

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP
ENERGIAS RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

JOEL PUGAS MARTINS

Estudo comparativo de sistemas de geração termo-fotovoltaico, utilizando combinações de painéis solares elétricos, térmicos e os tipos híbridos

SÃO PAULO
2014

Joel Pugas Martins

Estudo comparativo de sistemas de geração termo-fotovoltaico, utilizando combinações de painéis solares elétricos, térmicos e os tipos híbridos

**Monografia apresentada ao
PECE para finalização do
curso de Energias
Renováveis, Geração
Distribuída e Eficiência
Energética**

Área de Atuação:
Energia Solar

Orientador:
Prof. Dr. Cláudio Pacheco

SÃO PAULO
2014 .

FICHA CATALOGRÁFICA

MARTINS, Joel Pugas

Estudo comparativo de sistemas de geração termo-fotovoltaico, utilizando combinações de painéis solares elétricos, térmicos e os tipos híbridos

J.P. Martins -- São Paulo, 2014

96 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia

1.Energia solar I. Universidade de São Paulo
. Escola Politécnica. Programa de Educação Continuada em Engenharia

Nome: MARTINS, Joel Pugas

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Cláudio Pacheco, primeiramente pela marcante presença professoral nas aulas que ministrou nos cursos do PECE e pela qualidade de sua didática e paciência na explicação de tópicos importantes desse trabalho.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, pela sua marcante contribuição no meu curso de graduação, na minha formação acadêmica e por ser a base desse curso de especialização em energia renováveis.

Ao PECE, com todos seus professores, funcionários e colegas de sala de aula pela oportunidade de um convívio em ambiente carregado de conhecimento e experiência profissional.

À minha esposa, Alessandra, e minha filha, Juliana pela paciência com minha eventual ausência nas horas que precisei estar compenetrado neste trabalho.

Joel Pugas Martins

RESUMO

MARTINS, J. P. **Estudo comparativo de sistemas de geração termo-fotovoltaico, utilizando combinações de painéis solares elétricos, térmicos e os tipos híbridos.** 2014 - Monografia – PECE – Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da USP, São Paulo.

Esse trabalho apresenta as metodologias atualmente consagradas nos meios acadêmicos e na sociedade de uma maneira geral para o dimensionamento de sistemas solares térmicos (Duffie e Beckman - 2006), elétricos (Zilles - 2012), e híbridos (Marques 2008) que usam coletores solares e células fotovoltaicas no mesmo painel.

São aplicados os cálculos definidos nessas metodologias no caso exemplo desse trabalho de forma a atender as demandas térmica e elétrica, com prioridade na produção de energia elétrica.

São três diferentes propostas de configurações de sistemas solares, combinando painéis fotovoltaicos, coletores solares e os tipos híbridos, de forma a se buscar aquela de melhor desempenho com menor custo, ou seja, a de menor relação custo/benefício.

São explorados pelo menos dois aspectos peculiares das configurações de sistemas aqui apresentados:

- O uso de dois reservatórios em série
- O cálculo da temperatura da célula fotovoltaica dos painéis híbridos

Como resultado desse trabalho, são apresentadas planilhas mostrando os principais e mais relevantes parâmetros técnicos e econômicos dos três projetos, para análise e discussão

Palavras-chave: Coletor solar, Painel fotovoltaico; Painel híbrido; Energia elétrica, Energia térmica.

ABSTRACT

MARTINS, J. P. Comparative study of Thermo-photovoltaic generation systems, using combinations of electrical and thermal solar panels, and the hybrid types

- 2014. Monograph – PECE – Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da USP, São Paulo.

This work presents the methodologies currently used in academia and in the society, in general way, for the sizing of thermal solar systems, including the lifting of the solar potential on site (Duffie and Beckman -2006) and electric generation (Zilles-2012), and also work already done on hybrid systems (Marques 2008), using panels with solar collectors and photovoltaic cells.

Then it is applied the calculations defined in these methodologies in this fictitious example work in order to meet the thermal and electrical demands, with priority in the production of electrical energy.

There are three different proposals for setting up solar systems, combining photovoltaic panels, solar collectors and the hybrid type, in order to get that one that present better performance at a lower cost, i.e. the lowest cost/benefit ratio.

It is explored at least two peculiar aspects of the systems settings presented here:

- The use of two reservoirs in series
- The temperature calculation of photovoltaic cell in the hybrid panels

As a result. of this work it is presented a spreadsheet in which are shown the main and most relevant technical and economic parameters of three projects for analysis and discussion.

Keywords: Solar collector; Photovoltaic panel , Hybrid panel, Electrical power ..

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1: COMPOSIÇÃO BÁSICA DO COLETOR SOLAR.....	21
FIGURA 2.2: CURVAS DE ENERGIA DEMANDADA PELA CARGA TÉRMICA E ENERGIA FORNECIDA PELO COLETOR EM FUNÇÃO DO TEMPO.	24
FIGURA 2.3: SISTEMA TÍPICO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA SOLAR EM ÁGUA	27
FIGURA 2.4: PROCESSO DE CONVERSÃO FOTOVOLTAICA	30
FIGURA 2.5: COMPOSIÇÃO DO PAINEL FOTOVOLTAICO.....	31
FIGURA 2.6: CURVA TÍPICA DE PAINEL FOTOVOLTAICO (I-V) E (P-V).....	32
FIGURA 2.7: CURVA I-V PARA VÁRIOS NÍVEIS DE RADIAÇÃO	33
FIGURA 2.8: CURVA P-V PARA VÁRIOS NÍVEIS DE RADIAÇÃO	33
FIGURA 2.9: CURVA I-V A 1000 W/M^2 E VÁRIOS NÍVEIS DE TEMPERATURA DA JUNÇÃO P-N...	34
FIGURA 2.10: CURVA P-V A 1000 W/M^2 E VÁRIOS NÍVEIS DE TEMPERATURA DA JUNÇÃO P-N	34
FIGURA 2.11: CONFIGURAÇÃO TÍPICA DE UM SISTEMA FV CONECTADO À REDE	37
FIGURA 2.12: EFICIÊNCIA MÉDIA ANUAL DE UM INVERSOR EM FUNÇÃO DO FDI	43
FIGURA 2.13: COLETOR HÍBRIDO COMPOSTO POR CÉLULAS FOTOVOLTAICAS E UM SISTEMA DE APROVEITAMENTO DE CALOR.....	44
FIGURA 2.14: COLETOR HÍBRIDO PLACA-TUBO SEM COBERTURA	45
FIGURA 2.15: FLUXO DE ÁGUA PELO COLETOR HÍBRIDO.....	45
FIGURA 3.1: PERFIL DE CARGA TÉRMICA A SER ATENDIDA PELOS COLETORES SOLARES..	50
FIGURA 3.2: CONFIGURAÇÃO SFC	55
FIGURA 3.3: CONFIGURAÇÃO SFH	58
FIGURA 3.4: CONFIGURAÇÃO SFHC	60
FIGURA 3.5: TEMPERATURAS DO SISTEMA HÍBRIDO MAIS COLETOR SOLAR	61
FIGURA 4.1: PERFIL DA TEMPERATURA DE ARMAZENAMENTO AO LONGO DO DIA.....	66
FIGURA 4.2: PERFIL DA POTÊNCIA ELÉTRICA PRODUZIDA AO LONGO DO DIA.....	69
FIGURA 4.3: PERFIL DA TEMPERATURA DE ARMAZENAMENTO AO LONGO DO DIA.....	73
FIGURA 4.4: PERFIL DA POTÊNCIA ELÉTRICA PRODUZIDA AO LONGO DO DIA.....	76
FIGURA 4.5: PERFIL DA TEMPERATURA DO RESERVATÓRIO PRINCIPAL AO LONGO DO DIA.	81
FIGURA 4.6: PERFIL DA POTÊNCIA ELÉTRICA PRODUZIDA AO LONGO DO DIA.....	84

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1: DIAS MÉDIOS PARA CADA MÊS.	16
TABELA 2.2: TABELA DE RADIAÇÃO INTEGRADA TOTAL DIÁRIA (H).....	17
TABELA 2.3: TABELA INMETRO DE COLETORES SOLARES.....	22
TABELA 3.1: DADOS DO LOCAL DO EXEMPLO REFERÊNCIA	48
TABELA 3.2: DADOS DO CHUVEIRO	48
TABELA 3.3: DADOS DA MÁQUINA DE LAVA-LOUÇA	49
TABELA 3.4: DEMANDA TÉRMICA AO LONGO DO DIA	49
TABELA 3.5: PERFIL DA CARGA ELÉTRICA A SER CONSIDERADA PARA O SISTEMAS FV	54
TABELA 3.6: DADOS DO COLETOR SOLAR	55
TABELA 3.7: DADOS DO PAINEL FOTOVOLTAICO	56
TABELA 3.8: DADOS DO INVERSOR C.C./C.A.	56
TABELA 3.9: DADOS TÉRMICOS DO PAINEL HÍBRIDO	58
TABELA 3.10: DADOS ELÉTRICOS DO PAINEL HÍBRIDO.....	59
TABELA 4.1: DADOS DO RESERVATÓRIO DE ÁGUA.....	62
TABELA 4.2: RESULTADOS DO POTENCIAL SOLAR, E TEMPERATURA DE ARMAZENAMENTO - SFC	63
TABELA 4.3: RESULTADOS DA GERAÇÃO ELÉTRICA - SFC.....	68
TABELA 4.4: DADOS DO RESERVATÓRIO DE ÁGUA.....	69
TABELA 4.5: RESULTADOS DO POTENCIAL SOLAR, E TEMPERATURA DE ARMAZENAMENTO - SFH	70
TABELA 4.6: RESULTADOS DA GERAÇÃO ELÉTRICA - SFH.....	75
TABELA 4.7: DADOS DO RESERVATÓRIO DE ÁGUA DO COLETOR SOLAR (PRINCIPAL).....	77
TABELA 4.8: DADOS DO RESERVATÓRIO DE ÁGUA DO PAINEL HÍBRIDO (AUXILIAR).....	77
TABELA 4.9: RESULTADOS DO POTENCIAL SOLAR, E TEMPERATURA DE ARMAZENAMENTO - SFHC	78
TABELA 4.10: RESULTADOS DA GERAÇÃO ELÉTRICA – SFHC	83
TABELA 4.11: RESUMO DOS RESULTADOS TÉCNICOS PARA COMPARAÇÃO	85
TABELA 4.12: RESUMO DOS CUSTOS PARA COMPARAÇÃO	87
TABELA 4.13: CÁLCULO DO RETORNO FINANCEIRO (“PAY-BACK”)	88

LISTA DE SÍMBOLOS

A :	área de troca térmica do reservatório de armazenamento, em m^2
A_c :	área total de coletores solares (ou híbrido), em m^2
a_c :	área de um coletor solar (ou híbrido), em m^2
A_p :	área total de painéis fotovoltaicos, em m^2
a_p :	área de um painel solar, em m^2
AM :	massa de ar, adimensional
C_p :	calor específico da água, em $kJ/kg.^{\circ}C$
c.c.	corrente contínua
c.a.	corrente alternada
F_R :	fator de remoção de calor, adimensional
$F_R(\tau\alpha)$:	parâmetro que indica como a energia é absorvida pelo coletor, adimensional
F_{RUL} :	parâmetro que indica como a energia é perdida pelo coletor, adimensional
FV:	fotovoltaico
FDI –	Fator de Dimensionamento do Inversor
G_{SC} :	constante solar, em W/m^2
G_T :	fluxo de radiação solar no plano inclinado, em W/m^2
\bar{H} :	radiação diária integrada média mensal sobre superfície horizontal, em MJ/m^2
\bar{H}_0 :	radiação diária extraterrestre integrada média mensal superfície horizontal, em MJ/m^2
\bar{H}_d :	radiação difusa diária integrada média mensal sobre superfície horizontal, em MJ/m^2
HS:	hora solar, em h
$H_{t,\beta}$	- irradiância incidente no plano de inclinação β do painel fotovoltaico/coletor, em MJ/m^2
H_{ref}	- irradiância nas condições de referência, $1.000\ W/m^2$, $25\ ^{\circ}C$ e $AM = 1.5.$, em MJ/m^2
I_{mp} :	corrente do painel FV na máxima potência, em A
I :	radiação total horária, em MJ/m^2
I_b :	radiação direta horária, em MJ/m^2
I_d :	radiação difusa horária, em MJ/m^2
I_T :	radiação horária sobre superfície inclinada, em MJ/m^2
k_0 :	fator relacionado ao auto-consumo do inversor, adimensional

k_1 e k_2 : fator relacionado as perdas por carregamento do inversor, adimensional

\overline{K}_T : índice de claridade diária média mensal, adimensional

L : energia demandada pela carga térmica, em MJ

\dot{L} : taxa de energia demandada pela carga térmica, em kW

L_s : energia demandada pela carga térmica, suprida por fonte solar, em MJ

\dot{L}_s : taxa de energia demandada pela carga térmica, suprida por fonte solar, em kW

\dot{L}_{s1} : taxa de energia térmica do reservatório do painel híbrido (auxiliar), em kW

\dot{L}_{s2} : taxa de energia térmica do reservatório do coletor solar (principal), em kW

\dot{L}_w : taxa de energia térmica do processo, em kW

m : massa de água no sistema (reservatório), em kg

\dot{m} : vazão mássica de água do sistema, em kg/s

\dot{m}_{cs} : vazão mássica de água de consumo, em kg/s

n : dia do ano, adimensional

N_c : número de coletores solares ou híbridos, adimensional

N_p : número de painéis solares, adimensional

PMP : ponto de máxima potência, adimensional

P_{mp} : máxima potência fornecida pelo gerador fotovoltaico, em W

P_{FV}^o : potência nominal do gerador fotovoltaico, em W

P_{FV} : potência instantânea do gerador fotovoltaico, em W

$P_{saída}$: potência de saída do inversor (ou do sistema FV), em W

$P_{entrada}$: potência de entrada do inversor, em W

$p_{saída}$: potência de saída do sist. FV normalizada em relação a pot. nominal do inversor, adimensional

p_{FV} : potência do gerador FV normalizada em relação a pot. nominal do inversor, adimensional

p_{perdas} : potência de perdas normalizada em relação a potência nominal do inversor adimensional

P_{INV}^o : potência nominal do inversor, em W

P_{INV}^{max} : potência máxima do inversor, em W

PR : rendimento global do sistema, adimensional

Q_s : capacidade térmica total para um ciclo de temperatura ΔT_s , em kJ

Q_u : energia útil produzida pelo coletor solar (ou híbrido) / painel FV, em MJ.

Q_{perdas} : energia de perdas da água, em MJ

\dot{Q}_u : taxa de energia útil, em kW

q_{ca} : fluxo de calor entre a célula FV e o coletor, em kW

Rb: razão entre a radiação direta na superfície inclinada e a radiação no plano horizontal
adimensional

rd: razão entre a radiação difusa horária e a radiação difusa diária, adimensional

rt: razão entre a radiação total horária pela radiação diária, adimensional

SFC: Sistema com painel Fotovoltaico e Coletor solar, separados

SFH: Sistema com célula Fotovoltaica e coletor solar juntos, painel Híbrido

SFHC: Sistema Fotovoltaico com painel Híbrido mais Coletor solar

SFCR: Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede

SPMP Seguidor do Ponto de Máxima Potência

STC: Standard Temperature Conditions

SP: Sol Pleno

T'a ou Ta: temperatura ambiente, em °C

Td: temperatura de consumo da água na carga, em °C

Tr: temperatura da água recebida da rede, em °C

Ts: temperatura no reservatório de armazenamento, em °C

T_{s1} : temperatura de saída da água do reservatório auxiliar, em °C

T_{e1} : temperatura de entrada da água do reservatório auxiliar (água fria), em °C

T_{s2} : temperatura de saída do reservatório principal, em °C

T_{e2} : temperatura de entrada do reservatório principal, em °C

Ts+ : temperatura esperada no reservatório de armazenamento no instante t+Δt, em °C

T_M : temperatura média da água do coletor, em °C

T_C : temperatura da célula FV, em °C

T_{C,ref} : temperatura da célula nas condições de referência, 1.000 W/m², 25 °C e AM = 1.5, em °C

TNOC: temperatura nominal de operação da célula, em °C

T_{s1} : temperatura de saída do reservatório do painel híbrido, em °C

T_{e1} : temperatura de entrada do reservatório do painel híbrido (água fria), em °C

T_{s2} : temperatura de saída do reservatório do coletor solar, em °C

T_{e2} : temperatura de entrada do reservatório do coletor solar, em °C

T_{sH} : temperatura de saída da água do painel híbrido, em °C

T_{eH} : temperatura de entrada água do painel híbrido, em °C

ΔT_s : variação de temperatura, em °C

U : coeficiente de troca térmica global do reservatório, em kW/m². °C

U_{ca} : coeficiente de troca térmica global entre a célula FV e o coletor, em kW/m². °C

U_L : coeficiente de troca térmica global do coletor, em W/m². °C

\dot{V} : vazão da água pelo coletor (ou híbrido), m³/s

V_{arm} :volume de água no reservatório, em m³

V_{mp} : tensão do painel FV na máxima potência, em V

Y_F : Produtividade do sistema, em kWh/kWp

α : absorvância, adimensional

β : inclinação da superfície dos coletores / painéis, em °

δ : declinação solar, em °

γ : ângulo azimutal da superfície dos coletores / painéis, em °

γ_{mp} : coeficiente de temperatura, adimensional

ρ : densidade da água, em kg/m³

ρ_g : refletividade do solo, adimensional

Φ : latitude do local, em °

η : eficiência do coletor/painel solar, adimensional

η_{INV} : eficiência do inversor, adimensional

$\eta_{INV10}, \eta_{INV50}, \eta_{INV100}$ -eficiência instantânea a 10%, 50% e 100% da potência nominal do inversor, adimensional

η_{SPMP} :eficiência do seguidor do ponto de máxima potência, adimensional

τ : transmitância, adimensional

ω : ângulo horário, em °

ω_s : ângulo horário do pôr do sol, em °.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Objetivo	12
1.2. Justificativa	14
1.3. Metodologia.....	15
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1. Potencial de radiação solar.....	15
2.1.1. Radiação horária no plano inclinado (I_T).....	15
2.2. Dimensionamento térmico	21
2.2.1. Coletor solar.....	21
2.2.2. Eficiência do coletor solar no local	21
2.2.3. Energia útil - térmica	22
2.2.4. Cargas térmicas do processo e saídas do coletor solar	23
2.2.5. Armazenamento de energia	25
2.2.6. Massa de água dos reservatórios.....	26
2.2.7. Armazenamento em água	26
2.3. Dimensionamento elétrico	29
2.3.1. Conversão fotovoltaica	29
2.3.2. Células e Módulos fotovoltaicos.....	29
2.3.3. Energia útil - elétrica	31
2.3.3.1. Curva corrente versus tensão (I-V) e ponto de máxima potência	31
2.3.3.2. Eficiência de conversão.....	35
2.3.3.3. Rendimento global do sistema.....	35
2.3.3.4. Configuração básica de um SFCR.....	36
2.3.3.5. Modelo matemático para o cálculo de potência	37
2.3.3.6. Eficiência de conversão	40
2.3.3.7. Cálculo da potência de saída do SFCR.....	42
2.3.3.8. Fator de dimensionamento do inversor	42
2.3.3.9. Configuração do SFCR.....	43
2.4. Coletores híbridos (fotovoltaico e térmico)	44
2.4.1. Temperatura na célula fotovoltaica do painel híbrido.....	45
3. DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS TÉRMICO E ELÉTRICO PROPOSTOS	47
3.1. Dados geográficos do exemplo referência	47

3.2.	Cálculo da radiação horária no plano inclinado	48
3.3.	Dimensionamento do sistema térmico	48
3.3.1.	Cálculo da carga térmica atendida pelo sistema solar (L_s).....	48
3.3.2.	Cálculo das perdas térmicas (Q_{perdas})	51
3.3.3.	Cálculo da massa de água nos reservatórios (m).....	51
3.3.4.	Cálculo da temperatura do reservatório (T_s).....	51
3.3.4.1.	Processo iterativo	52
3.4.	Dimensionamento do sistema elétrico.....	53
3.4.1.	Cálculo da carga elétrica.....	53
3.5.	Sistema com Painéis Fotovoltaicos e Coletores Solares, separados (SFC).....	54
3.5.1.	Dados do coletor solar adotado	55
3.5.2.	Dados do painel FV e inversor adotados.....	55
3.6.	Sistema com Painéis Fotovoltaicos e Coletores Solares, juntos (SFH).....	57
3.6.1.	Dados do painel híbrido adotado.....	58
3.7.	Sistema com Painéis Híbridos + Coletores Solares (SFHC).....	59
3.7.1.	Cálculo das temperaturas nos reservatórios (T_s).....	60
4.	RESULTADOS.....	62
4.1.	Configuração SFC	62
4.1.1.	Térmico.....	62
4.1.1.1.	Resultado do cálculo da massa de água nos reservatórios.....	62
4.1.1.2.	Resultado do cálculo da temperatura de armazenamento.....	63
4.1.1.3.	Resultado do cálculo do número de coletores	67
4.1.2.	Elétrico.....	67
4.1.2.1.	Resultado do cálculo da potência de saída do inversor.....	67
4.2.	Configuração SFH	69
4.2.1.	Térmico.....	69
4.2.1.1.	Resultado do cálculo da massa de água nos reservatórios.....	69
4.2.1.2.	Resultado do cálculo da temperatura de armazenamento.....	70
4.2.1.3.	Resultado do cálculo do número de painéis híbridos.....	74
4.2.2.	Elétrico.....	74
4.2.2.1.	Resultado do cálculo da potência de saída do inversor.....	74
4.3.	Configuração SFHC.....	76
4.3.1.	Térmico.....	76
4.3.1.1.	Resultado do cálculo da massa de água nos reservatórios.....	76
4.3.1.2.	Resultado do cálculo da temperatura de armazenamento.....	77

4.3.1.3.	Resultado do cálculo do número de painéis híbridos e coletores	82
4.3.2.	Elétrico.....	82
4.3.2.1.	Resultado do cálculo da potência de saída do inversor.....	82
4.4.	Parâmetros comparativos	84
4.4.1.	Técnicos	84
4.4.2.	Econômicos.....	86
5.	CONCLUSÃO	88
6.	REFERÊNCIAS	91

1. INTRODUÇÃO

Assistimos hoje no mundo um cenário de aumento considerável na demanda por energia de uma maneira geral, por propiciar conforto e qualidade de vida para a humanidade. Em particular a demanda por energia elétrica vem se acentuando por ser uma forma de energia bastante versátil e limpa. Porém, como dito, trata-se de uma forma de energia e não a fonte. Dentre as várias fontes de energia, as de tipo renovável têm se mostrado as mais aceitáveis, principalmente em países mais desenvolvidos, por serem sustentáveis e muito menos agressivas ao meio-ambiente do que aquelas tradicionais de origem fóssil. O desafio passa a ser então, a busca por uma fonte de energia, renovável, que podemos transformar na forma de energia elétrica, de modo o mais eficiente e acessível possível. Quando falamos de eficiência significa fazer a transformação com o mínimo de perdas, e acessível significa a fonte estar a mais próxima possível do ponto de consumo. A energia solar, como fonte, parece atender muito bem o quesito “acessível”, pois ela irradia em cada telhado sob o qual está a maior parte do consumo. A corrida então, para viabilizar essa fonte de energia, é no sentido de atender o primeiro quesito, a “eficiência”, pelo menos para a geração de energia elétrica. Mas parece que é somente uma questão de tempo, pois vemos a indústria desse segmento bastante atuante e mostrando boas novidades ano a ano, seja no aspecto técnico, como também em termos de custos. Certamente, no futuro muito próximo, a energia solar, junto com as demais renováveis, vai ser uma componente muito importante na matriz energética do mundo.

1.1. Objetivo

O objetivo desse trabalho é verificar a vantagem, ou não, do uso de painéis solares do tipo híbrido (térmico e elétrico no mesmo painel), como uma alternativa mais eficiente e de menor custo (ou não), em relação ao uso de painéis fotovoltaicos e coletores solares instalados separadamente. E finalmente analisar uma terceira alternativa, que será a combinação destes.

Será definida uma carga térmica e elétrica para uma residência fictícia, situada na região de Campinas cuja concessão é da Elektro, para a qual serão feitos três projetos, como descritos a seguir:

- um sistema composto de painéis fotovoltaicos conectado à rede e coletores solares para aquecimento de água, instalados separadamente e independentemente - SFC.
- um sistema composto por painéis híbridos, em substituição aos painéis e coletores do caso acima – SFH.
- um sistema que será uma combinação de painéis híbridos e coletores solares – SFHC.

Em seguida serão feitas comparações dos parâmetros técnicos e econômicos mais importantes entre os 3 projetos acima definidos, concluindo-se assim qual será o mais vantajoso.

Para facilitar o estudo de forma a focar o trabalho no objetivo acima, as seguintes premissas serão adotadas:

- Não haverá limitação de área no telhado da residência, problemas com sombreamento, e outros que a princípio não afetarão o trabalho de comparação;
- O dimensionamento da geração elétrica e térmica será feito apenas para atender a demanda local dentro de valores usuais;
- No caso dos painéis híbridos, a prioridade será a geração elétrica em detrimento da térmica, tomando-se o cuidado para não se usar a eletricidade da geração fotovoltaica para aquecer a água do sistema híbrido;
- Como se trata de uma residência de padrão médio, mais comumente encontrada nas cidades brasileiras, a água aquecida será apenas para uso sanitário (o aquecimento de água de piscina está descartado), ou seja, a água deverá alcançar uma temperatura

mínima, algo em torno de 40 °C. Então o sistema além de atender a carga térmica, como mencionado acima, deverá também atender o requisito de temperatura.

Os parâmetros principais a serem comparados serão:

Técnicos:

- Potências térmica e elétrica geradas;
- Quantidade de painéis/ coletores, volumes dos reservatórios, rendimentos;
- Temperatura da água para uso na residência.

Econômicos:

- Custo do material, projeto e instalação;
- Pay-back.

1.2. Justificativa

No momento presente existem várias tecnologias de utilização da energia solar em desenvolvimento e é provável que esta situação assim continue nos anos vindouros. Estudos de avaliação destas tecnologias serão sempre benéficos para orientar os usuários nas decisões a tomar visando o emprego da energia solar em suas variadas aplicações.

Os painéis solares fotovoltaicos têm o seu rendimento diminuído à medida que a temperatura de operação do painel se eleva. Com base neste fato foi desenvolvido o conceito de painel solar híbrido que pode ser utilizado para atender simultaneamente a cargas de trabalho térmicas e elétricas.

Quão atraente é esta concepção em relação a sistemas convencionais existentes?

Este estudo acadêmico propõe fazer uma comparação de desempenho entre um sistema que utilize painéis solares híbridos com outro que atende a carga de trabalho elétrica com painéis solares fotovoltaicos convencionais associados com painéis solares térmicos convencionais para uma mesma carga de trabalho elétrica e térmica.

1.3. Metodologia

O método utilizado criou um exemplo fictício, com carga térmica e elétrica muito similar ao normalmente encontrado em residências médias pelo Brasil. Foram feitas três propostas técnicas de concepção de sistema solar térmico + elétrico para atender as cargas mencionadas acima, e na seqüência uma comparação técnica e econômica para se avaliar o desempenho de cada uma delas.

O conhecimento utilizado foi aquele obtido nas disciplinas do Curso de Energias Renováveis do PECE, complementado por bibliografia citada da qual se destacam: Duffie e Beckman (2006), para o dimensionamento térmico; Zilles (2012) para o dimensionamento elétrico fotovoltaico; MARQUES, R. L. (2008), no tratamento matemático a ser dado ao painel híbrido.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Potencial de radiação solar

2.1.1. Radiação horária no plano inclinado (I_T)

O primeiro passo no dimensionamento dos projetos propostos será o levantamento do potencial de radiação solar no local, considerando sua localização geográfica, e as condições do plano no qual serão instalados os painéis fotovoltaicos e coletores solares, tais como área total, orientação em relação ao azimute (ângulo azimutal, γ) e inclinação em relação à superfície horizontal (ângulo β).

O dimensionamento aqui proposto será baseado no levantamento da captação da energia solar a cada hora ao longo do dia médio dos meses escolhidos, representantes de cada estação do ano, e posteriormente extrapolados para o ano todo.

A partir do potencial de radiação calculada nas condições acima, ou seja, a radiação horária no plano inclinado (I_T), será calculada a quantidade de energia útil obtida pelos coletores solares e pelos painéis fotovoltaicos.

No caso dos coletores solares, o dimensionamento será feito de forma que a energia útil térmica seja suficiente para suprir a carga térmica ao longo do dia e que a temperatura da água armazenada seja no mínimo a temperatura de consumo. E no caso dos painéis fotovoltaicos a energia útil elétrica produzida fique próxima da demanda correspondente ao período de um ano.

Neste caso será necessário calcular a energia útil fornecida pelo coletor solar e painel fotovoltaico, Q_u , a qual depende do horário e da radiação no local. Dessa forma, considerando-se que o coletor/painel irá funcionar todos os dias do ano, foi definido que a radiação do mês será representada pelo dia médio obtido pela Tabela 1.6.1 do Duffie e Beckman (2006), mostrado na Tabela 2.1. Foram selecionados apenas os meses de Janeiro, Abril; Julho e Outubro os quais representam cada estação do ano.

Tabela 2.1: Dias médios para cada mês.

Mês	Para o dia médio do mês		
	dia	n	δ
Janeiro (verão)	17	17	-20,9
Abril (outono)	15	105	9.4
Julho (inverno)	17	198	21,2
Outubro (primavera)	15	288	-9.6

Fonte: Duffie e Beckman (2006)

em que:

n - dia do ano; adimensional

δ - declinação solar, em $^{\circ}$.(graus)

Através da equação 2.13.2a do Duffie e Beckman (2006), mostrada abaixo, ou alternativamente pela Figura 2.13.1 dessa mesma referência, pode-se calcular a razão (r_t) entre a radiação total horária e a radiação total diária.

$$r_t = \frac{\pi}{24} \cdot (a + b \cdot \cos \omega) \cdot \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \cdot \omega_s}{180} \cdot \cos \omega_s} \quad (2.1)$$

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

$$b = 0,6609 - 0,4767 \cdot \sin(\omega_s - 60)$$

em que:

r_t - razão entre a radiação total horária pela radiação diária, adimensional

ω - ângulo horário, em $^{\circ}$ (graus)

ω_s - ângulo horário do pôr do sol, em $^{\circ}$ (graus)

dado por:

$$\omega = (HS - 12) \cdot 15 \quad (2.2)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta)) \quad (2.3)$$

em que:

HS - hora solar, em h

ϕ - latitude do local, em ° (graus). Para a região de Campinas este valor é de - 22,80°. (Fonte <http://toolserver.org>), da qual faz parte a cidade de Atibaia, local do caso referência deste trabalho

Para o caso particular deste trabalho os valores de \bar{H} foram obtidos do banco de dados da Secretaria de Energia do Estado de São Paulo “Energia Solar Paulista – Levantamento de Potencial” e estão mostrados na Tabela 2.2. No caso referência aqui tratado, de uma residência localizada em Atibaia, serão usados os dados da região de Campinas, município da tabela mais próximo do nosso exemplo.

Tabela 2.2: Tabela de radiação integrada total diária (H)

Município	(kWh /m ² . dia)				
	Anual	Primavera	Verão	Outono	Inverno
Araçatuba	5,520	6,672	5,970	4,697	4,741
Barretos	5,509	6,711	6,057	4,474	4,794
Bauru	5,466	6,540	5,919	4,581	4,824
Campinas	5,388	6,347	6,147	4,402	4,658
Franca	5,484	6,385	6,133	4,618	4,801
Marília	5,384	6,590	5,786	4,573	4,588
P. Prudente	5,401	6,578	6,039	4,517	4,468
Registro	4,388	5,239	5,560	3,482	3,273
Ribeirão Preto	5,489	6,545	6,117	4,476	4,819
Santos	4,709	5,747	5,455	3,881	3,753
São Carlos	5,444	6,390	6,089	4,480	4,819
S. J. Campos	5,053	6,002	5,625	4,227	4,357
S. J. R. Preto	5,512	6,695	5,876	4,597	4,878
São Paulo	4,589	5,251	5,352	3,967	3,784
Sorocaba	5,126	6,105	5,933	4,237	4,231

Tabela 3 – Radiação solar global média nos municípios – Estado de São Paulo.

Fonte: <http://www.energia.sp.gov.br>

Com o valor de r_t e a radiação integrada média mensal (\bar{H}), obtém-se o valor da radiação total horária (I) através da expressão (2.4).

$$I = r_t \cdot \bar{H} \quad (2.4)$$

em que:

I : - radiação horária total, em MJ/m²

\bar{H} - : radiação diária integrada média mensal sobre superfície horizontal, em MJ/m²

Após o cálculo da radiação total horária, é necessário identificar quanto da radiação total é representada pela radiação direta e quanto é pela difusa para que a radiação sobre a superfície inclinada possa ser calculada. Para isso, utiliza-se a radiação diária extraterrestre integrada média mensal (\bar{H}_0), obtida pela equação 1.10.3 do Duffie e Beckman (2006), mostrada abaixo (2.5), ou pela tabela 1.10.1 da mesma referência.

$$\bar{H}_0 = \frac{24 \cdot 3600 \cdot G_{SC}}{\pi} \cdot \left(1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right) \cdot \left(\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s + \frac{\pi \cdot \omega_s}{180} \cdot \sin \phi \cdot \sin \delta \right) \quad (2.5)$$

em que:

\bar{H}_0 - radiação diária extraterrestre integrada média mensal sobre superfície horizontal, em MJ/m²

G_{SC} - constante solar, em W/m². Essa constante vale 1367 W/m² (Fonte: Duffie e Beckman 2006)

Com o \bar{H}_0 calculado, é possível obter o índice de claridade diário média mensal (\bar{K}_T) através da equação (2.6).

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (2.6)$$

em que:

\bar{K}_T - índice de claridade diário média mensal, adimensional.

O índice de claridade fornece a fração corresponde à radiação difusa através das equações 2.12.1a e 2.12.1b do Duffie e Beckman (2006), mostradas abaixo em (2.7) e (2.8), ou alternativamente pela figura 2.12.2 da mesma referência.

Para $\omega_s \leq 81,4^\circ$ e $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,391 - 3,560 \cdot \bar{K}_T + 4,189 \cdot \bar{K}_T^2 - 2,137 \cdot \bar{K}_T^3 \quad (2.7)$$

Para $\omega_s > 81,4^\circ$ e $0,3 \leq \bar{K}_T \leq 0,8$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1,311 - 3,022 \cdot \bar{K}_T + 3,427 \cdot \bar{K}_T^2 - 1,821 \cdot \bar{K}_T^3 \quad (2.8)$$

em que:

\bar{H}_d - radiação diária difusa integrada média mensal sobre superfície horizontal, em MJ/m²

Com o valor de \bar{H}_d e calculada a razão (r_d) entre a radiação difusa horária e a radiação difusa diária através da equação 2.13.4 do Duffie e Beckman (2006), mostrada em (2.9), ou alternativamente pela figura 2.13.2 da mesma referência, obtém-se a radiação difusa horária (I_d) pela equação (2.10).

$$r_d = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \cdot \omega_s}{180} \cdot \cos \omega_s} \quad (2.9)$$

$$I_d = r_d \cdot \bar{H}_d \quad (2.10)$$

em que:

r_d - razão entre a radiação difusa horária e a radiação difusa diária, adimensional;

I_d - radiação difusa horária, em MJ/m²

\overline{H}_d - radiação diária difusa integrada média mensal sobre superfície horizontal, em MJ/m²

Tendo-se o valor da radiação difusa horária e da radiação total horária anteriormente obtida, a radiação direta horária é calculada através da equação:

$$I_b = I - I_d \quad (2.11)$$

em que:

I_b - radiação direta horária, em MJ/m²

Os valores da radiação direta horária e da radiação direta horária difusa permitem calcular a radiação sobre a superfície inclinada (I_T) pela equação (2.13), sendo antes necessário obter o valor da razão da radiação direta na superfície inclinada sobre a radiação no plano horizontal (R_b) através da equação (2.12).

Para o hemisfério Sul:

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(\phi + \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \cdot \sin \delta} \quad (2.12)$$

em que:

R_b - razão entre a radiação direta na superfície inclinada pela radiação no plano horizontal, adimensional

β - : inclinação da superfície, em °. Considerou-se que a inclinação é igual ao valor da latitude do local

$$I_T = I_b \cdot R_b + I_d \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + I \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.13)$$

em que:

I_T :- radiação horária sobre superfície inclinada, em MJ/m²

ρ_g :- refletividade do solo, adimensional. Foi considerado um valor de 0,2

2.2. Dimensionamento térmico

2.2.1. Coletor solar

Segundo a ABNT coletor é o dispositivo que absorve a radiação solar incidente, transferindo-a para um fluido de trabalho/consumo, sob a forma de energia térmica. Existem várias formas de construí-lo, que dependerão da tecnologia que cada fabricante adotar. Porém a composição básica é a que está mostrada na Figura. 2.1.

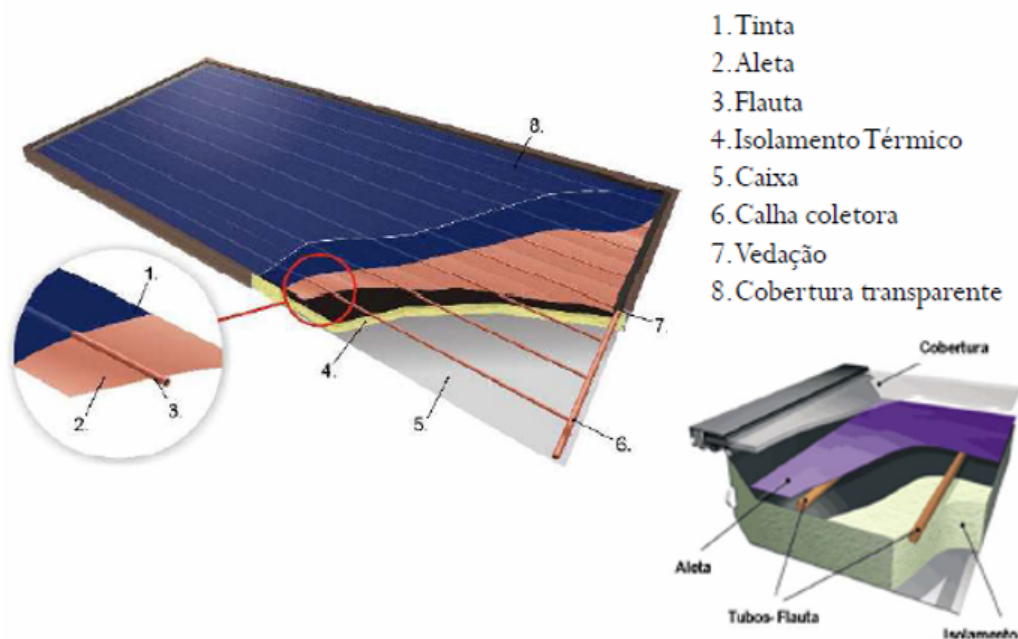


Figura 2.1: Composição básica do coletor solar

Fonte Curso de projetos de sistemas de aquecimento solar - ABRAVA

2.2.2. Eficiência do coletor solar no local

A eficiência de um coletor solar é a sua capacidade de transformar a radiação solar incidente sobre sua superfície em energia útil, ou seja, energia térmica. Com o valor da radiação sobre sua superfície, obtém-se o fluxo de radiação solar médio em uma certa hora (G_T) dividindo-o por 3600:

$$G_T = \frac{I_T}{3600} \quad (2.14)$$

em que:

G_T :- fluxo de radiação médio solar no plano inclinado, em W/m^2

A eficiência do coletor solar é dada pela equação (2.15).

$$\eta = F_R(\tau\alpha) - \frac{F_R U_L (T_s - T'_a)}{G_T} \quad (2.15)$$

em que:

η :- eficiência do coletor solar, adimensional

$F_R(\tau\alpha)$:- parâmetro que indica como a energia é absorvida pelo coletor, adimensional, dado pela tabela do INMETRO apresentada na Tabela 2.3. O coletor solar selecionado para a situação problema está indicado na mesma

$F_R U_L$:- parâmetro que indica como a energia é perdida pelo coletor, adimensional, dado pela tabela do INMETRO na Tabela 2.3. . O coletor solar selecionado para a situação problema está indicado na mesma

T'_a :- temperatura ambiente, em $^{\circ}C$. Os dados utilizados foram as temperaturas máximas médias e mínimas médias de cada mês

(Fonte: <<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Quadros/QTmedPeriodo.asp>>. Acesso em 29 de março de 2014).

Tabela 2.3: Tabela INMETRO de coletores solares.

06/02/2014 APLICAÇÃO: BANHO										
1 FABRICANTE	3 MODELO	4 PRESSÃO DE FUNCIONAMENTO		5 ÁREA EXTERNA DO COLETOR (m^2)	6 PRODUÇÃO MÉDIA MENSAL DE ENERGIA		7 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA MÉDIA (%)	8 CLASSIFICAÇÃO	9 MATERIAL SUPERFÍCIE ABSORVEDORA	10 $F_R(\tau\alpha)_n$
		(kPa)	(mca)		Por Coletor ($kWh/mês$)	Por m^2 (Específica) ($kWh/mês.m^2$)				
COLSOL	PL100RE	400,0	40,8	1,00	82,0	82,0	58,8	A	ALUMÍNIO	0,759
COLSOL	PL130RE	400,0	40,8	1,30	106,6	82,0	58,8	A	ALUMÍNIO	0,759
COLSOL	PL150RE	400,0	40,8	1,50	123,0	82,0	58,8	A	ALUMÍNIO	0,759
COLSOL	PL200RE	400,0	40,8	1,52	137,4	82,0	58,8	A	ALUMÍNIO	0,759
COLSOL	PL202RE	400,0	40,8	2,00	164,0	82,0	58,8	A	ALUMÍNIO	0,759

Fonte: <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/ColetoresSolares-banho.pdf>>

2.2.3. Energia útil - térmica

A partir dos dados do coletor, tais como eficiência e área, e o fluxo de radiação em sua superfície, podemos calcular a energia útil fornecida através da equação (2.16).

$$\dot{Q}_u = \eta \cdot A_c \cdot G_T \quad (2.16)$$

em que:

\dot{Q}_u : - taxa de adição ou remoção de energia do coletor, em W

A_c : - área total do coletor solar, em m²

A curva de geração de energia por fonte solar dificilmente corresponde ao perfil de consumo de energia, tornando-se necessário um sistema de armazenamento de energia.

Segundo Duffie e Beckman (2006), a capacidade ótima de um sistema de estocagem de energia depende do tempo esperado da disponibilidade de radiação solar, da natureza da carga térmica a ser esperada do processo, do grau de confiabilidade requisitado pelo processo, da maneira em que a energia auxiliar é suprida e da análise econômica que determina quanto da carga anual deveria ser fornecida pela energia solar e quanto pela fonte de energia auxiliar.

2.2.4. Cargas térmicas do processo e saídas do coletor solar

Para exemplificar a importância da instalação de um sistema de armazenamento, Duffie e Beckman (2006) apresentaram a seguinte figura (Figura 2.2), onde \dot{L} é a energia térmica demandada pelas cargas térmicas, \dot{Q}_u é a energia útil do coletor solar e G_T é a energia solar incidente, todas variáveis com o tempo. Nota-se que existem períodos em que a energia fornecida pelo coletor excede a energia demandada pela carga térmica e em outros períodos a energia disponibilizada pelo coletor não consegue suprir a energia demandada pela carga térmica. Dessa forma, um sistema de armazenamento pode ser instalado para guardar o excesso de energia para ser utilizado nos períodos de carência. Na Figura 2.2 (a), as áreas hachuradas verticalmente mostram quando há excesso de energia que pode ser adicionado ao sistema de armazenamento e as hachuradas horizontalmente mostram quando há consumo de energia do sistema de armazenamento. A Figura 2.2 (b) apresenta a energia armazenada como função do tempo e é visível que se não houvesse um sistema de armazenamento, o ganho com o sistema de geração de energia solar seria reduzido no primeiro e no terceiro dia, pois a quantidade de energia excedida ($\dot{Q}_u > \dot{L}$) seria perdida e não poderia ser utilizada no período onde a energia solar não conseguiu atender a demanda ($\dot{Q}_u < \dot{L}$).

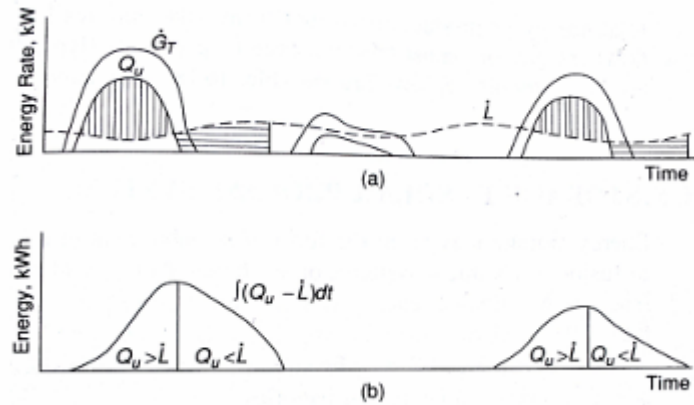


Figura 2.2: Curvas de energia demandada pela carga térmica e energia fornecida pelo coletor em função do tempo.

Fonte: Duffie e Beckman (2006)

Na maioria das aplicações, não é recomendável ou até mesmo possível atingir toda a demanda da carga térmica somente com a energia solar, tanto por razões econômicas como por razões de segurança do fornecimento de energia. Dessa forma, um sistema auxiliar deve ser utilizado e a carga térmica total \dot{L} será alcançada pela combinação da energia solar com a energia fornecida pelo sistema auxiliar.

Utilizando a equação 9.2.1. apresentada por Duffie e Beckman (2006) e transcrita abaixo pela equação (2.17) pode-se calcular o perfil da carga térmica total.

$$\dot{L}_w = \dot{m}_{cs} \cdot C_p \cdot (T_d - T_r) \quad (2.17)$$

em que:

\dot{L}_w - carga térmica do processo, em kW

\dot{m}_{cs} :- vazão mássica de água de consumo, em kg/s

C_p :- calor específico da água, em kJ/(kg. °C)

T_d :- temperatura de consumo da água na carga, em °C

T_r :- temperatura da água recebida da rede, em °C

Vamos definir a carga térmica solar (L_s), que é a parcela efetivamente suprida pelo sistema solar aqui dimensionado.

A partir da equação (2.17), e considerando que a temperatura do reservatório não será menor que a de consumo, temos que a carga térmica suprida pelo sistema solar \dot{L}_s , será conforme equação (2.18).

$$\dot{L}_s = \dot{m}_{cs} \cdot C_p \cdot (T_d - T_r) \quad (2.18)$$

em que:

\dot{L}_s : carga térmica suprida pelo sistema solar, em KW

\dot{m}_{cs} : Vazão mássica de consumo de água, em kg/s

C_p : calor específico da água, em kJ/(kg. °C)

T_d : temperatura de consumo da água na carga, em °C

T_r : temperatura da água recebida da rede, em °C

O valor assim obtido será usado para o dimensionamento do reservatório.

2.2.5. Armazenamento de energia

Dentre as várias forma de armazenagem de energia solar,. Duffie e Beckman (2006) exemplificam que para aquecimento de água o armazenamento de energia em forma de calor sensível é a escolha mais lógica, assim, essa será a forma adota neste trabalho.

Da mesma forma, têm significância os fatores relacionados ao coletor solar. O ganho útil do coletor diminui com o aumento da temperatura média da placa absorvedora e também com a diferença entre a temperatura média do fluido entre a entrada e saída do coletor. É significativa também a temperatura em que o fluido será entregue para a carga térmica, pois deverão ser consideradas as perdas térmicas para o ambiente no local onde está o reservatório e no transporte do fluido de armazenamento pelas tubulações. Assim, a temperatura do fluido que sai do coletor é maior que a temperatura em que o fluido será finalmente utilizado. Um objetivo do projeto desse sistema será minimizar essas perdas de temperatura dentro de restrições econômicas. Duffie e Beckman (2006).

O método de armazenamento será com água (energia em forma de calor sensível) que também será o fluido de carga.

2.2.6. Massa de água dos reservatórios

A massa de água no reservatório foi estimada adotando-se que a quantidade será suficiente para armazenar a energia de forma a atender as fontes de consumo durante um dia a partir da diferença entre a temperatura de armazenamento e a ambiente.

$$m = \frac{\sum L_s}{C_p \cdot (T_s - T'_a)} \quad (2.19)$$

em que ::

L_s energia demandada pela carga térmica, suprida por fonte solar, em kJ

C_p : calor específico da água, em kJ/(kg. °C)

T_s temperatura de armazenamento, em °C

T'_a temperatura ambiente;, em °C

m massa de água no sistema (reservatório), em kg

2.2.7. Armazenamento em água

Para muitos sistemas solares, água é o elemento ideal para estocar energia. Isso por ser abundante, de baixo custo e facilmente transportável. A energia é adicionada e removida deste tipo de unidade de armazenamento por transporte do próprio meio de armazenamento, eliminando, portanto, a queda de temperatura entre o fluido de transporte e o meio de armazenamento (DUFFIE; BECKMAN, 2006). Entretanto, também existem desvantagens como o fato de a água ser corrosiva. Assim, a vida útil total dos reservatórios é baixa, de aproximadamente 10 anos (Fath, 1998).

O fato desse tipo de armazenamento ser um dos mais utilizados reforçou a motivação para a escolha dessa forma de armazenamento.

Um sistema típico semelhante ao apresentado por Duffie e Beckman (2006) está apresentado na Figura 2.3, que será o modelo adotado neste trabalho.

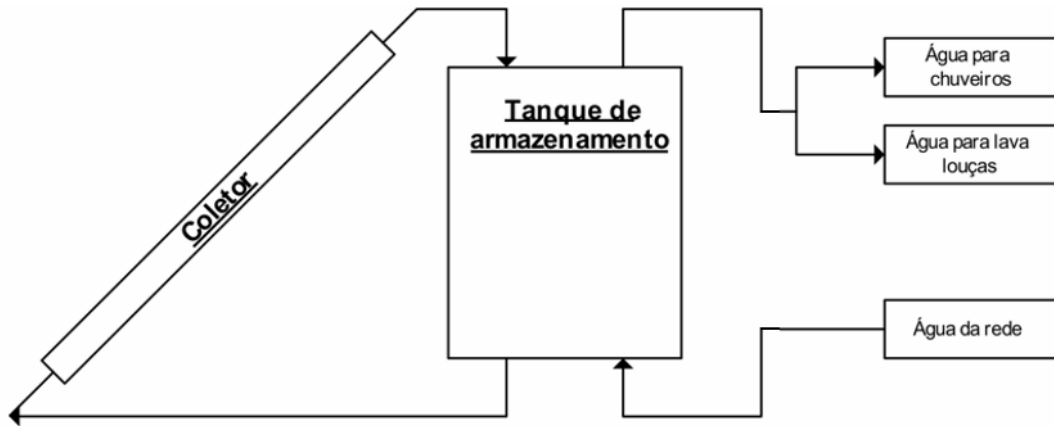


Figura 2.3: Sistema típico de armazenamento de energia solar em água

Fonte: OTA, 2013

A capacidade de armazenamento de energia de uma unidade de armazenamento em água a uma temperatura uniforme (ou seja, totalmente misturado e não estratificado) operando sobre um diferencial de temperatura finito é dada pela equação (2.20).

$$Q_s = (m \cdot C_p)_s \cdot \Delta T_s \quad (2.20)$$

em que:

Q_s :- capacidade térmica total para um ciclo operando através da variação de temperatura ΔT_s , em kJ

m massa de água no sistema (reservatório), em kg

C_p : calor específico da água, em kJ/(kg. °C)

ΔT_s :- variação de temperatura, em °C

A variação de temperatura sobre a qual a unidade pode operar tem o limite inferior determinada, em grande parte das aplicações, pelos requisitos do processo. O limite superior pode ser determinado pelo processo, pela pressão de vapor do líquido ou pela perda de energia térmica no trocador.

Um balanço de energia no reservatório não estratificado apresentado na Figura 2.3 pode ser escrito como:

$$(m \cdot C_p)_s \cdot \frac{dT_s}{dt} = \dot{Q}_u - \dot{L}_s - (UA)_s \cdot (T_s - T'_a) \quad (2.21)$$

em que:

\dot{Q}_u :- taxa de energia útil térmica, em kW

\dot{L}_s :- taxa de energia demandada pela carga térmica, suprida por fonte solar, em kW

T_s :- temperatura no reservatório de armazenamento, em °C

U :- coeficiente de troca térmica global do reservatório de armazenamento, em kW/(m². °C)

A :- área de troca térmica do reservatório de armazenamento, em m²

T'_a :- temperatura ambiente, em °C

Realizando integração pelo método de Euler na equação (2.21) para determinar o desempenho do sistema de armazenamento e do processo solar no longo prazo tem-se a equação (2.22).:

$$T_s^+ = T_s + \frac{\Delta t}{(m \cdot C_p)_s} \cdot [Q_u - L_s - (UA)_s \cdot (T_s - T'_a)] \quad (2.22)$$

Sendo que T_s^+ é a temperatura esperada no reservatório de armazenamento no instante $t+\Delta t$.

Assim, é possível calcular a temperatura após uma hora a partir das condições iniciais e assumindo que Q_u , L_s e as perdas do reservatório não irão variar durante uma hora. Nota-se que na equação (2.21) os termos são taxas e na equação (2.22) as quantidades são integradas para uma hora.

Porém, para utilizar o Q_u na equação (2.22) deve-se usar o valor integrado durante uma hora. Para isso, o valor obtido pela equação (2.16) foi multiplicado por 3600, considerando-se que \dot{Q}_u não irá variar durante esse período.

$$Q_u = \dot{Q}_u \cdot 3600 \quad (2.23)$$

Neste caso vamos considerar o seguinte:

- reservatório não estratificado e a água totalmente misturada dentro de seu interior;

-
- a água consumida do sistema será na quantidade correspondente a carga térmica L_s , porém na temperatura T_s . Isso significa dizer que quando a temperatura T_s for maior que a de consumo T_d , a massa de água consumida do sistema será menor que a demanda dos aparelhos como chuveiro e pias de forma que a carga térmica L_s se mantém a mesma. A diferença de massa de água virá da rede, à temperatura T_r ;
 - caso a temperatura T_s seja menor que T_d , toda a água demandada dos aparelhos virá do sistema, porém o valor de L_s será corrigido para a nova temperatura T_s .

2.3. Dimensionamento elétrico

2.3.1. Conversão fotovoltaica

A conversão fotovoltaica é a transformação da radiação solar luminosa, diretamente em energia elétrica através de um fenômeno físico chamado efeito fotovoltaico. Segundo Zilles (2012) “observado primeiramente pelo físico francês Edmond Becquerel em 1839, o efeito fotovoltaico ocorre em certos materiais semicondutores com capacidade de absorver a energia contida nos fótons presentes na radiação luminosa incidente, transformando-a em eletricidade.

2.3.2. Células e Módulos fotovoltaicos

Um elemento semicondutor é um material que não pode ser classificado como condutor elétrico e nem como isolante. As propriedades dos semicondutores podem ser alteradas com adição de materiais dopantes ou impurezas.

Na Figura 2.4 abaixo, vemos esquematicamente a estrutura de uma célula fotovoltaica compondo um painel completo.

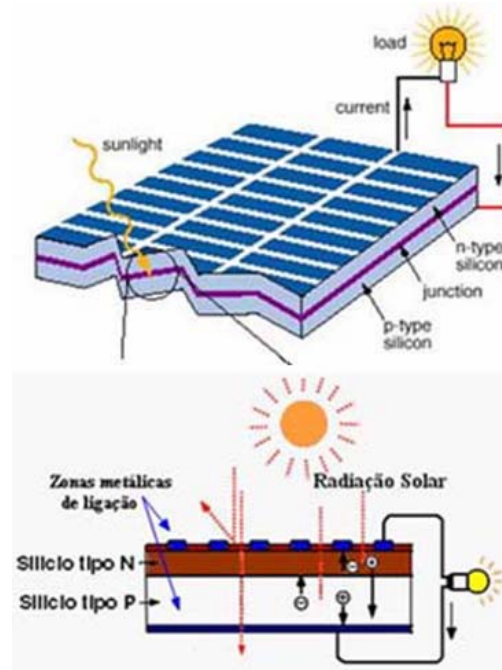


Figura 2.4: Processo de conversão fotovoltaica

Fonte: <http://google.com> - Imagens

Uma célula fotovoltaica é composta tipicamente por duas camadas de materiais semicondutores separados. O material da camada N é fabricado com silício e um material dopante N como, por exemplo, o fósforo. Essa camada tem elétrons em excesso e fracamente ligados ao átomo original. O material da camada P é dopado quimicamente com boro que apresenta falta de elétrons. Quando as duas camadas são colocadas em contato, formando uma junção semicondutora, acontece, então, uma migração dos elétrons da camada N para a P criando uma diferença de potencial e, em consequência, uma corrente elétrica. Uma célula gera uma pequena voltagem de 0,6V, mas a associação delas permite se obter uma voltagem para uso em aplicações comerciais.

Uma placa ou módulo fotovoltaico é constituído de um conjunto de células ligadas em série, montadas sobre uma estrutura metálica rígida, geralmente composta de uma liga de alumínio e são conectados eletricamente. Tipicamente um módulo é composto de 36, 54 ou 60 células e são encontrados no mercado com potências que variam de 50W a 250W e produzem uma tensão de aproximadamente 30V e corrente de 8A.

Todos os fabricantes de módulos fotovoltaicos realizam testes e ensaios nas mesmas condições, que são padronizadas por certificadores internacionais. A sigla em inglês STC "Standard Test Conditions" que significa condição padrão de teste, é conseguida

em laboratórios com câmaras climáticas com sistemas de controle e medição precisos de iluminação e temperatura. A condição padrão de testes STC considera irradiância solar de 1.000W/m^2 e a temperatura de 25°C da célula solar.

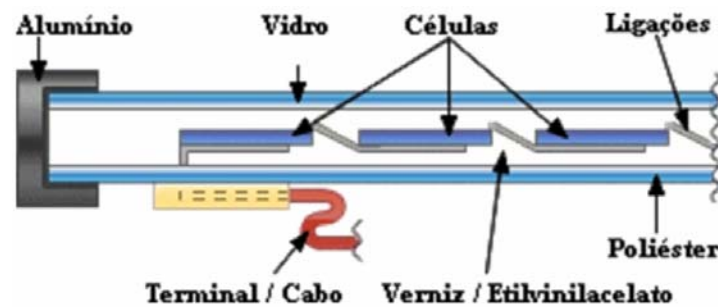


Figura 2.5: Composição do painel fotovoltaico

Fonte: <http://logicamaxtec.webnode.com.br/energia-renovavel/paineis-fotovoltaicos>

2.3.3. Energia útil - elétrica

Para o dimensionamento elétrico foi adotada a metodologia prevista no livro “Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica” de Roberto Zilles (2012), a partir da qual será definido o sistema fotovoltaico básico, incluindo os painéis fotovoltaicos e inversores do tipo conectado à rede (“Grid-Tie”), de forma a atender o total de energia demandada na residência tipificada neste trabalho, no período de um ano.

Como o objetivo deste trabalho é fazer apenas comparações de desempenho entre as alternativas aqui sugeridas, outros dispositivos desse sistema, tais como, de proteção, de fixação, cabeamento, etc., não serão detalhados.

2.3.3.1. Curva corrente versus tensão (I-V) e ponto de máxima potência

Em termos práticos, o que interessa num sistema fotovoltaico é a parte útil da curva (I-V), que efetivamente produz energia elétrica. Com relação a Figura 2.6, percebe-se que isso não ocorre no ponto de tensão de circuito aberto ($0, V_{oc}$) a nem no ponto de curto-circuito ($I_{sc}, 0$). Nesses pontos não se produz nenhuma energia, uma vez que a potência instantânea obtida a partir do produto entre corrente e tensão é igual a zero.

A curva característica corrente versus tensão é definida como a “representação dos valores da corrente de saída de um conversor fotovoltaico em função da tensão, para condições preestabelecidas de temperatura e radiação”. A partir da curva I-V, determinada sob as condições padrão de teste (ou STC), de uma célula ou módulo

fotovoltaico, obtêm-se os principais parâmetros que determinam sua qualidade e desempenho, entre eles I_{sc} , V_{oc} , V_{mp} , I_{mp} e P_{mp} .

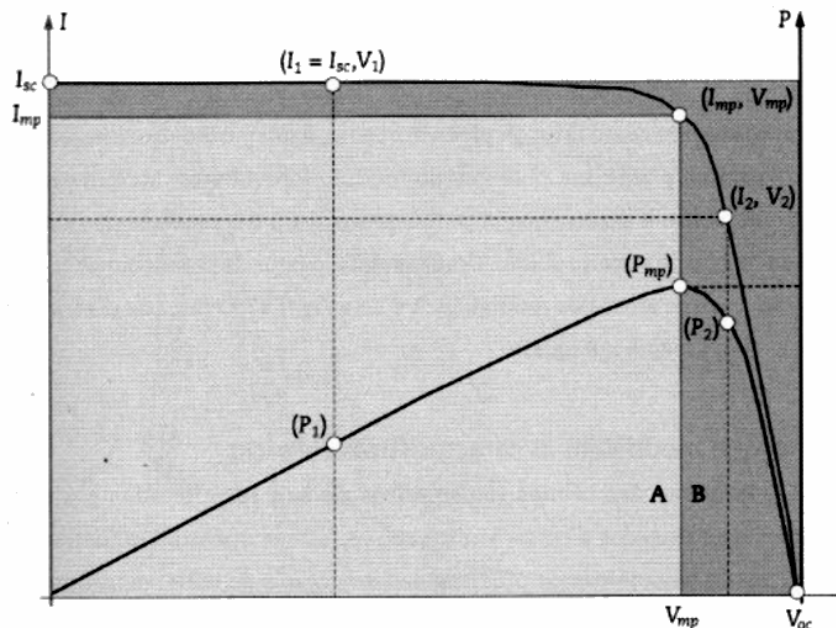


Figura 2.6: Curva típica de painel fotovoltaico (I-V) e (P-V)

Fonte: Zilles (2012)

A máxima transferência de potência ocorre em razão de uma única combinação de valores de tensão e corrente. Esse ponto é localizado no “joelho” da curva e possui valores típicos, chamados de V_{mp} e I_{mp} .

Externamente à célula, os fatores que mais contribuem para a alteração dos parâmetros elétricos são basicamente a radiação no plano incidente e a temperatura da célula.

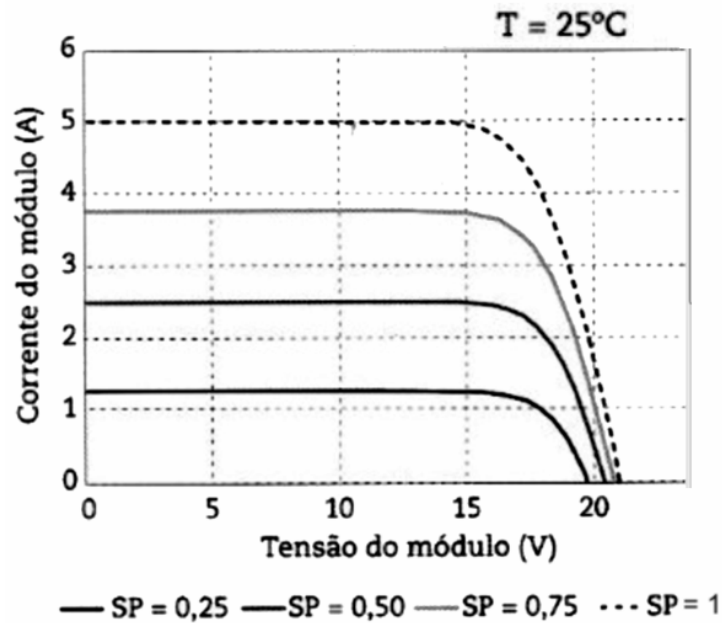


Figura 2.7: Curva I-V para vários níveis de radiação
Fonte: Zilles (2012)

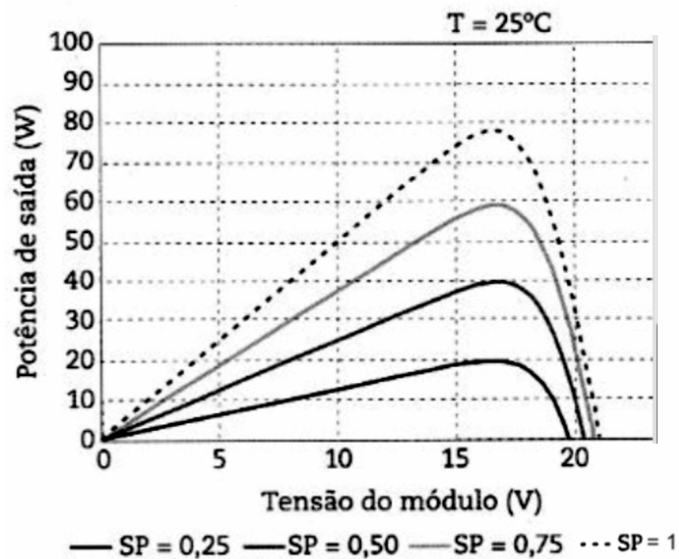


Figura 2.8: Curva P-V para vários níveis de radiação
Fonte: Zilles (2012)

As Figuras 2.7 e 2.8 ilustram as curvas de corrente versus tensão (I-V) e potência versus tensão (P-V), respectivamente para um dado módulo operando a uma temperatura fixa de 25 °C e vários níveis de radiação solar. O conceito de Sol Pleno (SP) adotado nas figuras corresponde à razão da irradiância incidente no plano do gerador (em W/m²) pela irradiância de referência nas STC (1.000W/m²).

A temperatura da célula também afeta os parâmetros elétricos da célula de maneira diferente. Porém, esse aumento é irrisório e não sensibiliza a potência gerada, no sentido de elevá-la, uma vez que a taxa de variação da tensão de circuito aberto com a temperatura é mais relevante.

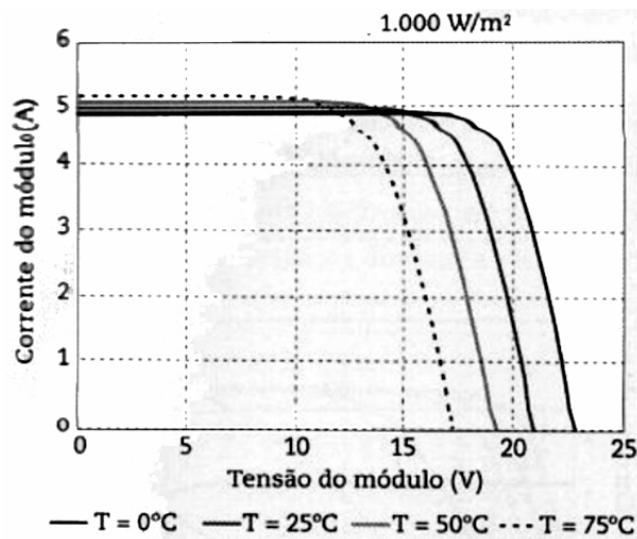


Figura 2.9: Curva I-V a 1000 W/m^2 e vários níveis de temperatura da junção p-n
Fonte: Zilles (2012)

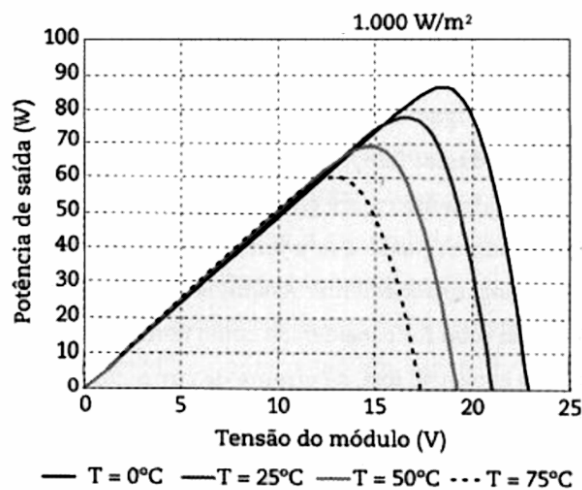


Figura 2.10: Curva P-V a 1000 W/m^2 e vários níveis de temperatura da junção p-n
Fonte: Zilles (2012)

As Figuras 2.9 e 2.10 mostram, respectivamente, o efeito da variação da temperatura da célula nas curvas (I-V) e (P-V). O aumento da temperatura leva à diminuição da

tensão de circuito aberto e a um pequeno aumento da corrente de curto-circuito, logo, percebe-se uma redução, no ponto de máxima potência de 77 Wp em uma operação de um dado módulo fotovoltaico a 25 °C para 60 Wp em uma operação a 75 °C.

2.3.3.2. Eficiência de conversão

Como qualquer outra fonte de energia elétrica, as células fotovoltaicas não têm a capacidade de transformar toda a energia incidente em eletricidade, por causa das limitações da tecnologia e das perdas inerentes ao processo.

A eficiência de conversão de energia é o parâmetro mais importante das células fotovoltaicas e é definida como a razão entre a máxima potência elétrica gerada pelo dispositivo e a potência nele incidente. Esse último parâmetro depende exclusivamente do espectro da luz incidente no plano da célula. Algebricamente, a eficiência pode ser vista como na equação (2.24) abaixo.

$$\eta = \frac{P_{Gerada}}{P_{Incidente}} \quad (2.24)$$

2.3.3.3. Rendimento global do sistema

Para entendemos esse conceito, é necessário entender primeiro o conceito de produtividade do sistema (Y_F). Denomina-se de produtividade do sistema em um determinado intervalo de tempo ($t_2 - t_1$), a relação entre o valor médio da energia entregue a carga e a potência nominal do gerador, equação (2.25).

$$Y_F = \frac{\int_{t_1}^{t_2} P_{Saída} \times dt}{P_{FV}^0} \quad (2.25)$$

Nota-se que Y_F se expressa em kWh/kWp ou simplesmente em horas. Tal como enfatizado em Lorenzo (1994), em um sistema totalmente livre de perdas, cujo gerador operasse sempre com as células a temperatura de 25°C e no ponto de máxima potência, o valor de Y_F expresso em kWh/kWp coincidiria numericamente com o valor médio da energia solar incidente sobre a gerador fotovoltaico no intervalo de tempo $\Delta t = t_2 - t_1$, em kWh/m².

A partir do conceito de Y_F e o do entendimento de sua importância na análise de desempenho de SFCR's, define-se outro parâmetro bastante difundido nas aplicações com sistemas fotovoltaicos de uma maneira geral, conhecido como rendimento global do sistema (em inglês, performance ratio - PR). O PR considera todas as perdas envolvidas em um SFCR (no gerador, no sistema de condicionamento ou no resto do sistema) e é definido de acordo com a relação dada pela equação. (2.26).

$$PR = \frac{Y_F}{\frac{\int_{t_1}^{t_2} H_{t,\beta} \times dt}{H_{ref}}} \quad (2.26)$$

Observa-se que Y_F pode ser interpretado como o tempo de operação com a potência nominal do gerador fotovoltaico, de modo a produzir a mesma quantidade de energia média entregue à carga. De modo análogo, o denominador da equação (2.26), também conhecido como “reference yield” (YR), é interpretado como o número de horas na irradiância de 1.000 W/m².

2.3.3.4. Configuração básica de um SFCR

Na configuração básica de um SFCR (Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede), simplificadamente, consideram-se os conjuntos formados pelo gerador fotovoltaico, o inversor e a rede elétrica local. O primeiro gera a energia em c.c. que será condicionada na unidade de potência e transformada em c.a., para ser diretamente transferida à rede elétrica.. Em cada etapa de processamento da eletricidade, há perdas relacionadas a diferentes causas, por exemplo, aumento da temperatura de operação do gerador voltaico, perdas ôhmicas no cabeamento ou perdas referentes ao processo de seguimento do ponto de máxima potência (SPMP). Essas perdas, somadas às perdas de conversão do inversor, contabilizarão na eficiência de conversão em energia elétrica total do SFCR.

A Figura 2.11 mostra um diagrama esquemático da configuração básica de um SFCR, bem como os parâmetros envolvidos no modelamento desse tipo de aplicação.

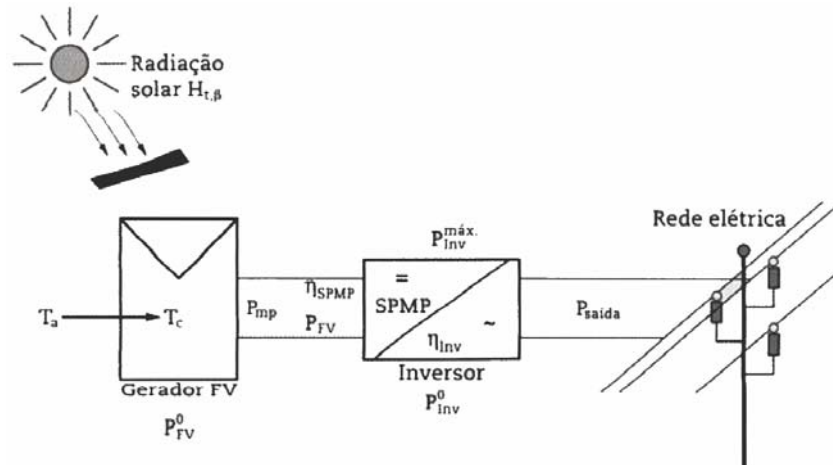


Figura 2.11: Configuração típica de um sistema FV conectado à rede

Fonte: Zilles (2012)

O dimensionamento de um SFCR envolve uma série de etapas, entre as quais se destacam aquelas associadas ao processo de cálculo da energia elétrica produzida pelo gerador fotovoltaico. É conveniente determinar como será a saída de potência de cada um dos módulos fotovoltaicos e, a partir daí, entender como será o comportamento deles ao serem reunidos dentro de um gerador em operação.

O gerador fotovoltaico transforma a radiação solar em energia elétrica contínua, em um processo regulado por sua própria eficiência, sendo esta caracterizada pelo valor de potência do gerador nas denominadas condições padrão de medida (STC - standard test conditions), e por um conjunto de fenômenos de segunda ordem relacionados com as condições de operação: temperatura das células, espectro e ângulo de incidência da luz solar distintos das STC, massa de ar (AM) e sujeira dos módulos. A literatura oferece diversos modelos que explicam adequadamente alguns desses fenômenos.

2.3.3.5. Modelo matemático para o cálculo de potência

Entre os fatores que alteram a potência produzida pelo módulo ou gerador fotovoltaico, a radiação solar incidente no seu plano e a temperatura de operação das células que o constituem são considerados os mais relevantes. A característica corrente-tensão (I-V) descreve o comportamento elétrico nos terminais do módulo ou gerador fotovoltaico sob influência desses fatores.

Por outro lado, a potência c.c. de entrada de um inversor empregado em SFCR depende, além dos fatores mencionados no parágrafo anterior, do ponto da curva I-V

em que gerador fotovoltaico está operando. Idealmente falando, o inversor deve sempre operar no ponto de máxima potência (PMP) do gerador fotovoltaico, a qual varia ao longo do dia, principalmente em função das condições ambientais (basicamente, radiação solar e temperatura ambiente). Dessa forma, os inversores usados em SFCRs são munidos, em sua estrutura de condicionamento de potência, de mecanismos para seguir o PMP, maximizando a transferência de potência. Portanto, o uso de um seguidor do ponto de máxima potência (SPMP) é um requisito básico dos inversores empregados em SFCR's.

Com base nessa realidade, os cálculos para obter a potência de saída do gerador fotovoltaico usualmente consideram a operação deste com SPMP. Para determinar o que efetivamente é convertido pelo inversor em c.a., dois parâmetros importantes são utilizados: o primeiro é conhecido como "coeficiente de temperatura" (γ_{mp}) e o segundo é a própria eficiência de seguimento do ponto de máxima potência do inversor (η_{SPMP}), para a qual, de acordo com dados experimentais (Abella; Chenlo, 2004; Braeberlin, 2004; Haeberlin et al., 2005; Hohm; Ropp, 2003), valores em torno de 98% são facilmente atingidos para potências c.c. superiores a 20% da potência nominal do inversor. Para valores de potência c.c. inferiores a 20% da potência nominal, a eficiência η_{SPMP} varia de 95% a 50%, dependendo do fabricante e da configuração em termos da tensão da operação.

No que diz respeito ao coeficiente de temperatura, historicamente, o desempenho de células e módulos fotovoltaicos tem sido associado às condições de teste comumente chamadas de condições padrão (STC), ou seja, nível de irradiância de 1.000 W/m^2 , distribuição espectral correspondente a $AM = 1,5$ e temperatura de célula de 25°C .

Essas condições padrão podem, em certa medida, representar as condições de operação em um dia típico de céu claro em horários próximos ao meio-dia. Entretanto, a temperatura considerada para operação da célula, 25°C , não representa satisfatoriamente a operação em campo, que frequentemente resulta em temperaturas próximas a 50°C . Infelizmente, a diferença entre as temperaturas obtidas em campo e a temperatura das condições padrão proporciona também uma diferença entre a potência entregue pelo módulo fotovoltaico e a potência nominal.

O termo "coeficiente de temperatura" vem sendo aplicado para descrever o comportamento dos parâmetros característicos do módulo fotovoltaico, incluindo

tensão, corrente e potência. Os coeficientes de temperatura permitem analisar a taxa de variação desses parâmetros com relação a temperatura. A máxima potência, P_{mp} , é obtida do produto de dois fatores, I_{mp} e V_{mp} , e ambos variam com a temperatura.

Para calcular a taxa de variação da máxima potência do módulo ou gerador fotovoltaico com a temperatura, utiliza-se o chamado “coeficiente de temperatura” do ponto de máxima potência" (γ_{mp}), dada pela equação. (2.27).

$$\gamma_{mp} = \frac{dP_{mp}}{dT} \cdot \frac{1}{P_{mp}} = \left(\frac{dV_{mp}}{dT} \cdot \frac{1}{V_{mp}} + \frac{dI_{mp}}{dT} \cdot \frac{1}{I_{mp}} \right) \quad (2.27)$$

A partir do coeficiente que relaciona a variação da potência no ponto de máxima potência com a temperatura (γ_{mp}), pode-se calcular a máxima potência do módulo e, conseqüentemente, do gerador fotovoltaico, a partir da equação. (2.28) (Martin, 1998; Gergaud; Wilton; Ahmed, 2002).

$$P_{mp} = P_{FV}^0 \frac{H_{t,\beta}}{H_{ref}} [1 - \gamma_{mp} (T_C - T_{C,ref})] \quad (2.28)$$

Em que P_{mp} é a máxima potência fornecida pelo gerador fotovoltaico em uma dada condição de operação; P_{FV}^0 , é a potência nominal do gerador fotovoltaico; $H_{t,\beta}$ é a irradiância incidente no plano do gerador; T_C é a temperatura equivalente de operação das células; e o sub-índice ref indica as condições de referência, que, nesse caso, são as condições padrão (1.000 W/m^2 , 25°C e $AM = 1.5$).

O modelo permite determinar a máxima potência capaz de ser suprida por um gerador fotovoltaico sobre um dado conjunto de condições climáticas. É importante ressaltar que o valor obtido pela equação (2.28) corresponde ao valor teórico ideal e não leva em conta as perdas no processo de seguimento do ponto de máxima potência (SPMP), representado pelo parâmetro η_{SPMP} ; ou seja, o valor mais realístico de potência c.c. entregue ao inversor é obtido pela equação (2.29).

$$P_{FV} = P_{FV}^0 \frac{H_{t,\beta}}{H_{ref}} [1 - \gamma_{mp} (T_C - T_{C,ref})] \cdot \eta_{SPMP} \quad (2.29)$$

O parâmetro η_{SPMP} , que leva em consideração as perdas devido a busca pelo ponto de máxima potência do inversor pode ser escrita tal como a equação (2.30).

$$\eta_{SPMP} = \frac{\int_{t1}^{t2} P_{FV} dt}{\int_{t1}^{t2} P_{mp} dt} \quad (2.30)$$

Onde P_{FV} é a potência c.c. de operação do inversor em uma dada condição e P_{mp} é potência ideal na mesma condição, se o inversor estivesse realmente operando no PMP.

A temperatura de célula pode ser obtida a partir da temperatura ambiente, A conversão é feita utilizando a equação (2.31), onde T_a é a temperatura ambiente medida ($^{\circ}\text{C}$); $H_{t,\beta}$ é a irradiância no plano do gerador (W/m^2); e T_{NOC} é a temperatura nominal de operação da célula ($^{\circ}\text{C}$), normalmente fornecida pelos fabricantes de módulos fotovoltaicos.

$$T_c = T_a(^{\circ}\text{C}) + H_{t,\beta}(\text{W} \cdot \text{m}^{-2}) \left(\frac{T_{NOC}(^{\circ}\text{C}) - 20(^{\circ}\text{C})}{800(\text{W} \cdot \text{m}^{-2})} \right) \cdot 0,9 \quad (2.31)$$

De posse da temperatura de operação da célula, o modelo simplificado apresentado permite calcular a máxima potência suprida pelo gerador fotovoltaico, para uma dada irradiância e temperatura de célula, por meio da inserção de somente dois parâmetros constantes: P_{FV}^0 e γ_{mp} .

2.3.3.6. Eficiência de conversão

Para calcular a potência de saída dos inversores, que é efetivamente a energia útil elétrica, podem-se utilizar modelos de eficiência de conversão do inversor os quais dependem da potência de saída do conversor (ou inversor) c.c. / c.a. Schmidt, Jantsch e Schmid (1992) constataram que a eficiência de conversão é uma função dependente do auto-consumo e do carregamento. Com base nos efeitos físicos envolvidos, representados pelos parâmetros k_0 , k_1 e k_2 , propõe-se a equação.(2.32).

$$\eta_{Inv}(P_{Saída}) = \frac{P_{Saída}}{P_{Entrada}} = \frac{P_{Saída}}{P_{Saída} + P_{Perdas}} = \frac{P_{Saída}}{P_{Saída} + k_0 + k_1 P_{Saída} + k_2 P_{Saída}^2} \quad (2.32)$$

Onde:

$p_{saída} = P_{saída} / P_{INV}^o$ é a potência de saída normalizada com relação a potência nominal do inversor.. Desse modo, a soma dos demais termos no denominador da equação. (2.32) quantifica as perdas de conversão do inversor. O parâmetro k_0 representa o fator relacionado ao auto-consumo do dispositivo e não depende da potência de saída. Os parâmetros k_1 e k_2 referem-se as perdas por carregamento do inversor. O primeiro leva em conta aquelas que variam linearmente com a potência de saída, como as quedas de tensão em diodos e dispositivos de chaveamento, enquanto o segundo leva em conta aquelas que variam com o quadrado da potência de saída, principalmente as perdas ôhmicas.

Para se determinar os valores dos parâmetros característicos k_0 , k_1 e k_2 , utilizam-se as equações (2.33) (Martin, 1998).

$$\begin{aligned} k_0 &= \frac{1}{9} \frac{1}{\eta_{INV100}} - \frac{1}{4} \frac{1}{\eta_{INV50}} + \frac{5}{36} \frac{1}{\eta_{INV10}} \\ k_1 &= -\frac{4}{3} \frac{1}{\eta_{INV100}} + \frac{33}{12} \frac{1}{\eta_{INV50}} - \frac{5}{12} \frac{1}{\eta_{INV10}} - 1 \\ k_2 &= \frac{20}{9} \frac{1}{\eta_{INV100}} - \frac{5}{2} \frac{1}{\eta_{INV50}} + \frac{5}{18} \frac{1}{\eta_{INV10}} \end{aligned} \quad (2.33)$$

onde:

η_{INV10} , η_{INV50} e η_{INV100} são os valores de eficiência instantânea correspondentes à operação do inversor, respectivamente, a 10%, 50% e 100% da potência nominal, que podem ser obtidos da curva de eficiência do inversor.

Como o valor da eficiência de conversão c.c./c.a do inversor η_{INV} , depende das perdas nele envolvidas, para um melhor entendimento do modelo anterior, há a necessidade de equacionar essas perdas.

Ao se normalizar as perdas com relação à potência nominal do inversor (P_{INV}^o), obtém-se a equação (2.34):

$$p_{perdas} = p_{FV} - p_{Saída} = (k_0 + k_1 p_{Saída} + k_2 p_{Saída}^2) \quad (2.34)$$

E finalmente, ao se reorganizar algebricamente a equação (2.34) em função das potências de entrada e saída do inversor, obtém a equação (2.35).

$$p_{FV} = \frac{p_{Saída}}{\eta_{Inv}} = p_{Saída} + (k_0 + k_1 p_{Saída} + k_2 p_{Saída}^2) \quad (2.35)$$

A equação (2.35) é utilizada para calcular a potência de saída, de acordo com o método descrito nos itens a seguir.

2.3.3.7. Cálculo da potência de saída do SFCR

Considerando-se o gerador fotovoltaico e o inversor representados pelos modelos descritos anteriormente, calcula-se a potência de saída do gerador fotovoltaico (P_{FV}) a partir da radiação solar incidente no seu plano (I_T) e da temperatura ambiente (T_a), e, posteriormente a potência de saída do inversor ($P_{Saída}$), por meio das equações. (2.36).

$$\begin{aligned} P_{Saída} &= p_{Inv}^{máx} && \dots\dots\dots \text{se } P_{Saída} \geq p_{Inv}^{máx} \\ P_{Saída} &= 0 && \dots\dots\dots \text{se } P_{FV} \leq k_0 p_{Inv}^0 \\ P_{Saída} &= p_{Saída} p_{Inv}^0 && \dots\dots\dots \text{se } k_0 p_{Inv}^0 < P_{Saída} < p_{Inv}^{máx} \end{aligned} \quad (2.36)$$

O parâmetro $p_{saída}$ é obtido pela solução da equação (2.35) que, para uma melhor compreensão, é escrita tal coma mostra a equação (2.37).

$$k_0 - p_{FV} + (1 + k_1) p_{Saída} + k_2 p_{Saída}^2 = 0 \quad (2.37)$$

onde p_{FV} e $p_{saída}$ são .os valores de saída de potência do gerador fotovoltaico e do inversor, respectivamente, normalizados com relação a potência nominal do inversor (P_{INV}^0).

2.3.3.8. Fator de dimensionamento do inversor

O fator de dimensionamento do inversor (FDI) representa a razão entre a potência nominal do inversor (P_{INV}^0) e a potência nominal ou potência de pico do gerador fotovoltaico (P_{FV}^0), equação (2.38). Um FDI de 0,7 indica que a capacidade do inversor é 70% da potência nominal ou de pico do gerador fotovoltaico.

$$FDI = \frac{P_{Inv}^0}{P_{FV}^0} \quad (2.38)$$

Analisando os vários inversores atualmente existentes no mercado, observa-se de modo geral comportamentos parecidos, como o mostrado no gráfico da Figura 2.12, em que se percebe que a partir de um FDI na faixa entre 0,6 e 0,8, não há praticamente alteração na eficiência do inversor (η_{INV}). Assim a escolha do FDI nesta faixa se mostra bastante razoável.

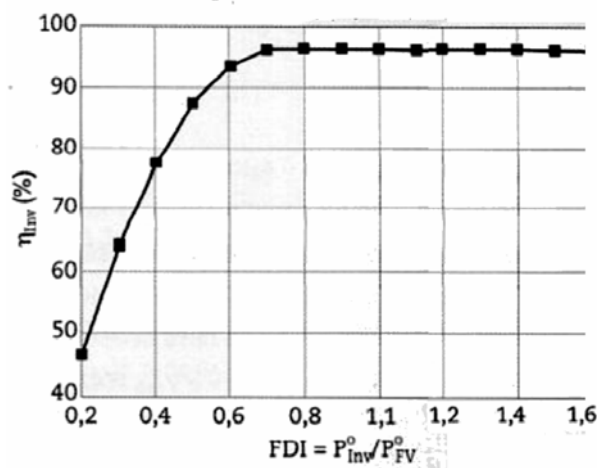


Figura 2.12: Eficiência média anual de um inversor em função do FDI

Fonte: Zilles (2012)

2.3.3.9. Configuração do SFCR

Nesta fase vamos quantificar o número de módulos fotovoltaicos, fazer sua configuração na malha, ou seja quantos em série e quantos em paralelos, e a escolha do inversor.

A quantidade módulos é dada pela equação (2.39), lembrando que P_{mp} é a potência máxima do gerador fotovoltaico em c.c. que será entregue ao inversor, que por sua vez deverá suprir a potência de saída em c.a. desejada, $P_{saída}$.

$$N^{\circ} \text{ de módulos } FV = \frac{P_{FV}^0}{P_{mp}} \quad (2.39.)$$

O total de módulos em série deve gerar na ponta da malha uma tensão em vazio e no ponto de máxima potência PMP, valores que estejam dentro da faixa permitida de

tensão de entrada do inversor. E igualmente o total de módulos em paralelo deve limitar a corrente de curto-circuito e no PMP, dentro da faixa permitida do módulo.

O mesmo procedimento acima deverá se repetir para cada nível de temperatura da célula (T_c) possível de ocorrer nas condições de projeto, ou seja, meteorológicas e das características do painel fotovoltaico utilizado.

2.4. Coletores híbridos (fotovoltaico e térmico)

O coletor solar híbrido é uma tecnologia que converte a radiação solar, simultaneamente, em eletricidade e calor, Figura 2.13. Combina as funções do coletor solar (térmico) e fotovoltaico (elétrico) no mesmo painel, mesma área no telhado.

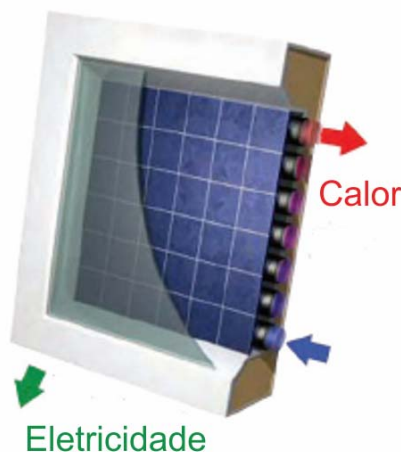


Figura 2.13: Coletor híbrido composto por células fotovoltaicas e um sistema de aproveitamento de calor

Fonte: Marques (2008)

Iremos tratar e adotar aqui nesse trabalho somente o tipo coletor PV-T Água: Estes são muito semelhantes aos convencionais coletores térmicos de placa plana: consiste basicamente em uma placa absorvedora, com uma serpentina (tubo), à qual vai ser acoplada o módulo fotovoltaico. Estes coletores caracterizam-se pela sua fácil integração em edifícios, tal como os coletores térmicos, e ainda podem ser classificados quanto a cobertura de vidro, em com ou sem. Neste trabalho vamos adotar o tipo sem cobertura, Figura 2.14, ou também conhecido como coletor híbrido placa-tubo sem cobertura (Marques 2008), visto que a prioridade na produção é pela energia elétrica.

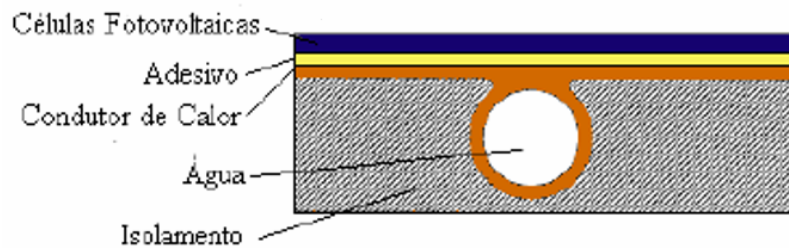


Figura 2.14: Coletor híbrido placa-tubo sem cobertura

Fonte: Marques (2008)

2.4.1. Temperatura na célula fotovoltaica do painel híbrido

Para esse cálculo, primeiramente se calcula o rendimento do painel híbrido aplicando a mesma equação (2.15) dos coletores solares, porém adotando $F_R(\tau\alpha)$ e $F_R U_L$ específicos desses painéis. Em seguida, a partir do rendimento calculado η e da radiação incidente G_T calcula-se a energia útil térmica Q_u produzida, aplicando igualmente a mesma equação (2.16) dos coletores.

Como essa energia útil térmica produzida foi calculada a partir de dados de rendimento térmico informado pelo fabricante, então ela é a energia efetivamente entregue à água, causando assim a elevação de sua temperatura de T_{eH} para T_{sH} , Figura 2.15.

Entre a superfície do coletor e a célula FV, temos uma resistência térmica igual a $1/U_{ca}$, de forma que a temperatura na célula fique ligeiramente acima da temperatura média da água circulante nos coletores logo abaixo, como mostrado nas equações abaixo:

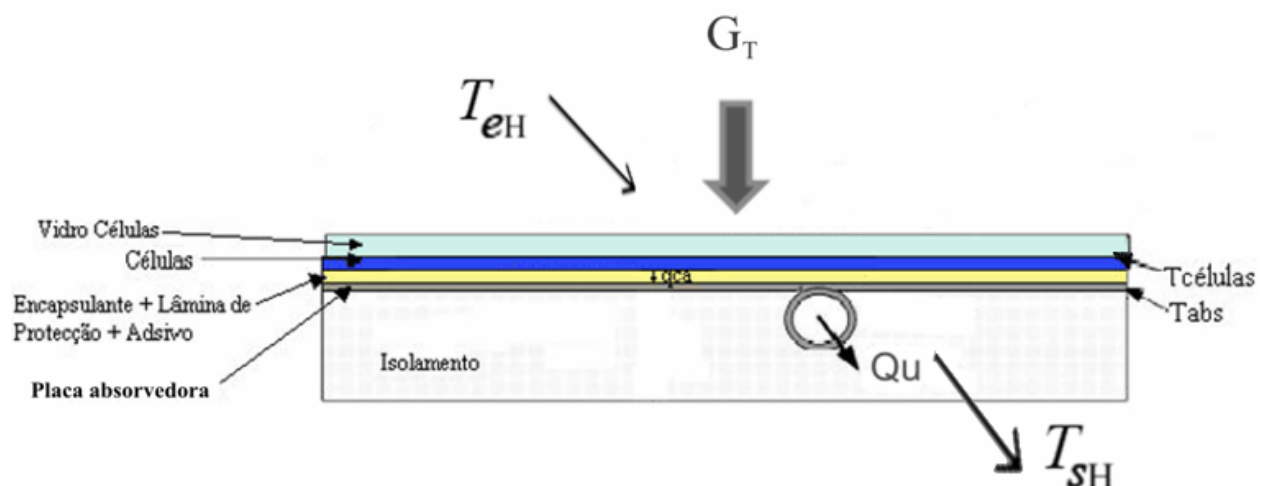


Figura 2.15: Fluxo de água pelo coletor híbrido

Fonte: Marques (2008)

$$T_{sH} = \frac{\dot{Q}_u}{(\rho \cdot \dot{V}) \cdot C_p} + T_{eH} \quad (2.40)$$

Em que:

T_{sH} – temperatura de saída da água do painel híbrido, em °C

T_{eH} – temperatura de entrada água do painel híbrido, em °C

ρ - densidade da água, em kg/m³

C_p :- calor específico da água, em kJ/(kg. °C)

\dot{V} - Vazão da água pelo coletor (ou híbrido), m³/s

\dot{Q}_u - taxa de energia útil, em kW

$$T_M = \frac{T_{sH} + T_{eH}}{2} \quad (2.41)$$

$$q_{ca} = U_{ca} \cdot A_c \cdot (T_C - T_M) \quad (2.42)$$

$$T_C = \frac{q_{ca}}{U_{ca} \cdot A_c} + T_M \quad (2.43)$$

Em que:

T_M - temperatura média da água do coletor, em °C

T_C - temperatura da célula FV, em °C

U_{ca} : coeficiente de troca térmica global entre a célula FV e o coletor, em kW/m². °C

q_{ca} fluxo de calor entre a célula FV e o coletor, em kW

A_c : área total de coletores solares (ou híbrido), em m²

Adotando-se

$q_{ca} = \dot{Q}_u$, temos

$$T_C = \frac{\dot{Q}_u}{U_{ca} \cdot A_c} + T_M \quad (2.44)$$

3. DESENVOLVIMENTO DOS SISTEMAS TÉRMICO E ELÉTRICO PROPOSTOS

Neste capítulo vamos aplicar as metodologias definidas no capítulo anterior ao exemplo tipificado nesse trabalho, porém adotando-se as premissas como seguem abaixo:

- Para análise do sistema de armazenamento, considerou-se um sistema de captação de energia solar associado a um reservatório de armazenamento de água, que servirá também para o consumo;
- Por ser uma primeira abordagem, foi desenvolvida uma planilha de cálculos onde foi introduzida a hipótese de mistura perfeita, com reservatório não-estratificado;
- Não haverá limitação de área no telhado da residência, problemas com sombreamento, e outros que a princípio não afetarão o trabalho de comparação;
- O dimensionamento da geração elétrica e térmica será feito apenas para atender a demanda local dentro de valores usuais;
- A prioridade será para a geração elétrica, em detrimento da térmica, e nessa situação não se usará a eletricidade da geração fotovoltaica para aquecer água;
- Como se trata de uma residência de padrão médio, mais comumente encontrada nas cidades brasileiras a água aquecida será para uso sanitário somente (p. ex. o aquecimento de água de piscina está descartado), e deverá alcançar uma temperatura mínima não menor que a de consumo T_d ;
- O cálculo da radiação no local tomará como base o dia médio do mês e será feito para os meses que adotarmos como os mais representativos para cada estação do ano como mostrado na Tabela 2,1.

3.1. Dados geográficos do exemplo referência

O exemplo referência desse trabalho que servirá de base para o dimensionamento das três propostas de projeto, será o de uma residência média localizada em Atibaia, região de Campinas, cujos dados estão mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Dados do local do exemplo referência

Dados da região		
ϕ (Campinas)	-22,8	°
β (igual a latitude do local)	22,8	°
γ (ângulo azimutal do telhado)	180 +/- 20	°
ρ_g (refletividade do solo)	0,2	
Temp. amb. média mensal	min. °C	max °C
verão (janeiro)	17,50	28,90
outono (abril)	13,00	27,90
inverno (julho)	8,20	23,50
primavera (outubro)	14,60	29,40
Pressão atm. Campinas	94,93	kPa

Fonte: Geohack - Ciiagro

3.2. Cálculo da radiação horária no plano inclinado

Esse cálculo será feito conforme metodologia apresentada no item 2.1 para os dados mostrados no item 3.1 e cujos resultados estão apresentados, juntamente com outros parâmetros calculados, na Tabela 4.2.

3.3. Dimensionamento do sistema térmico

3.3.1. Cálculo da carga térmica atendida pelo sistema solar (L_s)

O perfil do exemplo referência é de uma residência para acomodação regular de 6 pessoas em que está prevista uma demanda térmica para alimentar com água quente os chuveiros, pias e uma máquina de lava-louça, com característica mostradas abaixo.

Tabela 3.2: Dados do chuveiro

Dados para cálculo da carga térmica do chuveiro		
Densidade @ 40 °C, 94,93kPa	993	kg/m ³
Cp (Calor específico)	4181	J/(kg. °C)
Td (Temperatura de consumo)	40	°C
Tr (Temperatura da rede)	20	°C
Vch (Vazão do chuveiro)	3	l/min
mch (Vazão máss. do chuveiro)	0,0496	kg/s
Duração do banho	20	mi

Fonte: INMETRO

Tabela 3.3: Dados da máquina de lava-louça

Dados para cálculo da carga térmica da máquina de lava-louça	
densidade @90 °C,94,93kPa	965 kg/m ³
Cp (Calor específico)	4204 J/(kg. °C)
Td (Temperatura de consumo)	90 °C
Tr (Temperatura da rede)	20 °C
Vlav (Vazão da lava-louça)	3 l /ciclo
Duração do ciclo	3 min/ciclo
Período de funcionamento	3x18 min./dia
mlav (Vazão máss, da lava-louça)	0,02 kg/s

Fonte: < <http://www.brastemp.com.br/categoria/lava-loucas/> >

Note que a temperatura considerada para banho foi de 40 °C, enquanto que a máquina de lavar utiliza água a uma temperatura de 90 °C. O objetivo será fornecer a água na temperatura dos banhos, visto que a demanda térmica destes é maior e nesta temperatura o rendimento dos coletores é maior. A máquina de lavar louça terá outra fonte de energia térmica auxiliar para complementar a temperatura para 90 °C.

Tabela 3.4: Demanda térmica ao longo do dia

t (h)	Qtd. de chuv./pias ligados	Lw chuv.+pias atendida (kW)	Lw máq. lava-lou. (kW)	Lw máq. lava-lou. atendida (kW)	Ls chuv.+pias (MJ)	Lw máq. Lava-lou. (MJ)	Ls máq. Lava-lou atendida (MJ)	Ls total de hora cheia (MJ)
0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	1	4,15	0,00	0,00	4,48	0,00	0,00	4,48
7	2	8,30	0,00	0,00	8,96	0,00	0,00	8,96
8	1	4,15	0,00	0,00	4,48	0,00	0,00	4,48
9	0	0,00	4,73	1,35	0,00	5,11	1,45	1,45
10	1	4,15	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,75
11	1	4,15	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,75
12	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	1	4,15	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,75
14	0	0,00	4,73	1,35	0,00	5,11	1,45	1,45
15	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	1	4,15	0,00	0,00	0,75	0,00	0,00	0,75

t (h)	Qtd. de chuv./pias ligados	Lw chuv.+pias atendida (kW)	Lw máq. lava-lou. atendida (kW)	Lw máq. lava-lou. atendida (kW)	Ls chuv.+pias (MJ)	Lw máq. Lava-lou. (MJ)	Ls máq. Lava-lou atendida (MJ)	Ls total de hora cheia (MJ)
18	1	4,15	0,00	0,00	4,48	0,00	0,00	4,48
19	1	4,15	0,00	0,00	4,48	0,00	0,00	4,48
20	1	4,15	0,00	0,00	4,48	0,00	0,00	4,48
21	2	8,30	4,73	1,35	1,49	5,11	1,45	2,95
22	2	8,30	0,00	0,00	1,49	0,00	0,00	1,49
23	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total (MJ)					37,34	15,33	4,36	41,70
Total (kWh)					10,37	4,26	1,21	11,58

Fonte: Própria do Autor (2014)

Conforme Tabela 3.4 a demanda térmica total diária atendida pela radiação solar é de 41,70 MJ/dia (11,58kWh/dia), e média mensal de 352,2 kWh/mês.

Dessa forma, o sistema de coletores solares deverá atender a carga térmica total apresentada na Figura 3.1, ou seja, terá que atender toda a demanda dos chuveiros + pias, bem como parte da demanda da máquina de lava-louça.

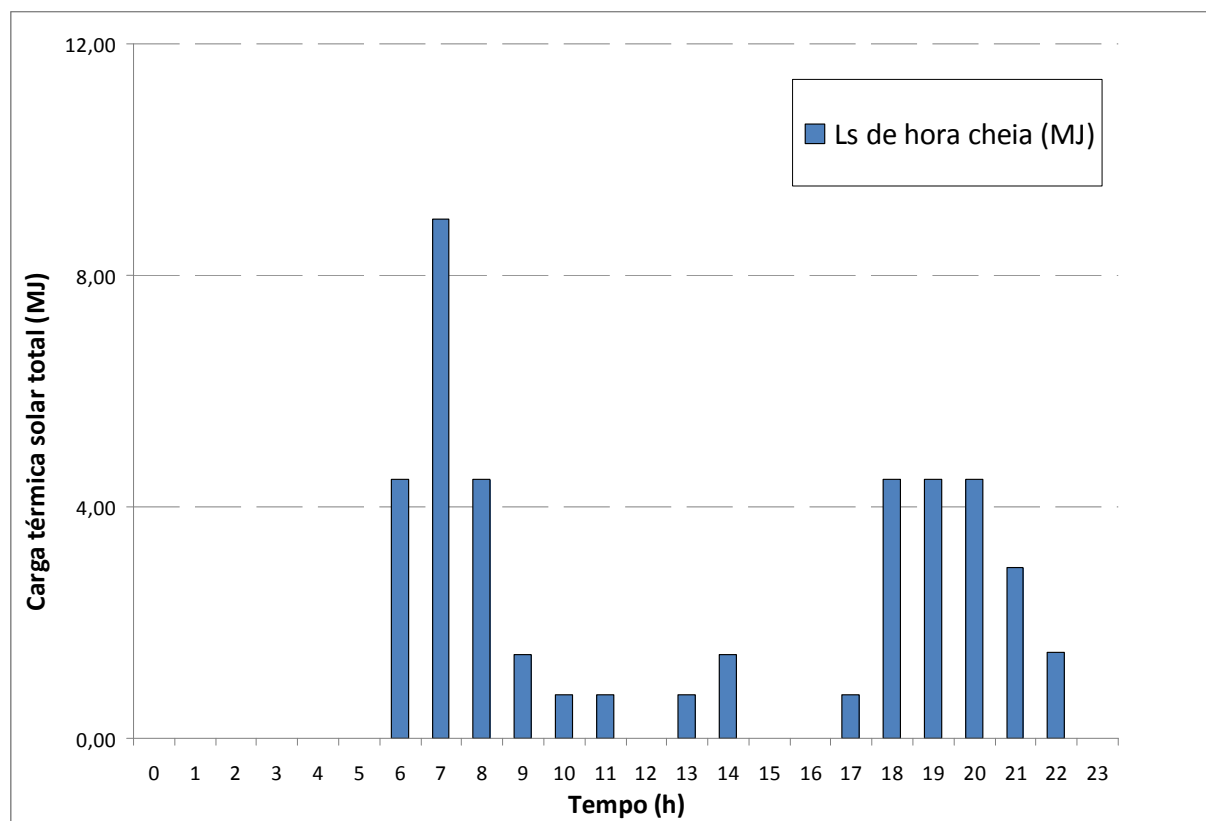


Figura 3.1: Perfil de carga térmica a ser atendida pelos coletores solares

Fonte: Própria do Autor (2014)

3.3.2. Cálculo das perdas térmicas (Q_{perdas})

Tratam-se de perdas no reservatório e tubulações e são consideradas no cálculo da temperatura de armazenamento variável no tempo pela equação (2.22). Essas perdas são representadas pelo termo $(UA)_s \cdot (T_s - T'_a)$ da equação (3.1') que num primeiro momento, será estimado como Q_{perdas} igual a 2,5% de Q_u somado com 2,5% de L_s (OTA, 2013). Estes valores são da mesma ordem de grandeza daqueles apresentados na literatura Duffie e Beckman (2006).

$$(UA)_s \cdot (T_s - T'_a) = Q_{\text{perdas}} = 0,025 \cdot Q_u + 0,025 \cdot L_s \quad (3.1)$$

3.3.3. Cálculo da massa de água nos reservatórios (m)

Apesar da temperatura de armazenamento variar ao longo do dia, ela foi fixada em um determinado valor a ser adotado apenas para estimativa de massa de água armazenada., para cada uma das três configurações propostas.

A temperatura ambiente foi adotada como a média entre a temperatura mínima média e a máxima média do mês. Também foi considerado que a carga térmica é a mesma durante todo o ano.

Dessa forma, o volume do reservatório então adotado será suficiente para o armazenamento de energia térmica a ser demandada ao longo do dia, e o volume de água nele será constante, podendo variar a temperatura, porém não para valor abaixo daquela de consumo.

O resultado do cálculo do volume do reservatório adotado para cada configuração está mostrado no capítulo 4.

3.3.4. Cálculo da temperatura do reservatório (T_s)

Considerou-se que inicialmente o reservatório necessita de um tempo apenas para acúmulo de energia, ou seja, no primeiro dia o reservatório receberá água quente provinda dos coletores solares, porém sem transferir para as cargas térmicas, apenas considerando as perdas, conforme item 3.3.2. Este tempo para o aquecimento da água foi definido através dos gráficos mostrados no capítulo 4. Percebe-se que a partir desse aquecimento inicial, a variação de temperatura da água passa a ser muito pequena e, portanto é o momento de se colocar a carga térmica no sistema. Pelas Tabelas 4.2, 4.5

e 4.9 e seus gráficos correspondentes também se percebe que o sistema, agora com carga térmica, apresenta um equilíbrio térmico necessário para o seu funcionamento, ou seja, a energia útil, descontada as perdas, fica muito próxima da carga térmica no período, e a temperatura mínima observada ao longo do dia, atende a temperatura de consumo de 40 °C (exceto para o caso SFH).

Dessa forma, através da equação (2.22), calcula-se a temperatura de armazenamento ao final do dia (T_s^+) com L_s valendo zero durante todo o dia e partindo de uma temperatura igual à temperatura da rede (20°C). No dia seguinte foi considerado que o reservatório parte a uma temperatura de armazenamento T_s igual à temperatura final T_s^+ calculada no dia anterior. Quando a temperatura T_s se tornar igual à temperatura final T_s^+ do dia anterior, é o momento de liberar o consumo de energia pelas cargas térmicas L_s calculado no item 3.3.1. Este dia então, foi considerado como representativo do mês, sendo que foram traçados os perfis para os meses de Janeiro, Abril, Julho e Outubro, considerados como representativos de cada estação.

O perfil de consumo das cargas térmicas foi considerado como o mesmo para todos os meses.

Apesar do fato que o sistema irá operar continuamente, o cálculo do acúmulo de energia durante os primeiros dias foi feito para todos os meses citados, visto que dessa forma é possível partir o reservatório em qualquer mês do ano.

3.3.4.1. Processo iterativo

No cálculo da temperatura do reservatório T_s a cada hora, se buscou o dimensionamento do sistema de forma que:

- T_s não ficasse abaixo da temperatura de consumo T_d ;
- Houvesse o regime, em que a demanda térmica L_s fosse igual a energia útil Q_U ou em outras palavras, que as temperaturas do reservatório se mantivessem sempre iguais (ou muito próximo) no início e no final do dia.

Então, são duas as variáveis usadas para se ajustar a temperatura T_s , calculada através da equação 2.22, são elas:

- A massa de água no sistema m , ajustada através de uma temperatura T_s inicial usada na equação (2.19);

- A energia útil Q_U , ajustada pela área total de coletores A_c .

Fazem-se então várias tentativas com essas duas variáveis: m e A_c , até os requisitos acima serem atendidos, quando então m e A_c ficam definidas. Lembrando que a partir do valor de A_c obtém-se o número de coletores necessários e de m , do volume do reservatório, V_{arm} .

3.4. Dimensionamento do sistema elétrico

3.4.1. Cálculo da carga elétrica

A carga elétrica a ser considerada neste trabalho é aquela registrada pelo medidor de energia elétrica instalado pela concessionária local na entrada do imóvel, acumulada durante um ano. Isso porque, nos termos regulamentados por meio da Resolução Normativa 482/2012 de 17/04/2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o microgerador poderá gerar energia elétrica de fonte renovável e injetá-la na rede recebendo por isso um crédito de energia que deverá ser consumido pelo mesmo num período de até 36 meses. Adotou-se aqui a demanda anual para o dimensionamento do sistema elétrica por representar um ciclo bem representativo da demanda de uma residência típica, como por exemplo considerando a variação de demanda devido às estações climáticas: verão, inverno, etc.

O suprimento de energia elétrica é feito pela concessionária local em circuito trifásico, com tensão de 127/220V e para potência instalada e declarada de 20kVA.

Na Tabela 3.5 está mostrada a distribuição da carga de energia elétrica a ser adotada na residência.

Tabela 3.5: Perfil da carga elétrica a ser considerada para o sistemas FV

Dados para o cálculo da carga elétrica da residência				
Equipamento	Qtd	Potência unit. (W)	Tempo de uso (h/dia)	Consumo (kWh/ano)
Maquina de lavar roupa	1	1.500	3,00	1.643
Geladeira	2	320	6,00	1.402
Iluminação (lâmpadas incandescentes/fluorescentes)	1	1.800	1,00	657
Ar condicionado	2	750	1,00	548
Ferro elétrico	1	1.200	1,00	438
Televisão	3	300	1,00	329
Forno de elétrico	1	1.750	0,45	287
Forno de microonda	1	1.400	0,50	256
Outros	1	500	1,00	183
Maq. de lava-louça (já descontado o apoio solar)	1	500	1,00	183
Liquidificador/Batedeira/Cafeteira eletr./Torradeira	1	2.400	0,06	53
Aspirador de pó	1	1.300	0,05	23
Total				5.998

3.5. Sistema com Painéis Fotovoltaicos e Coletores Solares, separados (SFC)

O dimensionamento dessa configuração é o mais simples, pois é feito separadamente para o sistema térmico e elétrico, usando as metodologias pertinentes, mostradas no capítulo 2.

Na Figura 3.2 está mostrado o esquema adotado para configuração tratada neste item. Percebe-se que são dois sistemas totalmente independentes um do outro.

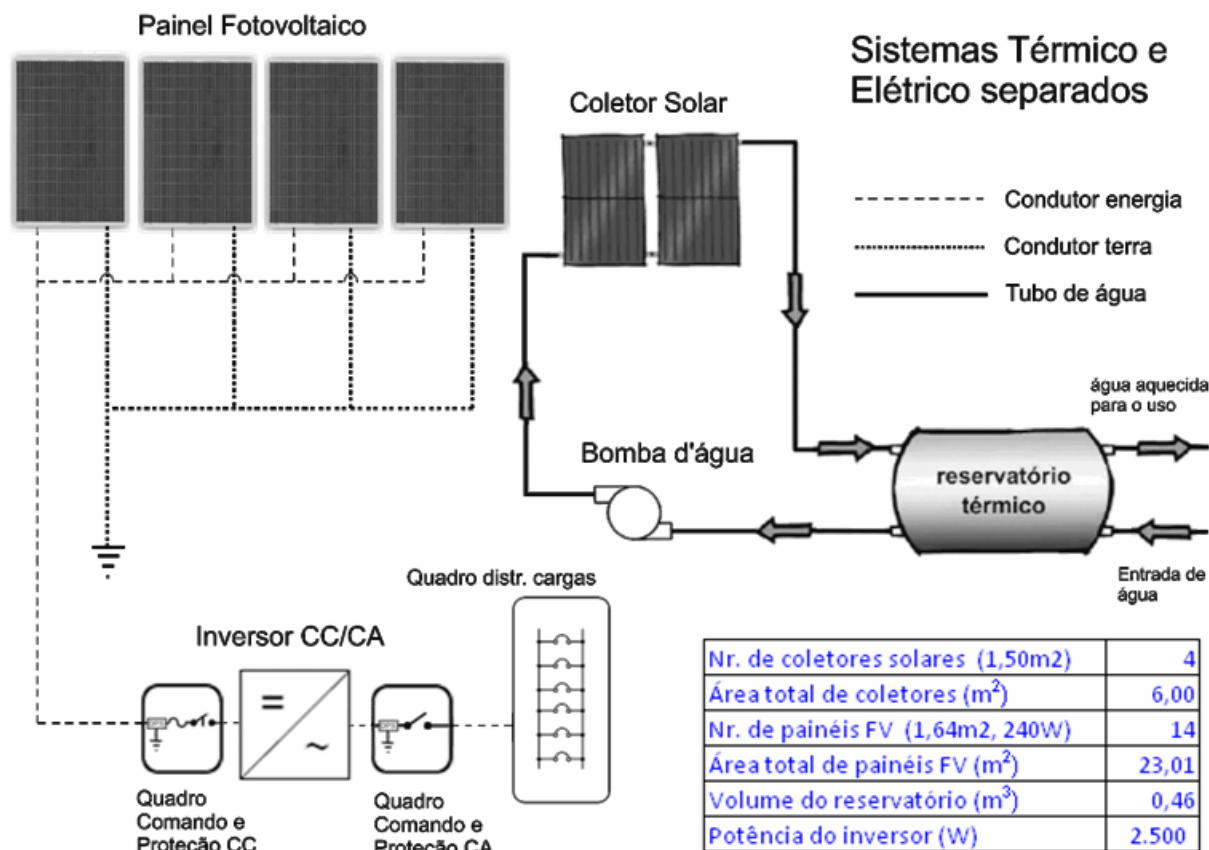


Figura 3.2: Configuração SFC

Fonte: Própria do Autor (2014)

3.5.1. Dados do coletor solar adotado

Estão mostrados na Tabela 3.6 os dados do coletor solar utilizado nesta configuração.

Tabela 3.6: Dados do coletor solar

Dados do coletor	
Área útil	1,5 m ²
$F_R(\tau\alpha)$	0,759
F_RUL	7,199

Fonte: INMETRO, marca Colsol

3.5.2. Dados do painel FV e inversor adotados

Nas Tabelas 3.7 e 3.8 estão mostrados os dados do painel FV e inversor utilizados nesta configuração.

Tabela 3.7: Dados do painel fotovoltaico

KD240GX-LPB (240W 29,8Vcc)
STC - standard test condition
G=1000W/m², Tc = 25 °C, AM=1,5

Área útil (m ²)	1,64
Potência nominal - PoFV - unit. / total - (Wp)	240
Potência máxima - P _{máx} (Wp)	240
Tensão de max. pot. cc - V _{mp} (V)	29,8
Corrente de max. pot. cc - I _{mp} (A)	8,06
Tensão vazio cc - V _{oc} (V)	36,9
Corrente curto cc - I _{sc} (A)	8,59

NOCT - nominal operating cell temperature

Irradiância - G (W/m ²)	800
Temperatura ambiente - (°C)	20
Massa de ar - AM	1,5
Temperatura na NOCT (°C)	45
Coeficiente de temperatura da I _{sc} (%/°C)	0,0600%
Coeficiente de temperatura da V _{oc} (%/°C)	-0,3600%
Coeficiente de temperatura da I _{mp} (%/°C)	0,0064%
Coeficiente de temperatura da V _{mp} (%/°C)	-0,5200%
Coeficiente de temp. do PMP, γ _{mp} (%/°C)	-0,5136%

Fonte: Catálogo do fabricante - Kyocera

Tabela 3.8: Dados do Inversor c.c./c.a.

Powador 3002

Entrada c.c.

Tensão no PMP - min./max.- (Vcc)	200	510
Tensão max. de entrada sem carga (Vco-cc)	600	
Corrente máx. de entrada (I _{max-cc})	13,5	
Nr. de strings (entrada de paralelos)	3	

Saída c.a.

Tensão de saída (Vca)	220
Potência saída nominal - P _{INV} ⁰ (W)	2500
Potência saída máxima - P _{INV} ^{MAX} (W)	2500
Corrente saída - I _{ca} (Aca)	10,9
Eficiência do inversor 100 η _{INV-100} (%)	95%
Eficiência do inversor 50 - η _{INV-50} (%)	96%
Eficiência do inversor 10 η _{INV-10} (%)	93%

Fonte: Catálogo do fabricante - Kaco

3.6. Sistema com Painéis Fotovoltaicos e Coletores Solares, juntos (SFH)

A proposta dessa configuração é de aproveitar a vantagem do painel híbrido na produção de energia elétrica que permite a troca de calor inerente ao processo FV com a água circulante de forma a reduzir a temperatura da célula FV, melhorando assim seu rendimento. A água residual desse processo então aquecida será usada para atender a demanda térmica.

Nessa configuração é considerado somente o uso dos painéis híbridos e nesta situação o dimensionamento será feito igualmente para térmico e elétrico, separadamente, usando as metodologias mostradas no capítulo 2, porém respeitando as seguintes premissas:

- O dimensionamento será feito primeiramente para atender a demanda elétrica, que vai definir o número de painéis híbridos;
- A partir da quantidade de painéis então definida, dimensiona-se o sistema térmico para atender a demanda térmica e a temperatura de consumo da melhor forma possível;
- A temperatura da célula FV deverá ser calculada agora considerando a troca de calor com a água circulante, conforme item 2.4.1.

Na Figura 3.3 está mostrado o esquema adotado para configuração tratada neste item. Percebe-se que agora é apenas um sistema, integrando o térmico e o elétrico no painel híbrido.

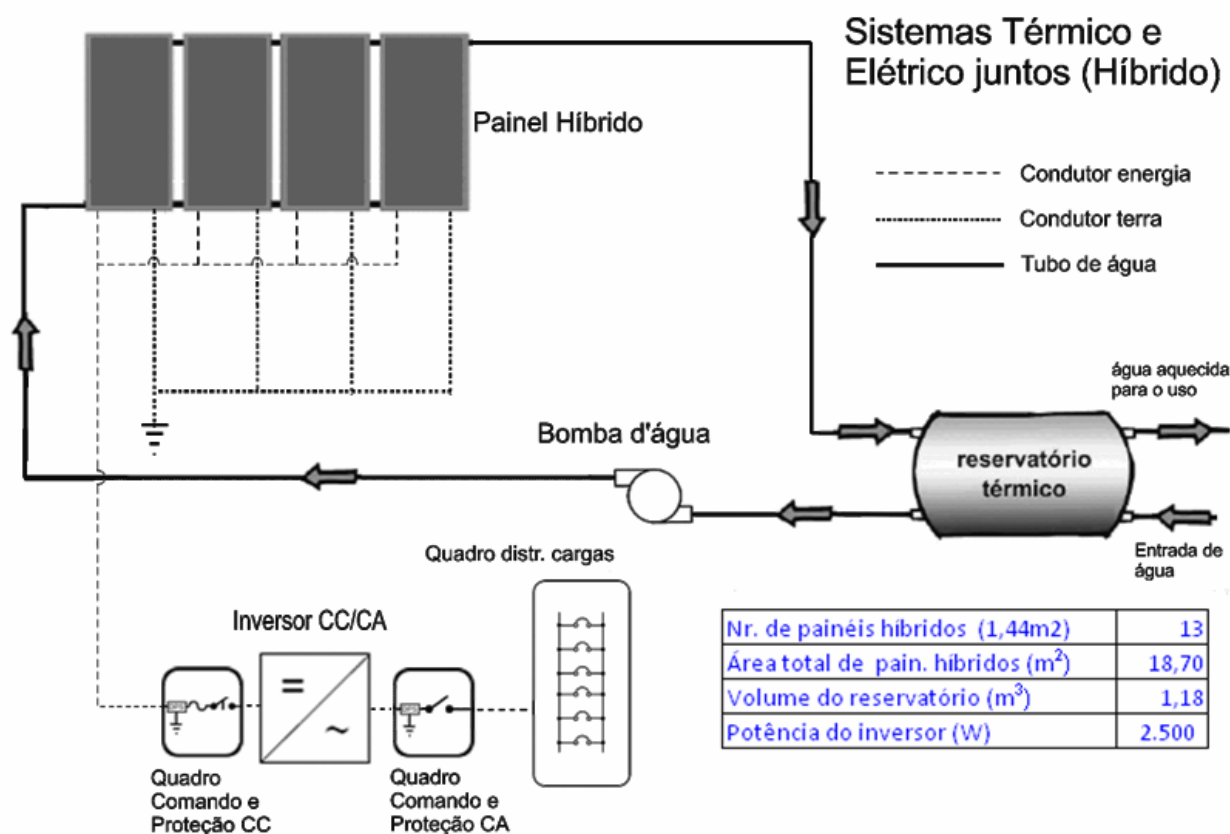


Figura 3.3: Configuração SFH

Fonte: Própria do Autor (2014)

3.6.1. Dados do painel híbrido adotado

Seguem nas Tabelas 3.9 e 3.10 os dados do painel híbrido utilizado nesta configuração.

Tabela 3.9: Dados térmicos do painel híbrido

Dados do coletor (Híbrido-Sices)	
Área útil (Catálogo Sices)	1,44 m ²
$F_R(\tau\alpha)$ - (Marques -2008)	0,42
F_{RUL} - (Marques -2008)	12,23
U_{ca} - cél- placa. abs (Marques -2008)	500 W ^o C.m ²

Tabela 3.10: Dados elétricos do painel híbrido

Sices - Janus-60 250W
STC - standard test condition
G=1000W/m², T_c = 25 °C, AM=1,5

Área útil (m ²)	1,44
Potência nominal - P ^o FV - unit. / total - (Wp)	250
Potência máxima - P _{máx} (Wp)	250
Área útil / Área total (%)	100%
Tensão de max. pot. cc - V _{mp} (V)	31,78
Corrente de max. pot. cc - I _{mp} (A)	7,90
Tensão vazio cc - V _{oc} (V)	37,6
Corrente curto cc - I _{sc} (A)	8,49

N °CT - nominal operating cell temperature

Irradiância - G (W/m ²)	800
Temperatura ambiente - T _{amb} (°C)	20
Massa de ar - AM	1,5
Temperatura na NOCT (°C)	46
Coeficiente de temperatura da I _{sc} (%/°C)	0,0500%
Coeficiente de temperatura da V _{oc} (%/°C)	-0,3400%
Coeficiente de temperatura da I _{mp} (%/°C)	0,0053%
Coeficiente de temperatura da V _{mp} (%/°C)	-0,4100%
Coeficiente de temp. do PMP, γ _{mp} (%/°C)	-0,4047%

Fonte: Catálogo do fabricante - Sices

3.7. Sistema com Painéis Híbridos + Coletores Solares (SFHC)

Os dados dos painéis e coletores usados nesta configuração são os mesmos já citados nos itens anteriores.

O objetivo dessa configuração é obter um melhor desempenho térmico daquela citada no item 3.6. (SFH), na qual encontramos uma condição que pode ser conflitante, pois de um lado precisamos “refrigerar” a célula FV para melhorar seu rendimento elétrico e neste instante a temperatura do elemento “refrigerante”, a própria água de consumo, não deveria ficar muito alta. Em sendo assim então, a água pode não atingir a temperatura de consumo desejada.

Uma solução comumente proposta para elevar a temperatura até a de consumo em sistemas híbridos como a do item 3.6 é usar um sistema auxiliar elétrico. Mas percebe-se tratar de uma proposta inconveniente, pois se monta um sistema FV para gerar energia elétrica e depois a usa para aquecer água, função essa menos nobre do que aquela de alimentar cargas exclusivamente elétricas. Por exemplo, o chuveiro poderia ser a gás, enquanto um computador não teria outra fonte senão a eletricidade.

Assim, ao invés de usar o sistema auxiliar elétrico, vamos usar um sistema com coletor solar simples, em série com o híbrido, como mostrado na Figura 3.4.

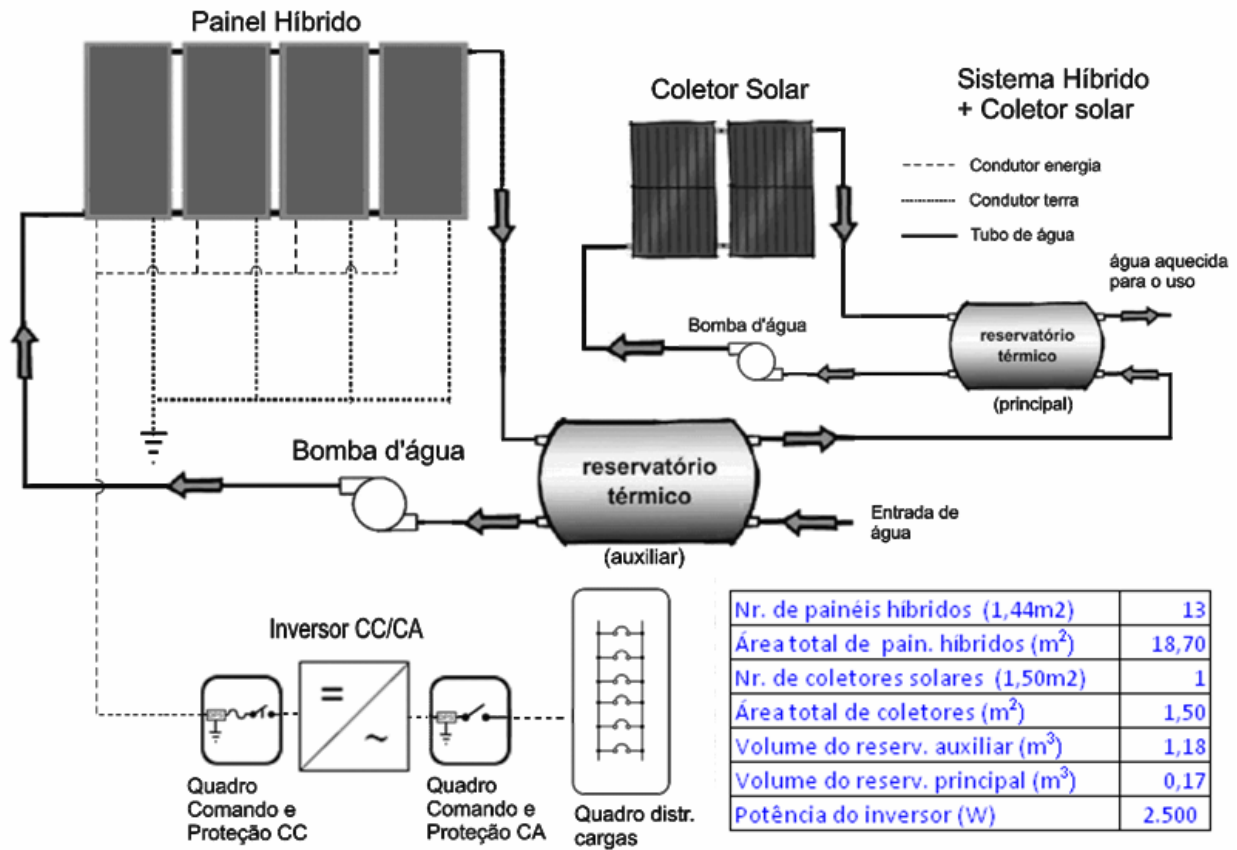


Figura 3.4: Configuração SFHC

Fonte: Própria do Autor (2014)

3.7.1. Cálculo das temperaturas nos reservatórios (T_s)

Esse cálculo será feito exatamente como nos casos anteriores, usando a equação (2.22) para cada reservatório e toda a metodologia descrita no capítulo 2 para esse tipo de cálculo. Porém neste caso particular, a água que sai do reservatório do sistema híbrido com temperatura T_{s1} será transportada para a entrada do reservatório do sistema com coletor solar. O reservatório térmico dos painéis híbridos chamaremos de auxiliar, pois servirá apenas para armazenar a água pré-aquecida a ser injetada no reservatório dos coletores solares, este então o principal, no qual ficará armazenada a água para o consumo.

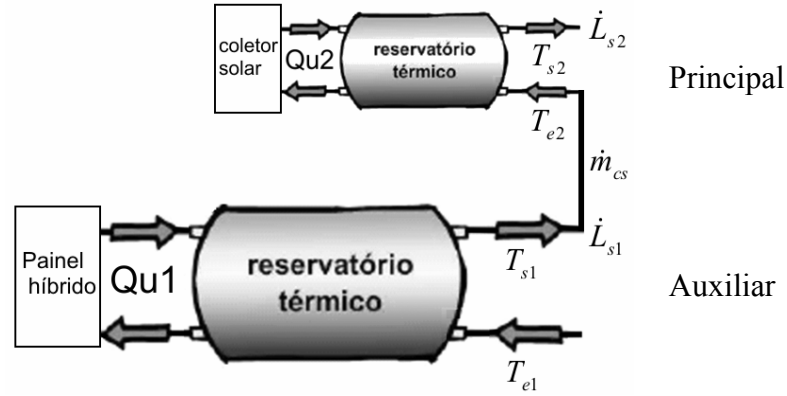


Figura 3.5: Temperaturas do sistema híbrido mais coletor solar
Fonte: Própria do Autor (2014)

A partir da equação (2.18) temos:

$$\dot{L}_{s1} = \dot{m}_{cs} \cdot C_p \cdot (T_{s1} - T_{e1}) \quad (3.2)$$

$$\dot{L}_{s2} = \dot{m}_{cs} \cdot C_p \cdot (T_{s2} - T_{e2}) \quad (3.3)$$

$$\dot{L}_{s1} + \dot{L}_{s2} = \dot{L}_s \quad (3.4)$$

Em que:

\dot{L}_{s1} - taxa de carga térmica do reservatório auxiliar, em kW

T_{s1} - temperatura de saída da água do reservatório auxiliar, em °C

T_{e1} - temperatura de entrada da água do reservatório auxiliar (água fria), em °C

\dot{m}_{cs} - vazão mássica de consumo do sistema, em kg/s

\dot{L}_{s2} - taxa de carga térmica do reservatório principal, em kW

T_{s2} - temperatura de saída da água do reservatório principal, em °C

T_{e2} - temperatura de entrada da água do reservatório principal, em °C

C_p - calor específico da água, em kJ/kg. °C

\dot{L}_s - taxa de carga térmica total do sistema suprida pelo sistema solar, em kW

Temos três equações em que são desconhecidos \dot{m}_{sc} , \dot{L}_{s1} e \dot{L}_{s2} , e vamos desprezar as perdas de calor da água no trajeto entre os reservatórios, ou seja, $T_{s1} = T_{e2}$.

Os valores de \dot{L}_{s1} e \dot{L}_{s2} , serão então usados no cálculo da temperatura dos reservatórios, nos instantes $t + \Delta t$, ou seja Ts^+ , através da equação (2.22). De posse da nova temperatura da água nos reservatórios, calcula-se os novos valores de \dot{L}_{s1} e \dot{L}_{s2} , e assim sucessivamente, até completar o ciclo diário.

Os resultados estão apresentados no capítulo 4.

4. RESULTADOS

4.1. Configuração SFC

4.1.1. Térmico

A partir do processo iterativo definido em 3.3.4.1, temos os resultados nos sub-itens a seguir.

4.1.1.1. Resultado do cálculo da massa de água nos reservatórios

A partir do desenvolvimento mostrado nos itens 3.3.3, 3.4.1 e dos dados na Tabela 4.1. calculamos a massa de água no reservatório necessária para cada estação do ano.

Tabela 4.1: Dados do reservatório de água

	Janeiro verão	Abril outono	Julho inverno	Outubro primavera
Ls total (MJ)	41,7	41,7	41,7	41,7
Ta media (°C)	23,2	20,5	15,9	22,0
Varm (m³)	0,46	0,41	0,34	0,44
m (kg)	457,3	406,1	342,0	433,5
Ts (°C)	45,0	45,0	45,0	45,0

Fonte: Própria do Autor (2014)

De posse do valor da massa, mostrada na mesma tabela, percebemos que um reservatório com volume de $0,46\text{m}^3$ poderia perfeitamente acomodar a massa de água necessária para atender a demanda térmica Ls estabelecida, para todas as estações.

4.1.1.2. Resultado do cálculo da temperatura de armazenamento

A partir do exposto no item 3.3. e dos dados no item 3.5, executamos o processo iterativo do item 3.3.4.1, quanto então no final teremos o potencial solar no local, a energia útil, a temperatura do reservatório e demais importantes parâmetros como mostrados na Tabela 4.2., inclusive a área total de coletores A_c e o volume de água do reservatório V_{arm} , como mostrado abaixo.

Área total dos coletores – A_c (m^2)	6,0
Volume do reservatório – V_{arm} (m^3)	0,46

Tabela 4.2: Resultados do potencial solar, e temperatura de armazenamento - SFC

Estudo comparativo de sistemas de geração termo-fotovoltaico, utilizando combinações de painéis solares elétricos e térmicos, e os tipos híbridos

64

Sistema com Painéis Fotovoltaicos e Coletores Solares, separados

Mês Dia n δ (o) a b H região de Campinas (MJ/m2) Ta_min oC Ta_max oC
Verão Janeiro 17 17 -20,9 0,726278 0,359372 22,13 17,50 28,90

HS	HS	ω (o)	ωS (o)	N (h)	from solar	rt	H (MJ/m²)	I (MJ/m²)	10 (MJ/m²)	KT=H/H0	Hd/H	id (MJ/m²)	rd	Id (MJ/m²)	Ib=I-Id	Rb	IT (MJ/m².G (W/m²)	Ta (oC)	Ts (oC)	η	Qu (W)	Qu (MJ)	LsC (MJ)	Qperdas	Ts+	
1 0-1	0,5	-172,5	99,2	13,2	11,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,294	0,000	0,000	17,5	56,7	0,000	0,000	0,000	0,000	56,7	
2 1-2	1,5	-157,5	99,2	13,2	10,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,313	0,000	0,000	18,5	56,7	0,000	0,000	0,000	0,000	56,7	
3 2-3	2,5	-142,5	99,2	13,2	9,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,360	0,000	0,000	19,4	56,7	0,000	0,000	0,000	0,000	56,7	
4 3-4	3,5	-127,5	99,2	13,2	8,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,473	0,000	0,000	20,4	56,7	0,000	0,000	0,000	0,000	56,7	
5 4-5	4,5	-112,5	99,2	13,2	7,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,869	0,000	0,000	21,3	56,7	0,000	0,000	0,000	0,000	56,7	
6 5-6	5,5	-97,5	99,2	13,2	6,5	0,002	22,13	0,047	41,821	0,529	0,402	8,889	0,003	0,028	0,019	-4,721	-0,062	0,000	22,3	56,7	0,000	0,000	0,000	0,000	56,7	
7 6-7	6,5	-82,5	99,2	13,2	5,5	0,023	22,13	0,515	41,821	0,529	0,402	8,889	0,030	0,268	0,248	0,486	0,392	108,934	23,2	56,7	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	54,3
8 7-8	7,5	-67,5	99,2	13,2	4,5	0,049	22,13	1,074	41,821	0,529	0,402	8,889	0,056	0,500	0,575	0,764	0,947	263,131	24,2	54,3	0,000	0,000	0,000	8,961	0,224	49,5
9 8-9	8,5	-52,5	99,2	13,2	3,5	0,075	22,13	1,665	41,821	0,529	0,402	8,889	0,080	0,708	0,957	0,858	1,542	428,383	25,1	49,5	0,349	896,360	3,227	4,480	0,193	48,8
10 9-10	9,5	-37,5	99,2	13,2	2,5	0,100	22,13	2,209	41,821	0,529	0,402	8,889	0,099	0,877	1,332	0,902	2,096	582,242	26,1	48,8	0,478	1670,729	6,015	1,453	0,187	51,0
11 10-11	10,5	-22,5	99,2	13,2	1,5	0,119	22,13	2,628	41,821	0,529	0,402	8,889	0,112	0,997	1,630	0,924	2,525	701,309	27,0	51,0	0,512	2155,189	7,759	0,747	0,213	54,6
12 11-12	11,5	-7,5	99,2	13,2	0,5	0,129	22,13	2,856	41,821	0,529	0,402	8,889	0,119	1,060	1,796	0,934	2,759	766,285	28,0	54,6	0,509	2338,572	8,419	0,747	0,229	58,5
13 12-13	12,5	7,5	99,2	13,2	0,5	0,129	22,13	2,856	41,821	0,529	0,402	8,889	0,119	1,060	1,796	0,934	2,759	766,285	28,9	58,5	0,481	2211,518	7,961	0,000	0,199	62,5
14 13-14	13,5	22,5	99,2	13,2	1,5	0,119	22,13	2,628	41,821	0,529	0,402	8,889	0,112	0,997	1,630	0,924	2,525	701,309	27,9	62,5	0,403	1695,549	6,104	0,747	0,171	65,3
15 14-15	14,5	37,5	99,2	13,2	2,5	0,100	22,13	2,209	41,821	0,529	0,402	8,889	0,099	0,877	1,332	0,902	2,096	582,242	26,8	65,3	0,284	991,436	3,569	1,453	0,126	66,3
16 15-16	15,5	52,5	99,2	13,2	3,5	0,075	22,13	1,665	41,821	0,529	0,402	8,889	0,080	0,708	0,957	0,858	1,542	428,383	25,8	66,3	0,078	201,037	0,724	0,000	0,018	66,7
17 16-17	16,5	67,5	99,2	13,2	4,5	0,049	22,13	1,074	41,821	0,529	0,402	8,889	0,056	0,500	0,575	0,764	0,947	263,131	24,8	66,7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	66,7
18 17-18	17,5	82,5	99,2	13,2	5,5	0,023	22,13	0,515	41,821	0,529	0,402	8,889	0,030	0,268	0,248	0,486	0,392	108,934	23,7	66,7	0,000	0,000	0,000	0,747	0,019	66,3
19 18-19	18,5	97,5	99,2	13,2	6,5	0,002	22,13	0,047	41,821	0,529	0,402	8,889	0,003	0,028	0,019	-4,721	-0,062	0,000	22,7	66,3	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	63,9
20 19-20	19,5	112,5	99,2	13,2	7,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,869	0,000	0,000	21,6	63,9	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	61,5
21 20-21	20,5	127,5	99,2	13,2	8,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,473	0,000	0,000	20,6	61,5	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	59,1
22 21-22	21,5	142,5	99,2	13,2	9,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,360	0,000	0,000	19,6	59,1	0,000	0,000	0,000	2,946	0,074	57,5
23 22-23	22,5	157,5	99,2	13,2	10,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,313	0,000	0,000	18,5	57,5	0,000	0,000	0,000	1,493	0,037	56,7
24 23-0	23,5	172,5	99,2	13,2	11,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,294	0,000	0,000	17,5	56,7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	56,7

Mês Dia n δ (o) a b H região de Campinas (MJ/m2) Ta_min oC Ta_max oC
Outono Abril 15 105 9,4 0,628962 0,451857 15,85 13,00 27,90

HS	HS	ω (o)	ωS (o)	N (h)	rom solar	rt	H (MJ/m²)	I (MJ/m²)	10 (MJ/m²)	KT=H/H0	Hd/H	id (MJ/m²)	rd	Id (MJ/m²)	Ib=I-Id	Rb	IT (MJ/m².G (W/m²)	Ta (oC)	Ts (oC)	η	Qu (W)	Qu (MJ)	LsC (MJ)	Qperdas	Ts+	
1 0-1	0,5	-172,5	86,0	11,5	11,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	1,014	0,000	0,000	13,0	52,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	52,0
2 1-2	1,5	-157,5	86,0	11,5	10,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	1,009	0,000	0,000	14,2	52,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	52,0
3 2-3	2,5	-142,5	86,0	11,5	9,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	0,997	0,000	0,000	15,5	52,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	52,0
4 3-4	3,5	-127,5	86,0	11,5	8,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	0,973	0,000	0,000	16,7	52,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	52,0
5 4-5	4,5	-112,5	86,0	11,5	7,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	0,918	0,000	0,000	18,0	52,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	52,0
6 5-6	5,5	-97,5	86,0	11,5	6,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	0,708	0,000	0,000	19,2	52,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	52,0
7 6-7	6,5	-82,5	86,0	11,5	5,5	0,006	15,85	0,097	29,991	0,528	0,402	6,376	0,009	0,057	0,040	2,324	0,152	42,130	20,5	52,0	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	49,6
8 7-8	7,5	-67,5	86,0	11,5	4,5	0,037	15,85	0,583	29,991	0,528	0,402	6,376	0,046	0,293	0,291	1,326	0,683	189,586	21,7	49,6	0,000	0,000	0,000	8,961	0,224	44,8
9 8-9	8,5	-52,5	86,0	11,5	3,5	0,071	15,85	1,132	29,991	0,528	0,402	6,376	0,079	0,504	0,628	1,225	1,282	356,235	22,9	44,8	0,318	679,336	2,446	4,480	0,173	43,6
10 9-10	9,5	-37,5	86,0	11,5	2,5	0,105	15,85	1,660	29,991	0,528	0,402	6,376	0,106	0,676	0,984	1,189	1,859	516,453	24,2	43,6	0,488	1512,466	5,445	1,453	0,172	45,6
11 10-11	10,5	-22,5	86,0	11,5	1,5	0,131	15,85	2,077	29,991	0,528	0,402	6,376	0,125	0,798	1,278	1,173	2,314	642,847	25,4	45,6	0,533	2055,440	7,400	0,747	0,204	49,0
12 11-12	11,5	-7,5	86,0	11,5	0,5	0,146	15,85	2,306	29,991	0,528	0,402	6,376	0,135	0,861	1,445	1,167	2,565	712,538	26,7	49,0	0,533	2280,798	8,211	0,747	0,224	52,8
13 12-13	12,5	7,5	86,0	11,5	0,5	0,146	15,85	2,306	29,991	0,528	0,402	6,376	0,135	0,861	1,445	1,167	2,565	712,538	27,9	52,8	0,508	2170,921	7,815	0,000	0,195	56,7
14 13-14	13,5	22,5	86,0	11,5	1,5	0,131	15,85	2,077	29,991	0,528	0,402	6,376	0,125	0,798	1,278	1,173	2,314	642,847	26,5	56,7	0,421	1622,957	5,843	0,747	0,165	59,3
15 14-15	14,5	37,5	86,0	11,5	2,5	0,105	15,85	1,660	29,991	0,528	0,402	6,376	0,106	0,676	0,984	1,189	1,859	516,453	25,2	59,3	0,283	877,484	3,159	1,453	0,115	60,2
16 15-16	15,5	52,5	86,0	11,5	3,5	0,071	15,85	1,132	29,991	0,528	0,402	6,376	0,079	0,504	0,628	1,225	1,282	356,235	23,8	60,2	0,025	53,416	0,192	0,000	0,005	60,3
17 16-17	16,5	67,5	86,0	11,5	4,5	0,037	15,85	0,583	29,991	0,528	0,402	6,376	0,046	0,293	0,291	1,326	0,683	189,586	22,5	60,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	60,3
18 17-18	17,5	82,5	86,0	11,5	5,5	0,006	15,85	0,097	29,991	0,528	0,402	6,376	0,009	0,057	0,040	2,324	0,152	42,130	21,1	60,3	0,000	0,000	0,000	0,747	0,019	59,9
19 18-19	18,5	97,5	86,0	11,5	6,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	0,708	0,000	0,000	19,8	59,9	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	57,5
20 19-20	19,5	112,5	86,0	11,5	7,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	0,918	0,000	0,000	18,4	57,5	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	55,1
21 20-21	20,5	127,5	86,0	11,5	8,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	0,973	0,000	0,000	17,1	55,1	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	52,7
22 21-22	21,5	142,5	86,0	11,5	9,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	0,997	0,000	0,000	15,7	52,7	0,000	0,000	0,000	2,946	0,074	51,1
23 22-23	22,5	157,5	86,0	11,5	10,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	1,009	0,000	0,000	14,4	51,1	0,000	0,000	0,000	1,493	0,037	50,3
24 23-0	23,5	172,5	86,0	11,5	11,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	1,014	0,000	0,000	13,0	50,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	50,3

Estudo comparativo de sistemas de geração termo-fotovoltaico, utilizando combinações de painéis solares elétricos e térmicos, e os tipos híbridos

65

Sistema com Painéis Fotovoltaicos e Coletores Solares, separados

Mês	Dia	n	δ (o)	a	b	H região de Campinas (MJ/m2)	Ta_min oC	Ta_max oC																		
Inverno	Julho	17	198	21,2	0,585616	0,493051	16,77	8,20 23,50																		
HS	HS	ω (o)	ωS (o)	N (h)	rom solar	rt	H (MJ/m²)	I (MJ/m²)	HO (MJ/m²)	KT=H/H0	Hd/H	Id (MJ/m²)	rd	Id (MJ/m²)	Ib=I-Id	Rb	IT (MJ/m²)	G (W/m²)	Ta (oC)	Ts (oC)	η	Qu (W)	Qu (MJ)	LsC (MJ)	Qperdas	Ts+
1 0-1	0,5	-172,5	80,6	10,7	11,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,932	0,000	0,000	8,2	56,6	0,000	0,000	0,000	0,000	56,6	
2 1-2	1,5	-157,5	80,6	10,7	10,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,922	0,000	0,000	9,5	56,6	0,000	0,000	0,000	0,000	56,6	
3 2-3	2,5	-142,5	80,6	10,7	9,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,900	0,000	0,000	10,8	56,6	0,000	0,000	0,000	0,000	56,6	
4 3-4	3,5	-127,5	80,6	10,7	8,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,856	0,000	0,000	12,0	56,6	0,000	0,000	0,000	0,000	56,6	
5 4-5	4,5	-112,5	80,6	10,7	7,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,761	0,000	0,000	13,3	56,6	0,000	0,000	0,000	0,000	56,6	
6 5-6	5,5	-97,5	80,6	10,7	6,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,482	0,000	0,000	14,6	56,6	0,000	0,000	0,000	0,000	56,6	
7 6-7	6,5	-82,5	80,6	10,7	5,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	-4,354	0,000	0,000	15,9	56,6	0,000	0,000	0,000	4,480	54,2	
8 7-8	7,5	-67,5	80,6	10,7	4,5	0,029	16,77	0,493	23,446	0,715	0,206	3,451	0,038	0,131	0,362	1,890	0,819	227,522	17,1	54,2	0,000	0,000	0,000	8,961	49,4	
9 8-9	8,5	-52,5	80,6	10,7	3,5	0,068	16,77	1,145	23,446	0,715	0,206	3,451	0,077	0,266	0,879	1,482	1,577	437,954	18,4	49,4	0,249	654,834	2,357	4,480	0,171	48,2
10 9-10	9,5	-37,5	80,6	10,7	2,5	0,106	16,77	1,785	23,446	0,715	0,206	3,451	0,109	0,376	1,409	1,365	2,314	642,657	19,7	48,2	0,439	1693,928	6,098	1,453	0,189	50,5
11 10-11	10,5	-22,5	80,6	10,7	1,5	0,137	16,77	2,296	23,446	0,715	0,206	3,451	0,132	0,454	1,843	1,317	2,899	805,246	21,0	50,5	0,494	2388,790	8,600	0,747	0,234	54,5
12 11-12	11,5	-7,5	80,6	10,7	0,5	0,154	16,77	2,580	23,446	0,715	0,206	3,451	0,143	0,494	2,086	1,298	3,223	895,215	22,2	54,5	0,499	2681,510	9,653	0,747	0,260	59,0
13 12-13	12,5	7,5	80,6	10,7	0,5	0,154	16,77	2,580	23,446	0,715	0,206	3,451	0,143	0,494	2,086	1,298	3,223	895,215	23,5	59,0	0,473	2541,309	9,149	0,000	0,229	63,7
14 13-14	13,5	22,5	80,6	10,7	1,5	0,137	16,77	2,296	23,446	0,715	0,206	3,451	0,132	0,454	1,843	1,317	2,899	805,246	22,1	63,7	0,387	1870,068	6,732	0,747	0,187	66,7
15 14-15	14,5	37,5	80,6	10,7	2,5	0,106	16,77	1,785	23,446	0,715	0,206	3,451	0,109	0,376	1,409	1,365	2,314	642,657	20,7	66,7	0,243	938,604	3,379	1,453	0,121	67,7
16 15-16	15,5	52,5	80,6	10,7	3,5	0,068	16,77	1,145	23,446	0,715	0,206	3,451	0,077	0,266	0,879	1,482	1,577	437,954	19,3	67,7	0,000	0,000	0,000	0,000	67,7	
17 16-17	16,5	67,5	80,6	10,7	4,5	0,029	16,77	0,493	23,446	0,715	0,206	3,451	0,038	0,131	0,362	1,890	0,819	227,522	17,9	67,7	0,000	0,000	0,000	0,000	67,7	
18 17-18	17,5	82,5	80,6	10,7	5,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	-4,354	0,000	0,000	16,5	67,7	0,000	0,000	0,000	0,747	67,3	
19 18-19	18,5	97,5	80,6	10,7	6,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,482	0,000	0,000	15,2	67,3	0,000	0,000	0,000	4,480	64,9	
20 19-20	19,5	112,5	80,6	10,7	7,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,761	0,000	0,000	13,8	64,9	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	62,5
21 20-21	20,5	127,5	80,6	10,7	8,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,856	0,000	0,000	12,4	62,5	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	60,1
22 21-22	21,5	142,5	80,6	10,7	9,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,900	0,000	0,000	11,0	60,1	0,000	0,000	0,000	2,946	0,074	58,5
23 22-23	22,5	157,5	80,6	10,7	10,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,922	0,000	0,000	9,6	58,5	0,000	0,000	0,000	1,493	0,037	57,7
24 23-0	23,5	172,5	80,6	10,7	11,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,932	0,000	0,000	8,2	57,7	0,000	0,000	0,000	0,000	57,7	
Mês	Dia	n	δ (o)	a	b	H região de Campinas (MJ/m2)	Ta_min oC	Ta_max oC																		
Primave	Outubro	15	288	-9,6	0,69005	0,393801	22,85	14,60 29,40																		
HS	HS	ω (o)	ωS (o)	N (h)	rom solar	rt	H (MJ/m²)	I (MJ/m²)	HO (MJ/m²)	KT=H/H0	Hd/H	Id (MJ/m²)	rd	Id (MJ/m²)	Ib=I-Id	Rb	IT (MJ/m²)	G (W/m²)	Ta (oC)	Ts (oC)	η	Qu (W)	Qu (MJ)	LsC (MJ)	Qperdas	Ts+
1 0-1	0,5	-172,5	94,1	12,5	11,5	0,000	22,85	0,000	37,987	0,602	0,337	7,697	0,000	0,000	0,000	1,169	0,000	0,000	14,6	59,6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	59,6
2 1-2	1,5	-157,5	94,1	12,5	10,5	0,000	22,85	0,000	37,987	0,602	0,337	7,697	0,000	0,000	0,000	1,175	0,000	0,000	15,8	59,6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	59,6
3 2-3	2,5	-142,5	94,1	12,5	9,5	0,000	22,85	0,000	37,987	0,602	0,337	7,697	0,000	0,000	0,000	1,192	0,000	0,000	17,1	59,6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	59,6
4 3-4	3,5	-127,5	94,1	12,5	8,5	0,000	22,85	0,000	37,987	0,602	0,337	7,697	0,000	0,000	0,000	1,228	0,000	0,000	18,3	59,6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	59,6
5 4-5	4,5	-112,5	94,1	12,5	7,5	0,000	22,85	0,000	37,987	0,602	0,337	7,697	0,000	0,000	0,000	1,332	0,000	0,000	19,5	59,6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	59,6
6 5-6	5,5	-97,5	94,1	12,5	6,5	0,000	22,85	0,000	37,987	0,602	0,337	7,697	0,000	0,000	0,000	2,383	0,000	0,000	20,8	59,6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	59,6
7 6-7	6,5	-82,5	94,1	12,5	5,5	0,015	22,85	0,352	37,987	0,602	0,337	7,697	0,024	0,182	0,169	0,702	0,304	84,468	22,0	59,6	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	57,2
8 7-8	7,5	-67,5	94,1	12,5	4,5	0,041	22,85	0,943	37,987	0,602	0,337	7,697	0,053	0,410	0,533	0,915	0,905	251,442	23,2	57,2	0,000	0,000	0,000	8,961	0,224	52,4
9 8-9	8,5	-52,5	94,1	12,5	3,5	0,071	22,85	1,617	37,987	0,602	0,337	7,697	0,080	0,615	1,002	0,971	1,600	444,576	24,5	52,4	0,307	819,620	2,951	4,480	0,186	51,5
10 9-10	9,5	-37,5	94,1	12,5	2,5	0,099	22,85	2,267	37,987	0,602	0,337	7,697	0,102	0,782	1,485	0,996	2,278	632,721	25,7	51,5	0,466	1768,448	6,366	1,453	0,195	53,9
11 10-11	10,5	-22,5	94,1	12,5	1,5	0,122	22,85	2,781	37,987	0,602	0,337	7,697	0,117	0,900	1,881	1,007	2,816	782,282	26,9	53,9	0,511	2396,270	8,627	0,747	0,234	57,9
12 11-12	11,5	-7,5	94,1	12,5	0,5	0,134	22,85	3,065	37,987	0,602	0,337	7,697	0,125	0,961	2,104	1,012	3,114	865,077	28,2	57,9	0,511	2653,927	9,554	0,747	0,258	62,4
13 12-13	12,5	7,5	94,1	12,5	0,5	0,134	22,85	3,065	37,987	0,602	0,337	7,697	0,125	0,961	2,104	1,012	3,114	865,077	29,4	62,4	0,484	2514,113	9,051	0,000	0,226	67,0
14 13-14	13,5	22,5	94,1	12,5	1,5	0,122	22,85	2,781	37,987	0,602	0,337	7,697	0,117	0,900	1,881	1,007	2,816	782,282	28,1	67,0	0,400	1879,661	6,767	0,747	0,188	70,1
15 14-15	14,5	37,5	94,1	12,5	2,5	0,099	22,85	2,267	37,987	0,602	0,337	7,697	0,102	0,782	1,485	0,996	2,278	632,721	26,7	70,1	0,266	1008,734	3,631	1,453	0,127	71,1
16 15-16	15,5	52,5	94,1	12,5	3,5	0,071	22,85	1,617	37,987	0,602	0,337	7,697	0,080	0,615	1,002	0,971	1,600	444,576	25,4	71,1	0,018	47,475	0,171	0,000	0,004	71,2
17 16-17	16,5	67,5	94,1	12,5	4,5	0,041	22,85	0,943	37,987	0,602	0,337	7,697	0,053	0,410	0,533	0,915	0,905	251,442	24,0	71,2	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	71,2
18 17-18	17,5	82,5	94,1	12,5	5,5	0,015	22,85	0,352	37,987	0,602	0,337	7,697	0,024	0,182	0,169	0,702	0,304	84,468	22,7	71,2	0,000	0,000	0,000	0,747	0,019	70,8
19 18-19	18,5	97,5	94,1	12,5	6,5	0,000	22,85	0,000	37,987	0,602	0,337	7,697	0,000	0,000	0,000	2,383	0,000	0,000								

A faixa de horas em vermelho na tabela anterior indica o período em que o sistema de geração de energia está ligado, aproveitando a insolação.

A partir da mesma tabela anterior obtemos a Figura 4.1 que apresenta graficamente o perfil da temperatura de armazenamento T_s , em função do tempo. Pode se notar que o sistema está em equilíbrio com a carga térmica.

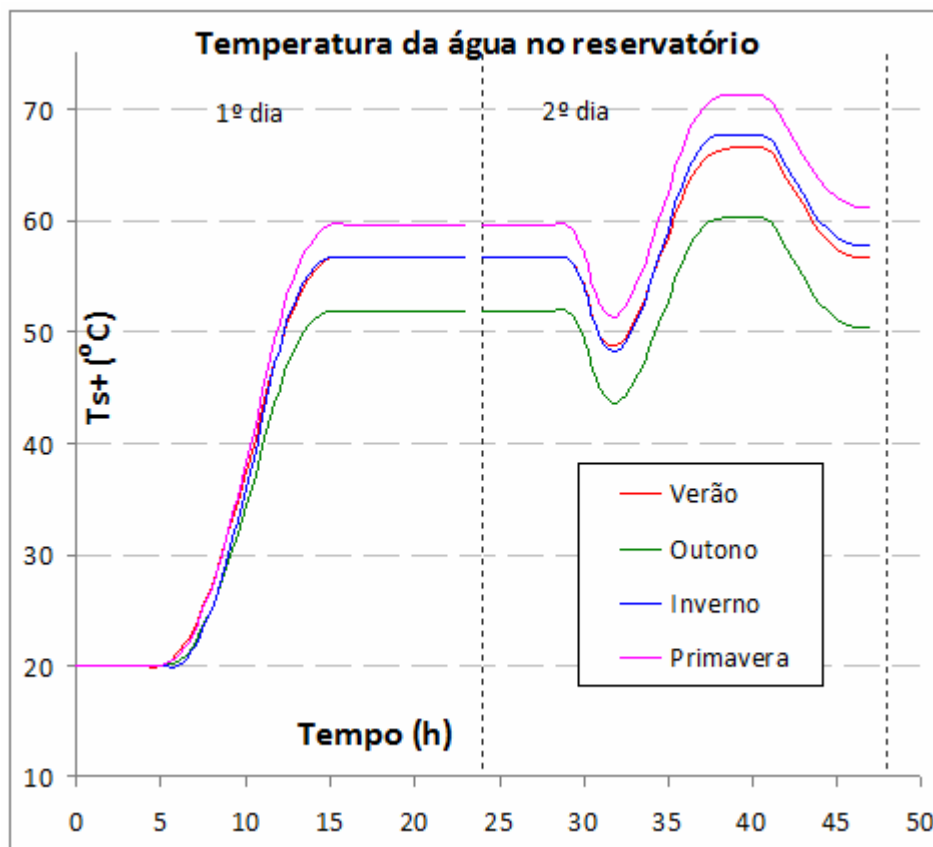


Figura 4.1: Perfil da temperatura de armazenamento ao longo do dia.
Fonte: Própria do Autor (2014)

Nota-se claramente no gráfico acima que a temperatura de armazenamento no primeiro dia tem um grande aumento, o qual vai diminuindo com o decorrer dos dias. Isso porque as perdas do coletor vão aumentando, o que implica na diminuição do acréscimo da temperatura. No segundo dia, quando o coletor começa a fornecer energia para as cargas térmicas, o aumento da temperatura já é sutil e a temperatura de armazenamento passa a ser relativamente constante ao longo do mês.

4.1.1.3. Resultado do cálculo do número de coletores

Uma vez encontrado o equilíbrio térmico no cálculo feito no item anterior, transformamos a área total de coletores em quantidade, conforme expressão (4.1) e os dados do mesmo mostrados na Tabela 3.6.

$$N_c = \frac{A_c}{a_c} \quad (4.1)$$

Em que:

A_c - área total de coletores, m²

a_c - área de um coletor solar, m²

Como $A_c = 6\text{m}^2$ e $a_c = 1,5\text{m}^2$, temos:

Número de coletores – N_c	4
-----------------------------	---

4.1.2. Elétrico

4.1.2.1. Resultado do cálculo da potência de saída do inversor

A partir da radiação horária no plano dos painéis FV, admitida a mesma do plano dos coletores já calculada no dimensionamento térmico, e os dados do painel FV mostrados na Tabela 3.7, aplicamos a metodologia do item 2.3.3.5. Para a temperatura da célula FV (T_c) usamos a equação (2.31), a potência máxima do painel FV (P_{mp}), a equação (2.28), e finalmente a potência de saída do inversor ($P_{saída}$), que é a energia elétrica efetivamente a ser utilizada, calculada através da equação (2.36). Repetimos esse procedimento para as quatro estações, e os resultados estão mostrados na Tabela 4.3.

O número de painéis FV e a potência do inversor são determinados por um processo de tentativas, iniciando com valores nominais que deverão ser ajustados até que o total de energia elétrica efetivamente produzida na saída do inversor ($P_{saída}$) no ano atinja o objetivo. Abaixo segue o resultado obtido.

Nr. de painéis FV	14
Potência nominal do Inversor (W)	2.500

Tabela 4.3: Resultados da geração elétrica - SFC

Primavera	Irrad. HTβ (kWh/m2.dia) = 6,12		Irrad. HTβ (kWh/m2.est.) = 563,1			
Temp(h)	ITβ (W/m2)	Ta (oC)	TC(oC)	Pmp (W)	PFV (W)	Psaida (W)
1	-	14,60	14,6	-	-	-
2	-	15,83	15,8	-	-	-
3	-	17,07	17,1	-	-	-
4	-	18,30	18,3	-	-	-
5	-	19,53	19,5	-	-	-
6	-	20,77	20,8	-	-	-
7	84,47	22,00	24,4	285	242	224
8	251,44	23,23	30,3	822	805	773
9	444,58	24,47	37,0	1.402	1.374	1.319
10	632,72	25,70	43,5	1.924	1.886	1.803
11	782,28	26,93	48,9	2.305	2.259	2.154
12	865,08	28,17	52,5	2.496	2.446	2.328
13	865,08	29,40	53,7	2.478	2.428	2.311
14	782,28	28,05	50,1	2.290	2.244	2.140
15	632,72	26,71	44,5	1.913	1.875	1.793
16	444,58	25,36	37,9	1.395	1.367	1.312
17	251,44	24,02	31,1	818	802	769
18	84,47	22,67	25,0	284	241	223
19	-	21,33	21,3	-	-	-
20	-	19,98	20,0	-	-	-
21	-	18,64	18,6	-	-	-
22	-	17,29	17,3	-	-	-
23	-	15,95	15,9	-	-	-
24	-	14,60	14,6	-	-	-
Total diar.	6.121,13				17.970	17.149

Verão	Irrad. HTβ (kWh/m2.dia) = 5,67		Irrad. HTβ (kWh/m2.est.) = 509,9			
Temp(h)	ITβ (W/m2)	Ta (oC)	TC(oC)	Pmp (W)	PFV (W)	Psaida (W)
1	-	17,50	17,5	-	-	-
2	-	18,45	18,5	-	-	-
3	-	19,40	19,4	-	-	-
4	-	20,35	20,4	-	-	-
5	-	21,30	21,3	-	-	-
6	-	22,25	22,2	-	-	-
7	108,93	23,20	26,3	364	309	289
8	263,13	24,15	31,6	854	837	803
9	428,38	25,10	37,1	1.350	1.323	1.270
10	582,24	26,05	42,4	1.781	1.746	1.671
11	701,31	27,00	46,7	2.093	2.052	1.960
12	766,29	27,95	49,5	2.251	2.206	2.104
13	766,29	28,90	50,5	2.238	2.193	2.092
14	701,31	27,86	47,6	2.083	2.041	1.950
15	582,24	26,83	43,2	1.773	1.738	1.664
16	428,38	25,79	37,8	1.344	1.318	1.265
17	263,13	24,75	32,2	852	835	801
18	108,93	23,72	26,8	363	308	289
19	-	22,68	22,2	-	-	-
20	-	21,65	21,6	-	-	-
21	-	20,61	20,6	-	-	-
22	-	19,57	19,6	-	-	-
23	-	18,54	18,5	-	-	-
24	-	17,50	17,5	-	-	-
Total	5.666,08				16.805	16.158

Outono	Irrad. HTβ (kWh/m2.dia) = 4,92		Irrad. HTβ (kWh/m2.est.) = 447,7			
Temp(h)	ITβ (W/m2)	Ta (oC)	TC(oC)	Pmp (W)	PFV (W)	Psaida (W)
1	-	13,00	13,0	-	-	-
2	-	14,24	14,2	-	-	-
3	-	15,48	15,5	-	-	-
4	-	16,73	16,7	-	-	-
5	-	17,97	18,0	-	-	-
6	-	19,21	19,2	-	-	-
7	42,13	20,45	21,6	144	122	106
8	189,59	21,69	27,0	630	618	591
9	356,23	22,93	33,0	1.148	1.125	1.081
10	516,45	24,18	38,7	1.613	1.581	1.515
11	642,85	25,42	43,5	1.955	1.916	1.832
12	712,54	26,66	46,7	2.127	2.085	1.991
13	712,54	27,90	47,9	2.112	2.070	1.977
14	642,85	26,55	44,6	1.942	1.903	1.820
15	516,45	25,19	39,7	1.604	1.572	1.507
16	356,23	23,84	33,9	1.143	1.120	1.075
17	189,59	22,48	27,8	628	615	588
18	42,13	21,13	22,3	144	122	106
19	-	19,77	19,8	-	-	-
20	-	18,42	18,4	-	-	-
21	-	17,06	17,1	-	-	-
22	-	15,71	15,7	-	-	-
23	-	14,35	14,4	-	-	-
24	-	13,00	13,0	-	-	-
Total	4.919,58				14.849	14.189

Inverno	Irrad. HTβ (kWh/m2.dia) = 6,02		Irrad. HTβ (kWh/m2.est.) = 553,6			
Temp(h)	ITβ (W/m2)	Ta (oC)	TC(oC)	Pmp (W)	PFV (W)	Psaida (W)
1	-	8,20	8,2	-	-	-
2	-	9,48	9,5	-	-	-
3	-	10,75	10,8	-	-	-
4	-	12,03	12,0	-	-	-
5	-	13,30	13,3	-	-	-
6	-	14,58	14,6	-	-	-
7	-	15,85	15,9	-	-	-
8	227,52	17,13	23,5	770	755	724
9	437,95	18,40	30,7	1.428	1.400	1.343
10	642,66	19,68	37,7	2.018	1.978	1.890
11	805,25	20,95	43,6	2.447	2.398	2.283
12	895,22	22,23	47,4	2.662	2.609	2.479
13	895,22	23,50	48,7	2.642	2.589	2.461
14	805,25	22,11	44,8	2.431	2.382	2.269
15	642,66	20,72	38,8	2.006	1.966	1.879
16	437,95	19,33	31,6	1.421	1.393	1.337
17	227,52	17,94	24,3	767	752	721
18	-	16,55	16,5	-	-	-
19	-	15,15	15,2	-	-	-
20	-	13,76	13,8	-	-	-
21	-	12,37	12,4	-	-	-
22	-	10,98	11,0	-	-	-
23	-	9,59	9,6	-	-	-
24	-	8,20	8,2	-	-	-
Total	6.017,19				18.222	17.385

Fonte: Própria do Autor (2014)

A Figura 4.2 mostra o perfil da geração de energia elétrica FV ao longo do dia, entregue pelo inversor em c.a., na tensão da rede de entrada da casa na qual está conectado e operando segundo as normas citadas no item 3.4.1.

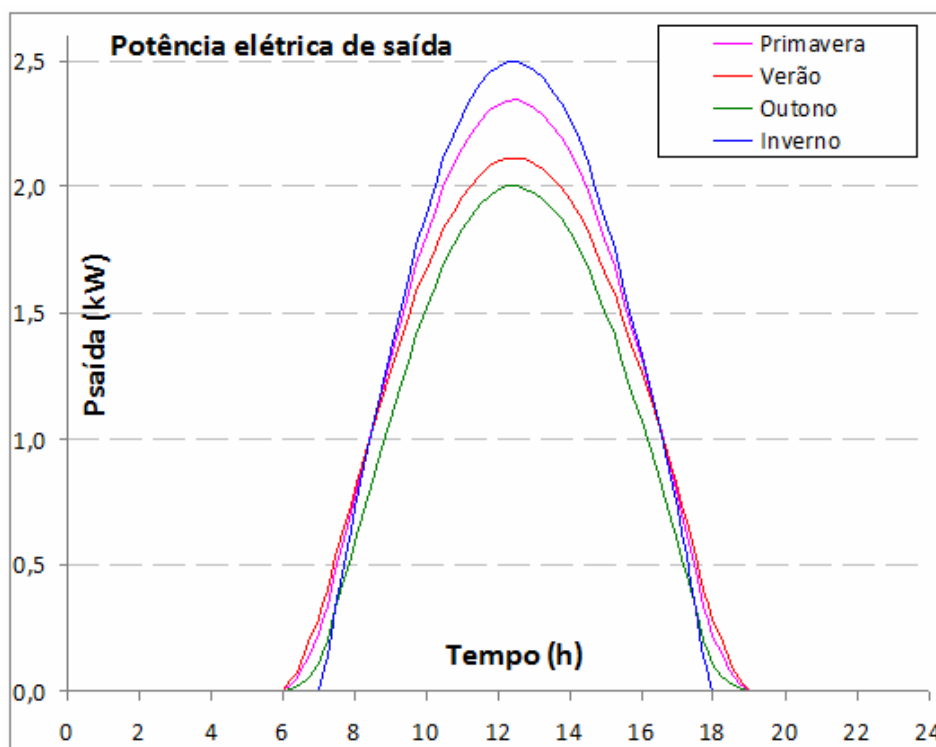


Figura 4.2: Perfil da potência elétrica produzida ao longo do dia

Fonte: Própria do Autor (2014)

4.2. Configuração SFH

4.2.1. Térmico

A partir do processo iterativo definido em 3.3.4.1, temos os resultados nos sub-itens a seguir.

4.2.1.1. Resultado do cálculo da massa de água nos reservatórios

A partir do desenvolvimento mostrado nos itens 3.3.3, 3.3.4 e dos dados na Tabela 4.4. calculamos a massa de água no reservatório necessária para cada estação do ano.

Tabela 4.4: Dados do reservatório de água

	Janeiro verão	Abril outono	Julho inverno	Outubro primavera
Ls total (MJ)	41,7	41,7	41,7	41,7
Ta media (°C)	23,2	20,5	15,9	22,0
Varm (m³)	1,18	0,89	0,63	1,04
m (kg)	1173,0	886,2	629,0	1027,9
Ts (°C)	31,7	31,7	31,7	31,7

Fonte: Própria do Autor (2014)

Observando a Tabela 4.4, percebemos que um reservatório com volume de $1,18\text{m}^3$ poderia perfeitamente acomodar a massa de água necessária para atender a demanda térmica L_s estabelecida, para todas as estações.

4.2.1.2. Resultado do cálculo da temperatura de armazenamento

A partir do exposto no item 3.3. e dos dados no item 3.6, executamos o processo iterativo do item 3.3.4.1, quanto então no final teremos o potencial solar no local, a energia útil, a temperatura do reservatório e demais importantes parâmetros como mostrados na Tabela 4.5., inclusive a área total de coletores A_c e o volume de água do reservatório V_{arm} , como mostrado abaixo.

Área total painéis híbridos – A_c (m^2)	18,7
Volume do reservatório – V_{arm} (m^3)	1,18

Tabela 4.5: Resultados do potencial solar, e temperatura de armazenamento - SFH

Estudo comparativo de sistemas de geração termo-fotovoltaico, utilizando combinações de painéis solares elétricos e térmicos, e os tipos híbridos

71

Sistema com Painéis Fotovoltaicos e Coletores Solares, juntos (híbridos)

		Mês	Dia	n	δ (o)	a	b	H região de Campinas (MJ/m2)			Ta_min oC Ta_max oC															
Verão		Janeiro	17	17	-20,9	0,726278	0,359372	22,13			17,50 28,90															
HS	HS	ω (o)	ωS (o)	N (h)	from solar	rt	H (MJ/m²)	I (MJ/m²)	IO (MJ/m²)	KT=H/H0	Hd/H	Id (MJ/m²)	rd	Id (MJ/m²)	Ib=I-Id	Rb	IT (MJ/m²; G (W/m²)	Ta (oC)	Ts (oC)	η	Qu (W)	Qu (MJ)	LsH(MJ)	Qperdas	Ts+	
1 0-1	0,5	-172,5	99,2	13,2	11,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,294	0,000	0,000	17,5	42,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,3
2 1-2	1,5	-157,5	99,2	13,2	10,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,313	0,000	0,000	18,5	42,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,3
3 2-3	2,5	-142,5	99,2	13,2	9,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,360	0,000	0,000	19,4	42,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,3
4 3-4	3,5	-127,5	99,2	13,2	8,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,473	0,000	0,000	20,4	42,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,3
5 4-5	4,5	-112,5	99,2	13,2	7,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,869	0,000	0,000	21,3	42,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,3
6 5-6	5,5	-97,5	99,2	13,2	6,5	0,002	22,13	0,047	41,821	0,529	0,402	8,889	0,003	0,028	0,019	-4,721	-0,062	0,000	22,3	42,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,3
7 6-7	6,5	-82,5	99,2	13,2	5,5	0,023	22,13	0,515	41,821	0,529	0,402	8,889	0,030	0,268	0,248	0,486	0,392	108,934	23,2	42,3	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	41,4
8 7-8	7,5	-67,5	99,2	13,2	4,5	0,049	22,13	1,074	41,821	0,529	0,402	8,889	0,056	0,500	0,575	0,764	0,947	263,131	24,2	41,4	0,000	0,000	0,000	8,961	0,224	39,5
9 8-9	8,5	-52,5	99,2	13,2	3,5	0,075	22,13	1,665	41,821	0,529	0,402	8,889	0,080	0,708	0,957	0,858	1,542	428,383	25,1	39,5	0,009	69,095	0,249	4,371	0,115	38,6
10 9-10	9,5	-37,5	99,2	13,2	2,5	0,100	22,13	2,209	41,821	0,529	0,402	8,889	0,099	0,877	1,332	0,902	2,096	582,242	26,1	38,6	0,155	1694,062	6,099	1,354	0,186	39,6
11 10-11	10,5	-22,5	99,2	13,2	1,5	0,119	22,13	2,628	41,821	0,529	0,402	8,889	0,112	0,997	1,630	0,924	2,525	701,309	27,0	39,6	0,201	2634,986	9,486	0,731	0,255	41,3
12 11-12	11,5	-7,5	99,2	13,2	0,5	0,129	22,13	2,856	41,821	0,529	0,402	8,889	0,119	1,060	1,796	0,934	2,759	766,285	28,0	41,3	0,207	2966,650	10,680	0,747	0,286	43,3
13 12-13	12,5	7,5	99,2	13,2	0,5	0,129	22,13	2,856	41,821	0,529	0,402	8,889	0,119	1,060	1,796	0,934	2,759	766,285	28,9	43,3	0,191	2733,871	9,842	0,000	0,246	45,2
14 13-14	13,5	22,5	99,2	13,2	1,5	0,119	22,13	2,628	41,821	0,529	0,402	8,889	0,112	0,997	1,630	0,924	2,525	701,309	27,9	45,2	0,117	1537,866	5,536	0,747	0,157	46,2
15 14-15	14,5	37,5	99,2	13,2	2,5	0,100	22,13	2,209	41,821	0,529	0,402	8,889	0,099	0,877	1,332	0,902	2,096	582,242	26,8	46,2	0,014	148,231	0,534	1,453	0,050	46,0
16 15-16	15,5	52,5	99,2	13,2	3,5	0,075	22,13	1,665	41,821	0,529	0,402	8,889	0,080	0,708	0,957	0,858	1,542	428,383	25,8	46,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	46,0
17 16-17	16,5	67,5	99,2	13,2	4,5	0,049	22,13	1,074	41,821	0,529	0,402	8,889	0,056	0,500	0,575	0,764	0,947	263,131	24,8	46,0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	46,0
18 17-18	17,5	82,5	99,2	13,2	5,5	0,023	22,13	0,515	41,821	0,529	0,402	8,889	0,030	0,268	0,248	0,486	0,392	108,934	23,7	46,0	0,000	0,000	0,000	0,747	0,019	45,8
19 18-19	18,5	97,5	99,2	13,2	6,5	0,002	22,13	0,047	41,821	0,529	0,402	8,889	0,003	0,028	0,019	-4,721	-0,062	0,000	22,7	45,8	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	44,9
20 19-20	19,5	112,5	99,2	13,2	7,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,869	0,000	0,000	21,6	44,9	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	43,9
21 20-21	20,5	127,5	99,2	13,2	8,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,473	0,000	0,000	20,6	43,9	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	43,0
22 21-22	21,5	142,5	99,2	13,2	9,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,360	0,000	0,000	19,6	43,0	0,000	0,000	0,000	2,946	0,074	42,4
23 22-23	22,5	157,5	99,2	13,2	10,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,313	0,000	0,000	18,5	42,4	0,000	0,000	0,000	1,493	0,037	42,1
24 23-0	23,5	172,5	99,2	13,2	11,5	0,000	22,13	0,000	41,821	0,529	0,402	8,889	0,000	0,000	0,000	1,294	0,000	0,000	17,5	42,1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	42,1
		Mês	Dia	n	δ (o)	a	b	H região de Campinas (MJ/m2)			Ta_min oC Ta_max oC															
Outono		Abril	15	105	9,4	0,628962	0,451857	15,85			13,00 27,90															
HS	HS	ω (o)	ωS (o)	N (h)	rom solar	rt	H (MJ/m²)	I (MJ/m²)	IO (MJ/m²)	KT=H/H0	Hd/H	Id (MJ/m²)	rd	Id (MJ/m²)	Ib=I-Id	Rb	IT (MJ/m²; G (W/m²)	Ta (oC)	Ts (oC)	η	Qu (W)	Qu (MJ)	LsH(MJ)	Qperdas	Ts+	
1 0-1	0,5	-172,5	86,0	11,5	11,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	1,014	0,000	0,000	13,0	39,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	39,3
2 1-2	1,5	-157,5	86,0	11,5	10,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	1,009	0,000	0,000	14,2	39,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	39,3
3 2-3	2,5	-142,5	86,0	11,5	9,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	0,997	0,000	0,000	15,5	39,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	39,3
4 3-4	3,5	-127,5	86,0	11,5	8,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	0,973	0,000	0,000	16,7	39,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	39,3
5 4-5	4,5	-112,5	86,0	11,5	7,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	0,918	0,000	0,000	18,0	39,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	39,3
6 5-6	5,5	-97,5	86,0	11,5	6,5	0,000	15,85	0,000	29,991	0,528	0,402	6,376	0,000	0,000	0,000	0,708	0,000	0,000	19,2	39,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	39,3
7 6-7	6,5	-82,5	86,0	11,5	5,5	0,006	15,85	0,097	29,991	0,528	0,402	6,376	0,009	0,057	0,040	2,324	0,152	42,130	20,5	39,3	0,000	0,000	0,000	4,333	0,108	38,4
8 7-8	7,5	-67,5	86,0	11,5	4,5	0,037	15,85	0,583	29,991	0,528	0,402	6,376	0,046	0,293	0,291	1,326	0,683	189,586	21,7	38,4	0,000	0,000	0,000	8,261	0,207	36,7
9 8-9	8,5	-52,5	86,0	11,5	3,5	0,071	15,85	1,132	29,991	0,528	0,402	6,376	0,079	0,504	0,628	1,225	1,282	356,235	22,9	36,7	0,000	0,000	0,000	3,744	0,094	35,9
10 9-10	9,5	-37,5	86,0	11,5	2,5	0,105	15,85	1,660	29,991	0,528	0,402	6,376	0,106	0,676	0,984	1,189	1,859	516,453	24,2	35,9	0,142	1369,572	4,930	1,157	0,152	36,7
11 10-11	10,5	-22,5	86,0	11,5	1,5	0,131	15,85	2,077	29,991	0,528	0,402	6,376	0,125	0,798	1,278	1,173	2,314	642,847	25,4	36,7	0,206	2478,601	8,923	0,622	0,239	38,3
12 11-12	11,5	-7,5	86,0	11,5	0,5	0,146	15,8																			

Estudo comparativo de sistemas de geração termo-fotovoltaico, utilizando combinações de painéis solares elétricos e térmicos, e os tipos híbridos

72

Sistema com Painéis Fotovoltaicos e Coletores Solares, juntos (híbridos)

	Mês	Dia	n	δ (o)	a	b	H região de Campinas (MJ/m2)	Ta_min oC	Ta_max oC																	
inverno	Julho	17	198	21,2	0,585616	0,493051	16,77	8,20	23,50																	
HS	HS	ω (o)	ωS (o)	N (h)	rom solar i	rt	H (MJ/m²)	I (MJ/m²)	HO (MJ/m²)	KT=H/H0	Hd/H	Id (MJ/m²)	rd	Id (MJ/m²)	Ib=I-Id	Rb	IT (MJ/m²; G (W/m²)	Ta (oC)	Ts (oC)	η	Qu (W)	Qu (MJ)	LsH(MJ)	Qperdas	Ts+	
1 0-1	0,5	-172,5	80,6	10,7	11,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,932	0,000	0,000	8,2	39,6	0,000	0,000	0,000	0,000	39,6	
2 1-2	1,5	-157,5	80,6	10,7	10,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,922	0,000	0,000	9,5	39,6	0,000	0,000	0,000	0,000	39,6	
3 2-3	2,5	-142,5	80,6	10,7	9,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,900	0,000	0,000	10,8	39,6	0,000	0,000	0,000	0,000	39,6	
4 3-4	3,5	-127,5	80,6	10,7	8,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,856	0,000	0,000	12,0	39,6	0,000	0,000	0,000	0,000	39,6	
5 4-5	4,5	-112,5	80,6	10,7	7,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,761	0,000	0,000	13,3	39,6	0,000	0,000	0,000	0,000	39,6	
6 5-6	5,5	-97,5	80,6	10,7	6,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,482	0,000	0,000	14,6	39,6	0,000	0,000	0,000	0,000	39,6	
7 6-7	6,5	-82,5	80,6	10,7	5,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	-4,354	0,000	0,000	15,9	39,6	0,000	0,000	0,000	4,396	38,7	
8 7-8	7,5	-67,5	80,6	10,7	4,5	0,029	16,77	0,493	23,446	0,715	0,206	3,451	0,038	0,131	0,362	1,890	0,819	227,522	17,1	38,7	0,000	0,000	0,000	8,380	0,209	37,0
9 8-9	8,5	-52,5	80,6	10,7	3,5	0,068	16,77	1,145	23,446	0,715	0,206	3,451	0,077	0,266	0,879	1,482	1,577	437,954	18,4	37,0	0,000	0,000	0,000	3,798	0,095	36,2
10 9-10	9,5	-37,5	80,6	10,7	2,5	0,106	16,77	1,785	23,446	0,715	0,206	3,451	0,109	0,376	1,409	1,365	2,314	642,657	19,7	36,2	0,106	1279,094	4,605	1,174	0,144	36,8
11 10-11	10,5	-22,5	80,6	10,7	1,5	0,137	16,77	2,296	23,446	0,715	0,206	3,451	0,132	0,454	1,843	1,317	2,899	805,246	21,0	36,8	0,179	2695,953	9,705	0,628	0,258	38,6
12 11-12	11,5	-7,5	80,6	10,7	0,5	0,154	16,77	2,580	23,446	0,715	0,206	3,451	0,143	0,494	2,086	1,298	3,223	895,215	22,2	38,6	0,196	3283,632	11,821	0,695	0,313	40,8
13 12-13	12,5	7,5	80,6	10,7	0,5	0,154	16,77	2,580	23,446	0,715	0,206	3,451	0,143	0,494	2,086	1,298	3,223	895,215	23,5	40,8	0,183	3070,878	11,055	0,000	0,276	43,0
14 13-14	13,5	22,5	80,6	10,7	1,5	0,137	16,77	2,296	23,446	0,715	0,206	3,451	0,132	0,454	1,843	1,317	2,899	805,246	22,1	43,0	0,102	1541,990	5,551	0,747	0,157	44,0
15 14-15	14,5	37,5	80,6	10,7	2,5	0,106	16,77	1,785	23,446	0,715	0,206	3,451	0,109	0,376	1,409	1,365	2,314	642,657	20,7	44,0	0,000	0,000	0,000	1,453	0,036	43,7
16 15-16	15,5	52,5	80,6	10,7	3,5	0,068	16,77	1,145	23,446	0,715	0,206	3,451	0,077	0,266	0,879	1,482	1,577	437,954	19,3	43,7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	43,7
17 16-17	16,5	67,5	80,6	10,7	4,5	0,029	16,77	0,493	23,446	0,715	0,206	3,451	0,038	0,131	0,362	1,890	0,819	227,522	17,9	43,7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	43,7
18 17-18	17,5	82,5	80,6	10,7	5,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	-4,354	0,000	0,000	16,5	43,7	0,000	0,000	0,000	0,747	0,019	43,5
19 18-19	18,5	97,5	80,6	10,7	6,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,482	0,000	0,000	15,2	43,5	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	42,6
20 19-20	19,5	112,5	80,6	10,7	7,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,761	0,000	0,000	13,8	42,6	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	41,6
21 20-21	20,5	127,5	80,6	10,7	8,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,856	0,000	0,000	12,4	41,6	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	40,7
22 21-22	21,5	142,5	80,6	10,7	9,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,900	0,000	0,000	11,0	40,7	0,000	0,000	0,000	2,946	0,074	40,1
23 22-23	22,5	157,5	80,6	10,7	10,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,922	0,000	0,000	9,6	40,1	0,000	0,000	0,000	1,493	0,037	39,8
24 23-0	23,5	172,5	80,6	10,7	11,5	0,000	16,77	0,000	23,446	0,715	0,206	3,451	0,000	0,000	0,000	0,932	0,000	0,000	8,2	39,8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	39,8
	Mês	Dia	n	δ (o)	a	b	H região de Campinas (MJ/m2)	Ta_min oC	Ta_max oC																	
Primavera	Outubro	15	288	-9,6	0,69005	0,393801	22,85	14,60	29,40																	
HS	HS	ω (o)	ωS (o)	N (h)	rom solar i	rt	H (MJ/m²)	I (MJ/m²)	HO (MJ/m²)	KT=H/H0	Hd/H	Id (MJ/m²)	rd	Id (MJ/m²)	Ib=I-Id	Rb	IT (MJ/m²; G (W/m²)	Ta (oC)	Ts (oC)	η	Qu (W)	Qu (MJ)	LsH(MJ)	Qperdas	Ts+	
1 0-1	0,5	-172,5	94,1	12,5	11,5	0,000	22,85	0,000	37,987	0,602	0,337	7,697	0,000	0,000	0,000	1,169	0,000	0,000	14,6	43,9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	43,9
2 1-2	1,5	-157,5	94,1	12,5	10,5	0,000	22,85	0,000	37,987	0,602	0,337	7,697	0,000	0,000	0,000	1,175	0,000	0,000	15,8	43,9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	43,9
3 2-3	2,5	-142,5	94,1	12,5	9,5	0,000	22,85	0,000	37,987	0,602	0,337	7,697	0,000	0,000	0,000	1,192	0,000	0,000	17,1	43,9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	43,9
4 3-4	3,5	-127,5	94,1	12,5	8,5	0,000	22,85	0,000	37,987	0,602	0,337	7,697	0,000	0,000	0,000	1,228	0,000	0,000	18,3	43,9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	43,9
5 4-5	4,5	-112,5	94,1	12,5	7,5	0,000	22,85	0,000	37,987	0,602	0,337	7,697	0,000	0,000	0,000	1,332	0,000	0,000	19,5	43,9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	43,9
6 5-6	5,5	-97,5	94,1	12,5	6,5	0,000	22,85	0,000	37,987	0,602	0,337	7,697	0,000	0,000	0,000	2,383	0,000	0,000	20,8	43,9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	43,9
7 6-7	6,5	-82,5	94,1	12,5	5,5	0,015	22,85	0,352	37,987	0,602	0,337	7,697	0,024	0,182	0,169	0,702	0,304	84,468	22,0	43,9	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	43,0
8 7-8	7,5	-67,5	94,1	12,5	4,5	0,041	22,85	0,943	37,987	0,602	0,337	7,697	0,053	0,410	0,533	0,915	0,905	251,442	23,2	43,0	0,000	0,000	0,000	8,961	0,224	41,1
9 8-9	8,5	-52,5	94,1	12,5	3,5	0,071	22,85	1,617	37,987	0,602	0,337	7,697	0,080	0,615	1,002	0,971	1,600	444,576	24,5	41,1	0,000	0,000	0,000	4,480	0,112	40,2
10 9-10	9,5	-37,5	94,1	12,5	2,5	0,099	22,85	2,267	37,987	0,602	0,337	7,697	0,102	0,782	1,485	0,996	2,278	632,721	25,7	40,2	0,140	1654,813	5,957	1,453	0,185	41,1
11 10-11	10,5	-22,5	94,1	12,5	1,5	0,122	22,85	2,781	37,987	0,602	0,337	7,697	0,117	0,900	1,881	1,007	2,816	782,282	26,9	41,1	0,199	2911,495	10,481	0,747	0,281	43,0
12 11-12	11,5	-7,5	94,1	12,5	0,5	0,134	22,85	3,065	37,987	0,602	0,337	7,697	0,125	0,961	2,104	1,012	3,114	865,077	28,2	43,0	0,210	3403,585	12,253	0,747	0,325	45,3
13 12-13	12,5	7,5	94,1	12,5	0,5	0,134	22,85	3,065	37,987	0,602	0,337	7,697	0,125	0,961	2,104	1,012	3,114	865,077	29,4	45,3	0,195	3164,095	11,391	0,000	0,285	47,6
14 13-14	13,5	22,5	94,1	12,5	1,5	0,122	22,85	2,781	37,987	0,602	0,337	7,697	0,117	0,900	1,881	1,007	2,816	782,282	28,1	47,6	0,115	1686,748	6,072	0,747	0,170	48,6
15 14-15	14,5	37,5	94,1	12,5	2,5	0,099	22,85	2,267	37,987	0,602	0,337	7,697	0,102	0,782	1,485	0,996	2,278	632,721	26,7	48,6	0,000	0,000	0,000	1,453	0,036	48,3
16 15-16	15,5	52,5	94,1	12,5	3,5	0,071	22,85	1,617	37,987	0,602	0,337	7,697	0,080	0,615	1,002	0,971	1,600	444,576	25,4	48,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	48,3
17 16-17	16,5	67,5	94,1	12,5	4,5	0,041	22,85	0,943	37,987	0,602	0,337	7,697	0,053	0,410	0,533	0,915	0,905	251,442	24,0	48,3	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	48,3
18 17-18	17,5	82,5	94,1	12,5	5,5	0,015	22,85	0,352	37,987	0,602	0,337	7,697	0,024	0,182	0,169	0,702	0,304	84,468	22,7	48,3	0,000	0,000	0,000	0,747	0,019	48,1
19 18-19	18,5	97,5	94,1	12,5	6,5	0,000	22,85	0,000	37,987	0,602	0,337															

A faixa de horas em vermelho na tabela anterior indica o período em que o sistema de geração de energia está ligado, aproveitando a insolação.

A partir da mesma tabela anterior, obtemos a Figura 4.3 que apresenta graficamente o perfil da temperatura de armazenamento T_s , em função do tempo. Pode se notar que o sistema está em equilíbrio com a carga térmica, porém com momentos em que a temperatura fica abaixo da de consumo de 40°C .

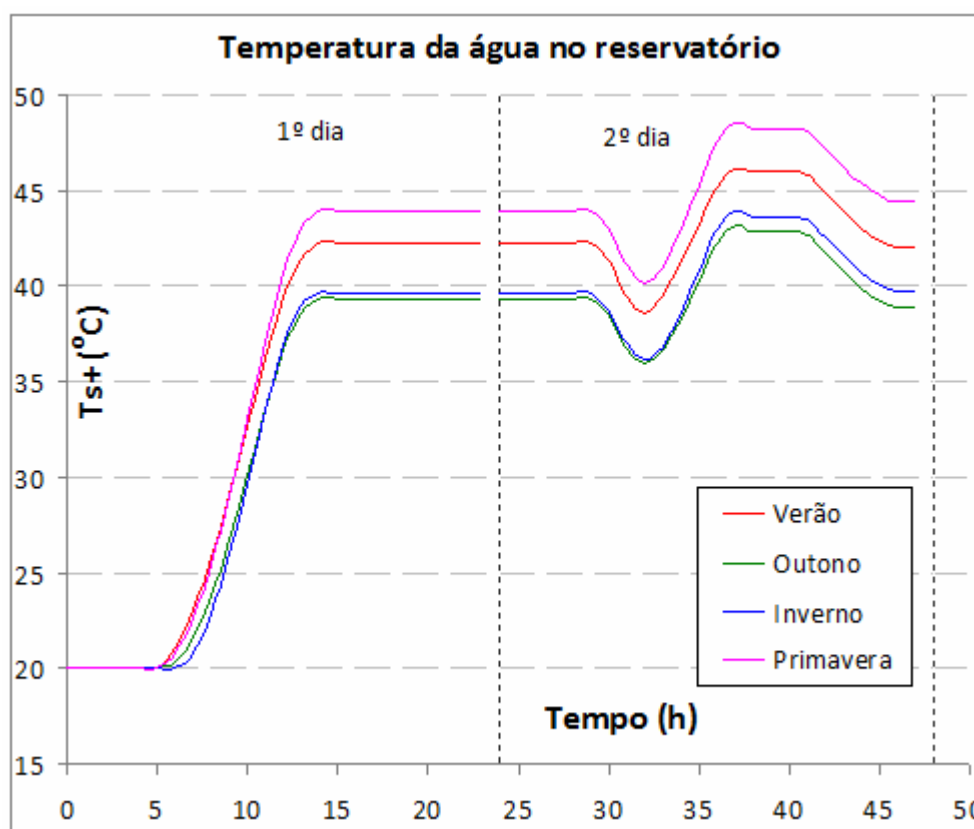


Figura 4.3: Perfil da temperatura de armazenamento ao longo do dia.

Fonte: Própria do Autor (2014)

Nota-se um gráfico muito parecido com o caso anterior, porém com níveis de temperatura menores, pois nesta situação, como já dito, há um conflito: quando se busca maiores temperatura no reservatório, isso faz reduzir o rendimento do próprio coletor solar como também do painel solar. Além de que, do ponto de vista térmico o coletor híbrido é menos eficiente do que o térmico puro F_{RUL} (térmico) = 7,2 ; F_{RUL} (híbrido) = 12,2.

4.2.1.3. Resultado do cálculo do número de painéis híbridos

Uma vez encontrado o equilíbrio térmico no cálculo feito no item anterior, transformamos a área total de coletores em quantidade, conforme expressão (4.1) e os dados do mesmo, mostrados na Tabela 3.9.

Como $A_c = 18,7\text{m}^2$ e $a_c = 1,44\text{m}^2$, temos:

Número de painéis híbridos - Nc	13
---------------------------------	----

4.2.2. Elétrico

4.2.2.1. Resultado do cálculo da potência de saída do inversor

Seguimos o mesmo procedimento feito no item 4.1.2.1, porém com os dados do painel híbrido mostrados na Tabela 3.10. Para o cálculo da temperatura da célula FV (T_c), diferente do feito para o SFC, usamos a metodologia do item 2.4.1. A potência máxima do painel FV (P_{mp}) é calculada com a equação (2.28), e finalmente a potência de saída do inversor ($P_{saída}$), que é a energia elétrica efetivamente a ser utilizada, calculada através da equação (2.36). Repetimos esse procedimento para as quatro estações, e os resultados estão mostrados na Tabela 4.6.

Como já dito, a prioridade é a produção de energia elétrica, então o número de painéis híbridos é determinado pela necessidade da mesma. Dessa forma, tanto a quantidade de painéis híbridos como a potência do inversor são determinados por um processo de tentativas, iniciando com valores nominais que deverão ser ajustados até que o total de energia elétrica efetivamente produzida na saída do inversor ($P_{saída}$) no ano atinja o objetivo. Abaixo segue o resultado obtido.

Nr. de painéis híbridos	13
Potência nominal do Inversor (W)	2.500

Tabela 4.6: Resultados da geração elétrica - SFH

Primavera	Irrad. HTβ (kWh/m2.dia)	6,12	Irrad. HTβ (kWh/m2.es)	563,1	Verão	Irrad. HTβ (kWh/m2.dia)	5,67	Irrad. HTβ (kWh/m2.es)	509,9				
Temp(h)	ITβ (W/m2)	Ta (oC)	TC (oC)	Pmp (W)	PFV (W)	Psaída (W)	Temp(h)	ITβ (W/m2)	Ta (oC)	TC (oC)	Pmp (W)	PFV (W)	Psaída (W)
1	-	14,60	14,60	-	-	-	1	-	17,50	17,50	-	-	-
2	-	15,83	15,83	-	-	-	2	-	18,45	18,45	-	-	-
3	-	17,07	17,07	-	-	-	3	-	19,40	19,40	-	-	-
4	-	18,30	18,30	-	-	-	4	-	20,35	20,35	-	-	-
5	-	19,53	19,53	-	-	-	5	-	21,30	21,30	-	-	-
6	-	20,77	20,77	-	-	-	6	17,25	22,25	22,25	57	48	-
7	84,47	22,00	43,95	253	215	198	7	108,93	23,20	42,32	329	280	261
8	251,44	23,23	43,01	758	742	712	8	263,13	24,15	41,38	798	783	750
9	444,58	24,47	41,14	1.351	1.324	1.270	9	428,38	25,10	39,54	1.310	1.284	1.233
10	632,72	25,70	40,98	1.923	1.885	1.803	10	582,24	26,05	39,45	1.782	1.746	1.672
11	782,28	26,93	42,46	2.363	2.316	2.206	11	701,31	27,00	40,82	2.133	2.091	1.996
12	865,08	28,17	44,62	2.588	2.536	2.412	12	766,29	27,95	42,71	2.312	2.266	2.160
13	865,08	29,40	46,79	2.564	2.512	2.389	13	766,29	28,90	44,57	2.293	2.247	2.143
14	782,28	28,05	48,35	2.302	2.256	2.151	14	701,31	27,86	45,96	2.086	2.044	1.953
15	632,72	26,71	48,60	1.860	1.823	1.744	15	582,24	26,83	46,25	1.730	1.695	1.624
16	444,58	25,36	48,30	1.309	1.282	1.231	16	428,38	25,79	45,98	1.274	1.249	1.199
17	251,44	24,02	48,30	740	725	695	17	263,13	24,75	45,98	783	767	735
18	84,47	22,67	48,30	249	211	194	18	108,93	23,72	45,98	324	275	256
19	-	21,33	21,33	-	-	-	19	17,25	22,68	22,68	57	48	-
20	-	19,98	19,98	-	-	-	20	-	21,65	21,65	-	-	-
21	-	18,64	18,64	-	-	-	21	-	20,61	20,61	-	-	-
22	-	17,29	17,29	-	-	-	22	-	19,57	19,57	-	-	-
23	-	15,95	15,95	-	-	-	23	-	18,54	18,54	-	-	-
24	-	14,60	14,60	-	-	-	24	-	17,50	17,50	-	-	-
Total diar.	6.121,13				17.829	17.005	Total	5.666,08				16.630	15.981

Outono	Irrad. HTβ (kWh/m2.dia)	4,92	Irrad. HTβ (kWh/m2.es)	447,7	Inverno	Irrad. HTβ (kWh/m2.dia)	6,02	Irrad. HTβ (kWh/m2.es)	553,6				
Temp(h)	ITβ (W/m2)	Ta (oC)	TC (oC)	Pmp (W)	PFV (W)	Psaída (W)	Temp(h)	ITβ (W/m2)	Ta (oC)	TC (oC)	Pmp (W)	PFV (W)	Psaída (W)
1	-	13,00	13,00	-	-	-	1	-	8,20	8,20	-	-	-
2	-	14,24	14,24	-	-	-	2	-	9,48	9,48	-	-	-
3	-	15,48	15,48	-	-	-	3	-	10,75	10,75	-	-	-
4	-	16,73	16,73	-	-	-	4	-	12,03	12,03	-	-	-
5	-	17,97	17,97	-	-	-	5	-	13,30	13,30	-	-	-
6	-	19,21	19,21	-	-	-	6	-	14,58	14,58	-	-	-
7	42,13	20,45	39,34	129	110	94	7	-	15,85	15,85	-	-	-
8	189,59	21,69	38,44	583	571	545	8	227,52	17,13	38,70	698	684	655
9	356,23	22,93	36,71	1.103	1.081	1.038	9	437,95	18,40	36,95	1.355	1.327	1.274
10	516,45	24,18	36,58	1.600	1.568	1.503	10	642,66	19,68	36,76	1.989	1.949	1.864
11	642,85	25,42	37,84	1.981	1.941	1.856	11	805,25	20,95	38,11	2.478	2.429	2.312
12	712,54	26,66	39,70	2.178	2.134	2.037	12	895,22	22,23	40,18	2.731	2.676	2.500
13	712,54	27,90	41,58	2.160	2.117	2.021	13	895,22	23,50	42,29	2.706	2.652	2.500
14	642,85	26,55	42,94	1.938	1.899	1.816	14	805,25	22,11	43,76	2.418	2.370	2.257
15	516,45	25,19	43,14	1.555	1.524	1.462	15	642,66	20,72	43,97	1.928	1.890	1.807
16	356,23	23,84	42,83	1.074	1.053	1.011	16	437,95	19,33	43,67	1.316	1.289	1.238
17	189,59	22,48	42,83	572	560	535	17	227,52	17,94	43,67	684	670	641
18	42,13	21,13	42,83	127	108	92	18	-	16,55	16,55	-	-	-
19	-	19,77	19,77	-	-	-	19	-	15,15	15,15	-	-	-
20	-	18,42	18,42	-	-	-	20	-	13,76	13,76	-	-	-
21	-	17,06	17,06	-	-	-	21	-	12,37	12,37	-	-	-
22	-	15,71	15,71	-	-	-	22	-	10,98	10,98	-	-	-
23	-	14,35	14,35	-	-	-	23	-	9,59	9,59	-	-	-
24	-	13,00	13,00	-	-	-	24	-	8,20	8,20	-	-	-
Total	4.919,58				14.666	14.009	Total	6.017,19				17.937	17.049

Fonte: Própria do Autor (2014)

A Figura 4.4 mostra o perfil da geração de energia elétrica FV ao longo do dia, entregue pelo inversor em c.a., na tensão de rede de entrada da casa na qual está conectado e operando segundo as normas citadas no item 3.4.1.

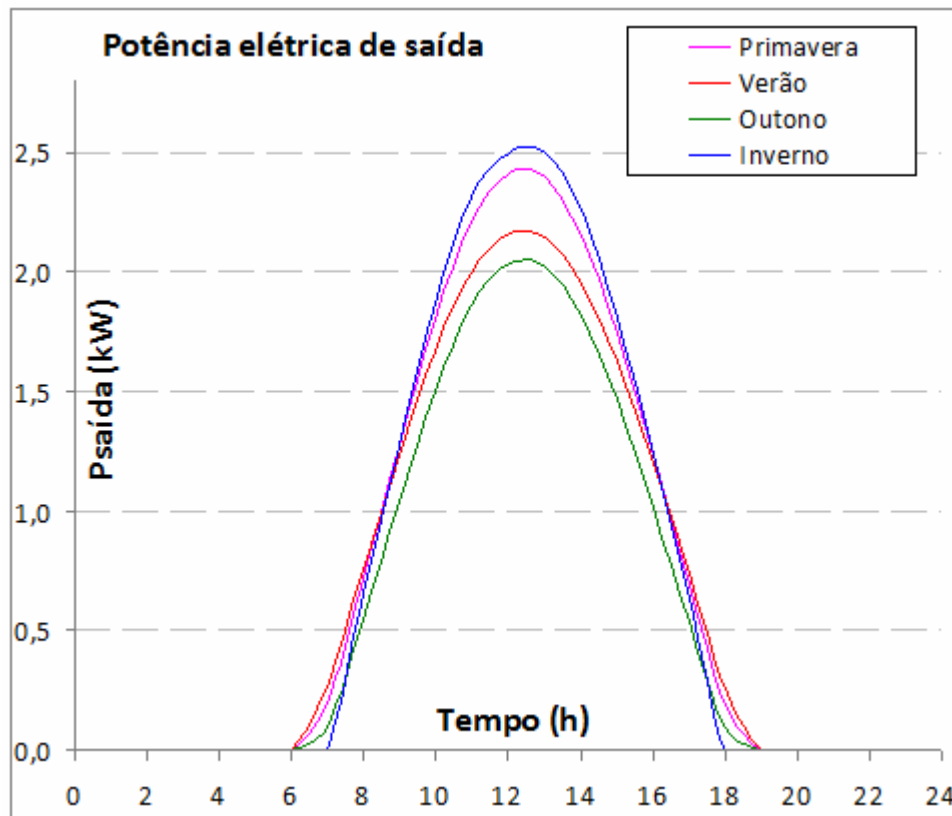


Figura 4.4: Perfil da potência elétrica produzida ao longo do dia

Fonte: Própria do Autor (2014)

4.3. Configuração SFHC

4.3.1. Térmico

A partir do processo iterativo definido em 3.3.4.1, temos os resultados nos sub-itens a seguir.

4.3.1.1. Resultado do cálculo da massa de água nos reservatórios

A partir do desenvolvimento mostrado nos itens 3.3.3, 3.7.1 e dos dados nas Tabelas 4.7 e 4.8. calculamos a massa de água nos reservatórios auxiliar e principal necessária para cada estação do ano.

Tabela 4.7: Dados do reservatório de água do coletor solar (principal)

	Janeiro	Abril	Julho	Outubro
	verão	outono	inverno	primavera
Ls total (MJ)	8,2	8,2	8,2	8,2
Ta media (°C)	23,2	20,5	15,9	22,0
Varm (m³)	0,17	0,14	0,10	0,15
m (kg)	166,8	135,3	102,8	151,4
Ts (°C)	35,0	35,0	35,0	35,0

Fonte: Própria do Autor (2014)

Tabela 4.8: Dados do reservatório de água do painel híbrido (auxiliar)

	Janeiro	Abril	Julho	Outubro
	verão	outono	inverno	primavera
Ls total (MJ)	33,5	33,5	33,5	33,5
Ta media (°C)	23,2	20,5	15,9	22,0
Varm (m³)	1,18	0,84	0,57	1,00
m (kg)	1166,4	832,7	563,1	992,8
Ts (°C)	30,1	30,1	30,1	30,1

Fonte: Própria do Autor (2014)

Observando as tabela 4.7 e 4.8, percebemos que um reservatório com volume de 0,17m³ para o principal e outro de 1,18m³ para o auxiliar poderiam perfeitamente acomodar a massa de água necessária para atender a demanda térmica total Ls estabelecida, para todas as estações.

4.3.1.2. Resultado do cálculo da temperatura de armazenamento

A partir do exposto no item 3.3. e dos dados no item 3.7, executamos o processo iterativo do item 3.3.4.1, quanto então no final teremos o potencial solar no local, a energia útil, a temperatura do reservatório e demais importantes parâmetros como mostrados na Tabela 4.9., inclusive a área total de coletores / painéis híbridos A_c e o volume de água dos reservatórios V_{arm} , como mostrado abaixo.

Híbrido

Área total painéis híbridos – A_c (m²)	18,7
Volume do reservatório auxiliar – V_{arm} (m³)	1,18

Coletor solar

Área total dos coletores solares – A_c (m ²)	1,5
Volume do reservatório principal – V_{arm} (m ³)	0,17

Tabela 4.9: Resultados do potencial solar, e temperatura de armazenamento - SFHC

Estudo comparativo de sistemas de geração termo-fotovoltaico, utilizando combinações de painéis solares elétricos e térmicos, e os tipos híbridos

Sistema com Painéis Híbridos + Coletores Solares																																		
Mês		Dia		n		δ (o)		a		b		H região de Campinas (MJ/m2)		Ta_min oC Ta_max oC																				
Julho		17		190		21.2		0.585616		0.493051		16.77		8.20 23.50																				
HS	HS	u (o)	uS (o)	N (h)	from solar n	rt	H (MJ/m²)	I (MJ/m²)	H0 (MJ/m²)	KT+H/H0	Hd/H	Hd (MJ/m²)	rd	Id (MJ/m²)	Ib=Id	Rb	IT (MJ/m²)	G (W/m²)	Ta (oC)	Coletores Híbridos					Coletores solares									
																				Ts H (oC)	η	QuH (W)	QuH (MJ)	LstH (MJ)	Operdas	TstH+ (oC)	TsC (oC)	η	QuC (W)	QuC (MJ)	LstC (MJ)	Operdas	TstC+ (oC)	
1 0-1	0.5	-172.5	80.6	10.7	11.5	0.000	16.77	0.000	23.446	0.715	0.206	3.451	0.000	0.000	0.000	0.992	0.000	0.000	8.2	40.9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	40.9	45.6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	45.6	
2 1-2	1.5	-157.5	80.6	10.7	10.5	0.000	16.77	0.000	23.446	0.715	0.206	3.451	0.000	0.000	0.000	0.900	0.000	0.000	9.5	40.9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	40.9	45.6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	45.6	
3 2-3	2.5	-142.5	80.6	10.7	9.5	0.000	16.77	0.000	23.446	0.715	0.206	3.451	0.000	0.000	0.000	0.856	0.000	0.000	10.8	40.9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	40.9	45.6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	45.6	
4 3-4	3.5	-127.5	80.6	10.7	8.5	0.000	16.77	0.000	23.446	0.715	0.206	3.451	0.000	0.000	0.000	0.761	0.000	0.000	12.0	40.9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	40.9	45.6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	45.6	
5 4-5	4.5	-112.5	80.6	10.7	7.5	0.000	16.77	0.000	23.446	0.715	0.206	3.451	0.000	0.000	0.000	0.482	0.000	0.000	13.3	40.9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	40.9	45.6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	45.6	
6 5-6	5.5	-97.5	80.6	10.7	6.5	0.000	16.77	0.000	23.446	0.715	0.206	3.451	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	14.6	40.9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	40.9	45.6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	45.6	
7 6-7	6.5	-82.5	80.6	10.7	5.5	0.000	16.77	0.000	23.446	0.715	0.206	3.451	0.000	0.000	0.000	-4.154	0.000	0.000	15.9	40.9	0.000	0.000	0.000	4.074	0.102	40.0	45.6	0.000	0.000	0.000	0.407	0.112	44.9	
8 7-8	7.5	-67.5	80.6	10.7	4.5	0.029	16.77	0.493	23.446	0.715	0.206	3.451	0.038	0.131	0.362	1.890	0.819	227.522	17.1	40.9	0.000	0.000	0.000	0.000	7.865	38.1	45.9	0.000	0.000	0.000	0.876	0.224	43.3	
9 8-9	8.5	-52.5	80.6	10.7	3.5	0.068	16.77	1.345	23.446	0.715	0.206	3.451	0.077	0.256	0.879	1.482	1.577	437.954	18.4	38.2	0.000	0.000	0.000	0.000	3.811	37.2	43.3	0.150	229.579	0.827	0.670	0.333	43.3	
10 9-10	9.5	-37.5	80.6	10.7	2.5	0.108	16.77	1.785	23.446	0.715	0.206	3.451	0.109	0.376	1.409	1.365	2.514	642.657	19.7	37.2	0.087	1041.252	3.749	1.564	0.123	37.8	43.3	0.494	476.155	1.714	0.288	0.079	45.1	
11 10-11	10.5	-22.5	80.6	10.7	1.5	0.137	16.77	2.296	23.446	0.715	0.206	3.451	0.132	0.454	1.843	1.317	2.899	805.246	21.0	37.8	0.155	2481.753	0.934	0.583	0.239	39.0	45.1	0.543	655.918	2.301	0.163	0.019	47.9	
12 11-12	11.5	-7.5	80.6	10.7	0.5	0.154	16.77	2.580	23.446	0.715	0.206	3.451	0.145	0.494	2.086	1.298	3.225	895.215	22.2	39.6	0.182	3053.383	10.992	0.576	0.289	42.0	47.9	0.553	742.023	2.671	0.168	0.085	51.1	
13 12-13	12.5	7.5	80.6	10.7	0.5	0.154	16.77	2.580	23.446	0.715	0.206	3.451	0.148	0.494	2.086	1.298	3.223	895.215	23.5	42.0	0.188	2881.021	10.122	0.000	0.239	44.2	51.1	0.537	721.479	2.597	0.000	0.085	54.4	
14 13-14	13.5	22.5	80.6	10.7	1.5	0.137	16.77	2.296	23.446	0.715	0.206	3.451	0.132	0.454	1.843	1.317	2.899	805.246	22.1	44.2	0.084	1295.590	4.556	0.571	0.123	45.1	54.4	0.470	568.085	2.043	0.170	0.076	58.8	
15 14-15	14.5	37.5	80.6	10.7	2.5	0.108	16.77	1.785	23.446	0.715	0.206	3.451	0.109	0.376	1.409	1.365	2.514	612.657	20.7	45.1	0.000	0.000	0.000	0.000	1.081	0.037	44.9	54.8	0.555	612.419	1.758	0.373	0.067	57.8
16 15-16	15.5	52.5	80.6	10.7	3.5	0.068	16.77	1.345	23.446	0.715	0.206	3.451	0.077	0.256	0.879	1.482	1.577	437.954	19.3	44.9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	44.9	57.8	0.126	83.078	0.299	0.000	0.007	58.2	
17 16-17	16.5	67.5	80.6	10.7	4.5	0.029	16.77	0.493	23.446	0.715	0.206	3.451	0.088	0.131	0.362	1.890	0.819	227.522	17.9	44.9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	44.9	58.2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	58.2	
18 17-18	17.5	82.5	80.6	10.7	5.5	0.000	16.77	0.000	23.446	0.715	0.206	3.451	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	16.5	44.9	0.000	0.000	0.000	0.526	0.013	44.7	58.2	0.000	0.000	0.000	0.221	0.019	57.9	
19 18-19	18.5	97.5	80.6	10.7	6.5	0.000	16.77	0.000	23.446	0.715	0.206	3.451	0.000	0.000	0.000	0.482	0.000	0.000	15.2	44.7	0.000	0.000	0.000	3.167	0.079	44.0	57.9	0.000	0.000	0.000	1.314	0.112	56.0	
20 19-20	19.5	112.5	80.6	10.7	7.5	0.000	16.77	0.000	23.446	0.715	0.206	3.451	0.000	0.000	0.000	0.761	0.000	0.000	13.8	44.0	0.000	0.000	0.000	3.228	0.081	43.2	56.0	0.000	0.000	0.000	1.252	0.112	54.2	
21 20-21	20.5	127.5	80.6	10.7	8.5	0.000	16.77	0.000	23.446	0.715	0.206	3.451	0.000	0.000	0.000	0.856	0.000	0.000	12.4	43.2	0.000	0.000	0.000	3.287	0.082	42.5	54.2	0.000	0.000	0.000	1.194	0.112	52.5	
22 21-22	21.5	142.5	80.6	10.7	9.5	0.000	16.77	0.000	23.446	0.715	0.206	3.451	0.000	0.000	0.000	0.900	0.000	0.000	11.0	42.5	0.000	0.000	0.000	2.197	0.055	41.9	52.5	0.000	0.000	0.000	0.749	0.074	51.4	
23 22-23	22.5	157.5	80.6	10.7	10.5	0.000	16.77	0.000	23.446	0.715	0.206	3.451	0.000	0.000	0.000	0.922	0.000	0.000	9.8	41.9	0.000	0.000	0.000	1.125	0.028	41.7	51.4	0.000	0.000	0.000	0.389	0.037	30.9	
24 23-0	23.5	172.5	80.6	10.7	11.5	0.000	16.77	0.000	23.446	0.715	0.206	3.451	0.000	0.000	0.000	0.932	0.000	0.000	8.2	41.7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	41.7	50.9	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	50.9	
																				Coletores Híbridos							Coletores solares							
Mês		Dia		n		δ (o)		a		b		H região de Campinas (MJ/m2)		Ta_min oC Ta_max oC																				
Outubro		15		288		-9.6		0.69005		0.393801		22.85		14.60 29.40																				
HS	HS	u (o)	uS (o)	N (h)	from solar n	rt	H (MJ/m²)	I (MJ/m²)	H0 (MJ/m²)	KT+H/H0	Hd/H	Hd (MJ/m²)	rd	Id (MJ/m²)	Ib=Id	Rb	IT (MJ/m²)	G (W/m²)	Ta (oC)	Coletores Híbridos					Coletores solares									
																				Ts H (oC)	η	QuH (W)	QuH (MJ)	LstH (MJ)	Operdas	TstH+ (oC)	TsC (oC)	η	QuC (W)	QuC (MJ)	LstC (MJ)	Operdas	TstC+ (oC)	
1 0-1	0.5	-172.5	94.1	12.5	11.5	0.000	22.85	0.000	37.987	0.602	0.337	7.697	0.000	0.000	0.000	1.169	0.000	0.000	14.6	45.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	45.5	47.8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	47.8	
2 1-2	1.5	-157.5	94.1	12.5	10.5	0.000	22.85	0.000	37.987	0.602	0.337	7.697	0.000	0.000	0.000	1.175	0.000	0.000	15.8	45.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	45.5	47.8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	47.8	
3 2-3	2.5	-142.5	94.1	12.5	9.5	0.000	22.85	0.000	37.987	0.602	0.337	7.697	0.000	0.000	0.000	1.192	0.000	0.000	17.1	45.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	45.5	47.8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	47.8	
4 3-4	3.5	-127.5	94.1	12.5	8.5	0.000	22.85	0.000	37.987	0.602	0.337	7.697	0.000	0.000	0.000	1.228	0.000	0.000	18.9	45.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	45.5	47.8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	47.8	
5 4-5	4.5	-112.5	94.1	12.5	7.5	0.000	22.85	0.000	37.987	0.602	0.337	7.697	0.000	0.000	0.000	1.332	0.000	0.000	19.5	45.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	45.5	47.8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	47.8	
6 5-6	5.5	-97.5	94.1	12.5	6.5	0.000	22.85	0.000	37.987	0.602	0.337	7.697	0.000	0.000	0.000	1.383	0.000	0.000	20.8	45.5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	45.5	47.8	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	47.8	
7 6-7	6.5	-82.5	94.1	12.5	5.5	0.023	22.85	0.392	37.987	0.602	0.337	7.697	0.024	0.182	0.589	0.702	0.304	84.988	20.2	43.3	0.000	0.000	0.000	-0.074	0.102	44.5	47.8	0.000	0.000	0.000	0.407	0.112	47.2	
8 7-8	7.5	-67.5	94.1	12.5	4.5	0.041	22.85	0.643	37.987	0.602	0.337	7.697	0.053	0.410	0.933	0.915	0.505	251.442	21.2	44.5	0.000	0.000	0.000	0.000	7.885	38.0	42.6	0.47	0.174	77.862	1.010	0.776	32.7	
9 8-9	8.5	-52.5	94.1	12.5	3.5	0.071	22.85	1.817	37.987	0.602	0.337	7.697	0.080	0.																				

A faixa de horas em vermelho na tabela anterior indica o período em que o sistema de geração de energia está ligado, aproveitando a insolação.

A Figura 4.5, como nos casos anteriores apresenta graficamente o perfil da temperatura de armazenamento em função do tempo. Neste caso, porém, foi admitido que a carga térmica fosse colocada no sistema já no primeiro dia, e notamos que o regime de temperatura no reservatório principal demora um pouco mais a ser alcançado, no 5º. dia. No item 4.3.1.2 estão as tabelas com os resultados dos cálculos e o perfil da temperatura de armazenamento T_s , em função do tempo. Pode se notar que o sistema está em equilíbrio com a carga térmica.

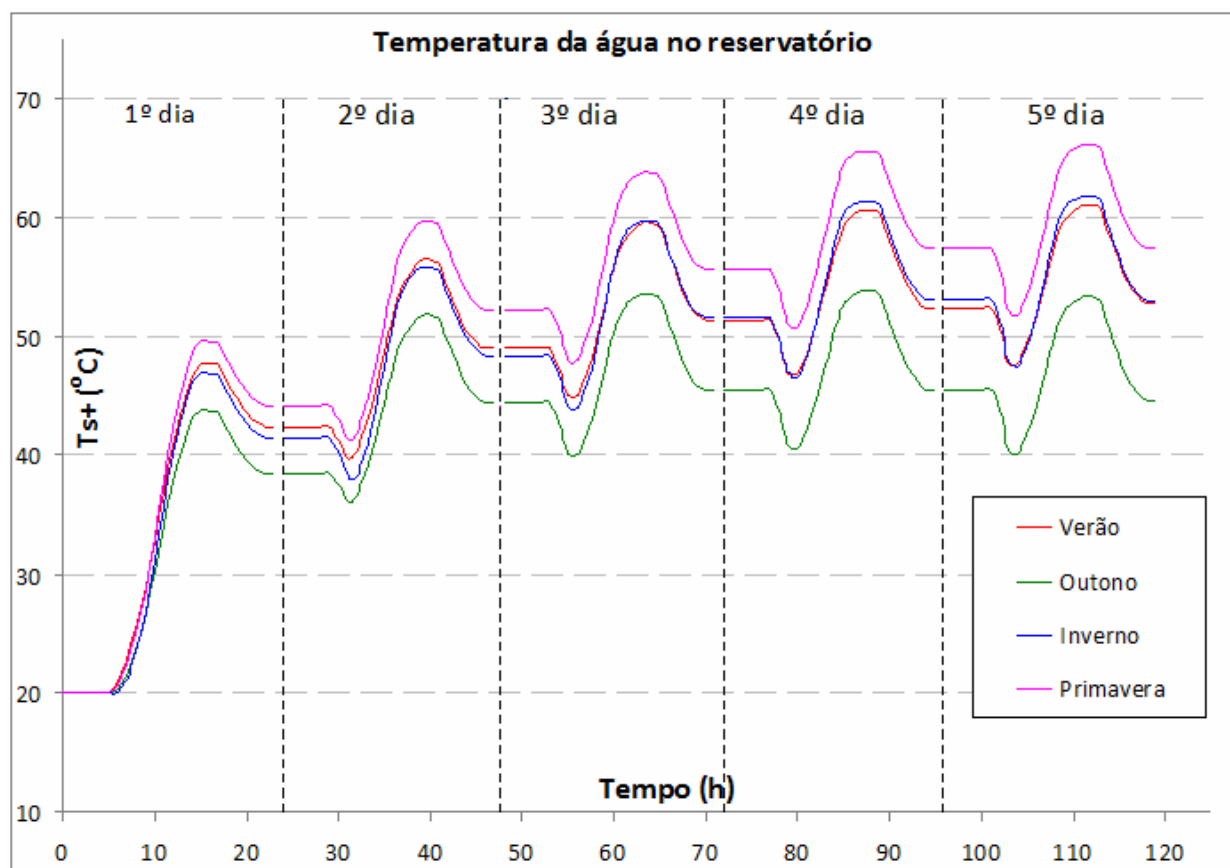


Figura 4.5: Perfil da temperatura do reservatório principal ao longo do dia.

Fonte: Própria do Autor (2014)

Nota-se agora um gráfico ainda parecido com o caso anterior, porém com níveis de temperatura maiores, graças a colocação de coletores solares em série com o sistema híbrido.

4.3.1.3. Resultado do cálculo do número de painéis híbridos e coletores

Uma vez encontrado o equilíbrio térmico no cálculo feito no item anterior, transformamos a área total de coletores em quantidade, conforme expressão (4.1) e os dados do mesmo mostrados na Tabela 3.9.

Híbrido

Como $A_c = 18,7\text{m}^2$ e $a_c = 1,44\text{m}^2$, temos:

Número de painéis híbridos - Nc	13
---------------------------------	----

Coletor solar

Como $A_c = 1,5\text{m}^2$ e $a_c = 1,5\text{m}^2$, temos:

Número de coletores solares - Nc	1
----------------------------------	---

4.3.2. Elétrico

4.3.2.1. Resultado do cálculo da potência de saída do inversor

Neste caso segue-se o mesmo procedimento já feito para o SFH, do item 4.2.2.1., e os resultados estão mostrados na Tabela 4.10.

Da mesma forma como no caso anterior, tanto a quantidade de painéis híbridos como a potência do inversor são determinados por um processo de tentativas, iniciando com valores nominais que deverão ser ajustados até que o total de energia elétrica efetivamente produzida na saída do inversor ($P_{saída}$) no ano atinja o objetivo. Abaixo segue o resultado obtido.

Nr. de painéis híbridos	13
Potência nominal do Inversor (W)	2.500

Tabela 4.10: Resultados da geração elétrica – SFHC

Primavera	Irrad. HTβ (kWh/m2.dia)		6,12	Irrad. HTβ (kWh/m2.es)		563,1	Verão	Irrad. HTβ (kWh/m2.dia)		5,67	Irrad. HTβ (kWh/m2.es)		509,9
Temp(h)	ITβ (W/m2)	Ta (oC)	TC (oC)	Pmp (W)	PFV (W)	Psaída (W)	Temp(h)	ITβ (W/m2)	Ta (oC)	TC (oC)	Pmp (W)	PFV (W)	Psaída (W)
1	-	14,60	14,60	-	-	-	1	-	17,50	17,50	-	-	-
2	-	15,83	15,83	-	-	-	2	-	18,45	18,45	-	-	-
3	-	17,07	17,07	-	-	-	3	-	19,40	19,40	-	-	-
4	-	18,30	18,30	-	-	-	4	-	20,35	20,35	-	-	-
5	-	19,53	19,53	-	-	-	5	-	21,30	21,30	-	-	-
6	-	20,77	20,77	-	-	-	6	17,25	22,25	22,25	57	48	-
7	84,47	22,00	45,48	252	214	196	7	108,93	23,20	43,72	327	278	259
8	251,44	23,23	44,52	753	738	707	8	263,13	24,15	42,75	794	778	746
9	444,58	24,47	42,63	1.342	1.315	1.262	9	428,38	25,10	40,87	1.303	1.277	1.226
10	632,72	25,70	42,41	1.911	1.873	1.792	10	582,24	26,05	40,70	1.772	1.737	1.663
11	782,28	26,93	43,86	2.348	2.301	2.193	11	701,31	27,00	42,04	2.122	2.080	1.986
12	865,08	28,17	46,06	2.572	2.520	2.397	12	766,29	27,95	43,98	2.299	2.253	2.148
13	865,08	29,40	48,28	2.547	2.496	2.374	13	766,29	28,90	45,87	2.280	2.234	2.131
14	782,28	28,05	49,78	2.287	2.242	2.138	14	701,31	27,86	47,21	2.074	2.033	1.942
15	632,72	26,71	50,03	1.848	1.811	1.733	15	582,24	26,83	47,43	1.721	1.686	1.615
16	444,58	25,36	49,77	1.300	1.274	1.223	16	428,38	25,79	47,17	1.267	1.242	1.193
17	251,44	24,02	49,77	735	721	690	17	263,13	24,75	47,17	778	763	731
18	84,47	22,67	49,77	247	210	192	18	108,93	23,72	47,17	322	274	255
19	-	21,33	21,33	-	-	-	19	17,25	22,68	22,68	57	48	-
20	-	19,98	19,98	-	-	-	20	-	21,65	21,65	-	-	-
21	-	18,64	18,64	-	-	-	21	-	20,61	20,61	-	-	-
22	-	17,29	17,29	-	-	-	22	-	19,57	19,57	-	-	-
23	-	15,95	15,95	-	-	-	23	-	18,54	18,54	-	-	-
24	-	14,60	14,60	-	-	-	24	-	17,50	17,50	-	-	-
Total diar.	6.121,13				17.714	16.898	Total	5.666,08				16.538	15.895

Outono	Irrad. HTβ (kWh/m2.dia)		4,92	Irrad. HTβ (kWh/m2.es)		447,7	Inverno	Irrad. HTβ (kWh/m2.dia)		6,02	Irrad. HTβ (kWh/m2.es)		553,6
Temp(h)	ITβ (W/m2)	Ta (oC)	TC (oC)	Pmp (W)	PFV (W)	Psaída (W)	Temp(h)	ITβ (W/m2)	Ta (oC)	TC (oC)	Pmp (W)	PFV (W)	Psaída (W)
1	-	13,00	13,00	-	-	-	1	-	8,20	8,20	-	-	-
2	-	14,24	14,24	-	-	-	2	-	9,48	9,48	-	-	-
3	-	15,48	15,48	-	-	-	3	-	10,75	10,75	-	-	-
4	-	16,73	16,73	-	-	-	4	-	12,03	12,03	-	-	-
5	-	17,97	17,97	-	-	-	5	-	13,30	13,30	-	-	-
6	-	19,21	19,21	-	-	-	6	-	14,58	14,58	-	-	-
7	42,13	20,45	40,61	128	109	93	7	-	15,85	15,85	-	-	-
8	189,59	21,69	39,65	580	568	542	8	227,52	17,13	39,98	695	681	652
9	356,23	22,93	37,76	1.098	1.076	1.033	9	437,95	18,40	38,10	1.348	1.321	1.268
10	516,45	24,18	37,47	1.594	1.562	1.497	10	642,66	19,68	37,74	1.981	1.941	1.856
11	642,85	25,42	38,71	1.973	1.934	1.849	11	805,25	20,95	39,06	2.468	2.419	2.303
12	712,54	26,66	40,65	2.169	2.126	2.029	12	895,22	22,23	41,22	2.718	2.664	2.500
13	712,54	27,90	42,62	2.151	2.108	2.012	13	895,22	23,50	43,43	2.692	2.639	2.500
14	642,85	26,55	43,97	1.929	1.890	1.808	14	805,25	22,11	44,89	2.406	2.358	2.246
15	516,45	25,19	44,19	1.548	1.517	1.455	15	642,66	20,72	45,12	1.919	1.880	1.798
16	356,23	23,84	43,93	1.069	1.048	1.006	16	437,95	19,33	44,87	1.309	1.283	1.232
17	189,59	22,48	43,93	569	558	532	17	227,52	17,94	44,87	680	666	638
18	42,13	21,13	43,93	126	107	91	18	-	16,55	16,55	-	-	-
19	-	19,77	19,77	-	-	-	19	-	15,15	15,15	-	-	-
20	-	18,42	18,42	-	-	-	20	-	13,76	13,76	-	-	-
21	-	17,06	17,06	-	-	-	21	-	12,37	12,37	-	-	-
22	-	15,71	15,71	-	-	-	22	-	10,98	10,98	-	-	-
23	-	14,35	14,35	-	-	-	23	-	9,59	9,59	-	-	-
24	-	13,00	13,00	-	-	-	24	-	8,20	8,20	-	-	-
Total	4.919,58				14.602	13.949	Total	6.017,19				17.852	16.992

Fonte: Própria do Autor (2014)

A Figura 4.6 mostra o perfil da geração de energia elétrica FV ao longo do dia, entregue pelo inversor em c.a. na tensão de rede de entrada da casa na qual está conectado e operando segundo as normas citadas no item 3.4.1.

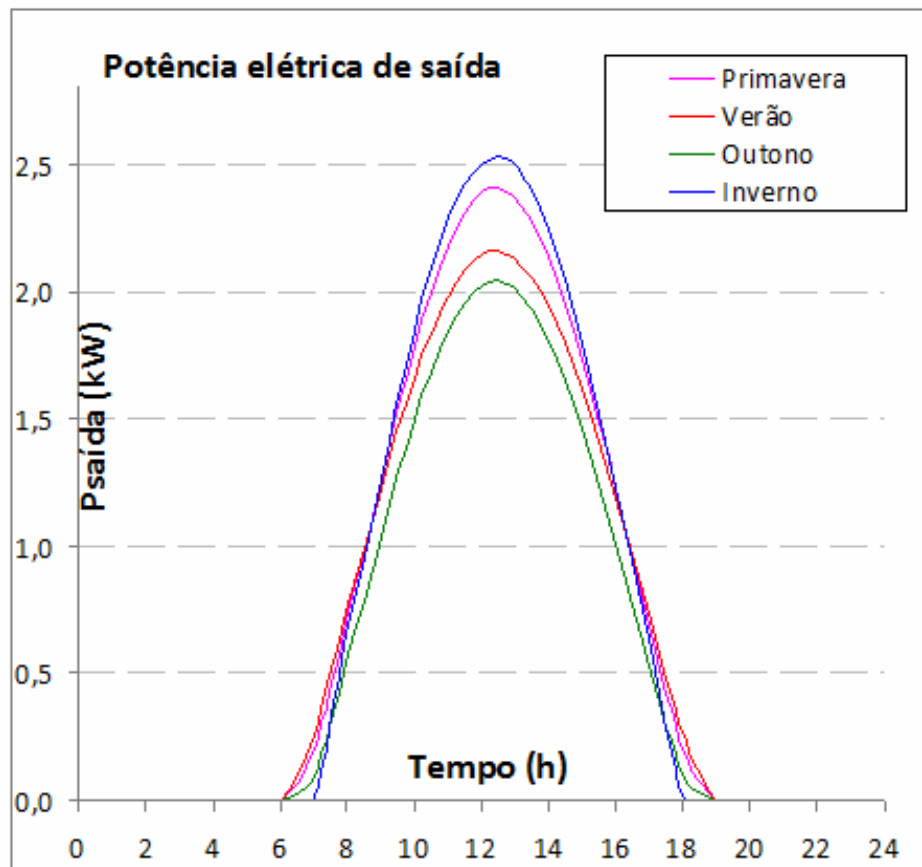


Figura 4.6: Perfil da potência elétrica produzida ao longo do dia
Fonte: Própria do Autor (2014)

4.4. Parâmetros comparativos

4.4.1. Técnicos

Tabela 4.11: Resumo dos resultados técnicos para comparação

RESULTADOS			SFC	SFH	SFHC
		Unid.	Valores	Valores	Valores
Painel/Coletor	Nr. de coletores solares térmicos (1,5m2)	peça	4		1
	Área	m2	6,00		1,50
	Nr. de painéis FV (1,64m2, 240W)	peça	14		
	Área	m2	23,01		
	Nr. de painéis híbridos (1,44m2, 250W)	peça		13	13
	Área	m2		18,72	18,72
	Área total	m2	29,01	18,72	20,22
Reservatórios - principal	Volume do reservatório térmico	m3	0,46	1,18	0,17
	Bomba d'água circulação forçada	l/mi	7,68	19,71	2,80
	Potência da bomba d'água	W	180	400	50
	Temperatura consumo	oC	40,00	40,00	40,00
	Temperatura mínima no ano	oC	43,61	35,93	40,05
	Temperatura máxima no ano	oC	71,22	48,60	66,16
Reservatório -	Volume do reservatório térmico (tanque)	m3			1,18
	Bomba d'água circulação forçada	l/mi			19,60
	Potência da bomba d'água	W			400
Inversor CC/CA	Potência nominal do Inversor CC/CA	W	2.500,00	2.500,00	2.500,00
	Fator de dimensionamento do inversor - FDI	adimens.	0,74	0,77	0,77
	Eficiência média anual do inversor	%	96%	96%	96%
	Produtividade anual estimada do SFCR - YF	kWh/kWp	1.762,67	1.798,81	1.784,79
	Painéis FV em série	peça	14	13	13
	Painéis FV em paralelo	peça	1	1	1
	Tensão CC na máxima potência (Vmp)	V	354,87	373,16	446,79
	Corrente CC na máxima potência (Imp)	A	8,07	7,91	7,91
Indicadores	Tempo de aquecimento para o regime	dias	1(*)	1(*)	5 (**)
	Demanda de energia térmica	kWh/ano	4.445,57	4.333,16	4.507,05
	Energia térmica gerada	kWh/ano	4.497,31	4.334,44	4.625,68
	Densidade de energia térmica gerada	kWh/ano.m2	749,55	231,54	228,77
	Demanda de energia elétrica	kWh/ano	6.000,00	6.000,00	6.000,00
	Energia elétrica gerada	kWh/ano	5.922,56	5.846,13	5.800,58
	Densidade de energia elétrica gerada	kWh/ano.m2	257,42	312,29	309,86
	Energia total gerada	kWh/ano	10.419,88	10.180,56	10.426,26
	Densidade de energia total gerada	kWh/ano.m2	359,21	543,83	515,64

(*) sem carga térmica

(**) com carga térmica

Fonte: Própria do Autor (2014)

Comentários:

- Em todos os casos conseguimos alcançar o equilíbrio térmico, ou seja, temos uma produção térmica igual ou maior que a carga térmica, porém na configuração SFH a temperatura de armazenamento mínima que se consegue é de no máximo 35,93 °C, abaixo da temperatura de consumo Td de 40 °C;
- Na configuração SFHC, a carga térmica foi colocada já no primeiro dia e assim foram 5 dias até se conseguir a temperatura de armazenamento Ts em regime;

- Do ponto de vista de rendimento por área, ou seja, por densidade superficial de energia (kwh/m^2), vemos que o SFC apresentou o melhor resultado térmico, porém no elétrico foram os tipo SFH e SFHC, que também foram os melhores no rendimento global (térmico + elétrico);
- Apesar da maior densidade de energia elétrica do SFH em relação ao SFHC, esse não atinge a temperatura de consumo de forma sustentável, devendo demandar parte do ganho elétrico para o aquecimento da água no ponto de consumo, o que torna o SFHC mais interesse do ponto de vista global;
- O quadro de resultado aqui apresentado é muito influenciado pelo perfil da carga adotada, ou seja, podemos encontrar vantagens em diferentes configurações do sistema termo-fotovoltaico aqui mostradas, dependendo desse perfil. Por exemplo, residências com alta demanda de eletricidade e baixa de energia térmica pode ser melhor com o SFC. Entretanto, indo para o outro extremo, o SFCH 'pode se mostrar muito mais vantajoso.

4.4.2. Econômicos

Na Tabela 4.12. estão mostrados os custos envolvidos para cada configuração.

Tabela 4.12: Resumo dos custos para comparação

RESULTADOS			SFC		SFH		SFHC		
	Unid.	Preço Unit. (R\$)	Qtd.	Sub-Total (R\$)	Qtd.	Sub-Total (R\$)	Qtd.	Sub-Total (R\$)	
Material	Coletores solares térmicos	peça	782,00	4	3.128,00	0	-	1	782,00
	Painéis fotovoltaico (elétricos)	peça	1.020,00	14	14.280,00	0	-	0	-
	Painéis híbridos (térmico e elétrico)	peça	1.643,00	0	-	13	21.359,00	13	21.359,00
	Reservatório térmico ~ 0,2m3	peça	323,00	0	-	0	-	1	323,00
	Reservatório térmico ~ 0,5m3	peça	512,00	1	512,00	0	-	0	-
	Reservatório térmico ~ 1,2m3	peça	1.088,00	0	-	1	1.088,00	1	1.088,00
	Bomba d"agua circulação forçada ~3 l/mi	peça	249,00	0	-	0	-	1	249,00
	Bomba d"agua circulação forçada ~8 l/mi	peça	413,00	1	413,00	0	-	0	-
	Bomba d"agua circulação forçada ~20 l/mi	peça	789,00	0	-	1	789,00	1	789,00
	Inversor CC/CA 2500W	peça	7.814,00	1	7.814,00	1	7.814,00	1	7.814,00
	Quadro de comando e proteção circuito térmico	peça	926,00	1	926,00	1	926,00	1	926,00
	Quadro de comando e proteção circuito elétrico	peça	975,00	1	975,00	1	975,00	1	975,00
	Ferragens de fixação coletores	kit/coletor.	83,00	4	332,00	0	-	1	83,00
	Ferragens de fixação painéis FV	kit/painel	102,00	14	1.428,00	0	-	0	-
	Ferragens de fixação painéis híbridos	kit/híbrido	121,00	0	-	13	1.573,00	13	1.573,00
	Material de hidráulica (tubos, conexões, válvulas, etc)	kit	157,00	2,0	314,00	5,0	785,00	5,0	785,00
	Material elétrico (cabos, conectores, eltroductos, etc)	kit	211,00	5,0	1.055,00	5,0	1.055,00	5,0	1.055,00
Sub-Total (R\$)				31.177,00		36.364,00		37.801,00	
Serviço	Projeto & Comissionamento (*)	Unid.	1.000,00	1	1.000,00	1	1.000,00	1	1.000,00
	Instalação - hidráulica / elétrica (*)	Unid.	500,00	1	500,00	1	500,00	1	500,00
	Por painel FV (*)	Unid.	100,00	14	1.400,00	0	-	0	-
	Por painel Coletor (*)	Unid.	80,00	4	320,00	0	-	1	80,00
	Por painel híbrido (*)	Unid.	120,00	0	-	13	1.560,00	13	1.560,00
	Sub-Total (R\$)				3.220,00		3.060,00		3.140,00
TOTAL				34.397,00		39.424,00		40.941,00	

(*) - Estimado

Fonte: Própria do Autor (2014)

Na Tabela 4.13 está mostrado o resultado financeiro, ou o tempo necessário para se recuperar o investimento total do sistema, considerando o ganho que o mesmo proporcionará em relação ao custo da energia de fontes não solar.

Tabela 4.13: Cálculo do retorno financeiro (“pay-back”)

TE - (R\$/kWh)=	0,14890
TU - (R\$/kWh)=	0,16290
Desconto no TU (res. ANEEL)=	80% aplicável a ger. FV
Tarifa c/ desconto s/ impostos	0,18148
ICMS (25%)=	0,06049 25%
Cofins (6,1%)=	- 0,00%
PIS (1,31%)=	- 0,00%
Tarifa c/ desconto c/ impostos	0,24197 Tarifa cheia 0,415723
Fonte: Conta de Luz da Elektro em Atibaia (abril/2014)	

Balanco - custos/energia anual	SFC		SFH		SFHC	
	Elétrico	Térmico	Elétrico	Térmico	Elétrico	Térmico
Energia consumida (kWh/ano)	6.000	4.446	6.000	4.333	6.000	4.507
	-		-		-	
Energia gerada (kWh/ano)	5.923	4.497	5.846	4.334	5.801	4.626
Tarifa local cheia s/ ger. FV c/ imp. (R\$/kWh)	0,4157	0,4157	0,4157	0,4157	0,4157	0,4157
Valor total da conta cheia c/ imp. (R\$/ano)	2.494,34	1.869,64	2.494,34	1.801,92	2.494,34	1.923,00
Total - Elétrico + Térmico (R\$/ano)	4.363,97		4.296,26		4.417,34	

Despesas do sistema

Tarifa local reduz. c/ ger. FV (TU) s/ imp. (R\$/kWh)	0,0326	0,0326	0,0326
Valor parcela c/ sist. FV en. cons.=gera. (R\$/ano)	192,96	190,47	188,98
Tarifa local reduz. c/ ger. FV c/ imp. (R\$/kWh)	0,24197	0,24197	0,24197
Valor parcela c/ sist. FV en. cons.> gera. (R\$/ano)	18,74	37,23	48,25
Energia do auto-consumo do sistema (kWh/ano)	329	730	821
Valor referente ao auto-consumo (R\$/ano)	79,49	176,64	198,72
Valor total das despesas (R\$/ano)	291,18	404,34	435,96

Diferença ano - economia (R\$/ano)	4.072,79	3.891,92	3.981,38
------------------------------------	----------	----------	----------

Resultados financeiros

Pay-back

Valor inicial (R\$)	34.397	39.424	40.941
Juros (%/mês)	0,500%	0,500%	0,500%
amortização mensal (R\$)	339,40	324,33	331,78
Tempo p/ pagar o investimento (anos)	11,81	15,64	16,03

Fonte: Própria do Autor (2014)

5. CONCLUSÃO

O objetivo desse trabalho foi fazer uma comparação entre as várias configurações de painéis solares térmicos, elétricos e os tipos híbridos, e verificar qual delas propicia o melhor rendimento e a melhor relação custo /benefício.

Uma das premissas importantes foi priorizar a produção de energia elétrica, visto que é a forma de energia mais versátil para um perfil de demanda residencial, como o adotado neste trabalho.

Na configuração SFC (com painéis FV e coletores separados) notamos uma temperatura de até 53,7°C, nas células FV e $P_{mp} = 2.478W$ no horário de maior radiação solar, o que representou uma redução em sua produtividade para 85% da condição padrão ($T_C = 25^\circ C$, $P_{mp} = 2.907W$). Porém a produtividade térmica de 749,55 kWh/ano.m² ficou até 3 vezes acima das demais.

Já na configuração SFH (com painéis híbridos) há uma tendência inicial de se imaginar um grande ganho de produtividade devido ao aproveitamento do calor gerado pelas células FV no aquecimento da água de uso, e ainda com a vantagem de, conseqüentemente, fazer a temperatura dessas células diminuir, aumentando sua eficiência. Porém o que se observou de fato nos cálculos aqui apresentados, foi uma situação conflitante, pois a água de consumo é armazenada em reservatório e deve ter uma temperatura maior que a do meio-ambiente, que definimos aqui como a de consumo. Porém essa mesma água ao invés de “refrigerar” vai então aumentar a temperatura das células FV na maior parte do tempo, quando ela circular no sistema. Ou seja, queremos a água aquecida para o consumo e ao mesmo tempo como “refrigerante” para as células FV.

No horário de maior radiação a temperatura da célula FV chegou a 46,8 °C e P_{mp} de 2.564W. Se, no entanto não houvesse circulação de água, esse temperatura chegaria a 54,7 °C com P_{mp} igual 2.474W. Porém em períodos de menor radiação podemos ter uma situação inversa, em que a temperatura da célula FV de 24,5 °C ($P_{mp} = 275W$) torna-se 43,9 °C ($P_{mp} = 253W$), devido a circulação da água aquecida que vem do reservatório.

É fácil perceber que tal conflito ocorre pelo fato da água ter que ser armazenada e mantida aquecida e não “refrigerada” como num sistema convencional em que a água usada como “refrigerante” passa por um trocador de calor com o meio-ambiente.

Então o que vimos pelos cálculos é uma melhora no rendimento elétrico, porém a um custo representado por perda de temperatura da água de consumo armazenada.

Uma forma normalmente proposta para resolver esse conflito é utilizar um sistema elétrico auxiliar para aumentar a temperatura da água no reservatório, que como já foi dito ao longo desse trabalho, é inapropriado. Como alternativa então, propusemos a configuração SFHC (com painéis híbridos e coletores), em que o sistema auxiliar ao invés de elétrico foi um a base de coletores solares convencionais.

Foram dois reservatórios: um (auxiliar), contendo água que será tratada como “refrigerante” para o painel híbrido e um outro (principal) que receberá água do primeiro, já pré-aquecida, e armazenará a água a ser aquecida pelos coletores solares até a temperatura de consumo.

Desta forma conseguimos manter o ganho no rendimento das células FV e fazer a temperatura do reservatório principal chegar na de consumo.

Na tabela com os resultados técnicos, observamos um melhor rendimento global nos sistemas que utilizam os painéis híbridos, apesar de no SFH a água não atingir a temperatura de consumo, o que ocorrerá somente com o uso de sistema auxiliar do SFHC.

Fazendo a mesma análise anterior, temos um resultado muito parecido, porém com a diferença que neste caso a temperatura do reservatório mínima observada de 40,05 °C atende a temperatura de consumo, diferente do caso anterior que atingiu somente 35,93 °C.

Já na tabela com os valores econômicos, a situação se inverte, e observamos um resultado bastante desfavorável para os sistemas com painéis híbridos. O caso SFHC, por exemplo, apresentou um custo total quase 20% maior que o SFC, e na mesma comparação, um “pay-back” quase 1,5 vezes maior.

Porém não podemos esquecer que todo esse resultado aqui mostrado, foi baseado em um determinado perfil de carga, com uma relação carga elétrica / carga térmica de +/- 1,4. É possível que diferentes perfis e temperaturas de consumo, podem mostrar vantagens em diferentes configurações. Provavelmente um perfil com alta demanda térmica deve dar mais vantagem para o SFHC, e um perfil com alta demanda elétrica, talvez dê mais vantagem para o SFC. Fazer um mapa mostrando a configuração de

maior vantagem em função do par demanda térmica x demanda elétrica poderia ser uma boa sugestão de tema para uma próxima monografia.

6. REFERÊNCIAS

ABRAVA – Curso de Projetos de Sistemas de Aquecimento Solar – Módulo Introdutório - Eng. Carlos Felipe da Cunha Faria - de 03/06/2008

CIIAGRO - <<http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Quadros/QTmedPeriodo.asp>>. Acesso em 29 de março de 2014

Catálogo Painei Fotovoltaico – Kyocera < <http://www.kyocerasolar.com.br>>

Catálogo Inversor – Kaco < <http://kaco-newenergy.com/>>

Catálogo Painei Híbrido – Sices < www.sicesbrasil.com.br>

Catálogo Lava louças – Brastemp < <http://www.brastemp.com.br/categoria/lava-loucas/> >

CRESESB. Potencial Energético Solar – Sun Data.: <<http://www.cresesb.cepel.br/sundata/index.php>>. Acesso em 28 de setembro de 2013.

C. R. PACHECO - PECE. (2012). *Apostila da Disciplina ERG007 - Energia Solar II*. PECE. (2012). *Apostila da Disciplina ERG006 - Energia Solar I*.

DUFFIE, J.A., W.A. BECKMAN. Solar Engineering of Thermal Processes. John Wiley & Sons, 3rd edition, 2006.

FATH, H.E.S. Technical Assessment of Solar Thermal Energy Storage Technologies. Renewable Energy, vol. 14, 1998.

GEOHACK. Banco de dados de informações geográficas.: <https://toolserver.org/~geohack/geohack.php?language=en¶ms=22_54_21_S_47_03_39_W>. Acesso em 30 de março de 2014

Google - <<http://google.com> - Imagens> Acesso em 5 de abril de 2014

HESLER, Thomas - Monografia - Estudo piloto de uma usina de microgeração fotovoltaica conectada à rede na região de Santa Rosa (RS) - 2013

INMETRO – Coletores solares . Sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água – coletores solares. 2013.

<<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/ColetoresSolares-banho.pdf>>..

INMETRO – Chuveiro Elétrico - Tabela de consumo de energia elétrica – Chuveiros Elétricos. 2013. <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/chuveiro.pdf>>..

LógicaMax - <<http://logicamaxtec.webnode.com.br/energia-renovavel/paineis-fotovoltaicos>> Acesso em 5 de abril de 2014

MARQUES, R. L. (2008). Avaliação da Viabilidade de Colectores Híbridos Fotovoltaicos e Térmicos para Aplicação ao Aquecimento de Águas e Micro-Geração. <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABD5gAC/colector-solar-hibrido-tese>>

OTA, Valeria Hiromi Arashiro – Monografia - Armazenamento de energia solar: métodos e aplicação – 2013

Roberto ZILLES, Wilson Negrão Macedo, Marcos André Barros Galhardo e Sérgio Henrique F. de Oliveira Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. – Editora Oficina de Textos - 2012

SECRETARIA DE ENERGIA DO ESTADO DE SP - Levantamento do Potencial de Energia Solar Paulista,

<<http://www.energia.sp.gov.br/portal.php/atlas-solar>

<<http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/455.pdf>>