_{eva} + \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} + \dot{Q}_{reposição}) \quad (17)$$

3.2.3 Energia elétrica

Diferentemente dos outros consumos de energia, o elétrico não segue nenhum método específico. A ideia da geração fotovoltaica será suprir as cargas internas e exportar o restante para a rede elétrica. No caso de não haver geração, ou a geração ser insuficiente, a eletricidade faltante será importada da rede. Dessa forma, o arranjo proposto será do tipo conectado à rede.

A ordem de grandeza da potência máxima fornecida pelo painel fotovoltaico foi determinada através dos documentos de cobrança da concessionária de energia elétrica. Calculou-se a média de consumo, em kWh, dos últimos doze meses. Esse valor foi utilizado como a geração mensal pretendida de energia elétrica pela fonte solar fotovoltaica.

3.3 DISPONIBILIDADE SOLAR

A utilização de energia solar requer uma série de equipamentos que, juntos, formam um sistema com função específica. Porém, a simples instalação de tais

equipamentos não garante o bom funcionamento geral. É preciso que se conheça a natureza científica que rege a engenharia solar.

Dessa forma, a fim de facilitar o entendimento dos métodos explicados à diante, faz-se necessário abordar alguns tópicos básicos sobre energia solar. Não é propósito deste trabalho aprofundar os conhecimentos sobre o assunto, mas sim entender os conceitos que fundamentam as metodologias adotadas. O leitor que tiver interesse em conhecer melhor a engenharia solar pode consultar os textos de Reddy (1987), Duffie & Beckman (2006), e outros autores.

3.3.1 Geometria solar

No item 2.2.1 foram introduzidos alguns conceitos e variáveis geométricas importantes na geometria solar. O comportamento espacial do Sol, em relação a um referencial na Terra, é periodicamente equivalente e bastante conhecido.

As expressões e variáveis apresentadas a seguir foram utilizadas para cálculo do sistema proposto no trabalho.

Declinação

A declinação é a posição do Sol ao meio dia solar, em relação ao plano do equador. Seu valor de graus é dado por:

$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left(360 \frac{284+n}{365} \right) \quad (18)$$

onde n é o dia do ano. A declinação varia de $-23,45^\circ$ em 21 de dezembro e $+23,45^\circ$ em 21 de junho.

Ângulo horário solar e ângulo horário solar de pôr-do-sol

O ângulo horário solar é a posição angular do Sol no meridiano local, na trajetória leste-oeste. Sendo o período da manhã negativo, tarde positivo e zero ao meio dia solar. A variação é de 15° por hora.

O ângulo horário solar de pôr-do-sol corresponde ao ângulo do momento em que o Sol se põe. É dado pela expressão:

$$\cos\omega_s = -\tan\phi \cdot \tan\delta \quad (19)$$

onde δ é a declinação e ϕ é a latitude do lugar.

Radiação extraterrestre e índice de claridade

A radiação solar fora da atmosfera terrestre é chamada de radiação extraterrestre. O valor dessa radiação diária em relação a uma superfície horizontal é dado pela expressão:

$$H_0 = \frac{24 \times 3600 G_{sc}}{\pi} \cdot \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \cdot \left(\cos\phi \cos\delta \sin\omega_s + \frac{\pi\omega_s}{180} \sin\phi \sin\delta \right) \quad (20)$$

onde G_{sc} é a constante solar e vale 1367 W/m^2 , ω_s deve ser inserido em graus.

Antes de alcançar a superfície da Terra, a radiação solar é atenuada pela atmosfera. A quantidade de radiação que atinge a superfície, em relação ao total extraterrestre é medido por uma relação proporcional chamada de índice de claridade, definido por:

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (21)$$

onde \bar{H} é a radiação solar diária média mensal em uma superfície horizontal e \bar{H}_0 é a radiação extraterrestre diária média mensal em uma superfície horizontal. \bar{K}_T depende da localização e época do ano.

3.3.2 Radiação média mensal em plano inclinado

A radiação solar no plano do coletor é necessária para obter a eficiência do coletor e também a quantidade real de energia coletada. Este trabalho utilizará a

expressão de Liu e Jordan (DUFFIE; BECKMAN, 2006) para calcular a média mensal de radiação no plano do coletor:

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \rho_g \left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \quad (22)$$

A primeira parcela da equação corresponde à radiação direta do Sol, cujo valor se dá pelo produto da média mensal da radiação direta diária $\bar{H}_b = (1 - \bar{H}_d)$ e o fator geométrico proporcional \bar{R}_b , que depende da orientação do coletor, latitude e época do ano. A segunda parcela é a contribuição da média mensal de radiação difusa diária \bar{H}_d , que depende da inclinação do coletor. Por fim, a última parcela representa a radiação obtida pela reflexão do solo, e depende da inclinação do coletor e da refletividade do solo ρ_g . Esse último valor é assumido como 0,2 quando a temperatura média do mês é superior a 0°C e 0,7 quando a temperatura é menor que -5°C; os valores intermediários variam linearmente com as temperaturas.

Para superfícies no hemisfério sul, inclinadas em direção ao equador, ou seja, $(\gamma) = 180^\circ$:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi+\beta)\cos\delta \sin\omega'_s + \left(\frac{\pi}{180}\right)\omega'_s \sin(\phi+\beta)\sin\delta}{\cos\phi\cos\delta \sin\omega_s + \left(\frac{\pi}{180}\right)\omega_s \sin\phi \sin\delta} \quad (23)$$

e

$$\omega'_s = \min \left[\frac{\cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta)}{\cos^{-1}(-\tan(\phi + \beta) \tan\delta)} \right] \quad (24)$$

onde ω'_s é o ângulo horário de pôr-do-sol para superfícies inclinadas para o dia médio do mês.

A média mensal da radiação difusa diária é calculada em relação à radiação global pela formula:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,391 - 3,560\bar{K}_T + 4,189\bar{K}_T^2 - 2,137\bar{K}_T^3 \quad (25)$$

para $\omega_s < 81,4^\circ$, e

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022\bar{K}_T + 3,427\bar{K}_T^2 - 1,821\bar{K}_T^3 \quad (26)$$

para $\omega_s > 81,4^\circ$.

3.3.3 Radiação horária em plano inclinado

Para obter a radiação diária em plano inclinado será feita a seguinte sequência de cálculos:

- Obtenção da radiação horária global e difusa em superfície horizontal para todas as horas de um dia típico, ou seja, com a mesma radiação diária global que a média do mês;
- Obter os valores horários de radiação global na superfície inclinada para todas as horas do dia;
- Obter a somatória dos valores horários que corresponde à média diária no plano inclinado.

Assim sendo, considera-se a radiação direta e difusa incidente e suas parcelas na distribuição horária de um dia típico. Primeiro, obtém-se a média mensal diária de radiação difusa (\bar{H}_d) usando a Eq 25, quando o ângulo horário do pôr-do-sol é menor que $81,4^\circ$ e a Eq 26 quando esse ângulo é maior que $81,4^\circ$. O índice de claridade (\bar{K}_T) é calculado pela Eq 21.

A seguir, a média diária de radiação é dividida em valores horários. Isso é feito pelas equações (DUFFIE; BECKMAN, 2006):

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos\omega) \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \frac{\pi\omega_s}{180} \cos\omega_s} \quad (27)$$

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (28)$$

$$b = 0,6609 + 0,4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (29)$$

onde r_t é a fração entre a radiação horária total e a radiação diária global, ω_s é expresso em graus e ω é o ângulo horário solar do ponto médio da hora em consideração, expresso em graus. Já a parcela difusa é calculada pela expressão:

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \frac{\pi\omega_s}{180} \cos\omega_s} \quad (30)$$

onde r_d é a fração entre a radiação difusa horária total e a radiação difusa diária global. Para cada hora do dia típico, a radiação global horizontal, I , e suas componentes difusa, I_d , e direta, I_b , são calculadas por:

$$I = r_t \bar{H} \quad (31)$$

$$I_d = r_d \bar{H}_d \quad (32)$$

$$I_b = I - I_d \quad (33)$$

Por fim, o cálculo da radiação horária no plano inclinado é feito pelo modelo isotrópico descrito por Duffie & Beckman (2006):

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right) + I \rho_g \left(\frac{1-\cos\beta}{2} \right) \quad (34)$$

onde ρ_g é a reflectância do solo, ou albedo, como descrito anteriormente.

R_b é a fração entre a radiação direta sobre superfície inclinada e aquela sobre superfície horizontal, e pode ser calculada por:

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_z} \quad (35)$$

onde θ é o ângulo de incidência da radiação direta sobre a superfície inclinada e θ_z o ângulo zenital do Sol.

3.3.4 Temperatura de água fria

A temperatura da água fria fornecida pela concessionária local é necessária para poder calcular a quantidade de energia entregue pelo sistema para obter água quente à temperatura desejada. Neste trabalho, a temperatura da água fria é computada diretamente assumindo seu valor igual ao da temperatura ambiente.

3.3.5 Dados reais de radiação no plano horizontal e inclinado

Embora a intensidade da radiação solar fora da atmosfera possa ser determinada precisamente através de medidas diretas, sua disponibilidade na superfície terrestre depende das condições climáticas locais, causando certo grau de incertezas. A melhor maneira de determinar a radiação solar no nível da superfície é medi-la localmente. Nem sempre isso é viável, seja por custo e tempo envolvidos, seja por instalar sistemas de captação, armazenamento e transferência dos dados. Há muitas estações de medição espalhadas pelo mundo cujos dados meteorológicos recolhidos incluem duração e potência da insolação, conteúdo de poeira e vapor de água na atmosfera e temperatura do ar. Já que essas estações operam há um longo tempo, os dados gerados são vastos e confiáveis. Por isso é conveniente usar correlações estatísticas, que apesar de serem simples podem não ser sempre precisas. Assume-se que tais fórmulas empíricas obtidas de dados detalhados medidos em relativas poucas localidades podem ser aplicadas em outros lugares onde menos dados são disponíveis. No entanto as correlações são constantemente revisadas sob base de dados crescente de radiação, sendo necessário aos cientistas e engenheiros de energia solar manterem-se atualizados com frequentes revisões da literatura (REDDY, 1987).

Os dados de potencial energético solar adotados neste trabalho foram obtidos do programa SunData, disponível na página eletrônica do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB, 2012). Conforme definição da instituição: “o programa SunData é baseado no banco de dados CENSOLAR (1993) contendo valores de irradiação diária média mensal no plano horizontal para cerca de 350 pontos no Brasil e em países limítrofes”.

Conforme instruções encontradas na própria página, introduziu-se as coordenadas geográficas do endereço do local do projeto. As coordenadas foram obtidas no aplicativo on-line “Google Earth”³. O programa fornece os dados de 3 localidades próximas, no mínimo, indicando valores de insolação, em kWh/m².dia no plano horizontal. Esses valores correspondem às médias mensais de radiação diária em todos os meses do ano.

³ <https://maps.google.com.br/>

Além do plano horizontal, o aplicativo também fornece dados de inclinações diferentes de zero. No caso, são dados os valores de radiação nos planos:

- de ângulo igual à latitude;
- do ângulo que fornece o maior valor médio diário anual de irradiação solar;
- do ângulo que fornece o maior valor mínimo diário anual de irradiação solar.

Esses valores são importantes para um sistema do tipo fotovoltaico. De acordo com o CRESESB, como descrito na mesma página,

O ângulo igual à latitude é um inclinação padrão, usada normalmente para locais onde são desenvolvidas atividades de caráter permanente como residências e postos de saúde. O ângulo com o maior valor médio diário anual de irradiação solar costuma ser usada quando se deseja maximizar a geração anual de energia, com o objetivo de maximizar a produtividade anual do sistema fotovoltaico. E por fim, o ângulo com maior valor mínimo diário anual de irradiação solar costuma ser uma medida conservadora, usado em situações onde o fornecimento contínuo de energia elétrica é crítico para atividade fim e por isso procura-se minimizar o risco de falta de energia, aumentando a dimensão do sistema geração fotovoltaica quando comparada ao ângulo de inclinação com a maior média anual.

3.4 DIMENSIONAMENTO SISTEMA FOTOVOLTAICO

O dimensionamento do sistema fotovoltaico, para fim de estudo conceitual, não é demasiadamente detalhado. O objetivo aqui não é projetar os dispositivos e componentes que compõem um sistema completo, e sim avaliar o potencial de substituição de energia comprada por energia autogerada. Além disso, pretende-se avaliar quanto de área deverá ser utilizada para tal fim. O processo de cálculo seguido é mostrado na Figura 32.

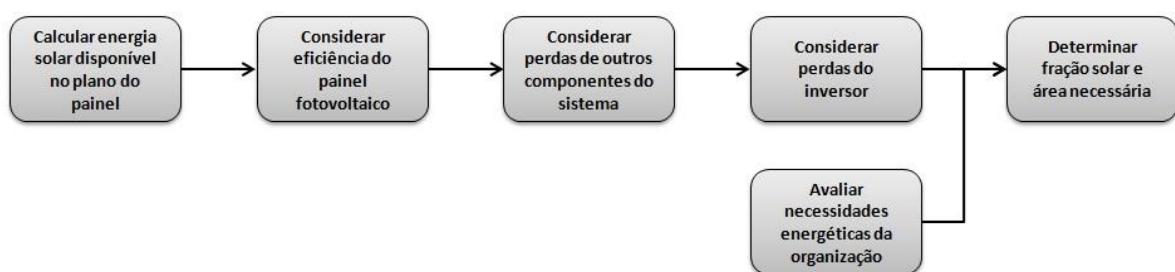


Figura 32 - Procedimento de cálculos do projeto conceitual do sistema fotovoltaico.

A energia solar disponível no plano do painel é obtida pelas expressões contidas na seção 3.3.3. Esse valor é uma das informações de entrada do procedimento da Figura 32.

O painel é caracterizado por sua eficiência média, η_p , que tem relação com a temperatura média do módulo em operação. Sua expressão é:

$$\eta_p = \eta_r [1 - \beta_p (T_c - T_r)] \quad (36)$$

onde η_r é a eficiência do módulo fotovoltaico à temperatura de referência T_r e β_p é o coeficiente de temperatura para eficiência do módulo. T_c é relacionado com a temperatura média ambiente, T_a , através da expressão:

$$T_c - T_a = (219 + 832 \bar{K}_T) \frac{NOCT - 20}{800} \quad (37)$$

onde NOCT é a temperatura nominal de operação da célula e \bar{K}_T o índice de claridade mensal. η_r , NOCT e β_p são dados obtidos dos fabricantes. A equação acima só é válida quando a inclinação do painel é o ângulo ótimo, igual à latitude menos a declinação. Se o ângulo é diferente, o lado direito da equação (37) deve ser corrigido pelo fator C_f :

$$C_f = 1 - 1,17 \times 10^{-4} (s_M - s)^2 \quad (38)$$

onde s_M é o ângulo ótimo e s é o ângulo real, ambos em graus. A energia entregue pelo sistema fotovoltaico, E_f , é obtida por:

$$E_f = \eta_p \bar{H}_T \quad (39)$$

com E_f em kWh/m². Essa quantidade de energia deve ser diminuída pelos efeitos de perda dos outros componentes, sendo λ_i a perda dos i componentes:

$$E_A = E_f (1 - \lambda_1) (1 - \lambda_2) (1 - \lambda_3) \dots (1 - \lambda_n) \quad (40)$$

e E_A é a energia disponível para as cargas, se forem de corrente contínua, ou para o inversor, caso haja cargas em corrente alternada ou envio à rede.

Em casos onde o sistema está conectado à rede, não há obrigatoriedade de especificar carga definida, já que se imagina que a rede pode suprir a falta de energia, assim como pode absorver o excesso. Para isso há necessidade de se colocar um inversor entre o painel e a rede elétrica. Sugere-se que o inversor tenha a mesma capacidade nominal do arranjo, pelo menos. Assim, a energia disponível após o inversor é:

$$E_{\text{disp}} = E_A \eta_{\text{inv}} \quad (41)$$

onde η_{inv} é a eficiência do inversor e E_{disp} é dada em kWh/m².

Como último passo, tendo o valor de E_{disp} e a previsão de necessidade de geração obtida na seção 3.2.3, é possível determinar a área útil a dispor para autogeração de energia elétrica. Esse dado final foi comparado com as áreas disponíveis no levantamento de campo para avaliar a viabilidade de instalação de um sistema fotovoltaico.

3.5 DIMENSIONAMENTO SISTEMA TÉRMICO

Na concepção de um sistema solar é necessário saber a dimensão básica de seus componentes, assim como qual será seu impacto na geração local de energia útil. Para isso é inviável montar um sistema inteiro para descobrir, na base da tentativa e erro, se esse sistema é adequado. A forma mais indicada de se obter informações confiáveis preliminares é através de simulações ou métodos de dimensionamento.

Simulações numéricas são soluções de modelos matemáticos que buscam prever o comportamento de um sistema solar, baseados em equações matemáticas de processos térmicos. Isso pode ser feito tanto numericamente, com auxílio de computadores, como analiticamente, para casos mais simples. Apesar de haver instituições e grupos de trabalhos promovendo a popularização de softwares de simulação, os custos de licenças e treinamentos, além de disponibilidade de tempo

dos profissionais, impactam nos custos finais de projetos baseados em simulações. Para o caso de sistemas menores e mais simples, como é o caso dos residenciais, simulações mais complexas não se justificam, pois a escala do projeto não consegue absorver os custos de uma engenharia mais detalhada. Portanto, existem métodos de dimensionamento desenvolvidos para facilitar a concepção nessa escala.

Ao pesquisar na literatura especializada, inúmeros métodos são propostos por diversos autores, das mais variadas épocas e locais. Apesar de muitos casos terem sua validade confirmada por testes, a escolha deve ser feita com cuidado, pois variações de localidade pelo mundo podem influenciar os resultados reais de uma instalação.

Há algumas aplicações cuja experiência prática foi adquirida a ponto de poder padronizar configurações. É o caso do aquecimento de interiores e água sanitária. Consequentemente, procedimentos de dimensionamento foram desenvolvidos, o que nada mais são que correlações algébricas deduzidas de inúmeras simulações computacionais, a partir de configurações de sistemas térmicos específicas, calculadas em vasto conjunto de variáveis e parâmetros.

3.5.1 Método f-chart

Este trabalho utilizará, para fins de cálculos do sistema de aquecimento de água sanitária, o método f-Chart, descrito por Reddy (1987), Duffie & Beckman (2006) e ASHRAE (2007). Esse método foi desenvolvido no Laboratório de Energia Solar da Universidade de Wisconsin em Madison, EUA.

O método proporciona estimar a fração da carga térmica total de aquecimento que pode ser fornecida pelo sistema solar, seja o fluido de trabalho água ou ar, dadas as características de um projeto e condições ambientais locais. Para isso, espera-se que o sistema seja comum para aplicações residenciais e que a temperatura mínima de entrega solar seja por volta de 20°C.

As variáveis importantes para os cálculos incluem áreas de coletores, como valores primários, e tipo de coletores, capacidade de armazenamento, taxas de fluxo mássico, carga térmica a ser suprida e tamanhos dos trocadores de calor, como dados secundários.

Centenas de experimentos numéricos, em forma de simulações, produziram uma série de resultados. Esses são empiricamente correlacionados a um valor de fração de carga térmica de aquecimento mensal, para interiores e água sanitária, suprida por energia solar. A fração, cujo símbolo “f” dá o nome à metodologia, é função de duas variáveis adimensionais, X e Y. A primeira é relacionada à razão entre as perdas do coletor e as cargas térmicas. A segunda refere-se à razão entre a radiação solar absorvida e a carga térmica.

Os possíveis sistemas padrões aplicáveis são três, a saber:

- sistema a líquido, para aquecimento de interiores e água quente (1);
- sistema a ar, para aquecimento de interiores e água quente (2);
- sistema apenas para aquecimento de água (3);

A Figura 33 e a Figura 34 mostram o diagrama esquemático para os padrões 1 e 2, respectivamente. Este trabalho, dadas as características do projeto que se pretende estudar, abordará o padrão 3, cujo esquema é mostrado na Figura 35. O coletor pode trabalhar tanto com ar como com água. Energia é transferida ao tanque de pré-aquecimento via trocador de calor. Esse primeiro tanque fornece água quente aquecida por energia solar a um tanque de aquecimento convencional ou outro método de aquecimento de passagem. Nesse ponto a água é aquecida à temperatura desejada, caso seja necessário.

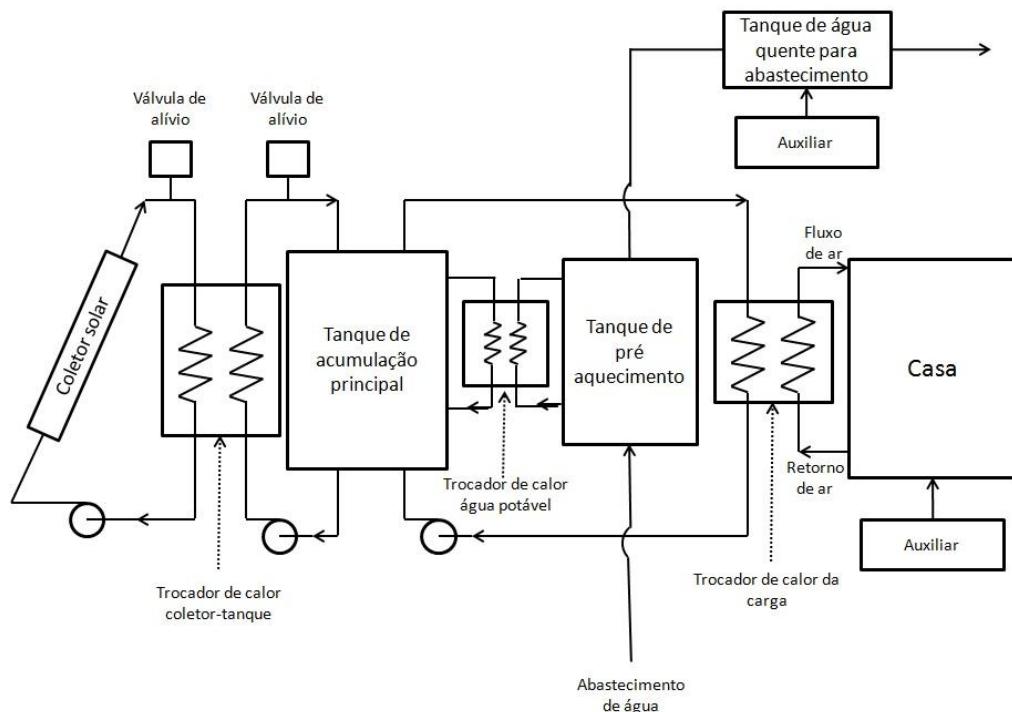


Figura 33 - Esquema de sistema padrão a líquido, com armazenamento.
Fonte: DUFFIE; BECKMAN, 2006.

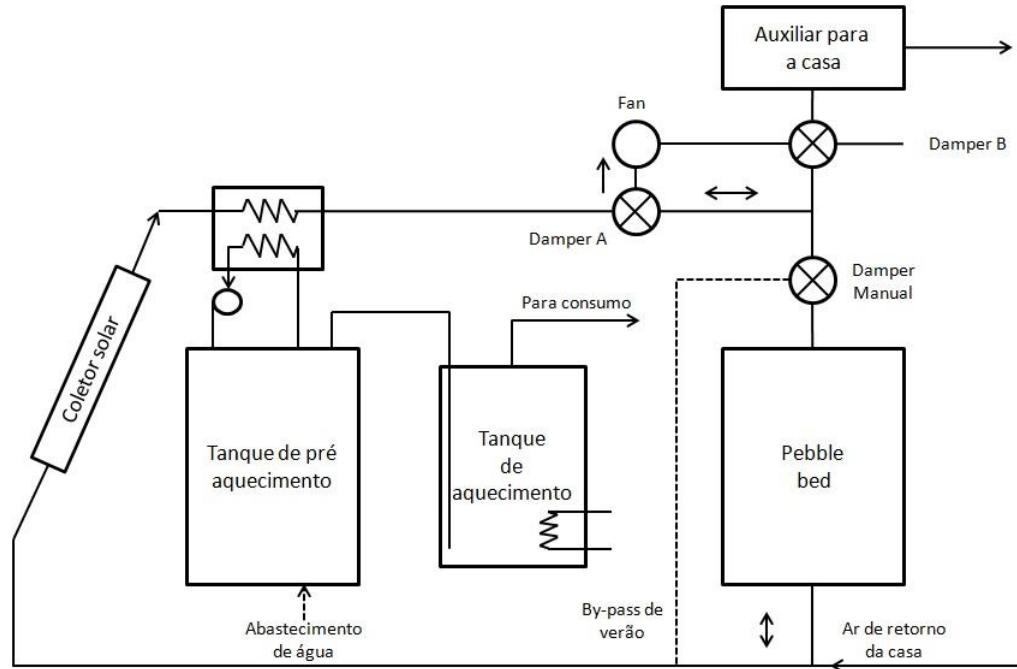


Figura 34 - Esquema de sistema padrão a ar.
Fonte: DUFFIE; BECKMAN, 2006.

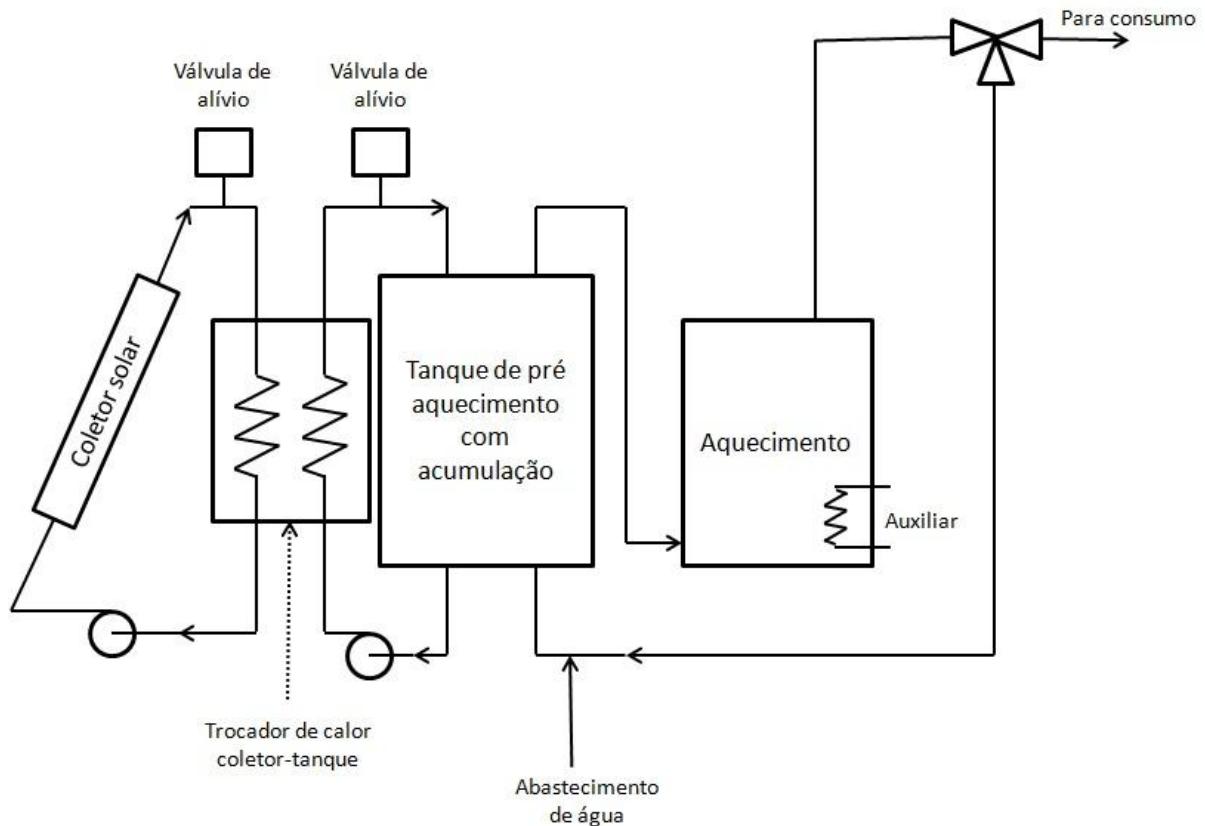


Figura 35 - Esquema de sistema padrão de apenas aquecimento de água.
Fonte: DUFFIE; BECKMAN, 2006.

Quanto ao dimensionamento matemático, as expressões de X e Y são:

$$X = \frac{A_c F'_R U_L (T_{ref} - \bar{T}_a) \Delta t}{L} \quad (42)$$

$$Y = \frac{A_c F'_R (\bar{\tau} \bar{\alpha}) \bar{H}_T N}{L} \quad (43)$$

onde:

A_c = área do coletor (m^2);

F'_R = fator de eficiência de troca de calor do coletor;

U_L = coeficiente de perdas térmicas globais do coletor ($W/m^2 \text{ } ^\circ\text{C}$);

Δt = número total de segundos no ano;

\bar{T}_a = média mensal da temperatura ambiente ($^\circ\text{C}$);

T_{ref} = temperatura de referência empírica ($100 \text{ } ^\circ\text{C}$);

L = carga térmica total mensal para aquecimento de interiores ou água quente (J);

\bar{H}_T = média mensal de radiação diária incidente na superfície por unidade de área (J/m^2);

N = número de dias no mês

$(\bar{\tau} \bar{\alpha})$ = média mensal do produto transmitânci-absorbtânci

As equações (42) e (43) podem ser reescritas da seguinte maneira:

$$X = F_R U_L \cdot \frac{F'_R}{F_R} \cdot (T_{ref} - \bar{T}_a) \cdot \Delta t \cdot \frac{A_c}{L} \quad (44)$$

$$Y = F_R (\tau \alpha)_n \cdot \frac{F'_R}{F_R} \cdot \frac{(\bar{\tau} \bar{\alpha})}{(\tau \alpha)_n} \cdot \bar{H}_T N \cdot \frac{A_c}{L} \quad (45)$$

onde:

$F_R U_L$ e $F_R (\tau \alpha)_n$ são obtidos de testes padrões de coletores solares; $\frac{F'_R}{F_R}$ corrige a queda de variação de temperatura entre os coletores e o tanque de pré-aquecimento; $\frac{(\bar{\tau} \bar{\alpha})}{(\tau \alpha)_n}$ é a relação entre o produto transmitânci-absorbtânci da radiação solar no coletor e uma situação de incidência normal à superfície do coletor. Sugere-se que o valor para coletores com cobertura única, voltados ao

equador, inclinados a um ângulo aproximadamente igual à latitude mais 15º, seja 0,96. No caso de coletores com cobertura dupla, o valor deve ser 0,94 (DUFFIE; BECKMAN, 2006);

A temperatura média do ar ambiente pode ser obtida de registros meteorológicos do local para as médias mensais. A média mensal de radiação diária incidente na superfície do coletor pode ser obtida de acordo com o descrito na seção 3.3. Para a obtenção da carga térmica L não é necessário seguir nenhum método específico para atender aos requerimentos do f-Chart. Dessa forma, para calcular os adimensionais da metodologia, as informações estão disponíveis em fontes oficiais e dados de entrada do projeto, não sendo de forma impeditiva obter tais informações. Isso caracteriza a simplicidade e facilidade do método f-Chart.

A fração f da energia solar suprida ao sistema é dada na expressão da equação (46), cujas variáveis são os parâmetros X e Y calculados anteriormente. Essa expressão também fornece os gráficos de f mostrados na Figura 36. Caso os valores dos parâmetros estejam fora dos limites das curvas da figura, ou seja, $0 \leq X \leq 15$ e $0 \leq Y \leq 3$, a equação (46) não deve ser usada. Se isso acontecer, pode-se se extrapolar o gráfico com resultados satisfatórios.

$$f = 1,029Y - 0,065X - 0,245Y^2 + 0,0018X^2 + 0,0215Y^3 \quad (46)$$

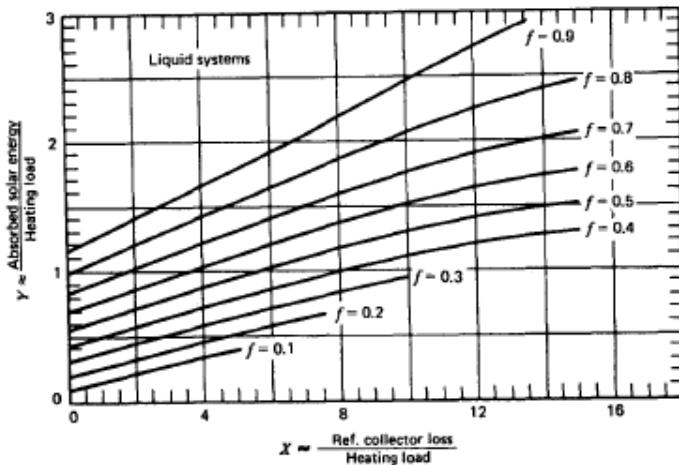


Figura 36 - Gráfico de f para sistemas de fluidos líquidos e meios de armazenamento.
Fonte: DUFFIE; BECKMAN, 2006.

O método requer uma correção do valor de X para o projeto em estudo neste trabalho específico. Como se optou pela configuração padrão 3, deve-se calcular o fator de correção X_c/X antes de usá-lo na expressão de f . O rendimento desse

sistema de aquecimento é afetado pela temperatura de reposição da água (T_m) e pela temperatura mínima de entrega de água quente (T_w). Ambas afetam o nível médio de temperatura do sistema e, consequentemente, as perdas de calor no coletor. Isso explica a correção em X, pois esse representa essas perdas, conforme explicado anteriormente. A equação para a correção é:

$$\frac{X_c}{X} = \frac{11,6 + 1,18T_w + 3,86T_m - 2,32\bar{T}_a}{100 - \bar{T}_a} \quad (47)$$

A aplicação do método descrito considera que a capacidade de armazenamento do sistema hipotético assume o valor de 75 litros por m^2 de área de coletor. Também, a distribuição diária de consumo de água quente deve ser equivalente à Figura 37. Variações na distribuição dentro de um mesmo dia surtem pouco efeito nos resultados. Porém, caso haja variações de dia para dia, pode haver diferença nas previsões feitas pelos cálculos.

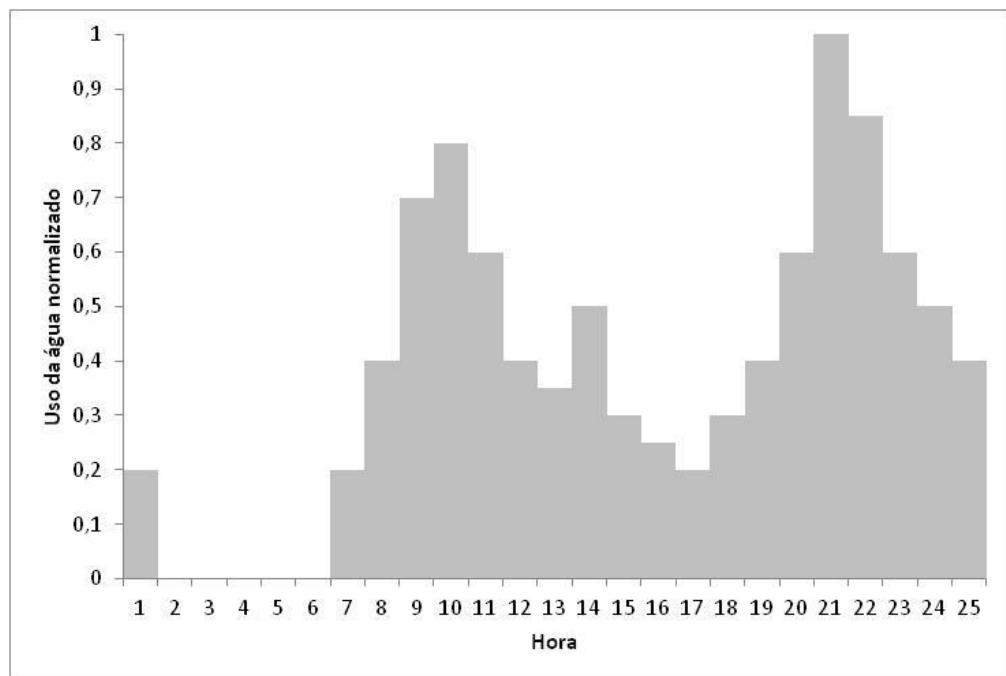


Figura 37– Perfil normalizado de consumo horário de água quente.
Fonte: Adaptado de DUFFIE; BECKMAN, 2006.

Outra consideração baseia-se no bom isolamento do tanque de pré-aquecimento. Mas as perdas no tanque de aquecimento auxiliar não estão incluídas.

Para os sistemas de aquecimento de água apenas, uma possibilidade é incluir as perdas no tanque auxiliar como se fossem cargas adicionais à carga térmica total consumida. É recomendado que esses cálculos de perda considerem que a toda a água do tanque esteja à temperatura mínima de fornecimento.

A contribuição de energia solar então é obtida pelo produto do valor da fração solar de cada mês (f_i) e o valor da carga térmica total de cada mês (L_i). Assim, a fração anual suprida pela energia do sol (F) é a soma das contribuições solares mensais, em valores de energia, dividida pela carga térmica anual. Essa relação é vista na equação:

$$F = \frac{\sum f_i L_i}{\sum L_i} \quad (48)$$

3.5.2 Método da utilizabilidade

Assim como o método do f-Chart, o método apresentado a seguir encontra-se na categoria de metodologia de projeto conceitual de baixo custo e maior simplicidade. O intuito do método da utilizabilidade também propõe prever o desempenho de um sistema solar no longo prazo.

Essa metodologia é indicada para sistemas de aquecimento de água por energia solar, sem meios de armazenamento. Há duas formas de proceder aos cálculos. A primeira é a partir da energia utilizável medida na forma de média mensal de hora em hora. A segunda forma é com relação à média mensal diária de radiação. Para este trabalho, será utilizada a segunda via.

A seguir será mostrada de forma mais sumarizada neste texto. Assim pode-se focar nas equações utilizadas nos cálculos sem entrar em detalhes mais teóricos. Para maiores explicações sobre o tema deve-se buscar os trabalhos de Duffie & Beckman (2006) ou Reddy (1987).

Utilizabilidade pode ser definida como a fração da radiação solar incidente que pode ser convertida em calor útil. Assim, a energia útil está representada pela equação:

$$Q_u = A_c F_R [I_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)]^+ \quad (49)$$

onde A_c é a área do coletor; I_T é a radiação horária incidente no plano do coletor; T_i é a temperatura do fluido de trabalho quando entra no coletor; T_a é a temperatura ambiente; F_R , U_L e $(\bar{\tau}\bar{\alpha})$ como definido na seção 3.5.1; e o sinal + significa que apenas é válido se o valor obtido é positivo.

Um coletor solar consegue coletar energia se a radiação capturada é maior que as perdas térmicas para o ambiente. Isso permite definir um nível crítico de radiação para que energia útil seja adquirida. Ao igualar a energia útil a zero, obtém-se a radiação crítica I_{Tc} :

$$I_{Tc} = \frac{F_R U_L (T_i - \bar{T}_a)}{F_R (\bar{\tau}\bar{\alpha})_n} \quad (50)$$

onde $(\bar{\tau}\bar{\alpha})$ e \bar{T}_a são a média mensal de transmitância-absorbância e a média mensal da temperatura ambiente, respectivamente. Esse ajuste é feito pois, como já dito, utilizou-se o método em relação às médias mensais.

A definição de utilizabilidade é expressa matematicamente como a soma de todas as horas e todos os dias, em um mês, cuja radiação incidente supera a radiação crítica, dividida pela radiação mensal total no plano do coletor:

$$\bar{\phi} = \sum_{\text{dias}} \sum_{\text{horas}} \frac{(I_T - I_{Tc})^+}{\bar{H}_T N} \quad (51)$$

Assim, a energia útil no mês, considerando os N dias, é expressa pela equação:

$$\sum_{i=1}^N Q_u = A_c F_R (\bar{\tau}\bar{\alpha}) \bar{H}_T \bar{\phi} \quad (52)$$

O propósito do método é calcular $\bar{\phi}$ dadas a orientação do coletor e os valores de radiação mensais. O método correlaciona $\bar{\phi}$ com o índice mensal de clariade \bar{K}_T e duas variáveis: o fator geométrico \bar{R}/R_n e o nível de radiação crítica adimensional \bar{X}_c . \bar{R} é a razão entre a radiação mensal no plano do coletor, \bar{H}_T , e a radiação no plano horizontal, \bar{H} :

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{H} \quad (53)$$

E R_n é expresso por:

$$R_n = \left(1 - \frac{r_{d,n}H_d}{r_{t,n}H}\right)R_{b,n} + \left(\frac{r_{d,n}H_d}{r_{t,n}H}\right)\left(\frac{1+\cos\beta}{2}\right) + \rho_g\left(\frac{1-\cos\beta}{2}\right) \quad (54)$$

onde:

$$r_{t,n} = \frac{\pi}{24} (a + b \cos\omega) \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \frac{\pi\omega_s}{180} \cos\omega_s} \quad (55)$$

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (56)$$

$$b = 0,6609 + 0,4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (57)$$

$$r_{d,n} = \frac{\pi}{24} \frac{\cos\omega - \cos\omega_s}{\sin\omega_s - \frac{\pi\omega_s}{180} \cos\omega_s} \quad (58)$$

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 1 - 0,2727K_T + 2,4495K_T^2 - 11,9514K_T^3 + 9,3879K_T^4 & \text{p/ } K_T < 0,715 \\ 0,143 & \text{p/ } K_T \geq 0,715 \end{cases} \quad (59)$$

para $\omega_s \leq 81,4^\circ$, e:

$$\frac{H_d}{H} = \begin{cases} 1 - 0,2832K_T + 2,5557K_T^2 - 0,8448K_T^3 & \text{para } K_T < 0,722 \\ 0,175 & \text{para } K_T \geq 0,722 \end{cases} \quad (60)$$

para $\omega_s \leq 81,4^\circ$

ω é o ângulo horário em graus para o horário em questão ⁴; e ω_s é o ângulo horário do pôr-do-sol.

O nível de radiação crítica adimensional é definido como a razão entre a radiação crítica e a radiação do meio-dia solar em um dia típico do mês ⁵:

⁴ É o ponto central da hora em que o cálculo é feito. No caso de cálculo diário é utilizado o ângulo horário do meio-dia solar.

⁵ É o dia cuja radiação total é a mesma que a média mensal diária.

$$\bar{X}_C = \frac{I_{Tc}}{r_{t,n} R_n \bar{H}} = \frac{F_R U_L (T_i - \bar{T}_a) / F_R (\tau \bar{\alpha})}{r_{t,n} R_n \bar{K}_T \bar{H}_o} \quad (61)$$

Por fim, a utilizabilidade em função das variáveis acima mencionadas é calculada por:

$$\bar{\Phi} = \exp \left\{ \left[a + b \frac{R_n}{\bar{R}} \right] \left[\bar{X}_C + c \bar{X}_C^2 \right] \right\} \quad (62)$$

$$a = 2,943 - 9,271 \bar{K}_T + 4,031 \bar{K}_T^2 \quad (63)$$

$$b = -4,345 + 8,853 \bar{K}_T - 3,602 \bar{K}_T^2 \quad (64)$$

$$c = -0,170 - 0,306 \bar{K}_T + 2,936 \bar{K}_T^2 \quad (65)$$

3.5.3 Dimensionamento do sistema solar de aquecimento de água para vestiários

Ao prever um sistema de aquecimento solar de água sanitária deve-se seguir uma sequência de cálculo para poder avaliar os resultados intermediários. A proposta deste trabalho seguiu o procedimento esquematizado na Figura 38.

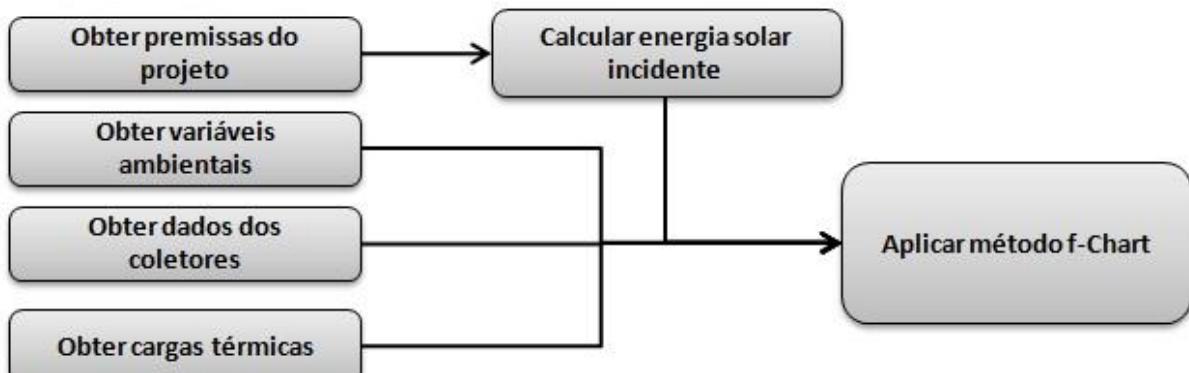


Figura 38 - Procedimento de cálculo de aquecimento solar de água quente.

As premissas do projeto foram obtidas como explicado na seção 3.1. Todos os dados desse levantamento são mostrados na seção 4.1. O cálculo da energia solar incidente pode ser feito como descrito na seção 3.3, e seus resultados podem ser encontrados na seção 4.3. As cargas térmicas são aquelas mostradas na seção

4.2, de acordo com as formulações da seção 3.2. As variáveis ambientais podem ser encontradas tanto na seção 3.2 como na seção 3.3.

Por fim, os dados dos coletores foram obtidos em dois passos. Primeiro, buscou-se um modelo de coletor com eficiência e qualidade adequados. Para isso, foi feita busca na tabela do Programa de Etiquetagem do INMETRO⁶. Uma vez decidido qual modelo, buscou-se os valores necessários disponíveis. Caso não houvesse informação suficiente, vale-se de busca nos catálogos do fabricante, através de suas páginas eletrônicas.

Assim que todos os dados estavam disponíveis, foi possível calcular os parâmetros do dimensionamento conceitual, através do método f-Chart. Isso foi feito através de planilhas eletrônicas do software Excel 2007 da Microsoft. Todos os resultados estão disponíveis na seção 4.5.

3.5.4 Dimensionamento do sistema solar de aquecimento de água para piscina

Assim como no caso anterior, foi seguido procedimento de cálculo para determinar a magnitude do sistema de aquecimento solar da piscina. Esse processo é mostrado esquematicamente na Figura 39.

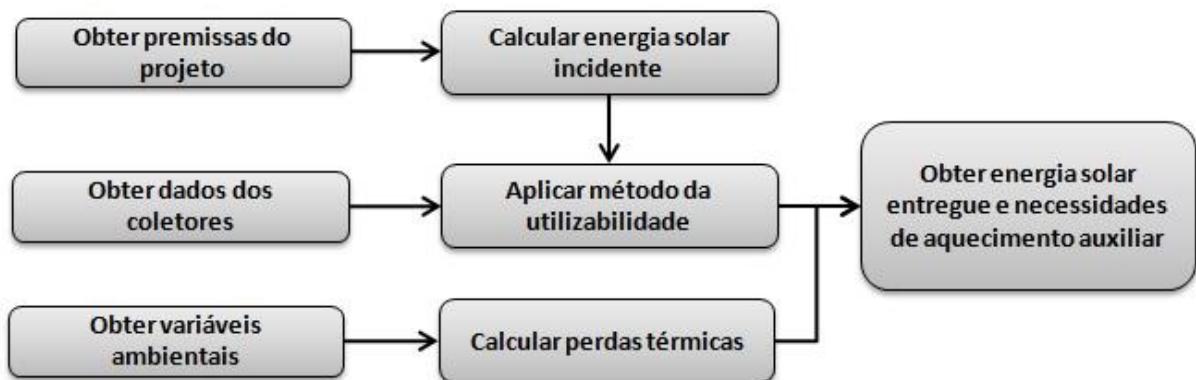


Figura 39 - Procedimento de cálculo de aquecimento solar de piscina.

As premissas de projeto encontra-se na seção 4.1, conforme metodologia descrita na seção 3.1. A energia solar é obtida pela seção 3.3 e os resultados estão mostrados na seção 4.3. As variáveis ambientais podem ser encontradas tanto na

⁶ Tabelas do INMETRO para dados de coletores disponíveis em:
<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/tabelas.asp>

seção 3.2 como na seção 3.3. As perdas térmicas têm seu método de cálculo explicado na seção 3.2 e os resultados na seção 4.2.

Os dados dos coletores foram obtidos da mesma forma que no caso dos aquecedores solares de água para vestiário. Também foi utilizado o software Excel 2007 para aplicação do método da utilizabilidade e obter a energia solar entregue.

4 RESULTADOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

A organização a ser beneficiada com este estudo é uma unidade da Associação de Pais e Amigos dos Excepcionais (APAE). O Movimento Apaeano é uma rede nacional, constituída por pais, amigos, pessoas com deficiência, voluntários, profissionais e instituições parceiras, sejam elas públicas ou privadas. O objetivo é promover e defender os direitos de cidadania de pessoas com deficiência, contribuindo com sua inclusão social.

Atualmente, o Movimento congrega a Federação Nacional das APAEs (FENAPAES). Essa é formada por 23 Federações das APAEs nos Estados e mais de duas mil APAEs espalhadas pelo Brasil. O número de pessoas com deficiência beneficiadas pela atenção integral das entidades é aproximadamente 250.000. De acordo com a página eletrônica da APAE⁷ “é o maior movimento social do Brasil e do mundo, na sua área de atuação”.

Especificamente para este projeto foi escolhida a unidade de Cabreúva. A cidade de Cabreúva está a aproximadamente 80 km de São Paulo, 35 km de Jundiaí e 20 km de Itu. Sua localização em coordenadas geográficas é latitude 23,25 Sul e longitude 47,06 Oeste⁸. A Figura 40 mostra a localização da cidade em relação ao Estado de São Paulo e as cidades vizinhas. A Figura 41 mostra o ponto na cidade onde se encontra a área estudada por este trabalho, representada pelo marcador verde, em relação ao centro da cidade. Os dados de localização física da APAE CABREÚVA estão no ANEXO A.

⁷ www.apaebrasil.org.br

⁸ <https://maps.google.com>

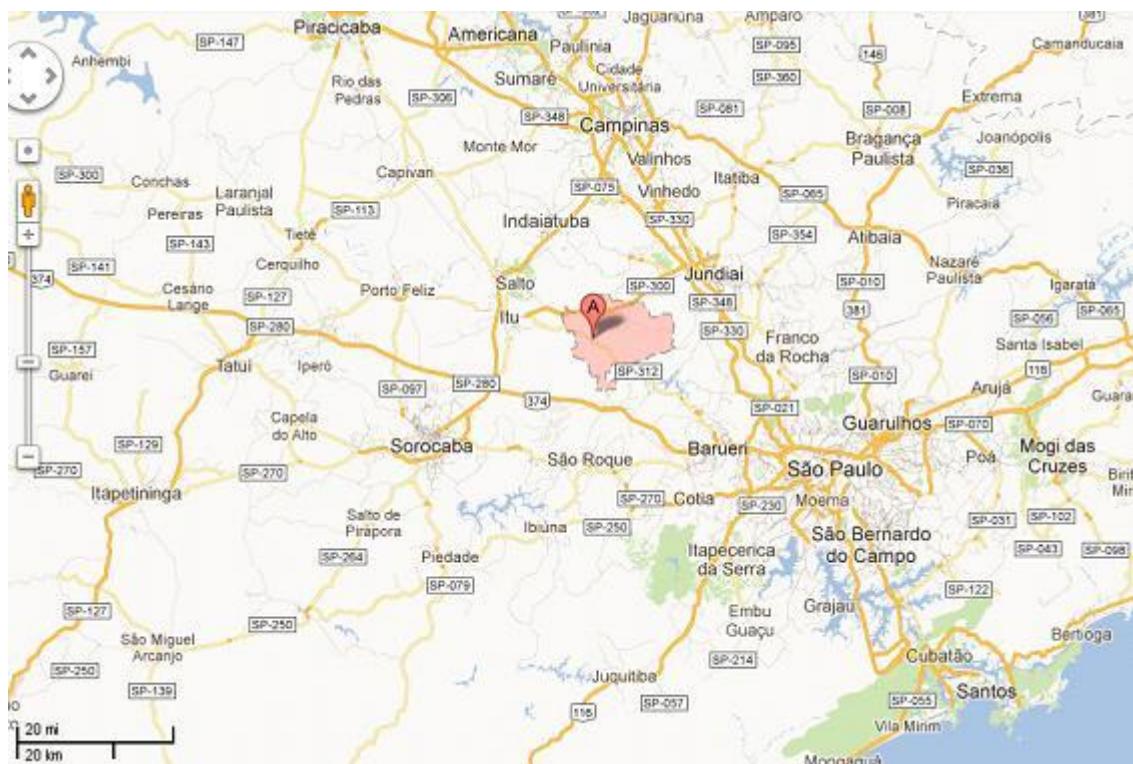


Figura 40 - Localização da cidade de Cabreúva.
Fonte: maps.google.com

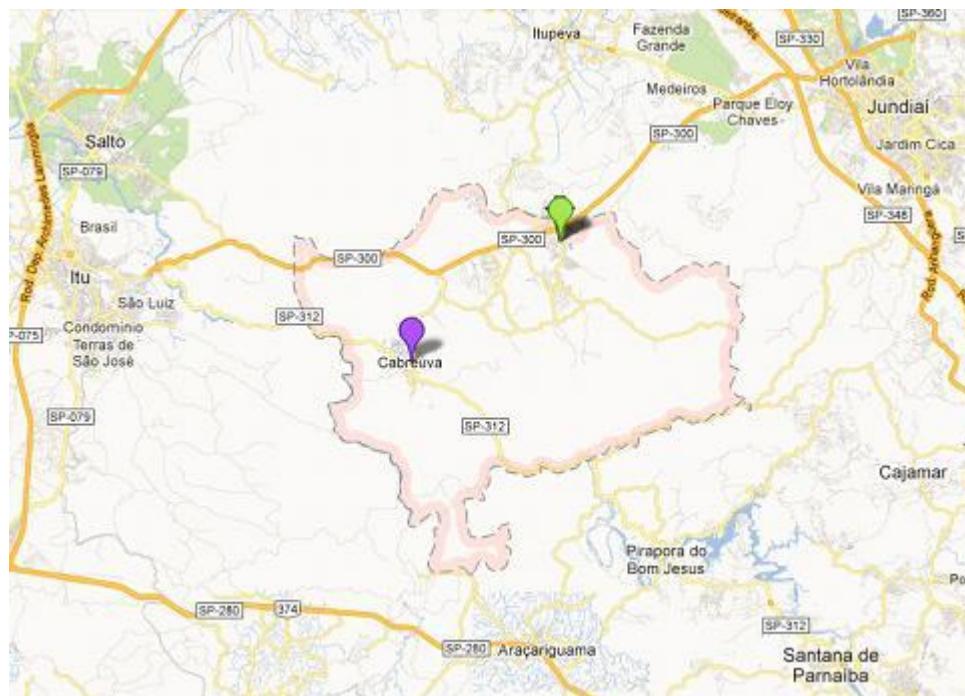


Figura 41 - Localização da APAE na cidade de Cabreúva.
Fonte: maps.google.com

Essa instituição teve fundação em 27 de Maio de 1998 como uma associação civil, filantrópica, sem fins lucrativos. Suas primeiras atividades buscaram atender às necessidades de 27 crianças com deficiência intelectual, que não tinham

atendimento ou eram atendidas em outros municípios. Hoje conta com atendimento para 200 pessoas. Apesar de a maioria das pessoas atendidas sejam crianças e jovens, a entidade também trabalha com deficientes de todas as idades, inclusive maiores de 45 anos.

A equipe de profissionais especializados identificam e encaminham os alunos portadores de cuidados especiais para um dos seguintes programas:

- Prevenção. Atende bebês de 0 a 2 anos que apresentam fatores de alto risco neurológico, acompanhando seu desenvolvimento neuropsicomotor;
- Educação precoce. Atende crianças de 0 a 4 anos com atraso no desenvolvimento neuropsicomotor e/ou deficiência intelectual, visando o desenvolvimento global da criança;
- Ambulatório. Atende crianças, adolescentes e adultos com deficiência intelectual e/ou múltipla, nas áreas de psicologia, fisioterapia, fonoaudiologia e terapia ocupacional, visando a inclusão do indivíduo em sua família, comunidade e escola;
- Escola de educação especial “Dona Rosita”. Oferece atendimento para crianças, adolescentes e adultos com deficiência intelectual e/ou múltipla, nos cursos de Ensino Fundamental e Educação de Jovens e Adultos;
- Pré-profissionalização. Atende adolescentes e adultos com deficiência intelectual e/ou múltipla, visando o desenvolvimento pessoal, social e a inclusão, através de atividades educativas para o trabalho e de inserção social.

Os beneficiados também participam de atividades alternativas complementares. Já a família também pode participar de programas específicos. Essas outras atividades buscam fortalecer o vínculo familiar, assim como valorizar o potencial do deficiente e diminuir atitudes discriminatórias e preconceituosas no seio da família e sociedade.

No início, a APAE CABREÚVA estabeleceu-se em um edifício cedido pela Prefeitura Municipal. Como houve aumento da procura por parte das famílias, optou-se por alugar espaço maior que dispusesse de espaço físico suficiente para melhorar as condições de atendimento. O espaço conseguido foi um terreno com características de sítio, com uma sede e outras construções, que costumava ser alugado para eventos e festas. Esse espaço é mostrado na Figura 42 com a

marcação vermelha, e ainda é usado atualmente na maioria das atividades assistenciais.



Figura 42 - Áreas utilizadas pela APAE CABREÚVA.

Em 2009, a APAE CABREÚVA adquiriu um terreno para construção de sua sede própria. Essa área é mostrada na Figura 42 com a demarcação amarela. A sede foi inaugurada e contém recepção e salas para os atendimentos terapêuticos. O restante do terreno será usado para construir as demais salas de aula, espaços recreativos e áreas de apoio. A Figura 43 mostra o prédio atual da sede da associação.



Figura 43 - Sede da APAE CABREÚVA.

No momento da visita à APAE para levantamento de informações deste trabalho, havia um projeto em andamento para construção de quadra poliesportiva e pequeno complexo de hidroterapia, que inclui piscina e vestiários, no terreno da nova sede. A área disponibilizada para as construções pode ser vista na Figura 44 e o esquema do projeto na Figura 45.



Figura 44 - Área disponível para construção de quadra, piscina e vestiários.

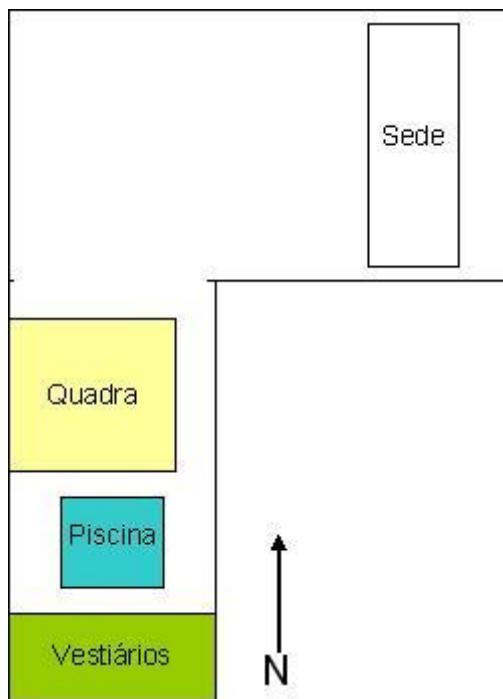


Figura 45 - Esquema mostrando a disposição das construções do projeto.

A piscina prevista é coberta e aquecida, com finalidade de iniciar atividades de hidroterapia. Conforme explicado na visita, a temperatura da água para esse tipo de atividade deve ser mantida em 33,5°C. Na documentação estava previsto um trocador de calor do tipo bomba de calor para aquecimento da piscina. A área superficial da piscina é de 50 m² e profundidade de 1,30m, totalizando 65 m³ de volume de água.

A cobertura é composta por pilares de concreto pré-moldado e estrutura metálica treliçada. As telhas serão metálicas, com duas águas, e inclinação $i = 10\%$ ($\beta_p = 6,3^{\circ}$), sendo uma virada para a face norte e outra para a face sul. Pelos desenhos pôde-se verificar que não haverá sombreamento na face norte, de interesse para um sistema de aquecimento solar. Cada uma das faces terá 69 m².

O vestiário terá 10 boxes com chuveiros elétricos para banhos. A partir das informações de previsão de uso do complexo, estimou-se que haverá aproximadamente 365 banhos por semana, considerando que a capacidade da piscina para as atividades previstas seria totalmente utilizada. No projeto não há tubulação de água quente reservada, sendo assim, a energia auxiliar necessária para suprir a falta de energia solar seria fornecida pelos próprios chuveiros elétricos.

O telhado projetado é composto por estrutura de madeira e telhas cerâmicas. Haverá apenas uma face, voltada para o norte, com área total de 183,5 m² e

inclinação $i = 25\%$ ($\beta_v = 14,5^\circ$). Como há presença da cobertura da piscina, que pode vir a obstruir a luz solar, foi feita a avaliação de sombreamento do local. A Figura 46 mostra as dimensões estudadas das estruturas, a partir do projeto arquitetônico.

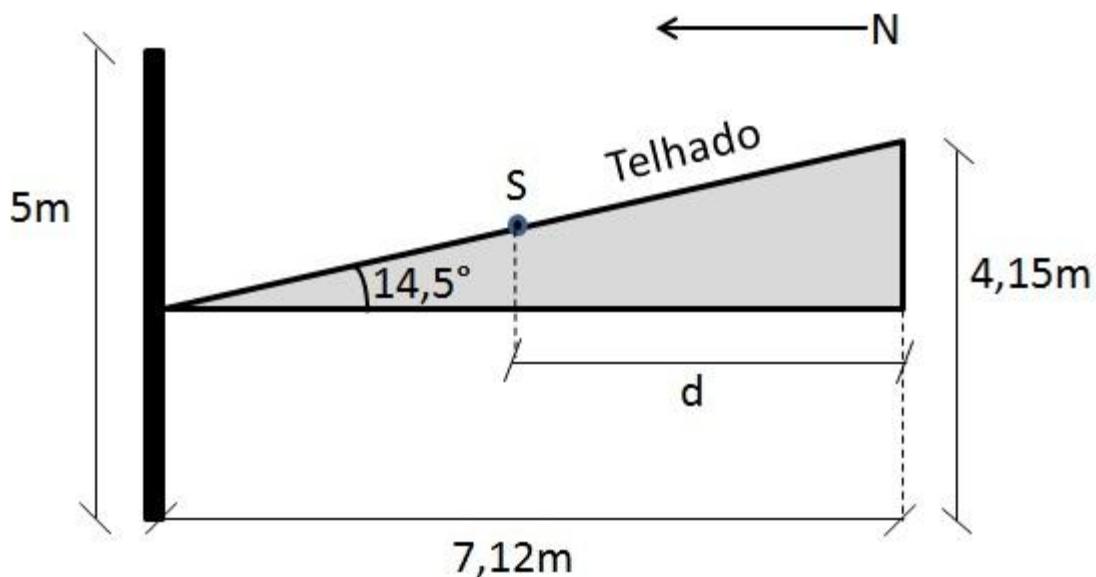


Figura 46 - Esquema das dimensões do telhado.

O ponto S foi definido como limite variável inferior da área disponível para coletar energia solar. Dessa forma, pôde-se verificar qual o impacto do sombreamento em diferentes valores “d” como mostrado na Figura 46. Três simulações foram feitas para valores de “d” iguais a 75%, 66,6% e 50% da distância total de 7,12m. Na situação de 75%, haveria sombra nos meses de Junho, Julho e Agosto, durante o dia inteiro. Os resultados para 66,6% e 50% podem ser vistos na Figura 47. Dessa forma, foi escolhido o último caso, pois como mostra a figura, haveria luz solar incidente nos coletores no pior mês, ou seja, Junho, a partir de 07:30 no período da manhã. A insolação sobre os coletores, nesse caso, cessaria somente depois das 16:30. O sombreamento parcial resultaria em 1 hora de sol a menos em cada período. Porém essa energia “perdida” não é significante, pois a radiação solar nesses períodos é suficiente para manter a temperatura do coletor, apenas. Portanto, a área disponível para instalação de coletores solares é de 88 m².

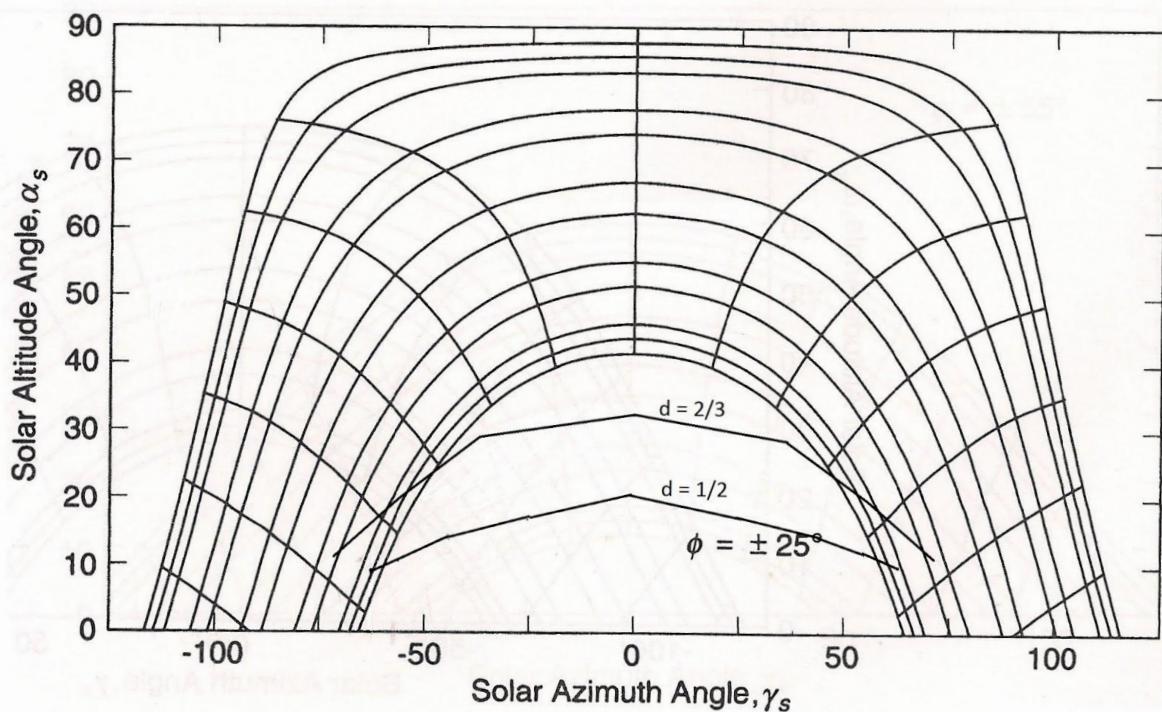


Figura 47 - Gráfico de insolação e sombreamento.

Fonte: Adaptado de DUFFIE; BECKMAN, 2006.

Por fim, o último edifício disponível para captar energia do Sol é justamente o único que está construído e em funcionamento. A demanda energética desse edifício é apenas elétrica. Pelas contas de energia elétrica fornecidas, foi possível separar o gasto da sede nova e das demais áreas de trabalho. Como estão em terrenos diferentes, as contas e consumos estão discriminados. A Figura 48 mostra o consumo elétrico da sede nova, enquanto a Figura 49 mostra o consumo das demais áreas.

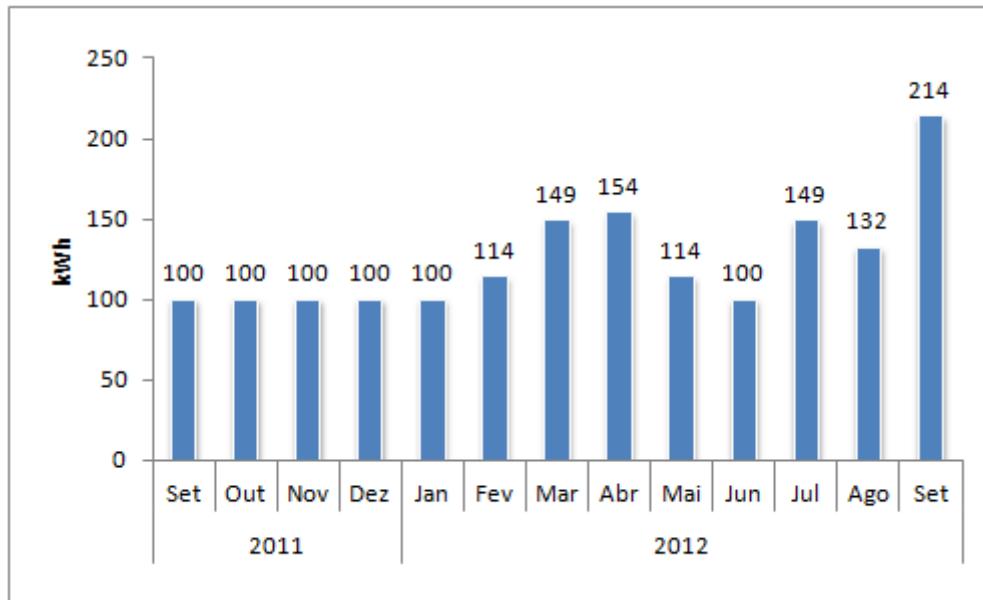


Figura 48 - Consumo elétrico na sede nova.

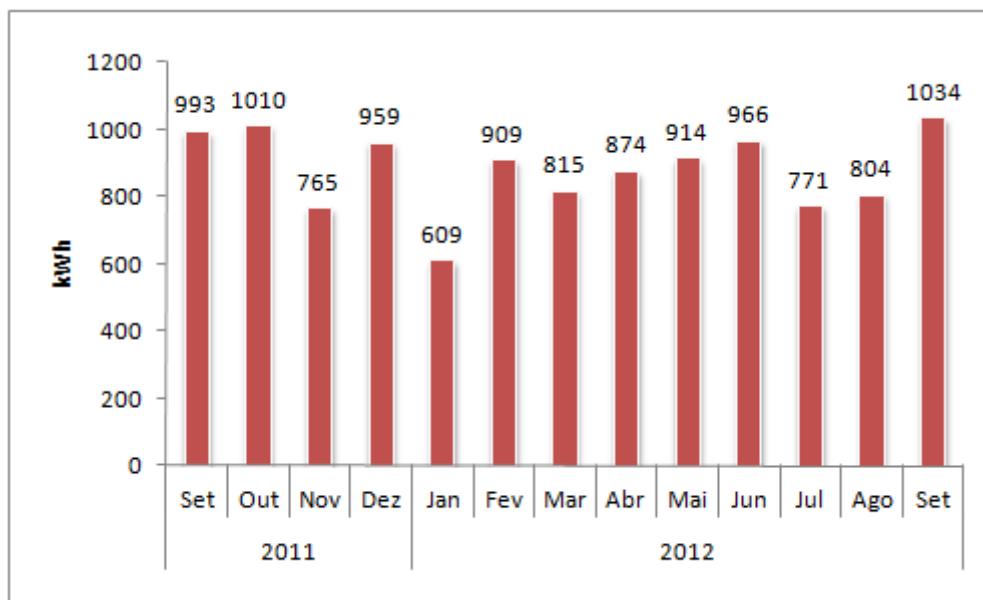


Figura 49 - Consumo elétrico nas demais áreas.

Durante a visita, a fim de caracterizar as cargas elétricas, também foi feito levantamento dos equipamentos elétricos conectados. Dessa forma foi possível verificar a potência total do edifício. Os valores para a sede nova estão na Tabela 2. Foi decidido que seriam estudadas apenas as cargas da nova sede, por motivos de mudanças futuras das instalações da APAE.

Tabela 2 - Potência unitária dos equipamentos da sede nova e potência total.

Equipamento	Descrição	Qtde	Pot. (W)	Pot. Total
Bebedouro		1	103	103
Computador		8	100	800
Monitor LED		3	80	240
Monitor tubo		5	330	1650
Lâmpada	Pequena	8	23	184
Lâmpada	Comprida	34	32	1088
Impressora		1	40	40
Ventilador		1	120	120
Roteador		2	14	28
Geladeira	Frigobar	1	80	80
Lâmpada	Incandescente	8	60	480
Pot. Total (W)				4.813

Com objetivo de usar parte do telhado da sede para geração fotovoltaica, verificou-se que a área disponível é de 240 m², sem interferência de objetos próximos à luz solar. A cobertura é praticamente plana, como pode ser visto na Figura 50. Haveria possibilidade de instalar suportes para os módulos, de forma a posicioná-los na inclinação necessária, com orientação para o norte.



Figura 50 - Cobertura da sede.

4.2 LEVANTAMENTO DE CONSUMO ENERGÉTICO

Os resultados a seguir mostram os cálculos da quantidade estimada de energia que a entidade deverá usufruir. São baseados em premissas e sua confiabilidade depende da aproximação dessas premissas com a realidade.

Há casos em que o desenvolvimento dos cálculos será mostrado para um período em particular, de forma que sua repetição para os demais períodos não será mostrada neste trabalho. Os sumários para todos os resultados serão explicitados no final de cada seção.

4.2.1 Aquecimento de água para banho

Os dados de entrada para obter a energia necessária para aquecer a água dos banhos estão na Tabela 3:

Tabela 3 - Dados de entrada para banhos.		
Item	Valor	Unidade
Consumo máximo	15	L/min
Ciclo diário	10	min/banho
Temp consumo	40	°C
Cp	4200	J/(kg.°C)
Densidade	1	kg/L
Quantidade banhos	53	banhos/dia

A partir da Equação (1), é possível calcular a energia média diária mensal utilizada para aquecer a água. Os valores totais estão mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Consumo energético média mensal em banhos.

Mês	T _a méd (°C)	V _i (L/dia)	Q _{dem} (MJ/dia)
Jan	24,4	7950	520,88
Fev	24,6	7950	514,21
Mar	24,0	7950	534,24
Abr	21,7	7950	611,04
Mai	19,3	7950	691,17
Jun	17,9	7950	737,92
Jul	17,7	7950	744,60
Ago	19,3	7950	691,17
Set	20,7	7950	644,43
Out	22,0	7950	601,02
Nov	22,9	7950	570,97
Dez	23,6	7950	547,60

4.2.2 Aquecimento de água para piscina

Conforme dito na seção 3.2.2, a energia utilizada para aquecimento da piscina é a perda energética por uma das vias: evaporação, convecção, condução, radiação e reposição de água. A seguir será mostrado o cálculo para o mês de Novembro, para cada uma das vias.

4.2.2.1 Perdas por evaporação

Mantendo a temperatura da piscina em $T_p = 33,5^{\circ}\text{C}$, sabendo que a temperatura média ambiente para Novembro é $T_a = 22,9^{\circ}\text{C}$ e assumindo a pressão atmosférica $P = 95\text{kPa}$ e umidade relativa de 60%, pelas equações (7) e (8), temos os seguintes valores de umidade absoluta:

$$T_p = 33,5^{\circ}\text{C}: \quad P_v = 0,6 \cdot 5,2134 = 3,12804 \text{ kPa}$$

$$\omega_p = 0,62198 \cdot \frac{95}{95 - 3,12804} = 0,643157$$

$$T_a = 22,9^{\circ}\text{C}: \quad P_v = 0,6 \cdot 2,8204 = 1,69224 \text{ kPa}$$

$$\omega_a = 0,62198 \cdot \frac{95}{95 - 1,69224} = 0,63326$$

onde os valores de P_{vs} foram obtidos de tabelas de propriedades termodinâmicas. Assim, pela equação (6), as perdas por evaporação são:

$$\dot{Q}_{eva} = 95 \left[35.0,1 + 43(33,5 - 22,9)^{\frac{1}{3}} \right] (0,643157 - 0,63326) = 92,101 \frac{W}{m^2}$$

$$\dot{Q}_{eva} = 92,101 \frac{W}{m^2} \cdot 50m^2 = 4605,1 W$$

A taxa de evaporação, pela equação (9), é:

$$\dot{m}_{eva} = \frac{15}{24} \cdot \frac{4,6051}{2454} \cdot 0,9 + \frac{9}{24} \cdot \frac{4,6051}{2454} \cdot 2 = 0,00246 \frac{kg}{s}$$

onde a primeira parcela corresponde ao período em que há cobertura e a segunda parcela representa o período sem manta.

A seguir, a Tabela 5 mostra os resultados das perdas por evaporação para todos os outros meses, seguindo os mesmos cálculos. A Tabela 6 mostra os valores das perdas de massa para os outros meses.

Tabela 5 - Perdas de calor por evaporação.

Mês	T_a méd (°C)	P_{vs}	P_v	ω_a	ω_p	\dot{Q}_{eva} (W)
Jan	24,4	3,0694	1,8416	0,6343	0,6432	3.934,8
Fev	24,6	3,1026	1,8616	0,6344	0,6432	3.847,2
Mar	24,0	3,0030	1,8018	0,6340	0,6432	4.111,3
Abr	21,7	2,6212	1,5727	0,6325	0,6432	5.156,7
Mai	19,3	2,2503	1,3502	0,6309	0,6432	6.242,1
Jun	17,9	2,0728	1,2437	0,6302	0,6432	6.812,0
Jul	17,7	2,0474	1,2284	0,6301	0,6432	6.894,2
Ago	19,3	2,2503	1,3502	0,6309	0,6432	6.242,1
Set	20,7	2,4552	1,4731	0,6318	0,6432	5.626,6
Out	22,0	2,6710	1,6026	0,6327	0,6432	5.017,5
Nov	22,9	2,8204	1,6922	0,6333	0,6432	4.605,0
Dez	23,6	2,9366	1,7620	0,6337	0,6432	4.289,4

Tabela 6 - Perdas de massa por evaporação.

Mês	T_a méd (°C)	Nº de horas com manta	\dot{m}_{eva} (kg/s)
Jan	24,4	15	0,00210
Fev	24,6	15	0,00206
Mar	24,0	15	0,00220
Abr	21,7	15	0,00276
Mai	19,3	15	0,00334
Jun	17,9	15	0,00364
Jul	17,7	15	0,00369
Ago	19,3	15	0,00334
Set	20,7	15	0,00301
Out	22,0	15	0,00268
Nov	22,9	15	0,00246
Dez	23,6	15	0,00229

4.2.2.2 Perdas por convecção

As perdas por convecção dadas pela equação (10) são:

$$\dot{Q}_{conv} = 50 \text{ m}^2 \cdot 3,51 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \cdot (33,5 - 22,9)^\circ C = 1860,3 \text{ W}$$

A Tabela 7 mostra os resultados para todos os períodos.

Tabela 7 - Perdas de calor por convecção.

Mês	T_a méd (°C)	h_{conv}	\dot{Q}_{conv} (W)
Jan	24,4	3,51	1.597,1
Fev	24,6	3,51	1.562,0
Mar	24,0	3,51	1.667,3
Abr	21,7	3,51	2.070,9
Mai	19,3	3,51	2.492,1
Jun	17,9	3,51	2.737,8
Jul	17,7	3,51	2.772,9
Ago	19,3	3,51	2.492,1
Set	20,7	3,51	2.246,4
Out	22,0	3,51	2.018,3
Nov	22,9	3,51	1.860,3
Dez	23,6	3,51	1.737,5

4.2.2.3 Perdas por radiação

As perdas por radiação dadas pela equação (14) são:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{rad} &= 50 \text{ } m^2 \cdot (0,96 \cdot 15 + 0,456 \cdot (24 - 15)) \cdot 5,669 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \cdot (33,5^4 - 22,9^4) K^4 \\ &= 51,63 \text{ } W\end{aligned}$$

A Tabela 8 mostra os resultados para os outros meses.

Tabela 8 - Perdas por radiação.

Mês	T_a méd (°C)	\dot{Q}_{rad} (W)
Jan	24,4	47,5
Fev	24,6	46,8
Mar	24,0	48,7
Abr	21,7	54,4
Mai	19,3	58,8
Jun	17,9	60,7
Jul	17,7	60,9
Ago	19,3	58,8
Set	20,7	56,4
Out	22,0	53,8
Nov	22,9	51,6
Dez	23,6	49,8

4.2.2.4 Perdas por reposição de água

As perdas por reposição de água compensam a água que evapora e eventuais trocas de água propositais, com a frequência determinada pelo responsável. A fração de volume da piscina renovada a cada semana, $f_{\text{reposição}}$, que foi utilizada para este estudo é 0,25, ou seja, supõe-se que toda a água da piscina seja renovada a cada quatro semanas. Assim, a massa de reposição é, de acordo com a equação (15):

$$\dot{m}_{\text{reposição}} = 0,00246 \frac{\text{kg}}{\text{s}} + 0,25 \cdot 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{65\text{m}^3}{7.86400 \text{s}} = 0,02933 \frac{\text{kg}}{\text{s}}$$

Assim, pela equação (16):

$$\dot{Q}_{\text{reposição}} = 0,02933 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4200 \frac{\text{J}}{\text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}} \cdot (33,5 - 22,9)^\circ\text{C} = 1305,8 \text{ W}$$

A Tabela 9 mostra os valores para os demais meses:

Tabela 9 - Perdas por reposição de água.

Mês	$T_{a \text{ méd}} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$\dot{m}_{\text{reposição}} \text{ (kg/s)}$	$\dot{Q}_{\text{reposição}} \text{ (W)}$
Jan	24,4	0,02897	1.107,3
Fev	24,6	0,02893	1.081,3
Mar	24,0	0,02907	1.159,8
Abr	21,7	0,02963	1.468,3
Mai	19,3	0,03021	1.801,5
Jun	17,9	0,03051	1.999,1
Jul	17,7	0,03056	2.027,7
Ago	19,3	0,03021	1.801,5
Set	20,7	0,02988	1.606,2
Out	22,0	0,02955	1.427,4
Nov	22,9	0,02933	1.305,8
Dez	23,6	0,02916	1.212,6

4.2.2.5 Perdas por condução

As perdas por condução são uma fração das demais perdas, e são dadas pela equação (17):

$$\dot{Q}_{cond} = 0,05 \cdot (4605,1 + 1860,3 + 51,63 + 1305,8) = 391,1 \text{ W}$$

As perdas para todos os meses encontram-se na Tabela 10:

Tabela 10 - Perdas por condução.

Mês	$T_{a\ méd}$ (°C)	\dot{Q}_{cond} (W)
Jan	24,4	334,3
Fev	24,6	326,9
Mar	24,0	349,3
Abr	21,7	437,5
Mai	19,3	529,7
Jun	17,9	580,5
Jul	17,7	587,8
Ago	19,3	529,7
Set	20,7	476,8
Out	22,0	425,8
Nov	22,9	391,1
Dez	23,6	364,5

4.2.2.6 Perdas totais e energia necessária

Agora, a taxa de energia requerida para manter a temperatura da piscina em 33,5°C é a soma de todas as formas de contribuição de perdas, menos o ganho passivo da piscina. Como a piscina é totalmente coberta, o ganho passivo é zero. Portanto, pela equação (3), a taxa de energia requerida é:

$$\dot{Q}_{req} = \text{máx} [4605,1 + 1860,3 + 51,63 + 1305,8 + 391,1] = 8213,9 \text{ W}$$

E a energia total necessária no mês é dada pela equação (2):

$$Q_{mês} = 86400s \cdot 30 \cdot 8213,9 \text{ W} = 21290,3 \text{ MJ}$$

Ou para os outros meses, o resumo dos valores das taxas e energia total é como mostra a Tabela 11:

Tabela 11 - Taxas de perdas e energia requerida mensal.

Mês	$T_{a\ méd\ } (°C)$	$\dot{Q}_{eva} (\text{W})$	$\dot{Q}_{reposit\ \text{ão}} (\text{W})$	$\dot{Q}_{conv} (\text{W})$	$\dot{Q}_{rad} (\text{W})$	$\dot{Q}_{cond} (\text{W})$	$\dot{Q}_{req} (\text{W})$	$Q_{mês} (\text{MJ})$
Jan	24,4	3.934,8	1.107,3	1.597,1	47,5	334,3	7.021,0	18.805,1
Fev	24,6	3.847,2	1.081,3	1.562,0	46,8	326,9	6.864,1	16.605,6
Mar	24,0	4.111,3	1.159,8	1.667,3	48,7	349,3	7.336,3	19.649,7
Abr	21,7	5.156,7	1.468,3	2.070,9	54,4	437,5	9.187,9	23.815,0
Mai	19,3	6.242,1	1.801,5	2.492,1	58,8	529,7	11.124,2	29.795,2
Jun	17,9	6.812,0	1.999,1	2.737,8	60,7	580,5	12.190,1	31.596,8
Jul	17,7	6.894,2	2.027,7	2.772,9	60,9	587,8	12.343,5	33.060,8
Ago	19,3	6.242,1	1.801,5	2.492,1	58,8	529,7	11.124,2	29.795,2
Set	20,7	5.626,6	1.606,2	2.246,4	56,4	476,8	10.012,4	25.952,2
Out	22,0	5.017,5	1.427,4	2.018,3	53,8	425,8	8.942,8	23.952,3
Nov	22,9	4.605,0	1.305,8	1.860,3	51,6	391,1	8.213,9	21.290,3
Dez	23,6	4.289,4	1.212,6	1.737,5	49,8	364,5	7.653,7	20.499,7

A energia requerida é parte ou totalmente suprida pelo sistema solar. Quanto à energia solar não é capaz de abastecer toda a demanda por calor, o sistema auxiliar complementa com a energia faltante. Esse cálculo será feito na seção 4.5.

4.3 DISPONIBILIDADE SOLAR

Com base na explanação sobre aspectos básicos de engenharia solar apresentada na seção 3.3, este capítulo pretende mostrar os resultados da previsão de disponibilidade de energia solar no local em estudo. Esses valores servirão de dados de entrada para os tópicos subsequentes, quando haverá a apresentação dos dimensionamentos dos sistemas solares.

4.3.1 Geometria solar

A geometria solar é caracterizada pelos parâmetros descritos na seção 2.2, calculadas para os dias do ano. A Tabela 12 mostra os dias médios de cada mês,

que foram considerados para representar todos os períodos mensais nas análises energéticas. As equações (18) e (19) dão os valores da declinação e ângulo de pôr-do-sol, mostrados na mesma tabela.

Tabela 12 - Valores iniciais de geometria solar.

	n	δ (°)	ω_s (°)
Jan	17	-20,9	99,4
Fev	47	-13,0	95,7
Mar	75	-2,4	91,0
Abr	105	9,4	85,9
Mai	135	18,8	81,6
Jun	162	23,1	79,4
Jul	198	21,2	80,4
Ago	228	13,5	84,1
Set	258	2,2	89,1
Out	288	-9,6	94,2
Nov	318	-18,9	98,5
Dez	344	-23,0	100,5

A radiação solar extraterrestre é obtida pela equação (20), cujo valor de novembro é mostrado no cálculo a seguir. Os valores dos demais meses podem ser vistos na Tabela 13, lembrando que a latitude local é -23,25°.

$$H_o = \frac{24 \times 3600 \times 1367}{\pi} \cdot \left(1 + 0,033 \cos \frac{360 \times 318}{365} \right) \cdot \left(\cos(-23,25) \cos(-18,9) \sin(98,5) + \frac{\pi \times 98,5}{180} \sin(-23,25) \sin(-18,9) \right) = 41,51 \frac{MJ}{m^2 \cdot dia}$$

4.3.2 Radiação média mensal em plano inclinado

A seguir, obtêm-se os valores das médias diárias mensais de radiação em plano horizontal, fornecidos pelo banco de dados do CRESES, de acordo com o explicado na seção 3.3. Com posse desses dados, determina-se o índice de claridade média mensal de acordo com a equação (21). Para Novembro, tem-se:

$$\bar{H} = 5,86 \frac{kWh}{m^2 \cdot dia} \cdot \frac{3600 kJ}{1 kWh} = 21,096 \frac{MJ}{m^2 \cdot dia}$$

$$\bar{K}_T = \frac{21,096}{41,51} = 0,508$$

Antes de determinar a radiação no plano inclinado, deve-se obter os valores de \bar{R}_b e ω'_s , de acordo com as equações (23) e (24), respectivamente. Assim, sabendo que a inclinação da superfície receptora será de $14,5^\circ$, para o mês do exemplo:

$$\omega'_s = \min \left[\frac{\cos^{-1}(-\tan(-23,25) \tan(-18,9))}{\cos^{-1}(-\tan(-23,25 + 14,5) \tan(-18,9))} \right] = 93,02^\circ$$

$$\begin{aligned} \bar{R}_b &= \frac{\cos(-23,25 + 14,5) \cos(-18,9) \sin 93,02 + \left(\frac{\pi}{180}\right) 93,02 \sin(-23,25 + 14,5) \sin(-18,9)}{\cos(-23,25) \cos(-18,9) \sin 93,02 + \left(\frac{\pi}{180}\right) 98,5 \sin(-23,25) \sin(-18,9)} \\ &= 0,9391 \end{aligned}$$

Agora, obtém-se o valor da radiação difusa no plano horizontal pela equação (25) ou equação (26), dependendo do valor de ω_s . Para Novembro, $\omega_s = 98,5$, logo:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022 \cdot 0,508 + 3,427 \cdot 0,508^2 - 1,821 \cdot 0,508^3 = 0,422$$

$$\bar{H}_d = 0,422 \cdot \bar{H} = 0,422 \cdot 21,096 = 8,892 \frac{MJ}{m^2 \cdot dia}$$

Assim, finalmente determina-se o valor da radiação no plano inclinado pela equação (22):

$$\frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = (1 - 0,422) \cdot 0,9391 + 0,422 \left(\frac{1 + \cos 14,5}{2} \right) + 0,2 \left(\frac{1 - \cos 14,5}{2} \right) = 0,9613$$

$$\bar{H}_T = 0,9613 \cdot 21,096 = 20,28 \frac{MJ}{m^2 \cdot dia}$$

Os resultados dos outros meses estão na Tabela 13.

Tabela 13 - Valores mensais de energia solar disponível.

Mês	H_o ($\frac{MJ}{m^2 \cdot dia}$)	\bar{H} ($\frac{MJ}{m^2 \cdot dia}$)	\bar{K}_T	\bar{H}_d ($\frac{MJ}{m^2 \cdot dia}$)	ω'_s ($^{\circ}$)	\bar{R}_b	\bar{H}_T ($\frac{MJ}{m^2 \cdot dia}$)
Jan	42,32	19,188	0,453	9,12	93,369	0,926	18,36
Fev	39,96	20,016	0,501	8,57	92,036	0,979	19,70
Mar	35,82	18,792	0,525	7,63	90,370	1,057	19,36
Abr	30,12	16,308	0,541	6,37	85,921	1,158	17,83
Mai	24,96	14,616	0,586	5,13	81,590	1,260	17,05
Jun	22,44	12,816	0,571	4,18	79,441	1,316	15,52
Jul	23,45	15,084	0,643	4,01	80,407	1,290	18,29
Ago	27,66	16,488	0,596	5,63	84,080	1,200	18,62
Set	33,33	17,100	0,513	7,13	89,054	1,094	17,98
Out	38,34	20,088	0,524	8,17	91,492	1,003	20,06
Nov	41,51	21,096	0,508	8,89	93,021	0,939	20,28
Dez	42,71	19,908	0,466	9,21	93,746	0,912	18,88

4.3.3 Radiação horária em plano inclinado

Diferentemente do método anterior, a energia total incidente em um plano inclinado, em um dia, pode ser obtida pela soma das radiações horárias médias. Como descrito na seção 3.3.3, as frações horárias de radiação total são dadas pela equação (27). Assim, usando novamente o mês de Novembro como exemplo, sabendo que o ângulo do ponto médio do intervalo entre 10 e 11 horas é $-22,5^{\circ}$:

$$a = 0,409 + 0,5016 \operatorname{sen}(98,5 - 60) = 0,721$$

$$b = 0,6609 + 0,4767 \operatorname{sen}(98,5 - 60) = 0,364$$

$$r_t = \frac{\pi}{24} (0,721 + 0,364 \cos(-22,5)) \frac{\cos(-22,5) - \cos(98,5)}{\operatorname{sen}(98,5) - \frac{\pi \cdot 98,5}{180} \cos(98,5)} = 0,1194$$

Da mesma forma, a fração horária de radiação difusa, para o mesmo intervalo de horas é:

$$r_d = \frac{\pi}{24} \frac{\cos(-22,5) - \cos(98,5)}{\sin(98,5) - \frac{\pi \cdot 98,5}{180} \cos(98,5)} = 0,1129$$

Todos os valores das frações para cada mês e faixa horária podem ser conferidos na Tabela 14 e na Tabela 15.

Tabela 14 - Frações horárias da radiação total.

	r_t											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
5-6	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,02	-0,03	-0,03	-0,02	-0,01	0,00	0,00	0,00
6-7	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02
7-8	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05
8-9	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08
9-10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10
10-11	0,12	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12
11-12	0,13	0,13	0,13	0,14	0,15	0,16	0,15	0,15	0,14	0,13	0,13	0,13
12-13	0,13	0,13	0,13	0,14	0,15	0,16	0,15	0,15	0,14	0,13	0,13	0,13
13-14	0,12	0,12	0,12	0,13	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12
14-15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10
15-16	0,08	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08
16-17	0,05	0,05	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,05
17-18	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	-0,01	0,00	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02
18-19	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,02	-0,03	-0,03	-0,02	-0,01	0,00	0,00	0,00

Tabela 15 - Frações horárias da radiação difusa.

	r_d											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
5-6	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,05	-0,06	-0,05	-0,04	-0,02	-0,01	0,00	0,01
6-7	0,03	0,03	0,03	0,02	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,02	0,02	0,03	0,03
7-8	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06
8-9	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
9-10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10
10-11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11
11-12	0,12	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,12	0,12
12-13	0,12	0,12	0,12	0,13	0,14	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,12	0,12
13-14	0,11	0,12	0,12	0,12	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,11	0,11
14-15	0,10	0,10	0,10	0,10	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,10	0,10
15-16	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08
16-17	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06
17-18	0,03	0,03	0,03	0,02	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,02	0,02	0,03	0,03
18-19	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,05	-0,06	-0,05	-0,04	-0,02	-0,01	0,00	0,01

Usando as definições de fração da radiação, têm-se:

$$I = r_t \bar{H} = 0,1194 \cdot 21,096 = 2,519 \frac{MJ}{m^2 \cdot dia}$$

$$I_d = r_d \bar{H}_d = 0,1129 \cdot 8,89 = 1,004 \frac{MJ}{m^2 \cdot dia}$$

$$I_b = I - I_d = 1,5152 \frac{MJ}{m^2 \cdot dia}$$

Agora, para obter a radiação no plano inclinado, utiliza-se a equação (34), onde os valores de R_b calculados encontram-se na Tabela 16. A energia total diária é a soma de todas as faixas horárias de cada dia. Os valores horários e o total diário podem ser vistos na Tabela 17.

$$I_T = 1,5152 \cdot 0,9809 + 1,004 \left(\frac{1 + \cos 6,3}{2} \right) + 2,519 \cdot 0,2 \left(\frac{1 - \cos 6,3}{2} \right) = 2,4887 \frac{MJ}{m^2 \cdot dia}$$

Tabela 16 - Valores de R_b para cada mês e faixa de horas.

	R_b											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
5-6	-2,302	3,261	1,186	0,832	0,711	0,673	0,689	0,771	0,998	1,943	-5,053	-1,353
6-7	0,691	0,778	0,992	1,902	-5,342	-1,324	-2,109	3,676	1,176	0,829	0,7099	0,673
7-8	0,869	0,934	1,045	1,233	1,503	1,71	1,608	1,33	1,107	0,966	0,884	0,853
8-9	0,929	0,979	1,056	1,167	1,294	1,373	1,336	1,217	1,095	1,002	0,9414	0,917
9-10	0,957	0,999	1,06	1,144	1,232	1,283	1,259	1,179	1,09	1,018	0,9677	0,947
10-11	0,972	1,009	1,063	1,133	1,206	1,247	1,228	1,162	1,088	1,025	0,9809	0,962
11-12	0,978	1,013	1,063	1,129	1,195	1,232	1,215	1,156	1,087	1,029	0,9865	0,968
12-13	0,978	1,013	1,063	1,129	1,195	1,232	1,215	1,156	1,087	1,029	0,9865	0,968
13-14	0,972	1,009	1,063	1,133	1,206	1,247	1,228	1,162	1,088	1,025	0,9809	0,962
14-15	0,957	0,999	1,06	1,144	1,232	1,283	1,259	1,179	1,09	1,018	0,9677	0,947
15-16	0,929	0,979	1,056	1,167	1,294	1,373	1,336	1,217	1,095	1,002	0,9414	0,917
16-17	0,869	0,934	1,045	1,233	1,503	1,71	1,608	1,33	1,107	0,966	0,884	0,853
17-18	0,691	0,778	0,992	1,902	-5,342	-1,324	-2,109	3,676	1,176	0,829	0,7099	0,673
18-19	-2,302	3,261	1,186	0,832	0,711	0,673	0,689	0,771	0,998	1,943	-5,053	-1,353

Tabela 17 - Radiação diária e horária média mensal no plano inclinado.

	I _T											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
ΣI_T	18,86	19,89	19	16,97	15,49	13,85	16,29	17,29	17,45	20,09	20,737	19,53
5-6	0,025	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0002	0,047
6-7	0,428	0,374	0,366	0,264	0,007	0	0	0,075	0,192	0,344	0,4484	0,461
7-8	0,912	0,912	0,878	0,727	0,508	0,417	0,517	0,616	0,705	0,898	0,9905	0,955
8-9	1,426	1,491	1,427	1,252	1,09	0,956	1,138	1,235	1,276	1,499	1,5678	1,477
9-10	1,901	2,033	1,939	1,75	1,66	1,488	1,748	1,835	1,821	2,062	2,1032	1,959
10-11	2,268	2,453	2,336	2,14	2,113	1,913	2,235	2,31	2,248	2,501	2,5165	2,33
11-12	2,467	2,682	2,553	2,353	2,365	2,149	2,505	2,573	2,483	2,74	2,7417	2,532
12-13	2,467	2,682	2,553	2,353	2,365	2,149	2,505	2,573	2,483	2,74	2,7417	2,532
13-14	2,268	2,453	2,336	2,14	2,113	1,913	2,235	2,31	2,248	2,501	2,5165	2,33
14-15	1,901	2,033	1,939	1,75	1,66	1,488	1,748	1,835	1,821	2,062	2,1032	1,959
15-16	1,426	1,491	1,427	1,252	1,09	0,956	1,138	1,235	1,276	1,499	1,5678	1,477
16-17	0,912	0,912	0,878	0,727	0,508	0,417	0,517	0,616	0,705	0,898	0,9905	0,955
17-18	0,428	0,374	0,366	0,264	0,007	0	0	0,075	0,192	0,344	0,4484	0,461
18-19	0,025	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0002	0,047

4.4 DIMENSIONAMENTO SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para obter um sistema fotovoltaico adequado para a entidade proposta, seguiu-se o fluxograma mostrado na Figura 32. As necessidades elétricas da organização foram separadas em duas partes: a sede nova e as demais instalações. A proposta deste trabalho é, então, dimensionar conceitualmente um sistema fotovoltaico para as cargas da sede nova. A justificativa para essa decisão é que, como a intenção da associação é mudar de terreno, a sede é hoje a única edificação que contribuirá para as cargas elétricas do futuro.

Como neste caso, as instalações solares são modulares, ou seja, a ampliação da potência instalada pode facilmente ser feita pela adição de mais módulos. Dessa forma, será feito o dimensionamento para abastecer apenas a sede nova. Caso haja interesse em ampliar o sistema solar, basta considerar as novas cargas conectadas ao circuito do novo terreno. Com isso tenta-se evitar que a produção elétrica seja continuamente maior que as cargas, caracterizando perda de energia em todos os meses.

A rigor, o sistema será considerado conectado à rede elétrica da concessionária local. Assim haveria o benefício de gerenciar as flutuações diárias de geração e carga, de modo a exportar no momento quem que o consumo é menor

que a geração e importar da rede no caso contrário. Supõe-se, também, que em períodos com duração de alguns dias compensem as flutuações, de maneira a manter o balanço próximo à média de consumo e geração mensal.

Pela Figura 48, o consumo médio mensal, do período de doze meses é 125,08 kWh. Essa será a quantidade de energia alvo para que o painel fotovoltaico deve gerar no mês.

Pretende-se instalar os módulos na inclinação igual à latitude, ou seja, $\phi = -23,25^\circ$. A energia disponível no plano dos módulos foi calculada da mesma forma que o processo da seção 4.3.3, porém com a inclinação alterada. Os valores mensais estão mostrados na Tabela 18.

Tabela 18 - Radiação no plano inclinado dos módulos fotovoltaicos.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
$\bar{H}_T \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}} \right)$	4,89	5,32	5,32	5,08	4,92	4,55	5,38	5,31	4,99	5,45	5,41	5,01
$T_a \text{ méd } (\text{ }^\circ\text{C})$	24,4	24,6	24,0	21,7	19,3	17,9	17,7	19,3	20,7	22,0	22,9	23,6

A eficiência do painel fotovoltaico é dada pela equação (36). Para obtê-la, utilizou-se dados de fabricantes cujos produtos estão listados nas tabelas do Programa de Etiquetagem do INMETRO. As informações dos produtos são aquelas mostradas da Tabela 19.

Tabela 19 - Dados de fabricantes.

Dado	Valor	Unidade
NOCT	45	°C
β_p	0,4	%/°C
T_r	25	°C
η_r	14,8	%
η_{comps}	0,9	
η_{inv}	0,92	

Usando o mês de novembro como exemplo, tem-se:

$$T_c = T_a + (219 + 832 \cdot 0,50822) \frac{45 - 20}{800} = 42,96^\circ\text{C}$$

$$\eta_p = 14,8 \left[1 - \left(\frac{0,4}{100} \right) (42,96 - 25) \right] = 13,74\%$$

Sabendo qual é a eficiência do painel fotovoltaico, é possível obter a energia gerada, pela equação (39). Considerando a eficiência dos componentes do sistema e também do inversor, de acordo com as equações (40) e (41), segue o cálculo da energia disponível:

$$E_f = 0,1374 \cdot 5,414 = 0,744 \frac{kWh}{m^2 \cdot dia}$$

$$E_A = 0,9 \cdot 0,744 = 0,6696 \frac{kWh}{m^2 \cdot dia}$$

$$E_{disp} = 0,92 \cdot 0,6696 = 0,616 \frac{kWh}{m^2 \cdot dia}$$

Dessa forma, a área necessária para essa produção de energia elétrica é:

$$A_{tot} = 125,08 kWh \cdot \frac{1}{30 dias} \cdot \frac{1}{0,616} \frac{m^2 \cdot dia}{kWh} = 6,77 m^2$$

Os resultados intermediários e finais para todos os meses são mostrados na Tabela 20.

Tabela 20 - Resultados do dimensionamento do sistema fotovoltaico.

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
\bar{K}_T	0,45	0,50	0,52	0,54	0,59	0,57	0,64	0,60	0,51	0,52	0,51	0,47
T_c	43,03	44,47	44,49	42,62	41,37	39,59	41,27	41,64	40,88	42,47	42,96	42,56
η_p	13,73	13,65	13,65	13,76	13,83	13,94	13,84	13,81	13,86	13,77	13,74	13,76
E_f	0,67	0,73	0,73	0,70	0,68	0,63	0,74	0,73	0,69	0,75	0,74	0,69
E_A	0,60	0,65	0,65	0,63	0,61	0,57	0,67	0,66	0,62	0,68	0,67	0,62
E_{disp}	0,56	0,60	0,60	0,58	0,56	0,52	0,62	0,61	0,57	0,62	0,62	0,57
A_{tot}	7,25	7,43	6,71	7,21	7,16	7,94	6,55	6,64	7,28	6,49	6,77	7,07

Pela ficha técnica do fabricante, a área útil de cada módulo é 1,46 m². Ao optar por atender à geração máxima com menor área mensal requerida, ou seja,

Outubro, evitaria que excesso de energia fosse desperdiçado. Assim, a quantidade de módulos seria:

$$N = A_{tot} \cdot \frac{módulo}{A_{mód}} = 6,49 \cdot \frac{1}{1,46} = 4,5 \text{ módulos}$$

O perfil da geração com quatro módulos se correlaciona bem em boa parte do perfil de consumo mensal da entidade, como mostra a Figura 51. Porém, avaliando o total anual, a fração solar corresponde a 83,2% da carga do edifício.

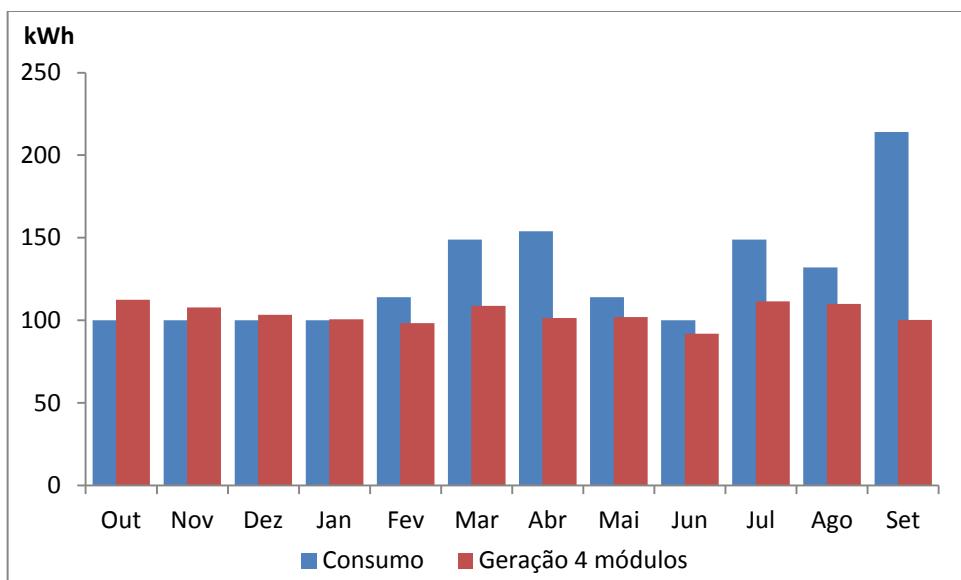


Figura 51- Perfis de consumo e geração com quatro módulos.

Já a escolha de cinco módulos ultrapassa o consumo em vários meses, como na Figura 52. A fração solar anual corresponde a 104% da carga. Apesar de haver pouco excesso de geração, recomenda-se instalar cinco módulos fotovoltaico, pois o sistema é baseado na conexão à rede elétrica, que funciona como um banco de bateria. Além disso, a tendência de maior consumo, seja por aumento natural ou pela adição de novas edificações à sede, brevemente absorveria o pouco excesso de energia fotovoltaica.

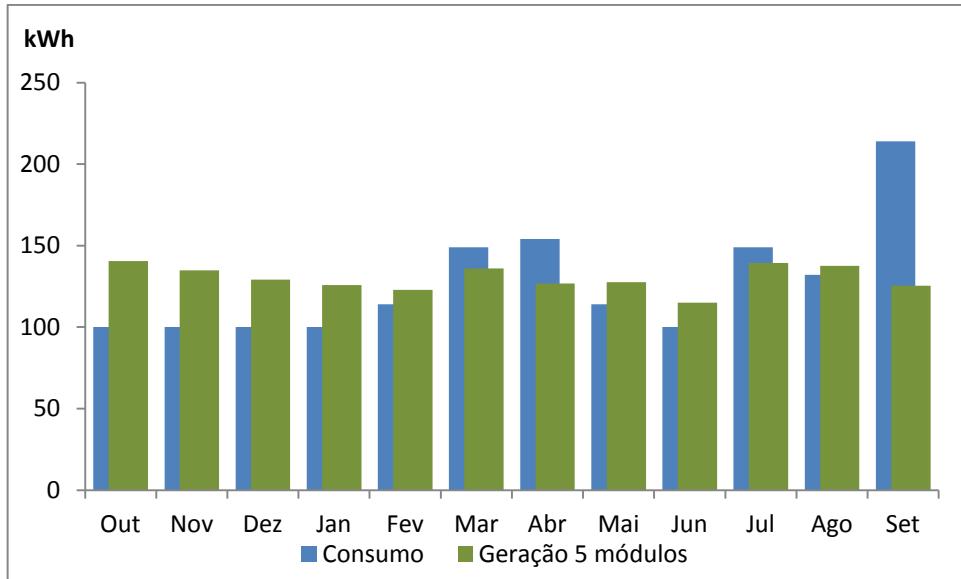


Figura 52 - Perfis de consumo e geração com cinco módulos.

4.5 DIMENSIONAMENTO SISTEMA TÉRMICO

Nesta parte serão dimensionados dois sistemas térmicos de energia solar, aquele que abastecerá os vestiários e aquele que manterá a temperatura da piscina. O primeiro utilizará o método f-chart, juntamente com as informações de entrada estabelecidas em capítulos anteriores, sabendo que o sistema tem capacidade de armazenamento de energia. O segundo seguirá o método da utilizabilidade, já que a energia incidente só é aproveitada quando excede certo valor, e também não acumula energia, como no caso anterior.

4.5.1 Dimensionamento do sistema solar de aquecimento de água para vestiários

O primeiro passo do dimensionamento, de acordo com a Figura 38, é calcular a energia solar incidente por unidade de área. Isso foi feito na seção 4.3.2, para o caso real. As variáveis ambientais, no caso a temperatura ambiente, são dadas na Figura 30. As cargas térmicas foram estimadas na seção 4.2.1.

Os dados dos coletores foram obtidos através das tabelas do Programa de Etiquetagem do INMETRO. A área do telhado disponível para o projeto deverá ser totalmente utilizada. Os dados utilizados estão na Tabela 21.

Tabela 21 - Dados dos coletores e sistema proposto.

Dado	Valor
$F_r(\tau\alpha)_n$	0,728
$F_r U_L$	6,18
$A_c (m^2)$	88
$T_{consumo} (^\circ C)$	40

Utilizando o mês de Junho como exemplo dos cálculos, os parâmetros adimensionais X, X_C e Y são obtidos pelas equações (42), (47) e (43). Os valores de $(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$ foram obtidos das Figuras 5.10.1 e 5.6.1 de Duffie & Beckman (2006) :

$$X = \frac{88 \cdot 6,18 \cdot (100 - 17,9) \cdot 30 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60}{737,92 \cdot 10^6 \cdot 30} = 5,23$$

$$\frac{X_C}{X} = \frac{11,6 + 1,18 \cdot 40 + 3,86 \cdot 17,9 - 2,32 \cdot 17,9}{100 - 17,9} = 1,05$$

$$X_C = 5,23 \cdot 1,05196 = 5,50$$

$$Y = \frac{0,728 \cdot 0,94 \cdot 15,52 \cdot 10^6 \cdot 30 \cdot 88}{737,92 \cdot 10^6 \cdot 30} = 1,25$$

Assim, a fração solar do mês em análise é obtida pela equação (46):

$$f = 1,029 \cdot 1,25 - 0,065 \cdot 5,5 - 0,245 \cdot 1,25^2 + 0,0018 \cdot 5,5^2 + 0,0215 \cdot 1,25^3 = 0,64$$

Na Tabela 22 estão todos os parâmetros calculados para cada mês. A fração solar total será a razão da soma da fração solar de cada mês multiplicada pela carga térmica correspondente, pela carga térmica anual, assim:

Tabela 22 - Resultados do método f-chart.

Mês	\bar{H}_T (MJ/dia.m ²)	Q_{dem} (MJ)	X	Xc	Y	f	$\frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n}$	$E_{solar \text{ útil}}$ (MJ)
Jan	18,36	16.147,40	6,82	8,69	2,10	0,85	0,93	13.732,30
Fev	19,70	14.397,77	6,89	8,83	2,28	0,89	0,93	12.876,12
Mar	19,36	16.561,44	6,68	8,42	2,18	0,88	0,94	14.616,06
Abr	17,83	18.331,11	6,02	7,09	1,76	0,80	0,94	14.628,33
Mai	17,05	21.426,36	5,49	6,02	1,49	0,73	0,94	15.690,33
Jun	15,52	22.137,57	5,23	5,50	1,25	0,64	0,93	14.258,44
Jul	18,28	23.082,51	5,19	5,43	1,46	0,75	0,93	17.277,01
Ago	18,62	21.426,36	5,49	6,02	1,62	0,79	0,94	16.932,97
Set	17,98	19.332,81	5,78	6,61	1,68	0,79	0,94	15.235,96
Out	20,06	18.631,62	6,10	7,25	1,99	0,87	0,93	16.207,83
Nov	20,28	17.129,07	6,34	7,74	2,12	0,89	0,93	15.223,79
Dez	18,88	16.975,48	6,56	8,16	2,05	0,86	0,93	14.525,85
Total	225.579,50			Total	0,80			

Portanto, esse sistema solar deverá fornecer 80% da energia necessária para aquecer a água dos banhos, caso o consumo não seja muito diferente do previsto. Além disso, em cada um dos meses, a fração solar está compreendida entre 64% e 89%, de forma a não haver desperdício de energia solar. Esse resultado valida a intenção de não superdimensionar o sistema, evitando, assim, custos desnecessários.

4.5.2 Dimensionamento do sistema solar de aquecimento de água para piscina

A avaliação do sistema de aquecimento da piscina segue o fluxograma da Figura 39. A energia incidente foi calculada pelo procedimento da seção 4.3.3. Já as perdas térmicas, foram obtidas na seção 4.2.2. O método da utilizabilidade, explicado na seção 3.5.2, será desenvolvido aqui para o mês exemplo de Junho.

Inicialmente, os dados do coletor escolhido foram obtidos das tabelas do Programa Brasileiro de Etiquetagem do INMENSTRO. Esses e outros dados iniciais estão relacionados na Tabela 1.

Tabela 23 - Dados de entrada do dimensionamento.

Dado	Valor
$F_r(\tau\alpha)_n$	0,914
$F_r U_L$	22,570
β	6,3°
$A_c (m^2)$	69
$T_{piscina} (°C)$	33,5

A radiação crítica é obtida pela equação (50):

$$I_{Tc} = \frac{22,570 \cdot (33,5 - 17,9)}{0,914 \cdot 0,93} = 414,22 \frac{W}{m^2}$$

A sequência a seguir, correspondente às equações (53) a (61), determina o valor do nível de radiação crítica adimensional para o mês:

$$r_{t,n} = \frac{\pi}{24} (0,5759 + 0,8196 \cos 0) \frac{\cos 0 - \cos 79,44}{\sin 79,44 - \frac{\pi \cdot 79,44}{180} \cos 79,44} = 0,2047$$

$$a = 0,409 + 0,5016 \sin (79,44 - 60) = 0,5759$$

$$b = 0,6609 + 0,4767 \sin (79,44 - 60) = 0,8196$$

$$r_{d,n} = \frac{\pi}{24} \frac{\cos 0 - \cos 79,44}{\sin 79,44 - \frac{\pi \cdot 79,44}{180} \cos 79,44} = 0,1467$$

Como $\omega_s = 79,44^\circ < 81,4^\circ$ e considerando $K_T = \bar{K}_T = 0,57$,

$$\frac{H_d}{H} = 1 - 0,2727 \cdot 0,57 + 2,4495 \cdot 0,57^2 - 11,9514 \cdot 0,57^3 + 9,3879 \cdot 0,57^4 = 0,418$$

$$R_{b,n} = \frac{\cos(-23,25 + 6,3) \cos 23,1 \cos 0 + \sin(-23,25 + 6,3) \sin 23,21}{\cos(-23,25) \cos 23,1 \cos 0 + \sin(-23,25) \sin 23,1} = 1,11$$

$$R_n = \left(1 - \frac{0,1467}{0,2047} \cdot 0,42\right) 1,11 + \left(\frac{0,1467}{0,2047} \cdot 0,42\right) \left(\frac{1 + \cos 6,3}{2}\right) + 0,2 \left(\frac{1 - \cos 6,3}{2}\right) = 1,08$$

$$\bar{X}_C = \frac{I_{Tc}}{r_{t,n} R_n \bar{H}} = \frac{414,22 \cdot 3600}{0,2047 \cdot 1,08 \cdot 12,816 \cdot 10^6} = 0,5283$$

Sendo \bar{X}_C um dos adimensionais necessários para calcular a utilizabilidade, basta obter o outro adimensional. Dessa forma:

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \frac{16,38 \cdot 10^6}{12,816 \cdot 10^6} = 1,278$$

$$\frac{R_n}{\bar{R}} = \frac{1,076}{1,278} = 0,8419$$

Agora, a utilizabilidade média para o mês de Junho é dada pela equação (62). Assim:

$$\bar{\phi} = \exp\{-1,032 - 0,469 \cdot 0,8419][0,5283 + 0,610 \cdot 0,5283^2]\} = 0,369$$

$$a = 2,943 - 9,271 \cdot 0,57 + 4,031 \cdot 0,57^2 = -1,032$$

$$b = -4,345 + 8,853 \cdot 0,57 - 3,602 \cdot 0,57^2 = -0,469$$

$$c = -0,170 - 0,306 \cdot 0,57 + 2,936 \cdot 0,57^2 = 0,610$$

A Tabela 24 mostra os resultados parciais do desenvolvimento de cálculo acima para os outros meses. A utilizabilidade obtida para cada mês é entrada para saber qual a quantidade de energia útil do sistema solar para manter a temperatura da piscina constante.

Tabela 24 - Utilizabilidade e resultados intermediários.

Mês	I_{tc} (W/m ²)	$r_{b,n}$	$r_{d,n}$	$\frac{H_d}{H}$	$R_{b,n}$	R_n	\bar{X}_C	$\bar{\phi}$
Jan	241,63	0,20	0,12	1,32	1,00	1,00	0,22	0,68
Fev	236,32	0,20	0,12	1,39	1,01	1,00	0,21	0,70
Mar	249,56	0,20	0,13	1,43	1,04	1,00	0,23	0,68
Abr	309,98	0,20	0,14	1,46	1,06	1,00	0,34	0,57
Mai	373,03	0,20	0,14	1,54	1,09	0,99	0,45	0,43
Jun	414,22	0,20	0,15	0,42	1,11	1,08	0,53	0,37
Jul	419,53	0,20	0,15	0,26	1,10	1,08	0,45	0,40
Ago	373,03	0,20	0,14	1,56	1,08	0,99	0,40	0,48
Set	336,25	0,20	0,13	1,41	1,05	1,00	0,35	0,56
Out	305,35	0,20	0,13	1,43	1,02	1,00	0,27	0,63
Nov	281,45	0,20	0,12	1,41	1,00	1,00	0,24	0,66
Dez	262,87	0,20	0,12	1,34	0,99	1,00	0,24	0,67

A seguir, obtém-se a energia útil em um dia. A soma da energia média em cada dia do mês fornece a energia média mensal, de acordo com a equação (52). A fração solar pode ser obtida dividindo a energia útil gerada pelo sistema solar pela energia necessária para repor as perdas de calor, conforme calculado na seção 4.2.2. A

Tabela 25 mostra os resultados finais para cada mês do ano.

$$Q_u = 69 \cdot 0,914 \cdot 0,93 \cdot 16,38 \cdot 10^6 \cdot 0,369 = 354,5 \text{ MJ}$$

$$Q_{u,Jun} = 354,5 \cdot 30 = 10635,1 \text{ MJ}$$

$$fracão solar = \frac{10635,1}{31596,8} = 0,337 = 33,7\%$$

Tabela 25 - Energia solar útil para piscina.

Mês	Q_u (MJ)	$Q_{u, \text{mês}}$ (MJ)	$Q_{\text{dem, mês}}$ (MJ)	Fração solar
Jan	705,255	21862,92	18805,06	1,16
Fev	792,122	22179,43	16605,63	1,34
Mar	770,097	23873,00	19649,66	1,21
Abr	615,598	18467,94	23814,96	0,78
Mai	453,175	14048,43	29795,16	0,47
Jun	354,01	10620,31	31596,82	0,34
Jul	452,517	14028,04	33060,82	0,42
Ago	539,614	16728,04	29795,16	0,56
Set	591,88	17756,41	25952,18	0,68
Out	726,124	22509,85	23952,30	0,94
Nov	759,07	22772,09	21290,30	1,07
Dez	704,06	21825,85	20499,68	1,06

Os resultados mostram que há meses em que a energia fornecida pelo sistema solar supera a demanda para suprir as perdas energéticas. Além de haver mais radiação disponível, esses meses pertencem às estações mais quentes, havendo, portanto, menor perda de calor para o ambiente por causa das temperaturas ambientais mais altas.

De qualquer forma, há economia de energia elétrica para aquecimento da piscina, considerando que o aquecimento suplementar dar-se-á por meio de bomba de calor. A fração solar total é de 77%, considerando as economias anuais. Esses resultados justificam, tecnicamente, a viabilidade de um sistema desse tipo.

Vale destacar que o modelo não prevê acúmulo de energia de um mês ao outro, o que ocorre na realidade, pois uma piscina tem massa e capacidade térmica grandes. Sendo assim, esse resultado está, de certa forma, conservador quanto à capacidade de aquecimento dos coletores.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho foi capaz de mostrar técnicas de previsão de aproveitamento de energia solar para satisfazer as necessidades energéticas de uma instituição de serviços assistenciais. As técnicas foram seguidas de livros e manuais técnicos consagrados que costumam ser referência a outros textos técnicos do assunto.

Os resultados obtidos pelo levantamento de campo são:

- há área disponível para instalações de sistemas solares de aproveitamento de energia, a saber: 69 m² para aquecimento de piscina; 240 m² para painéis fotovoltaicos e 88 m² para aquecimento de água dos vestiários, após estudo de sombreamento;
- a orientação de cada sistema será alinhada com o norte geográfico;
- a quantidade alvo de energia elétrica fornecida pelo sistema fotovoltaico é 125,08 kWh/mês;

O cálculo do sistema fotovoltaico forneceu as seguintes conclusões:

- um sistema de cinco módulos fotovoltaicos, com as especificações dadas no memorial de cálculo, fornece fração solar de 104%, com aproveitamento da conexão com a rede elétrica para compensação.

O dimensionamento dos sistemas térmicos, a partir dos modelos de previsão de cargas térmica e determinação da radiação solar incidente, forneceu os seguintes resultados:

- sistema de aquecimento de água para banhos com fração solar anual de 80%, e frações mensais que variam entre 64% e 89%;
- sistema de aquecimento de água da piscina com fração solar de 77%, e frações mensais que variam entre 34% e 116%.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, S. L. Estações solarimétricas. In: MONTENEGRO, A. A. **Fontes não convencionais de energia: as tecnologias solar, eólica e de biomassa.** 3^a ed. Florianópolis: 2000. p 101-114.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Heating, ventilating and air-conditioning applications.** SI ed. Atlanta: ASHRAE. 2007.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE). **Fundamentals Handbook.** IP ed. Atlanta: ASHRAE. 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15569:** Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Projeto e instalação. Rio de Janeiro: 2008. 36p.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME); EMPRESA DE PESQUISAS ENERGÉTICAS (EPE). **Plano decenal de expansão de energia 2020.** Brasília: MME/EPE, 2011. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/PDEE/20120302_1.pdf>. Acesso em 28 ago.2012.

COLLE, S; PEREIRA, E. B. Atlas de irradiação solar do Brasil: 1^a versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície. In: MONTENEGRO, A. A. **Fontes não convencionais de energia: as tecnologias solar, eólica e de biomassa.** 3^a ed. Florianópolis: 2000. p 75-100.

COMETTA, E. **Energia solar:** utilização e empregos práticos. São Paulo: Hemus Editora Ltda, 1982. 127 pp.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: CRESESB, 1999. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2004.pdf>. Acesso em: 01 Set. 2012.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). Potencial energético solar - SunData. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php#sundata>>. Acesso em: 06 Out. 2012.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). **Tutorial de Energia Solar Fotovoltaica.** Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=tutorial_solar>. Acesso em: 23 Jul. 2012.

DUFFIE, J. A., BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes.** 3^a ed. New Jersey: John Wiley & Sons. 2006. 908 p.

GOLDEMBERG, J. **Energia e desenvolvimento sustentável**. São Paulo: Blucher, 2010. 94 p.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **World energy outlook**: Executive summary. Paris: OECD/IEA 2011a. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/executive_summary.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2012.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Energy for all**: Financing access for the poor. Paris: OECD/IEA 2011b. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/weo2011_energy_for_all.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2012.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewable energy** : Markets and prospects by region. Paris: OECD/IEA 2011c. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Renew_Regions.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2012.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Renewable energy** : Markets and prospects by technology. Paris: OECD/IEA 2011d. Disponível em: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/Renew_Tech.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2012.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Energy Technology Perspectives 2012** : Pathways to a Clean Energy System. Executive summary. Paris: OECD/IEA 2012. Disponível em: <<http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/ETP2012SUM.pdf>>. Acesso em: 28 ago. 2012.

LIGHTING AFRICA. **Solar Lighting for the Base of the Pyramid**: Overview of an Emerging Market. S.l: IFC/World Bank, Outubro, 2010. Disponível em: <[http://www.lightingafrica.org/files/Solar%20Lighting%20for%20the%20BOP-%20overview%20of%20an%20emerging%20mkt_\(2\).pdf](http://www.lightingafrica.org/files/Solar%20Lighting%20for%20the%20BOP-%20overview%20of%20an%20emerging%20mkt_(2).pdf)>. Acesso em: 28 ago. 2012.

MORRIS, E.; WINIECKI, J.; CHOWDHARY, S.; CORTIGLIA, K. **Using Microfinance to Expand Access to Energy Services**: Summary of Findings. Small Enterprise Education and Promotion Network. Washington: The SEEP Network, 2007. Disponível em: <http://www.arcfinance.org/pdfs/pubs/Energy_Summary_FINAL.pdf>. Acesso em: 28 ago. 2012.

NASPOLINI, H. F.; RUTHER, R. The impacts of solar water heating in low-income households on the distribution utility's active, reactive and apparent power demands. **Solar Energy**, n. 85, p. 2023-2032, Jun. 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X11001915>>. Acesso em: 27 ago. 2012

NASPOLINI, H. F.; RUTHER, R. Assessing the technical and economic viability of low-cost domestic solar hot water systems (DSHWS) in low-income residential dwellings in Brazil. **Renewable Energy**, n. 48, p. 92-99, Abr. 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811200287X>>. Acesso em: 27 ago. 2012

PEREIRA, E. B., MARTINS, F. R., ABREU, S. L., RUTHER, R. **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006. 60p. Disponível em: <http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst/pdf/atlas_solar-reduced.pdf>. Acesso em: 30 ago. 2012.

REDDY, T.A. **Design and sizing of active solar thermal systems**. New York: Oxford University Press. 1987. 391 p.

SIMÕES MOREIRA, J.R. **Fundamentos e aplicações da psicrometria**. São Paulo: RPA: 1999. 194p.

ANEXO A – DADOS DA APAE

ASSOCIAÇÃO DE PAIS E AMIGOS DOS EXCEPCIONAIS DE CABREÚVA

Rua Paraíba, 369

Bairro Jacaré - Cabreúva - São Paulo

CEP 13318-000

Telefones: (11) 4529-3378

(11) 4529-7559

E-mail para contato: apaecabreuva@superig.com.br

Página eletrônica: www.apaecabreuva.org.br