

Renê Eduardo Zaidan

Estudo comparativo entre os métodos de dimensionamento de sistemas
de aquecimento solar propostos pela NBR 15569-2008

São Paulo
2016

Renê Eduardo Zaidan

Estudo comparativo entre os métodos de dimensionamento de sistemas
de aquecimento solar propostos pela ABNT NBR 15569:2008

Monografia apresentada como trabalho
final para obtenção do título de Especialista
em energias renováveis, geração
distribuída e eficiência energética, no
Programa de Educação Continuada para
Engenheiros (PECE) da Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo

Orientador Professor Dr. Cláudio Pacheco

São Paulo
2016

Catálogo-na-publicação

Zaidan, Renê Eduardo

Estudo comparativo entre os métodos de dimensionamento de sistemas de aquecimento solar propostos pela ABNT NBR 15569:2008 / R. E. Zaidan - São Paulo, 2016.

88 p.

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

PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Energia solar 2.Aquecimento de água I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

RESUMO

Esta monografia apresenta uma comparação entre os dois métodos de dimensionamento de instalações de aquecimento solar sugeridos pela norma brasileira ABNT NBR 15569:2008: *Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Projeto e instalação*. Esta norma tem como escopo instalações de aquecimento de água com coletores solares planos em circuitos diretos e sugere como métodos de dimensionamento duas alternativas, denominadas como metodologias 1 e 2, com abertura para que outros métodos sejam utilizados. O primeiro método é uma referência à “Carta f ”, método F-Chart da referência *Solar Heating Desing*, BECKMAN, W. A. KLEIN S. A e DUFFIE, J.A. O segundo método é um roteiro descrito na própria norma técnica. A comparação entre estes métodos apresentada neste trabalho mostra as diferenças de abordagens, aplicações e resultados. É enfatizada a importância da fração solar estimada na avaliação econômica dos empreendimentos solares e através de um modelo simplificado mostrar a importância que as propriedades estatísticas da distribuição das irradiações médias diárias têm na formação desta grandeza.

Palavras chave: energia solar; aquecimento de água.

ABSTRACT

This work presents a comparison between the two methods of solar heating systems design suggested by Brazilian standard NBR 15569: 2008: Solar water heating systems in direct circuit - Design and installation. The scope of this standard is water heating systems with flat solar collectors in direct circuits and suggests as design methods two alternatives, known as methodologies 1 and 2, with an opening to other methods. The first method is a reference to the method F-Chart Solar Heating Design from BECKMAN, W. A. KLEIN S. and DUFFIE, J. A. The second method is a script described inside this technical standard. The comparison between these methods presented here shows the differences approaches, applications and results. It is emphasized the importance of the estimated solar fraction in the economic evaluation of solar projects and through a simplified model is shown the importance that the statistical properties of the distribution of the mean daily radiation have in the formation of this variable.

Key words: solar energy; water heating.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema evidenciando circuito primário e secundário do SAS	15
Figura 2.2 - Configuração para sistemas de aquecimento exclusivo de água considerado no método Carta f	17
Figura 2.3 - Esquema de cálculo da metodologia Carta f	18
Figura 2.4 - Correção do adimensional X em função da variação do volume do reservatório térmico	23
Figura 2.5 - Variação da fração solar anual com a variação do tamanho do reservatório térmico	23
Figura 2.6 - Carta f para líquidos	24
Figura 2.7 - Esquema de cálculo da metodologia 2	26
Figura 2.8 - Radiação solar global horizontal diária, média anual [MJ/(m ² .dia)]	32
Figura 2.9 - Temperatura média anual nas regiões brasileiras	33
Figura 2.10 - Radiação solar global horizontal diária, média anual [kWh/(m ² .dia)]	34
Figura 2.11 - Radiação solar global no plano inclinado diária, média anual [kWh/(m ² .dia)]	34
Figura 2.12 - Pontos selecionados com dados solarimétricos horários	35
Figura 2.13 - Exemplo de resultado do aplicativo SunData	37
Figura 2.14 – Amostra da lista com os coletores solares certificados pelo INMETRO	39
Figura 2.15 - Amostra da lista com os reservatórios térmicos certificados pelo INMETRO	41
Figura 2.16 - Exemplo da influência da área e dos parâmetros energéticos de coletores e do tamanho do reservatório na fração solar	47
Figura 2.17 - Exemplo de variação da fração solar anual em função do volume do reservatório térmico	48
Figura 3.1 Representação da análise do equilíbrio energético de longo período independente dos constituintes internos do sistema de aproveitamento solar	53
Figura A.1 - Exemplo da estimativa da fração solar e da distribuição de probabilidade da irradiação diária	76
Figura A.2 - Fração solar em função do desvio padrão da distribuição de radiação solar diária estimada pelo modelo simplificado	78
Figura B.1 - Amostra da irradiação diária no plano horizontal - São Paulo	80

Figura B.2 - Relação entre o módulo da latitude e o desvio padrão da distribuição de irradiação global diária em pontos do Brasil.....	84
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Faixas dos parâmetros de projeto utilizadas no desenvolvimento da Carta f	21
Tabela 2.2 – Consumo de pontos de utilização de água quente.....	26
Tabela 2.3 – Comparação entre valores de radiação média anual no plano horizontal de quatro fontes de dados para uma localização exemplo	38
Tabela 2.4 – Classificação INMETRO de eficiência energética dos coletores solares de banho	40
Tabela 2.5 – Máximas perdas específicas de energia mensal de reservatórios para receber selo PROCEL de eficiência energética	42
Tabela 3.1 – Irradiação média anual no plano horizontal para as três localidades selecionadas conforme várias referências	57
Tabela 3.2 – Irradiação média mensal para as três localidades exemplo conforme CRESESB (2015).....	58
Tabela 3.3 – Média mensal e anual da temperatura ambiente das três localidades exemplo.....	59
Tabela 3.4 – Volumes de consumo apurados como demanda exemplo de quatro moradores	59
Tabela 3.5 – Frações solares anuais $\mathcal{F}$ obtidas com a metodologia Carta f para três localidades exemplos	62
Tabela 3.6 – Cálculo da área dos coletores pela Metodologia 2 para três localidades exemplo.....	63
Tabela 3.7 – Valores da fração solar anual $\mathcal{F}$ para comparação entre as metodologias	64
Tabela 3.8 – Exemplo de escolha de alternativa de menor tempo de retorno do investimento	65
Tabela A.1 – Valores estimados de fração solar pelo modelo simplificado a partir da distribuição de irradiação diária.....	78
Tabela B.1 – Características das distribuições das irradiações globais diárias no plano horizontal para vinte localidades do Brasil.....	80
Tabela C.1 – Exemplo de cálculo pela metodologia Carta f - Petrolina.....	86
Tabela C.2 – Exemplo de cálculo pela metodologia Carta f – Belo Horizonte	87

Tabela C.3 – Exemplo de cálculo pela metodologia Carta f – Santa Maria.....	88
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
CRESESB	Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
NBR	Norma Brasileira
NREL	<i>National Renewable Energy Laboratory</i>
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
SAS	Sistema de aquecimento solar
TMY	<i>Typical meteorological year</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A_c	Área do coletor [m ²]
C_A	Custo dos itens do SAS instalado dependentes da área de coletor [\$/m ²]
C_E	Custo dos itens do SAS instalado independentes da área de coletor [\$]
C_p	Calor específico da água igual a 4,18 [kJ/kg °C]
C_S	Custo total do sistema de aquecimento solar instalado [\$]
E_{util}	Demanda de energia útil diária [kWh/dia]
f	Fração solar mensal (parcela da necessidade energética atendida pelo sistema de aquecimento solar)
$\mathcal{F}$	Fração solar anual
F_R	Fator de eficiência de troca de calor do coletor
F'_R	Fator de eficiência de troca de calor do coletor até o reservatório
$Fr(ta)_n$	Coeficiente de eficiência do coletor conforme tabelado pelo INMETRO
$freq_{uso}$	Número total de utilizações do ponto de água quente por dia
L	Demanda energética mensal de aquecimento de água [J]
H_{dia}	Radiação total diária (direta + difusa) [kWh/m ²]
$\bar{H}_T$	Média mensal da radiação diária incidente na superfície inclinada do coletor por unidade de área [J/m ²]
N	Dias no mês
Q_{pu}	Vazão do ponto de utilização de água quente [m ³ /s]
T_{ref}	Temperatura de referência [°C]
$\bar{T}_a$	Temperatura média mensal ambiente [°C]

T_{aa}	Temperatura média anual ambiente [°C]
T_{arm}	Temperatura de armazenamento no reservatório térmico [°C]
T_{cons}	Temperatura de consumo da água [°C]
T_m	Temperatura de entrada no sistema da água, ou seja, a temperatura da rede [°C]
t_u	Tempo médio de uso diário do ponto de água quente [s]
T_w	Temperatura mínima aceitável da água quente [°C]
U_L	Coeficiente geral de perda do coletor [W/m ² °C]
U_S	Coeficiente de perda de calor do reservatório [W/°C]
V_{cons}	Volume de consumo diário [m ³]
V_R	Volume de armazenamento do reservatório térmico [m ³]
X	Adimensional do método Carta f proporcional à relação entre as perdas térmicas em relação à demanda energética
X_{c1}	Adimensional X corrigido para adaptá-lo à instalação de aquecimento exclusivo de água no método da Carta f
X_{c2}	Adimensional X corrigido para adaptá-lo à volume de reservatório com relação diferente de volume de 75 L/m ² de área coletora no método da Carta f
Y	Adimensional do método da Carta f proporcional à razão da absorção solar em relação à demanda térmica

Símbolos Gregos

β	Inclinação do coletor solar em relação ao plano horizontal [°]
---------	--

γ	Ângulo azimutal de orientação dos coletores solares em relação ao norte geográfico [°]
ρ	Massa específica da água igual a 1.000 [kg/m ³]
$\tau\alpha$	Adimensional produto transmitância – absorção do coletor
$\overline{\tau\alpha}$	Média mensal do produto transmitância – absorção do coletor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	Justificativa.....	13
1.2	Objetivos	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	A Norma NBR 15569.....	15
2.2	Metodologia de cálculo 1 - Carta f	16
2.3	Metodologia de cálculo 2.....	25
2.4	Potencial solarimétrico brasileiro.....	31
2.5	Coletores solares planos disponíveis no mercado brasileiro.....	38
2.6	Reservatórios térmicos disponíveis no mercado brasileiro	41
2.7	Propostas de sistemas térmicos disponíveis no mercado.....	42
2.8	Avaliação econômica	45
3	DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE COMPARATIVA.....	50
3.1	Análise crítica do texto da norma	50
3.2	Instalações típicas para três regiões brasileiras (escolha de carga térmica representativa).....	57
3.3	Dimensionamento da área de coletores para cada instalação e método	60
3.4	Utilização dos resultados de dimensionamento na seleção econômica de alternativas	64
3.5	Sugestões de melhorias às duas metodologias de dimensionamento	66
4	CONCLUSÕES.....	69
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICE A – Avaliação da fração solar a partir da distribuição diária da irradiação	74
	APÊNDICE B – Avaliação das distribuições diárias de irradiação no Brasil	79
	APÊNDICE C – Tabelas com exemplos de cálculos pela metodologia Carta f	86

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

A tecnologia de aquecimento solar de água com coletores planos aparenta uma simplicidade em seus elementos constituintes que oculta uma complexa interferência de fenômenos, a partir da própria fonte energética continuamente variável, que é a irradiação solar. Sob esta condição dinâmica de aporte energético, a conversão em calor e as várias transferências e dissipações de calor envolvidas provocam relações de grande complexidade para o dimensionamento destes aproveitamentos. Os técnicos envolvidos nesta tarefa são obrigados a recorrer a simplificações para oferecer sistemas razoavelmente dimensionados.

A norma técnica ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2008) sugere dois destes métodos simplificados para o dimensionamento de sistemas de aquecimento de água em circuito direto. Estes dois métodos possuem abordagens diferentes entre si, além de simplificações comuns que podem influenciar nos resultados obtidos com o uso destes métodos ou com a utilização de abordagens alternativas, que a própria norma permite.

1.2 Objetivos

O objetivo deste trabalho é oferecer uma comparação entre os métodos de cálculo recomendados pela norma ABNT (2008), explicitando suas características particulares e pontos em que as simplificações adotadas podem influenciar resultados obtidos na seleção dos componentes, particularmente os coletores solares e o reservatório térmico.

As metodologias demandam informações que estão além da norma, como o aporte energético, as temperaturas ambientais e os dados de desempenho dos coletores e reservatórios térmicos. Algumas alternativas de fonte de informação foram apresentadas e analisadas.

Entre os objetivos dos dimensionamentos, destaca-se o de fornecer elementos para uma avaliação econômica do empreendimento. Neste trabalho foi incluída uma revisão de técnicas de análise econômica de aproveitamentos solares, com destaque da importância da fração solar como grandeza central na análise econômica. Existem diferenças entre a forma que as frações solares são consideradas em cada metodologia e procurou-se aprofundar na compreensão da formação desta grandeza.

Para exemplificar a utilização das metodologias e comparar os resultados obtidos, foi incluído um cálculo comparativo, onde foram selecionadas localidades brasileiras julgadas representativas, para as quais foram dimensionados sistemas de aquecimento de água para uma demanda comum. Também foi incluída uma exemplificação de avaliação econômica a partir dos resultados obtidos neste dimensionamento.

Com esta comparação entre metodologias, é esperado delimitar os escopos de aplicação de cada método de forma mais explícita do que apresentado na própria norma, alertando para as limitações e incluindo recomendações de melhorias e de métodos alternativos, os quais a norma permite com o atributo genérico de “procedimentos tecnicamente reconhecidos”¹, sem apresentar alternativas.

¹ Tópico 9.1 da norma ABNT (2008) reproduzido em 2.1.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

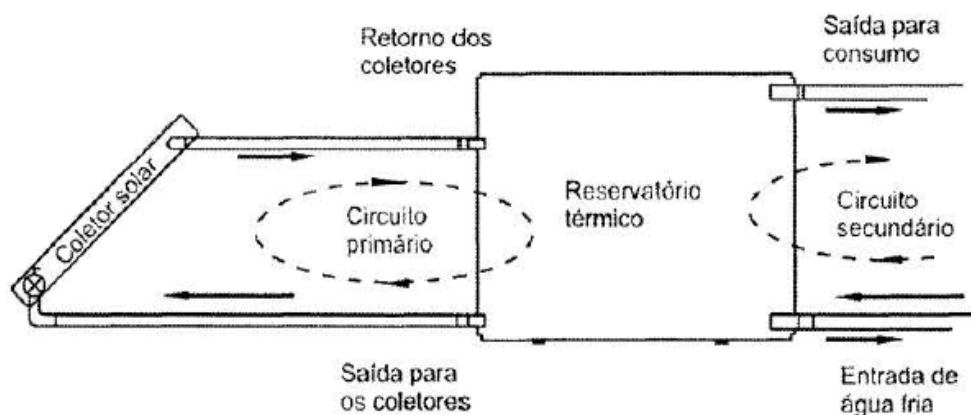
2.1 A Norma NBR 15569

A norma ABNT (2008) tem como escopo estabelecer os requisitos para os sistemas de aquecimento solar de água em circuito direto, com foco nos aspectos de concepção, dimensionamento, arranjo hidráulico, instalação e manutenção.

Esta norma apenas cobre sistemas com coletores planos, com ou sem reservatórios térmicos e com eventual sistema de aquecimento de água auxiliar. Explicitamente não são cobertos os sistemas de aquecimento de piscina nem os sistemas em circuito indireto. A norma não indica nenhuma restrição de tamanho das instalações para sua aplicabilidade.

A Figura 2.1 indica o esquema de um sistema de aquecimento solar conforme o escopo desta norma, reproduzida de seu Anexo A.

Figura 2.1 - Esquema evidenciando circuito primário e secundário do SAS



Fonte: Anexo A da ABNT (2008)

O texto principal desta norma cobre itens diversos como a concepção do sistema, os materiais, as considerações de instalação, operação, segurança e proteção e mesmo os requisitos gerais de documentação de projeto e manuais de operação.

A parte desta norma que este trabalho detalha e analisa é seu tópico de dimensionamento.

A norma indica em seu item 9.1 o objetivo do dimensionamento e suas duas sugestões apresentadas em anexo, com a abertura para que outros métodos sejam utilizados:

O objetivo do dimensionamento é determinar qual é a área coletora e o volume do sistema de armazenamento necessário para atender à demanda de energia útil de um determinado perfil de consumo.

O dimensionamento do SAS pode ser realizado por qualquer procedimento tecnicamente reconhecido. Métodos de cálculo são sugeridos no Anexo B [anexo da ABNT (2008)]

Apesar de que o dimensionamento não ser o foco principal da norma, os seus resultados serão aqueles que terão grande influência nos resultados de desempenho obtidos pelo sistema de aquecimento. Os dois itens a seguir detalham os métodos sugeridos no Anexo B da norma.

2.2 Metodologia de cálculo 1 - Carta f

A metodologia “Carta f ” apenas aparece como uma referência no anexo B.1 da norma ABNT (2008), aqui reproduzida:

Metodologia “Carta F” conforme Solar Heating Design by F-chart method, BECKMAN, W. A., Klein S. A. and DUFFIE, J. A., Wiley-Interscience, New York (1977).

A análise apresentada neste trabalho é baseada na apresentação do método na fonte DUFFIE e BECKMAN (2013), por ser o trabalho mais atualizado destes autores localizado com este método. Outros trabalhos considerados também estão indicados como referências a detalhes do método.

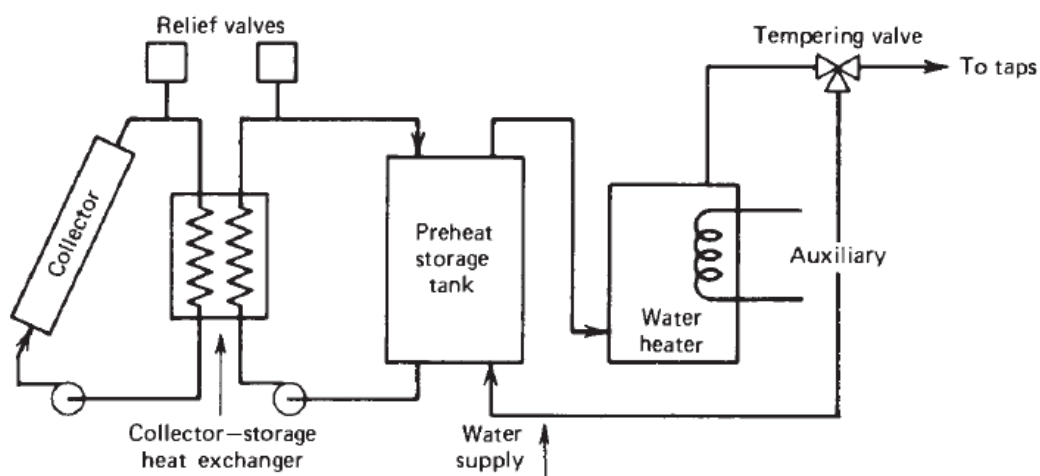
A metodologia Carta f é uma metodologia para avaliação da performance de sistemas de aquecimento de água em longos períodos, que é baseada na correlação de um grande número de simulações detalhadas. Os resultados destes experimentos numéricos permitiram obter a correlação de duas variáveis adimensionais, denominadas X e Y, com a fração de aproveitamento solar f . Esta

metodologia tem as referências KLEIN et al. (1976, 1977)² e BECKMAN et al. (1977)³, *apud* DUFFIE e BECKMAN (2013).

Este método foi desenvolvido para sistemas de aquecimento ambiental para edifícios, com os fluidos ar ou água utilizados nas placas coletoras, e para sistemas de aquecimento exclusivamente de água para consumo. Apenas este último desenvolvimento é relevante para o escopo da norma ABNT (2008) e é o único analisado nesta revisão.

As simulações para sistemas exclusivos de água consideraram o esquema reproduzido na Figura 2.2, que indica um sistema de aquecimento com circuito indireto ou fechado, ou seja, diferente daquele considerado no escopo da norma, reproduzido na Figura 2.1.

Figura 2.2 - Configuração para sistemas de aquecimento exclusivo de água considerado no método Carta *f*



Fonte: figura 20.2.3 em DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W. A. (2013)

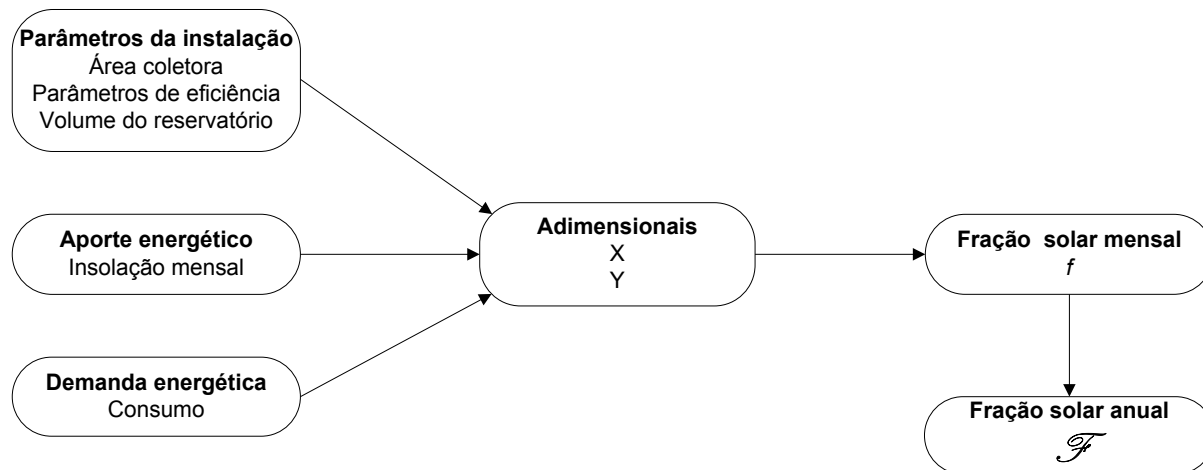
O parâmetro principal de entrada é a área total dos coletores. As demais variáveis são as características térmicas do coletor, a capacidade do reservatório, as vazões de fluido, a oferta energética solar, a demanda de água quente e o tamanho dos trocadores de calor, sendo que este elemento não aparece na configuração direta, mas foi utilizado nestas simulações.

² KLEIN et al. **Solar Energy** (1976) "A Design Procedure for Solar Heating Systems"
KLEIN et al. **Solar Energy** (1977) "A Design Procedure for Solar Air Heating Systems"

³ BECKMAN et al. **Solar Heating Design by the *f*-Chart Method**, Wiley-Interscience, New York (1977)

A Figura 2.3 mostra esquematicamente o caminho proposto pela metodologia Carta f .

Figura 2.3 - Esquema de cálculo da metodologia Carta f



Fonte: elaborado pelo autor

Centenas de simulações numéricas do comportamento térmico deste conjunto, com a variação dos parâmetros em faixas apropriadas para as instalações reais permitiram obter correlações entre as frações solares f atendidas pelo conjunto e os dois parâmetros adimensionais X e Y .

O parâmetro X é relacionado com as perdas térmicas em relação à demanda térmica. Quanto maior este parâmetro, menor será a fração solar f atendida com o conjunto. O adimensional X é calculado pela expressão (2.1).

$$X = \frac{A_c F'_R U_L (T_{ref} - \bar{T}_a) \Delta t}{L} \quad (2.1)$$

$$Y = \frac{A_c F'_R \bar{\tau} \bar{\alpha} \bar{H}_T N}{L} \quad (2.2)$$

Onde as seguintes variáveis são características da instalação:

$$A_c = \text{Área do coletor [m}^2 \text{]}$$

F'_R = Fator de eficiência de troca de calor do coletor até o reservatório

U_L = Coeficiente geral de perda do coletor [W/m² °C]

$\overline{\tau\alpha}$ = Média mensal do produto transmitância – absorção

E as seguintes variáveis são características do aporte e da demanda energética:

T_{ref} = Temperatura de referência (empírica) fixa (100°C) [°C]

$\bar{T}_a$ = Média mensal da temperatura ambiente [°C]

L = Total da demanda mensal de aquecimento de água [J]

$\bar{H}_T$ = Média mensal da radiação diária incidente na superfície inclinada do coletor por unidade de área [J/m²]

Δt = Total de segundos no mês

N = Dias no mês

A demanda mensal é calculada a partir do volume consumido e da elevação da temperatura da água fornecida da rede até a temperatura desejada. Todos estes valores podem sofrer variação mensal no cálculo, sendo que a temperatura da rede sofre a influência da variação da temperatura média do ambiente, cuja variação mensal é significativa nas regiões de maior latitude. Os demais valores podem sofrer variações conforme o uso do aproveitamento ou serem admitidos como constantes para utilizações relativamente uniformes.

A equação (2.3) indica o valor da demanda mensal onde os índices i correspondem à indicação que os valores utilizados podem variar para cada mês.

$$L_i = V_{cons_i} N_i \rho C_p (T_{w_i} - T_{m_i}) \quad (2.3)$$

Onde:

L = Total da demanda mensal de aquecimento de água [J]

V_{cons} = Volume de água consumido diariamente [m³]

N = Dias no mês

ρ = Massa específica da água igual a 1.000 [kg/m³]

C_p = Calor específico da água igual a 4.180 [J/kg °C]

T_w = Temperatura mínima aceitável da água quente [°C]

T_m = Temperatura de entrada no sistema da água, ou seja, a temperatura da rede [°C]

A norma ABNT (2008) indica na metodologia 2 um procedimento para o cálculo do volume de consumo diário, que também pode ser utilizado nesta metodologia. A temperatura da entrada no sistema T_m deverá ser avaliada a partir da temperatura média mensal do ambiente $\bar{T}_a$, pois é este último valor que tem maior disponibilidade; no exemplo apresentado no item 3.3 é apresentada uma proposta para esta estimativa.

Os coletores possuem em suas especificações os valores de $F_R U_L$ e $F_R (\tau \alpha)$, porém a equação indica $F'_R U_L$ e $F'_R (\overline{\tau \alpha})$, portanto algumas considerações e correções devem ser observadas, com se segue.

O fator F'_R leva em conta a eficiência de troca de calor do conjunto coletor até o reservatório, sendo que o elemento principal que afeta a eficiência térmica entre o coletor e o reservatório é a presença de trocador de calor, posicionado como indicado na Figura 2.2. Como as instalações cobertas pela norma NBR 15569 são apenas de circuito direto (Figura 2.1), ou seja, sem trocadores de calor, o fator F'_R se iguala ao fator F_R do coletor, se não forem consideradas as perdas na tubulação. Considerando que segundo a norma, estas tubulações devem receber isolamento térmico⁴, a aproximação $F'_R = F_R$ é adequada. Caso seja desejado refinar o cálculo para considerar as perdas da tubulação, DUFFIE e BECKMAN (2013) indica um

⁴ Item 7.6 de ABNT (2008).

roteiro para corrigir os fatores U_L e $\overline{\tau\alpha}$ do coletor para considerar também estas perdas⁵.

Os fatores de transmitância e de absorção são ambos dependentes do ângulo de incidência solar sobre o coletor, de forma que o valor médio mensal que aparece na fórmula (2.2) deve ser calculado como uma integração desta inclinação variável, tanto em termos horários como em termos da variação diária. Este cálculo deve considerar a parcela de insolação direta, que é apenas um dos componentes da irradiação total, pois a parcela de irradiação difusa não é afetada pelo ângulo de incidência. KLEIN (1976) *apud* e BECKMAN (2013) indica o valor da correção para $(\overline{\tau\alpha})/(\tau\alpha)$ o valor constante de 0,96 para os meses de inverno para coletores com apenas um vidro e com inclinações próximas a latitude mais 15°. Para coletores com dois vidros, pouco utilizados no Brasil, a sugestão deste fator de correção é 0,94.

As faixas de aplicação deste método estão indicadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Faixas dos parâmetros de projeto utilizadas no desenvolvimento da Carta f

Faixa utilizada
$0,6 \leq \overline{\tau\alpha} \leq 0,9$
$5 \leq F'_R A_c \leq 120 \text{ m}^2$
$2,1 \leq U_L \leq 8,3 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{C}$
$30 \leq \beta \leq 90^\circ$

Fonte: tabela 20.2.1 em DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W. A. (2013)

As inclinações usuais no Brasil são menores ou junto à extremidade inferior da faixa utilizada para β . A norma ABNT (2008) recomenda como inclinação ótima o valor do módulo da latitude mais 10°, que no Brasil corresponde em seu extremo sul ao valor de β igual a 44°.

O adimensional X é corrigido por dois fatores, sendo que o primeiro é um ajuste da equação (2.1) para sistemas exclusivos de aquecimento de água, que é o caso de interesse da norma ABNT (2008), ou seja, o adimensional X sempre é corrigido pela equação (2.4):

⁵ Item 10.3 de DUFFIE e BECKMAN (2013)

$$\frac{X_{c1}}{X} = \frac{11,6 + 1,18 T_w + 3,86 T_m - 2,32 \bar{T}_a}{100 - \bar{T}_a} \quad (2.4)$$

Onde:

T_w = Temperatura mínima aceitável da água quente [°C]

T_m = Temperatura de entrada no sistema, ou seja, a temperatura da rede [°C]

$\bar{T}_a$ = Média mensal da temperatura ambiente [°C]

A norma ABNT (2008) sugere para a temperatura de consumo o valor de 40°C⁶, que pode ser o valor adotado para T_w .

As simulações numéricas foram realizadas com a relação fixa entre o reservatório térmico e área dos coletores de 75 L/m². O segundo fator visa corrigir o adimensional X para relações de volumes diferentes, com a equação (2.5):

$$\frac{X_{c2}}{X_{c1}} = \left(\frac{V_{Rreal}}{V_{Rpadrão}} \right)^{-0,25} \quad (2.5)$$

Relação válida para $0,5 \leq \left(\frac{V_{real}}{V_{padrão}} \right) \leq 4,0$, onde:

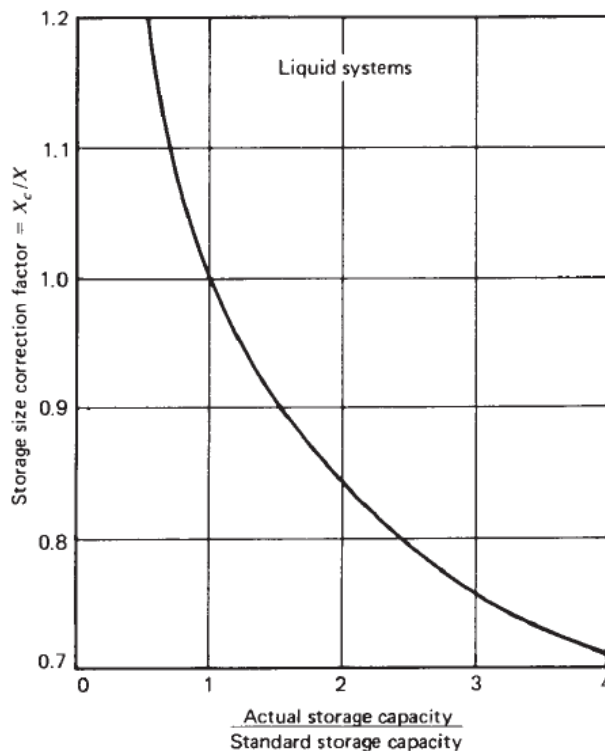
V_{Rreal} = Volume real do reservatório [m³]

$V_{Rpadrão}$ = Volume calculado com a relação padrão 75 L/m² x A_c [m³]

Esta segunda correção implica em um aumento de até 20% no valor do adimensional X , para o valor inferior de 0,5 na relação entre volumes e em uma diminuição de cerca de 30% para o valor superior de 4,0 nesta relação. A Figura 2.4 mostra graficamente esta relação. Recorda-se que o adimensional X é proporcional à relação de perdas térmicas em relação à carga e que quanto maior, menor será a fração solar calculada. Este efeito da variação do tamanho do reservatório na fração solar anual é mostrado na Figura 2.5.

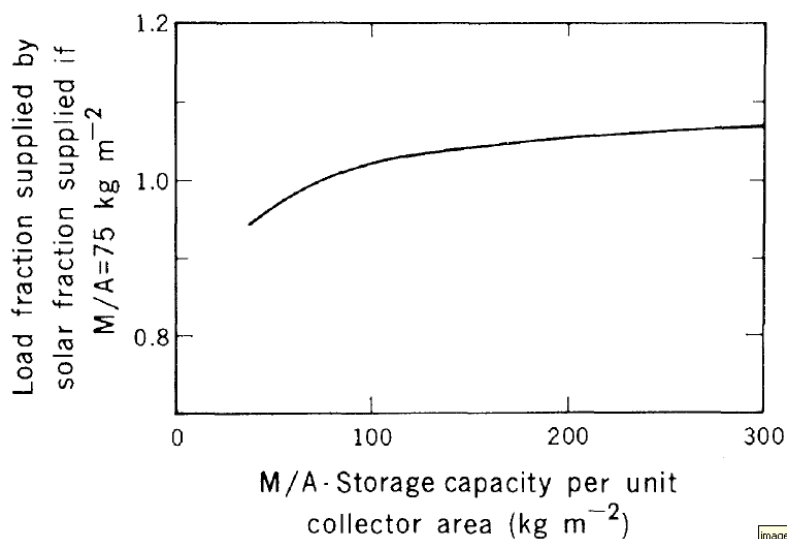
⁶ Esta recomendação é dada na metodologia 2 para temperatura de consumo.

Figura 2.4 - Correção do adimensional X em função da variação do volume do reservatório térmico



Fonte: figura 20.3.3 em DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W. A. (2013)

Figura 2.5 - Variação da fração solar anual com a variação do tamanho do reservatório térmico



Fonte: figura 8 em DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W. A. (1976)

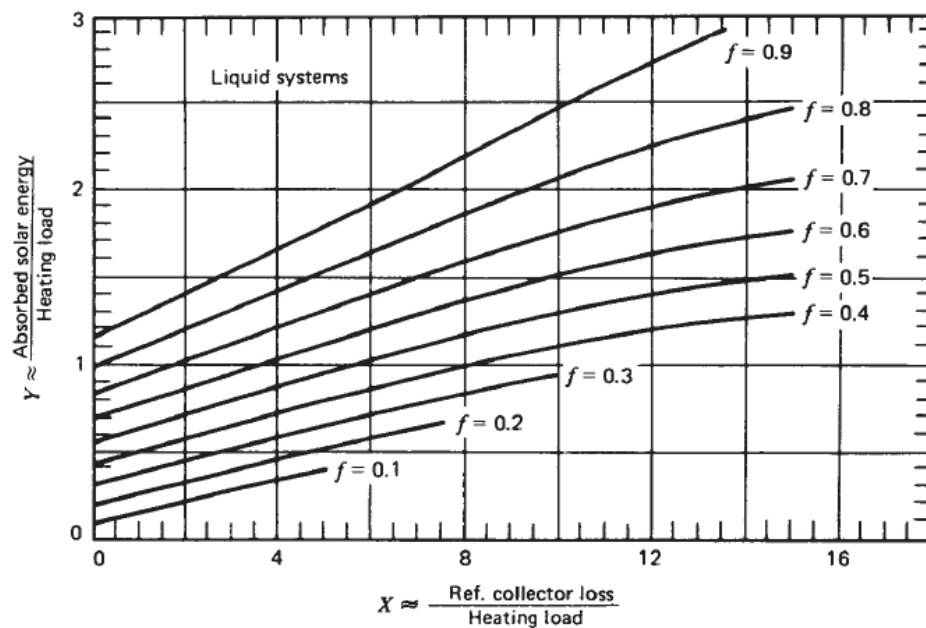
Com os adimensionais X e Y calculados conforme indicado acima, pode-se estimar a fração solar mensal pela equação (2.6):

$$f = 1,029Y - 0,065X - 0,245Y^2 + 0,0018X^2 + 0,0215Y^3 \quad (2.6)$$

O valor de X deve ser corrigido pelas equações (2.4) e (2.5), ou seja, utilizar o valor de X_{c2} .

A Figura 2.6 mostra esta relação e a equação (2.6) apenas deve ser utilizada nas faixas indicadas na figura. Caso seja necessário realizar extrapolação, a figura deve ser utilizada, não a equação, que foi ajustada apenas nas faixas indicadas.

Figura 2.6 - Carta f para líquidos



Fonte: figura 20.3.1 em DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W. A. (2013)

Os fatores das frações solares mensais f calculados pela equação (2.6) podem ser combinados para determinar a fração solar anual $\mathcal{F}$, pela média ponderada pela carga mensal, como explicitado na equação (2.7):

$$\mathcal{F} = \frac{\sum f_i L_i}{\sum L_i} \quad (2.7)$$

O método da Carta f é um método baseado nos valores médios de oferta energética solar, que por si só apresentam variações significativas em relação aos valores observados em dado período. Estes valores médios foram aplicados em uma grande quantidade de simulações numéricas, que permitiram obter a correlação numérica para a estimativa da performance do sistema de aquecimento solar. Conforme

analisado por DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W. A. (2013), as estimativas mensais apresentam maiores desvios em relação aos valores verificados individualmente por outros métodos, porém as estimativas anuais permitem uma boa avaliação dos efeitos da variação dos parâmetros de projeto no aproveitamento energético do sistema.

Para efeitos dos sistemas de aquecimento solares instalados no Brasil, que é o escopo da ABNT (2008), é importante observar o quanto os valores e arranjos utilizados originalmente no método se aproximam das condições brasileiras. Esta análise está apresentada no item 3.1.

2.3 Metodologia de cálculo 2

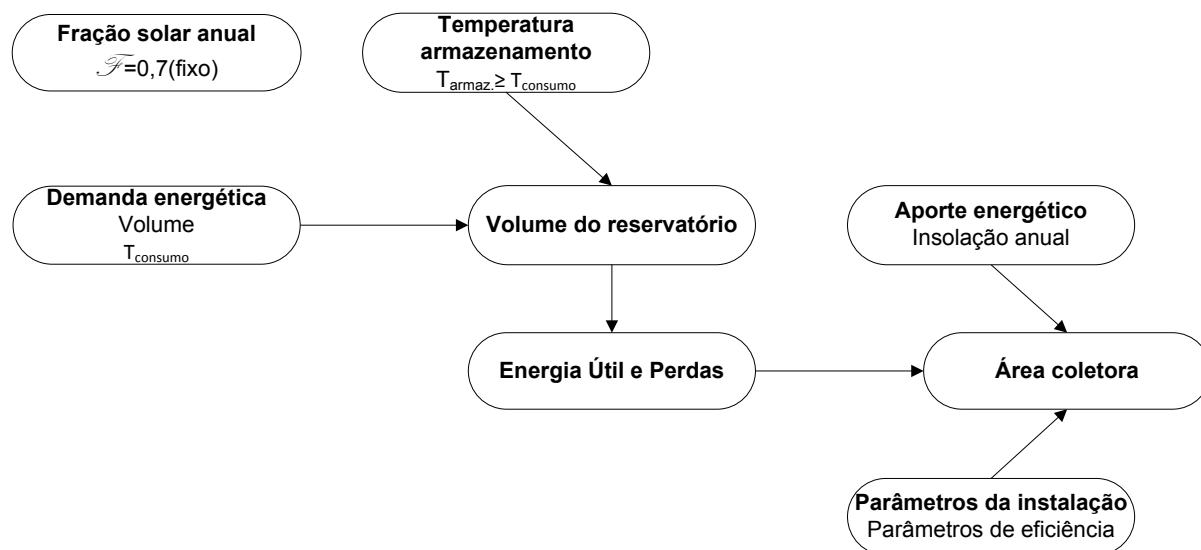
A metodologia de cálculo 2 é apresentada com um roteiro mais simplificado e escopo mais restrito quando comparado com a metodologia Carta f , vista no item anterior, pois esta se destina apenas aos sistemas de aquecimento solar das residências unifamiliares.

O cálculo apresenta a fração solar anual $\mathcal{F}$ de 0,7 como um valor prefixado.

O parâmetro inicial é a demanda energética, que determina o volume e temperatura de consumo. Os demais parâmetros considerados são a temperatura de armazenamento e a ambiente, as características energéticas dos coletores e do reservatório e a oferta energética. Com a temperatura de armazenamento adotada, é calculado o volume de armazenamento e deste volume, a necessidade energética a ser atendida pelos coletores. O resultado final deste método é a área dos coletores.

A Figura 2.7 mostra esquematicamente o roteiro de cálculo da metodologia 2.

Figura 2.7 - Esquema de cálculo da metodologia 2



Fonte: elaborado pelo autor

O roteiro detalhado da metodologia 2 é apresentado como etapas de dimensionamento⁷:

a) Cálculo do volume de consumo, levando-se em consideração a vazão das peças de utilização e uma tabela oferecida pela norma, reproduzida na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Consumo de pontos de utilização de água quente

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

Fonte: anexo C da norma ABNT (2008)

⁷ Itemização igual à utilizada na norma ABNT (2008)

O volume de consumo é calculado pela equação (2.8)

$$V_{cons} = \sum (Q_{pu} t_u freq_{uso}) \quad (2.8)$$

Onde:

V_{cons} = Volume de água consumido diariamente [m³]

Q_{pu} = Vazão do ponto de água quente [m³/s]

t_u = Tempo médio de uso diário do ponto de água quente [s]

$freq_{uso}$ = Número total de utilizações do ponto de água quente por dia

O cálculo do volume de consumo proposto na metodologia 2 pode ser utilizado também na Carta *f*, uma vez a metodologia utiliza a demanda como dado de entrada.

b) Cálculo do volume do reservatório térmico

$$V_R = \frac{V_{cons} (T_{cons} - T_{aa})}{T_{arm} - T_{aa}} \quad (2.9)$$

Onde:

V_R = Volume de armazenamento do reservatório térmico [m³]

V_{cons} = Volume de consumo diário [m³]

T_{cons} = Temperatura de consumo [°C]

T_{aa} = Temperatura ambiente média anual [°C]

T_{arm} = Temperatura de armazenamento no reservatório térmico [°C]

A norma ABNT (2008) apresenta algumas relações sugeridas para os valores a serem utilizados na equação (2.9):

$$V_R \geq 0,75 V_{cons}$$

$$T_{cons} = 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{arm} \geq T_{cons}$$

Uma sugestão adicional indica que, caso seja adotado temperatura de armazenamento acima de 60 °C, deve-se investigar a característica de eficiência do coletor solar.

c) Cálculo da demanda energética útil é indicado pela expressão (2.10):

$$E_{util} = \frac{V_R \rho C_p (T_{arm} - T_{aa})}{3600} \quad (2.10)$$

Onde:

E_{util} = Energia útil diária [kWh/dia]

V_R = Volume de armazenamento no reservatório térmico [m³]

ρ = Massa específica da água igual a 1.000 [kg/m³]

C_p = Calor específico da água igual a 4,18 [kJ/kg °C]

T_{arm} = Temperatura de armazenamento no reservatório térmico [°C]

T_{aa} = Temperatura ambiente média anual [°C]

d) Cálculo da área coletora

A área coletora é determinada pela demanda energética útil calculada na etapa anterior, pela oferta energética, pelos parâmetros energéticos de aproveitamento dos coletores e pelas perdas térmicas dos circuitos primários e secundários.

A oferta energética é avaliada pela irradiação global média anual do local de instalação dos coletores I_G . A norma ABNT (2008, anexo E) referencia PEREIRA, E. B. et al. (2006), mas recomenda que “os valores de irradiação sejam obtidos através dos órgãos competentes”. Nesse anexo encontramos uma reprodução do mapa presente na obra referenciada, da radiação solar global horizontal, média anual.

Os parâmetros energéticos dos coletores são avaliados pela produção média diária de energia específica do coletor solar $PPMDEE$, determinado pela equação (2.11) e pelo fator de correção para a inclinação e orientação do coletor FC_{instal} , determinado pela equação (2.12).

$$PPMDEE = 4,901 (F_R \tau \alpha - 0,0249 F_R U_L) \quad (2.11)$$

Onde:

$PPMDEE$ = Produção média diária de energia específica do coletor solar
[kWh/(m²dia)]

F_R = Fator de eficiência de troca de calor do coletor

$\tau \alpha$ = Adimensional produto transmitância – absorção do coletor

U_L = Coeficiente geral de perda do coletor [W/(m² °C)]⁸

$$FC_{instal} = \frac{1}{1 - [1,2 \cdot 10^{-4} (\beta - \beta_{ótimo})^2 + 3,5 \cdot 10^{-5} \gamma^2]} \quad (2.12)$$

Onde:

FC_{instal} = Adimensional fator de correção para inclinação e orientação do coletor solar

β = Inclinação do coletor solar em relação ao plano horizontal
[°]

$\beta_{ótimo}$ = Inclinação ótima do coletor solar para o local de instalação
[°]

γ = Ângulo de orientação dos coletores solares em relação ao norte geográfico [°]

⁸ A norma ABNT (2008) indica $F_{r_{UL}}$ como um adimensional. Neste trabalho, esta informação foi considerada como uma imprecisão da norma, pois U_L possui a unidade indicada [W/(m² °C)]

Para $\beta_{ótimo}$ a metodologia 2 sugere o valor em módulo da latitude mais 10° .

A soma das perdas térmicas dos circuitos primário e secundário é calculada como 15% da energia útil, conforme explicitado na equação (2.13).

$$E_{perdas} = 0,15 E_{util} \quad (2.13)$$

Onde:

E_{perdas} = Soma das perdas térmicas dos circuitos primário e secundário [kWh/dia]

E_{util} = Energia útil diária [kWh/dia]

A área do coletor é determinada pela equação (2.14), que reúne os resultados das equações anteriores E_{util} (2.10), E_{perdas} (2.13), FC_{instal} (2.12), $PPMDEE$ (2.12) e I_G , obtido de fonte externa.

$$A_c = \frac{4,901 (E_{util} + E_{perdas}) FC_{instal}}{PMDEE \cdot I_G} \quad (2.14)$$

Onde:

A_c = Área dos coletores solares [m²]

E_{util} = Energia útil diária [kWh/dia]

E_{perdas} = Soma das perdas térmicas dos circuitos primário e secundário [kWh/dia]

FC_{instal} = Adimensional fator de correção para inclinação e orientação do coletor solar

$PPMDEE$ = Produção média diária de energia específica do coletor solar [kWh/(m² dia)]

I_G = Irradiação global média anual do local de instalação dos coletores [kWh/(m² dia)]

A norma indica I_G com o texto acima, sem deixar claro se esta média anual refere-se ao plano horizontal ou inclinado e indica em seu anexo E o mapa com os valores de irradiação do plano horizontal. Uma análise na equação (2.14) indica que o valor de I_G a ser utilizado é o da irradiação do plano inclinado do coletor; esta conclusão é retomada e explicada no item 3.1.

2.4 Potencial solarimétrico brasileiro

As duas metodologias analisadas utilizam o valor do aporte energético sobre os coletores a partir de levantamentos médios que podem estar disponíveis em várias fontes de dados. A metodologia Carta f utiliza os valores médios mensais do aporte diário, enquanto a metodologia 2 utiliza o valor médio anual. Além do aporte energético, outra informação de interesse é a temperatura média ambiente, que também é utilizada nas duas metodologias; a disponibilidade desta informação também é ressaltada nestas referências e uma referência adicional é citada como fonte da temperatura média do ambiente.

Quatro referências de avaliação do potencial solarimétrico foram analisadas:

- TIBA, C. et al. (2000)
- PEREIRA, E. B. et al. (2006): é a fonte indicada na norma ABNT (2008) em seus anexos D e E, para temperatura média anual e radiação global diária, respectivamente.
- National Renewable Energy Laboratory (2014): base de dados horária em pontos selecionados do Brasil.
- CRESESB (2015)

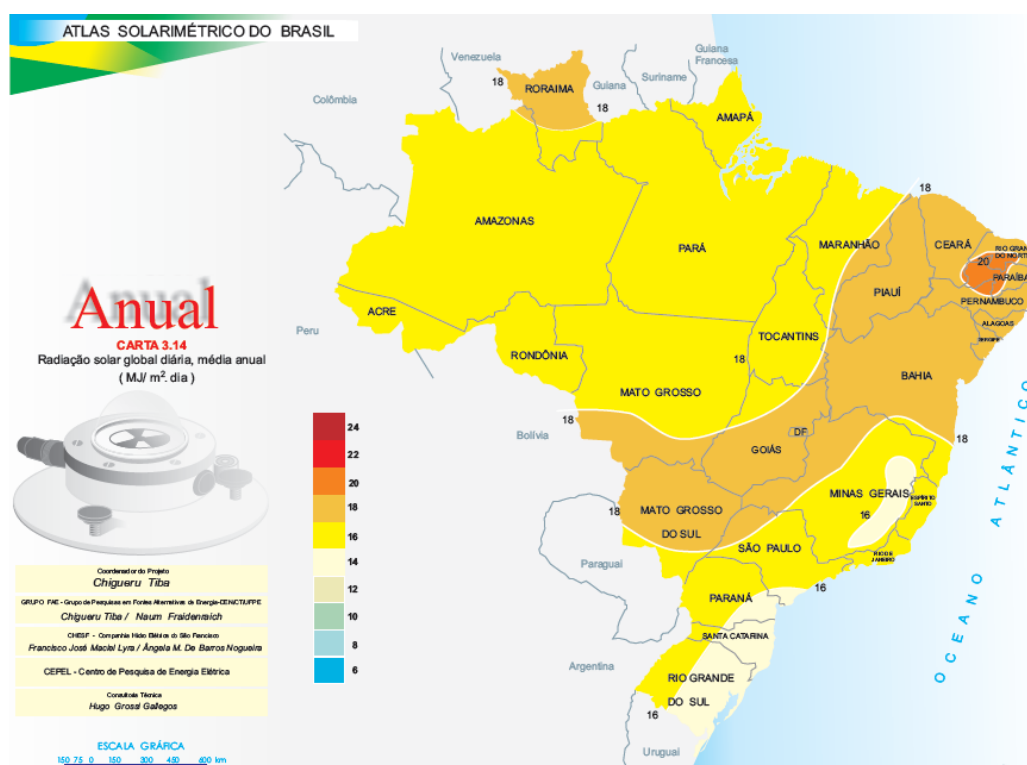
TIBA, C. et al. (2000) é uma publicação criada a partir de uma base de dados que reuniu muitos trabalhos anteriores e disponibilizou estes dados em aplicativos e na Internet. Na publicação são apresentados mapas da radiação solar global diária, médias mensais e a média anual, este último reproduzido na Figura 2.8.

Os dados deste levantamento são disponibilizados em uma base de dados e um programa para acessá-los também é fornecido no mesmo sítio indicado na

referência. A base de dados fornecida é no formato MS Access⁹, que permite sua abertura e análise, onde se pode verificar que os dados armazenados são aqueles apresentados pelo aplicativo, ou seja, os valores estatísticos mensais e anuais. Não contém os valores horários ou diários originais que geraram estas estatísticas e que poderiam ser utilizados em uma simulação diária.

Por ser uma referência que conta com os valores mensais, ela pode ser considerada para utilização nas duas metodologias, porém esse trabalho não apresenta os valores corrigidos para o plano inclinado, que é o valor de interesse. Isto exige a aplicação de correções para os valores disponíveis, que são apenas as radiações solares no plano horizontal. Esta referência não fornece informações de temperatura média ambiental.

Figura 2.8 - Radiação solar global horizontal diária, média anual [MJ/(m².dia)]



Fonte: TIBA, C. et al. (2000)

PEREIRA, E. B. et al. (2006) é um estudo abrangente da disponibilidade de recursos solares no território brasileiro, baseado em levantamentos por satélites no período de uma década, entre 1995 e 2005.

⁹ Banco de dados para microcomputadores da Microsoft

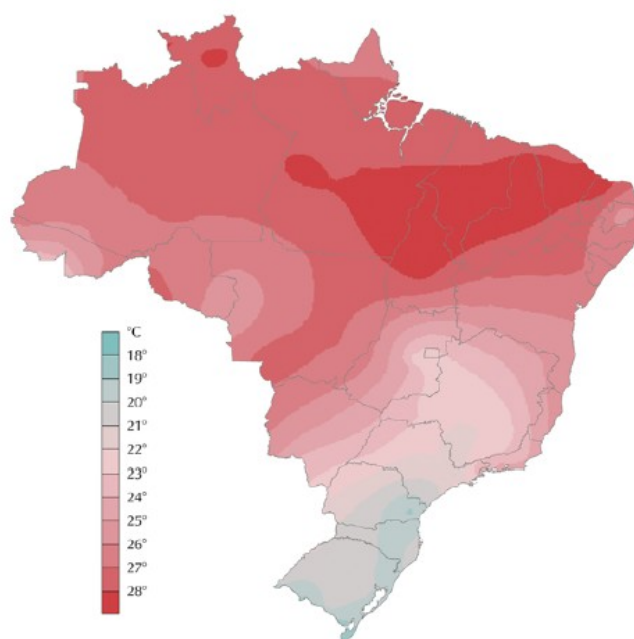
Este estudo apresenta mapas de interesse às metodologias de dimensionamento de coletores solares, em particular os mapas reproduzidos na Figura 2.9 a Figura 2.11. O mapa da Figura 2.9 refere-se à temperatura média anual e é reproduzido no anexo D da norma ABNT (2008). O mapa indicado na Figura 2.10 é o equivalente nesta referência ao apresentado na Figura 2.8 e é reproduzido como anexo E na norma ABNT (2008). Na Figura 2.11, o plano inclinado refere-se à inclinação igual à latitude.

Os mapas indicados na Figura 2.10 e Figura 2.11 também são apresentados para períodos menores, de três meses cada.

Como esse trabalho apresenta apenas os valores anuais e trimestrais, ele é uma fonte mais apropriada à metodologia 2, que utiliza o valor médio anual. Para utilização na metodologia Carta *f*, será necessário adotar valores iguais para o aporte energético nos meses de cada trimestre. No caso da temperatura ambiente, apenas são fornecidos as médias anuais, ou seja, as normais climatológicas.

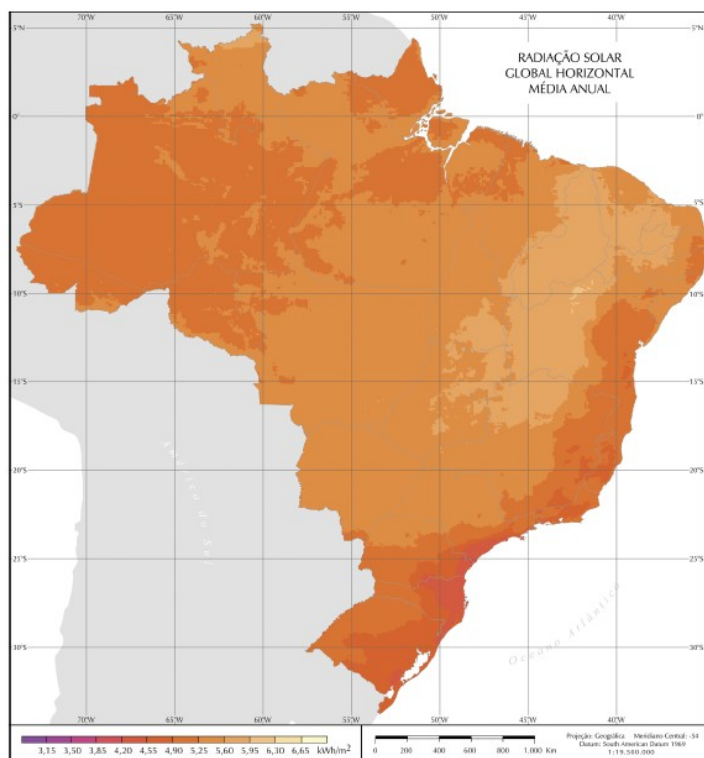
Além do plano horizontal, a única inclinação disponível é a de valor igual ao módulo da latitude do ponto. Para instalações com valores de inclinação dos coletores diferentes, a correção também é necessária.

Figura 2.9 - Temperatura média anual nas regiões brasileiras



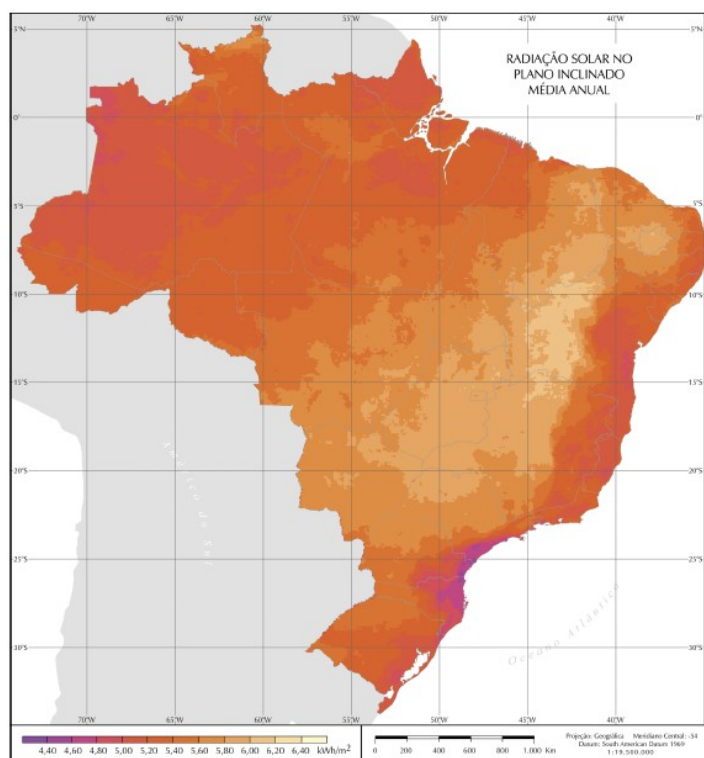
Fonte: PEREIRA, E. B. et al. (2006)

Figura 2.10 - Radiação solar global horizontal diária, média anual [kWh/(m².dia)]



Fonte: PEREIRA, E. B. et al. (2006)

Figura 2.11 - Radiação solar global no plano inclinado diária, média anual [kWh/(m².dia)]

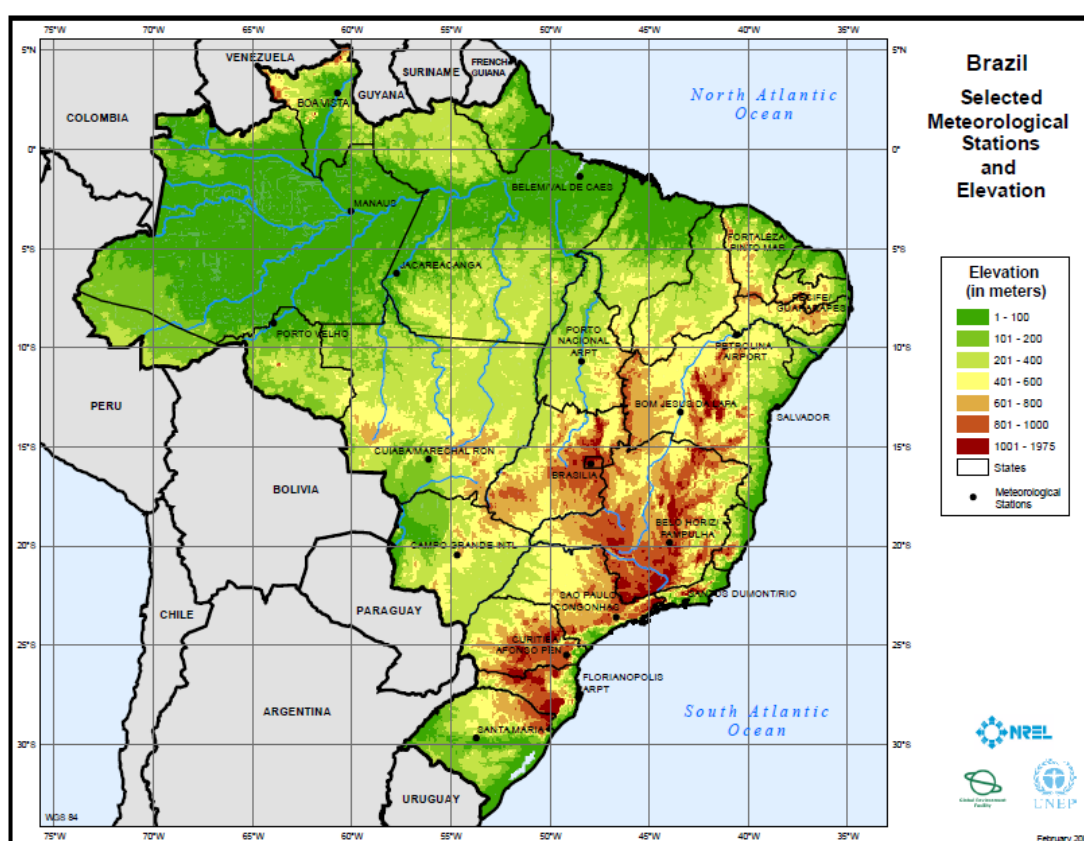


Fonte: PEREIRA, E. B. et al. (2006)

No final da publicação são apresentados valores relativos à variabilidade e tendências das estatísticas apresentadas, porém esta análise de variabilidade e tendência refere-se apenas aos valores médios apresentados, ou seja, às variações observadas das médias trimestrais e anuais ao longo dos anos de levantamento. Nenhuma informação no documento é apresentada das variabilidades diárias em relação aos valores médios.

NREL (2014) é um sítio na Internet que disponibiliza um arquivo compactado que contém arquivos formatados com dados meteorológicos e de disponibilidade energética a cada hora para vinte localidades selecionadas no Brasil e indicados na Figura 2.12. O período disponibilizado é entre 1 de janeiro de 1973 e 31 de julho de 2002 para a maioria destes pontos, sendo apenas um ponto com um período inferior¹⁰.

Figura 2.12 - Pontos selecionados com dados solarimétricos horários



Fonte: NREL.(2014)

¹⁰ Porto Velho, Rondônia, cujos dados estão entre 01/11/1982 e 31/07/2002, 7.213 dias

Entre as várias grandezas oferecidas, de particular interesse para este trabalho é a radiação global no plano horizontal, dada pela quantidade total de radiação direta e difusa em Wh/m^2 recebidos no plano horizontal em cada hora. Estes valores foram utilizados no Anexo B. A temperatura ambiente também é uma grandeza fornecida de interesse e cujos valores podem ser utilizados nas metodologias avaliadas neste trabalho como insumo na determinação dos valores médios mensais, utilizados na Carta *f*, ou da média anual, utilizada na metodologia 2.

Junto com os arquivos anuais do período para cada localidade, um arquivo de dados adicional apresenta os valores do ano meteorológico típico (TMY – *typical meteorological year*).

Além dos arquivos de dados, são fornecidos outros arquivos de apoio, tais como planilhas preparadas para a leitura dos dados e outros arquivos descritivos do material.

Esta base de dados é oferecida com a finalidade de permitir simulações numéricas, uma vez que para cada localidade é disponibilizado um total de 24 valores, correspondente aos valores horários, para os 10.804 dias do período coberto, totalizando 259.296 valores para cada grandeza para cada uma das 20 localidades selecionadas.

CRESESB (2015) é um sítio que disponibiliza os valores do banco de dados *Valores Medios de Irradiación Solar Sobre Suelo Horizontal do Centro de Estudos de la Energia Solar*¹¹ em uma plataforma denominada SunData, disponível na Internet no endereço indicado na referência. Atualmente esta plataforma está em sua versão 2.0.

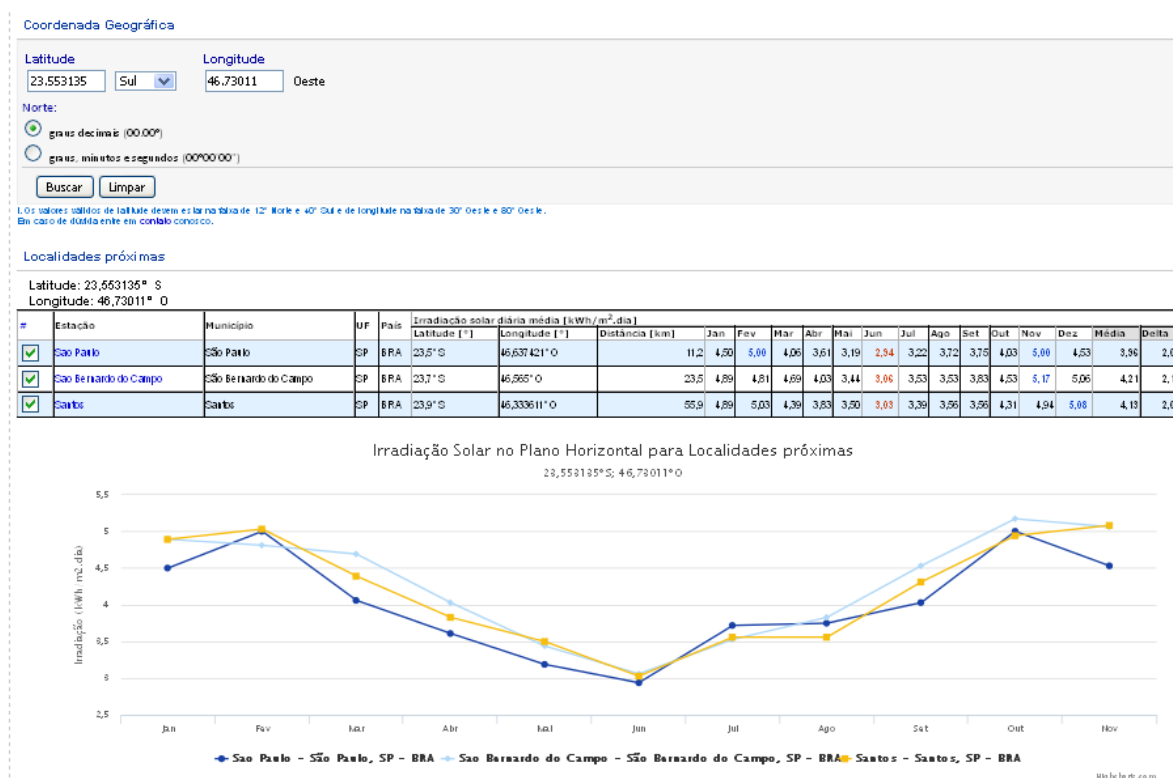
Os dados são fornecidos a partir da entrada das coordenadas do ponto que se deseja informações. Como resultado, são apresentados os dados de pelo menos três estações mais próximas ao ponto indicado. São fornecidos os valores mensais de radiação média diária, o valor médio anual e a diferença entre os maiores e menores valores mensais, para quatro inclinações: plano horizontal, inclinação igual à latitude, inclinação que fornece o maior valor médio anual e a inclinação com o

¹¹ CENSOLAR, 1993. *Valores Medios de Irradiación Solar Sobre Suelo Horizontal* - Centro de Estudios de la Energia Solar. Sevilla.

menor mínimo anual. As inclinações são sempre apresentadas com valores inteiros de graus e com a inclinação mínima de 10° , mesmo que os valores calculados sejam inferiores. Os resultados são apresentados em tabelas e gráficos. A Figura 2.13 mostra uma tela do aplicativo como exemplo dos resultados obtidos quando foram inseridas as coordenadas da secretaria do PECE.

Por fornecer os valores mensais, esta referência é apropriada para as duas metodologias. Como são fornecidas quatro inclinações, ela é particularmente útil para orientar o projetista na escolha da inclinação dos coletores e, caso os coletores sejam instalados em inclinação diferente daquelas fornecidas, uma interpolação pode ser realizada entre as inclinações mais próximas fornecidas. Esta referência não fornece valores de temperatura ambiente das localidades apresentadas.

Figura 2.13 - Exemplo de resultado do aplicativo SunData



Fonte: CRESESB (2015) – figura ilustrativa, valores irrelevantes para o contexto deste trabalho.

Como exemplificação da comparação entre as quatro fontes de dados, a Tabela 2.3 apresenta a radiação solar global diária média anual no plano horizontal, obtida para a localização da secretaria do PECE, nas quatro referências analisadas e uma comparação destes resultados em relação ao valor médio entre elas.

Tabela 2.3 – Comparação entre valores de radiação média anual no plano horizontal de quatro fontes de dados para uma localização exemplo

Fonte	Radiação kWh/(m ² dia)	Variação em relação à média	Apresentado como
TIBA, C. et al. (2000)	4,44	-2%	16 MJ/(m ² dia)
PEREIRA, E. B. et al. (2006)	5,08	13%	4,90 a 5,25
NREL (2014)	4,56	1%	média dos dados de São Paulo
CRESESB (2015)	3,96	-12%	
Média	4,49		

Fonte: elaborado pelo autor

Apenas NREL (2014) apresenta dados que permitem levantar as características da variação diária, ou seja, de como é a distribuição dos dados diários em relação aos valores médios. A utilidade desta informação é tratada no item 3.1 e permitiu as análises detalhadas nos Apêndices A e B.

CLIMATE-DATA.ORG (2012) é apresentado como uma referência adicional de utilidade para obtenção dos valores médios de temperatura ambiente. Esta referência apresenta de forma organizada os valores de temperatura média para várias cidades do Brasil.

2.5 Coletores solares planos disponíveis no mercado brasileiro

As escolhas dos coletores devem ser realizadas pelos projetistas a partir dos valores disponíveis no mercado. Recordar-se que na metodologia Carta *f*, a área de coletores e os dados de eficiência energética são dados de entrada. Na metodologia 2, a área é o resultado final, porém o projetista deverá utilizar o valor calculado como referência para a escolha de coletores reais.

Todos coletores solares planos disponíveis no mercado brasileiro devem ser certificados no INMETRO (2008), que segue principalmente a norma NBR 15747,

Sistemas solares térmicos e seus componentes – coletores solares, particularmente a parte dois desta norma: Métodos de ensaio.

O INMETRO mantém em seu sítio documentos com a lista atualizada dos coletores certificados e os parâmetros energéticos de rendimento obtidos. O INMETRO (2016a) é um exemplo destes documentos e seu conteúdo inicial está reproduzido na Figura 2.14. Esta lista, contendo os coletores de banho e piscina, traz 76 coletores no total, de 14 empresas diferentes, com data de atualização de 13/06/2016.

Além destes coletores, em INMETRO (2016b) são listados mais 22 modelos de sistemas acoplados, de 10 empresas diferentes, também com data de atualização de 13/06/2016.

Figura 2.14 – Amostra da lista com os coletores solares certificados pelo INMETRO



INMETRO

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA

PSE- Coletor Solar aplicação Banho e Piscina

Tabela de Consumo / Eficiência Energética

Empresas: 14
Marcas: 15
Modelos Etiquetados: 76

Rendimento-Banho (PHEa)

80,0 < PHEa	A
70,0 < PHEa ≤ 80,0	B
60,0 < PHEa ≤ 70,0	C
50,0 < PHEa ≤ 60,0	D
40,0 < PHEa ≤ 50,0	E

Rendimento-Piscina (PHEa)

80,0 < PHEa	A
70,0 < PHEa ≤ 80,0	B
60,0 < PHEa ≤ 70,0	C
50,0 < PHEa ≤ 60,0	D
40,0 < PHEa ≤ 50,0	E



PROGRAMA
BRASILEIRO DE
ETIQUETAGEM

Data de Atualização: 13/06/2016

Produção de Energia Mensal (PHEa)
Específica em m² (90Wh/m².m²)

Empresa	Marca	Modelo	Aplicação	Pressão de Funcionamento		Área Externa do Coletor m²	Produção Média mensal de Energia		Eficiência Energética Média(%)	Classificação	Material Superfície Absorvedora	Fijação	FtUL	Número do Registro de Objeto	Data de Concessão	Data do cancelamento
				(KPa)	(mca)		Por Coletor (Wh/m².m²)	Por m² (Específico) (Wh/m².m²)								
AECOSOL, Ma Energia Limpa LTDA	Aecocol MS	Aecocol 270 BP	Banho	90	5,00	3,164	254,67	90,49	64,9	A	Vidro de Borossilicato	0,752	0,718	009013/2015	25/9/2015	6/1/2016
AECOSOL, Ma Energia Limpa LTDA	Aecocol MS	Aecocol 30 BP	Banho	90	5,00	2,786	223,99	80,40	64,8	A	Vidro de Borossilicato	0,540	3,785	009011/2015	25/9/2015	
AECOSOL, Ma Energia Limpa LTDA	Aecocol MS	Aecocol 30 EP	Banho	90	5,00	3,180	270,31	86,87	72,1	A	Vidro de Borossilicato	0,962	2,184	009010/2015	25/9/2015	
AECOSOL, Ma Energia Limpa LTDA	Aecocol MS	Aecocol 40 EP	Banho	90	5,00	5,509	375,79	68,21	72,1	C	Vidro de Borossilicato	0,962	2,184	009010/2015	25/9/2015	
AECOSOL, Ma Energia Limpa LTDA	Aecocol MS	Aecocol 50 EP	Banho	90	5,00	6,919	472,85	68,34	72,1	C	Vidro de Borossilicato	0,962	2,184	009010/2015	25/9/2015	
A.C.F Indústria e Comercio Ltda	ACF	10090 Coletor Solar Plano	Piscina	98	10,00	0,966	84,90	87,89	62,83	C	Polipropileno	0,787	15,863	004395/2015	17/3/2016	
A.C.F Indústria e Comercio Ltda	ACF	10003 Coletor Solar Plano	Piscina	98	10,00	1,426	124,90	87,89	62,83	C	Polipropileno	0,787	15,863	004395/2015	17/3/2016	
A.C.F Indústria e Comercio Ltda	ACF	10094 Coletor Solar Plano	Piscina	98	10,00	1,886	164,90	87,43	62,83	C	Polipropileno	0,787	15,863	004395/2015	17/3/2016	
BOSCH TERMOTECNOLOGIA, LIMITADA	BOSCH	FCC220-2V	Banho	600	60,00	2,077	190,90	96,24	71,06	A	Alumínio	0,831	3,71	001984/2016	8/4/2016	
CRISTIANO EDUARDO DALESSANDRO - ME	Eco Aquecedores	ECO-MD-10	Banho	90	5,00	1,412	113,56	80,42	64,8	A	Vidro de Borossilicato	0,540	3,785	002278/2014	4/4/2014	
CRISTIANO EDUARDO DALESSANDRO - ME	Eco Aquecedores	ECO-ESP-15	Banho	90	5,00	4,124	281,30	68,21	64,8	C	Vidro de Borossilicato	0,962	2,184	002277/2014	4/4/2014	6/1/2016
CRISTIANO EDUARDO DALESSANDRO - ME	Eco Aquecedores	ECO-MD-15	Banho	90	5,00	2,134	170,30	79,80	64,8	B	Vidro de Borossilicato	0,540	3,785	002278/2014	4/4/2014	

Fonte: INMETRO (2016a) – figura ilustrativa, valores irrelevantes para o contexto deste trabalho.

Nestas listas de coletores é dado particular destaque à produção média mensal de energia, considerando que para o consumidor é o valor de interesse, pois está associada à expectativa de economia que será obtida com a instalação destes coletores, por exemplo, na fatura mensal de energia elétrica, supondo uma

substituição desta fonte. O valor específico, ou seja, o valor da produção média mensal de energia por metro quadrado é a grandeza utilizada para classificar o desempenho dos coletores em uma escala padronizada de categorias de A a E, sendo que a categoria A habilita o coletor receber um selo adicional de economia de energia do PROCEL, conforme detalhado em PROCEL (2010).

A Tabela 2.4 apresenta os valores utilizados na categorização dos coletores de banho quanto à eficiência energética. Estas faixas são aplicáveis tanto aos coletores oferecidos em separado como para os modelos acoplados com reservatórios.

Tabela 2.4 – Classificação INMETRO de eficiência energética dos coletores solares de banho

Classificação	Faixa de produção média mensal específica
	kWh/(mês m ²)
A	$80,3 < PMEe$
B	$73,3 < PMEe \leq 80,3$
C	$66,3 < PMEe \leq 73,3$
D	$59,3 < PMEe \leq 66,3$
E	$52,3 < PMEe \leq 59,3$

Fonte: INMETRO (2016a) e INMETRO (2016b)

Para efeito do dimensionamento da instalação utilizando as metodologias da ABNT (2008) analisadas neste trabalho, os valores de maior interesse são a Área externa do coletor, $Fr(ta)_n$ e $FrUL$, que serão utilizados nas formulações apresentadas nos itens 2.2 e 2.3 respectivamente como A_c , $F_R \tau \alpha$ e $F_R U_L$. Apenas a tabela para coletores convencionais desacoplados contam com os valores de $Fr(ta)_n$ e $FrUL$, ou seja, na tabela de coletores acoplados estes valores não estão disponíveis e o projetista deve contar com outra fonte de informação para poder utilizar as metodologias da norma.

Os coletores solares oferecidos no mercado variam em áreas externas de 0,966 m² a 8,553 m² por módulo, sendo que os maiores são os de tubo a vácuo. Os adimensionais de absorção $Fr(ta)_n$ variam entre 0,472 e 0,831. O coeficiente de perdas térmicas $FrUL$ tem uma variação entre 1,368 W/(m²°C) e 5,361 W/(m²°C).

2.6 Reservatórios térmicos disponíveis no mercado brasileiro

A mesma portaria que regulamentou os ensaios de certificação de coletores solares, INMETRO (2008), também regulamentou os ensaios dos reservatórios térmicos.

De forma análoga, a lista de reservatórios certificados é mantida atualizada no sítio do INMETRO e INMETRO (2016c) é um exemplo da lista de reservatórios, cujo conteúdo inicial está reproduzido na Figura 2.15. Esta lista, contendo os reservatórios de alta e os de baixa pressão, traz 64 reservatórios no total, de 7 empresas diferentes, com data de atualização de 13/06/2016.

Além destes reservatórios, em INMETRO (2016d) são listados mais 37 modelos de reservatórios de operação de nível, de 4 empresas diferentes, também com data de atualização de 13/06/2016.

Os reservatórios não possuem uma escala de eficiência energética similar aos coletores, porém PROCEL (2010) estabelece valores máximos de perda específica de energia mensal que são aceitáveis para cada volume para que o reservatório possa receber o selo PROCEL de economia de energia. Os valores permitidos estão reproduzidos na Tabela 2.5.

Figura 2.15 - Amostra da lista com os reservatórios térmicos certificados pelo INMETRO



INMETRO

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA

PBE- Reservatórios Térmicos de alta e baixa pressão

Tabelas de Consumo / Eficiência Energética

Empresas: 7
Marcas: 7
Modelos: 64



PROGRAMA
BRASILEIRO DE
ETIQUETAGEM

Data de Atualização: 13/06/2016

Empresa	Marca	Modelo	Opções de seleção: AP / BP	Volume (litros)	Potência da Resistência (kW)	Perda Específica de Energia Mensal (kWh/m²)	Pressão de Funcionamento		Dimensões Externas (mm)		Material do Corpo Interno	Material do Isolamento Térmico	Número do Registro de Objeto	Data de concessão	Data de cancelamento
							kPa	(mca)	Comprimento	Diâmetro					
AECOSOL Ma Energia Limpa LTDA	Aecosol MS	Aecosol 270 BP	Baixa pressão		não se aplica	2,48	50	5,00	1960	460	SUS-304	Poliuretano	00013/2015	25/02/2015	6/1/2016
L.A.M. MELONI - AQUECEDORES SOLARES	MONDIALLE	AP 500L	Alta pressão	500	4,0	0,14	400		1831	670	Aço Inox	Poliuretano	00017/2016	12/1/2016	
L.A.M. MELONI - AQUECEDORES SOLARES	MONDIALLE	BP 500L	Baixa pressão	500	4,0	0,14	50		1831	670	Aço Inox	Poliuretano	00017/2016	12/1/2016	
L.A.M. MELONI - AQUECEDORES SOLARES	MONDIALLE	BP 400L	Baixa pressão	400	4,0	0,15	50	5,00	1490	670	Aço Inox	Poliuretano	00079/2016	5/2/2016	
L.A.M. MELONI - AQUECEDORES SOLARES	MONDIALLE	AP 400L	Alta pressão	400	4,0	0,15	400	40,00	1490	670	Aço Inox	Poliuretano	00079/2016	5/2/2016	
L.A.M. MELONI - AQUECEDORES SOLARES	MONDIALLE	AP 200L	Alta pressão	200	4,0	0,19	400	40,00	815	670	Aço Inox	Poliuretano	00079/2016	5/2/2016	
L.A.M. MELONI - AQUECEDORES SOLARES	MONDIALLE	BP 200L	Baixa pressão	200	4,0	0,19	50	5,00	815	670	Aço Inox	Poliuretano	00079/2016	5/2/2016	
L.A.M. MELONI - AQUECEDORES SOLARES	MONDIALLE	BPS 200L	Baixa pressão	200	não se aplica	0,19	50	5,00	815	670	Aço Inox	Poliuretano	00079/2016	5/2/2016	
L.A.M. MELONI - AQUECEDORES SOLARES	MONDIALLE	BP 600L	Baixa pressão	600	4,0	0,15	50	5,00	2125	670	Aço Inox	Poliuretano	00080/2016	5/2/2016	
L.A.M. MELONI - AQUECEDORES SOLARES	MONDIALLE	AP 600L	Alta pressão	600	4,0	0,15	400	40,00	2125	670	Aço Inox	Poliuretano	00080/2016	5/2/2016	
L.A.M. MELONI - AQUECEDORES SOLARES	MONDIALLE	BP 800L	Baixa pressão	800	5,0	0,13	50,0	5,00	1850	813	Aço Inox	Poliuretano	00080/2016	5/2/2016	

Fonte: INMETRO (2016c) – figura ilustrativa, valores irrelevantes para o contexto deste trabalho.

Tabela 2.5 – Máximas perdas específicas de energia mensal de reservatórios para receber selo PROCEL de eficiência energética

Volume	Perda específica de energia mensal
L	kWh/(mês L)
100	$\leq 0,22$
150	$\leq 0,21$
200	$\leq 0,20$
250	$\leq 0,19$
300	$\leq 0,19$
400	$\leq 0,15$
500	$\leq 0,14$
600	$\leq 0,13$
800	$\leq 0,10$
≥ 1000	$\leq 0,10$

Fonte: PROCEL (2010)

Para efeito do dimensionamento da instalação utilizando as metodologias da ABNT (2008) analisadas neste trabalho, o valor de maior interesse é o volume do reservatório, utilizado nas formulações apresentadas nos itens 2.2 e 2.3 como V_R .

Observamos que as tabelas do INMETRO não trazem os valores do coeficiente global de perda de calor dos reservatórios para o ambiente U_S , mas optaram por apenas informar os valores das perdas específicas mensais dos reservatórios, estimadas, calculados conforme ABNT (2013), pois são valores que permitem a comparação e facilitam o entendimento dos consumidores finais¹².

2.7 Propostas de sistemas térmicos disponíveis no mercado

As propostas cobertas pela norma ABNT (2008) de sistemas de aproveitamento térmico solar são categorizadas pelos seguintes atributos:

Arranjo:

Solar mais auxiliar: sistema que utiliza de forma integrada a fonte solar e uma auxiliar (gás ou eletricidade, por exemplo).

Somente solar: sem o uso de sistema de aquecimento auxiliar

¹² Item 5.1.3 da ABNT (2013).

Preaquecimento solar: instalado para preaquecer a água fria, previsto na entrada de outro tipo de aquecedor.

Circulação:

Natural ou termossifão: a circulação no circuito primário, entre os coletores e o reservatório ocorre apenas pela diferença de densidade da água.

Forçada: a circulação ocorre com auxílio de dispositivo adicional, tal como uma motobomba.

Regime:

Acumulação: conta com um armazenamento para a circulação da água entre o reservatório e os coletores, permitindo que o consumo ocorra em momentos diferentes do aquecimento.

Passagem: a água a ser aquecida passa diretamente dos coletores para o uso.

Armazenamento:

Convencional: o reservatório é separado do coletor e está a certa distância deste.

Acoplado: o dispositivo de armazenamento termina com o coletor e está montado sobre uma estrutura de suporte comum.

Integrado: as funções de coleta e armazenamento de energia solar são realizadas dentro do mesmo dispositivo.

Alimentação:

Exclusiva: quando o sistema de alimentação de água fria abastece apenas o sistema de aquecimento de água.

Não exclusiva: sistema de alimentação de água fria abastece o sistema de aquecimento de água e outros pontos de consumo.

Alívio de pressão

Respiro: a equalização das pressões positivas e negativas do sistema de aquecimento de água é realizada por comunicação entre o reservatório e a atmosfera.

Conjunto de válvulas: a equalização das pressões positivas e negativas do sistema de aquecimento de água é realizada por dispositivos mecânicos.

Além dos atributos citados acima, conforme ABNT (2008), outros atributos podem ser considerados como variações possíveis oferecidas no mercado para os sistemas de aquecimento de água:

Com ou sem suporte a congelamento.

Pressão de operação do reservatório:

Afogado de alta pressão: opera sempre cheio e aceita valores altos de pressão da água.

Afogado de baixa pressão: opera sempre cheio, porém aceita pressões limitadas, exigindo uma caixa ou outro dispositivo que limite a pressão de alimentação.

Reservatório de nível: opera com volumes parciais, permitindo que seja instalado no mesmo nível que a caixa de alimentação.

Reservatório com ou sem ânodo de sacrifício: este dispositivo, quando presente, permite a operação com águas agressivas, evitando a corrosão dos metais de sistema de aquecimento de água por efeito eletroquímico.

2.8 Avaliação econômica

A revisão da avaliação econômica em sistemas de aquecimento solar foi baseada em DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W. A. (2013), que contém um capítulo voltado a esta análise¹³. Neste caso, procurou-se extrair os pontos relevantes para situação brasileira das instalações cobertas pela ABNT (2008) e, em particular, as análises que podem derivar das informações obtidas com as duas metodologias de dimensionamento analisadas. No final é apresentada uma proposta de tratamento do efeito inflação particular para as instalações brasileiras.

Os sistemas de aquecimento solar têm como característica econômica básica um alto custo inicial concentrado como investimento para a instalação do sistema e um baixo custo de operação, que resulta no retorno em longo prazo, que é o benefício de produção energética e que justificará aquele investimento inicial.

A necessidade energética total será atendida pela produção do sistema solar e pelo sistema auxiliar, sendo este último ativado apenas nos momentos que o aporte energético solar não atender a necessidade. A proporção que o sistema solar atende a necessidade é a fração solar f , calculada em seus valores médios mensais e anuais na metodologia Carta f e admitida como pré-estabelecida na metodologia 2, com o valor fixo 0,7.

Uma análise econômica de uma instalação tem como objetivo a obtenção dos parâmetros de projeto que resultem no menor custo total, ou no melhor retorno, para atender a necessidade energética.

Os custos de investimento são formados pelos custos dos equipamentos, tais como os coletores, reservatórios e equipamentos auxiliares, bem como pelo custo de instalação. Outros custos podem compor o investimento, tal como os custos financeiros e os de adaptações que venham a ser necessárias no imóvel. Se o investimento for realizado por uma empresa, outros fatores como abatimento de impostos podem ser considerados.

¹³ Capítulo 11 – Solar Process Economics, p. 447 a 476.

Estes custos podem ser categorizados em dependentes ou não da área de coletores, pois, a área dos coletores tende a ser a principal variável de influência nos resultados econômicos, como será detalhado adiante. Com esta categorização, pode-se expressar o custo total pela equação (2.15).

$$C_S = C_A A_c + C_E \quad (2.15)$$

Onde:

C_S = Custo total do sistema de aquecimento solar instalado [\$]

C_A = Custo dos itens do SAS instalado dependentes da área de coletor [\$/m²]

A_c = Área de coletor [m²]

C_E = Custo dos itens do SAS instalado independentes da área de coletor [\$]

Os itens que dependem da área de coletor incluem os coletores em si, eventuais aumentos de tubulações e conexões, suportes e mão de obra de instalação.

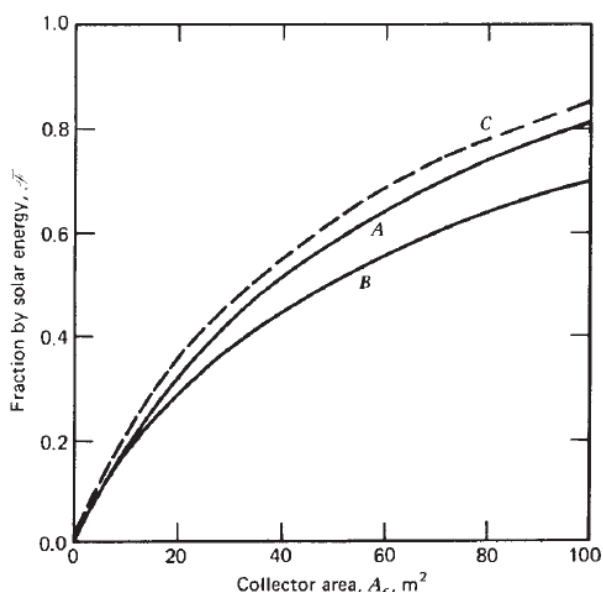
Os custos de operação são aqueles despendidos com a fonte auxiliar de energia e com a operação do sistema solar, tal como a energia utilizada por uma bomba auxiliar e eventuais custos de manutenção do sistema. Eventuais valores adicionais podem ser considerados em casos particulares, como a valorização do imóvel que pode permitir deduções em impostos em caso de venda e depreciações do equipamento no caso de empresas.

Uma análise financeira precisa pode ser muito complexa pelo número grande de variáveis envolvidas e a resolução pode ser simplificada com a determinação do tamanho da instalação para atender uma demanda preestabelecida. O tamanho da instalação irá determinar seu custo e seu desempenho energético. A demanda é calculada nas duas metodologias analisadas neste trabalho, como uma variável mensal na Carta f , que leva em conta a temperatura ambiente média mensal, e como um valor anual na metodologia 2.

A determinação do desempenho energético da instalação tem como variável principal o valor da área coletora. Outras variáveis também interferem em menor grau, tal como os parâmetros energéticos dos coletores e do reservatório e o volume do reservatório.

A Figura 2.16 mostra um exemplo da maior influência da área dos coletores na fração solar anual de um sistema em comparação com outras variáveis. Nesta figura, a curva A foi obtida com um coletor de melhor parâmetro energético, com cobertura dupla e superfície seletiva; a curva B é um sistema com piores parâmetros, pois possui apenas uma cobertura e superfície não seletiva; a curva C foi obtida com os mesmos coletores da curva A, porém com um reservatório com o dobro da capacidade, sendo esta última a curva de maior desempenho por combinar o melhor coletor com o maior reservatório.

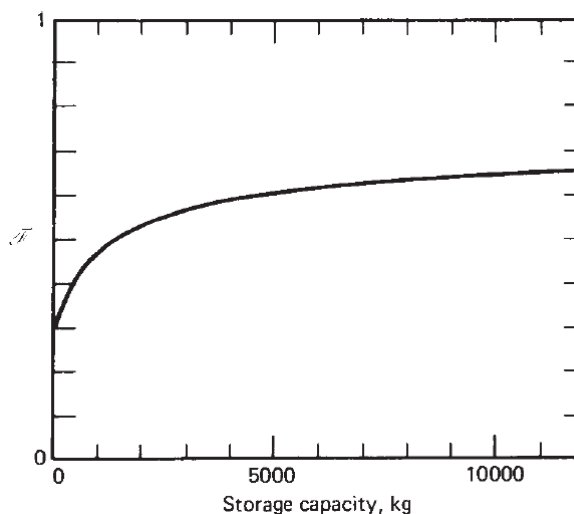
Figura 2.16 - Exemplo da influência da área e dos parâmetros energéticos de coletores e do tamanho do reservatório na fração solar



Fonte: figura 11.2.1 em DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W. A. (2013)

A Figura 2.17 detalha a dependência da fração solar anual em relação ao tamanho do reservatório, onde é observado que a variação é pequena para volumes acima de um valor crítico, porém pode ser severamente impactada para volumes abaixo deste valor crítico. Os valores mostrados são referentes a uma instalação exemplo de 60 m² de coletores com dupla cobertura e superfície seletiva.

Figura 2.17 - Exemplo de variação da fração solar anual em função do volume do reservatório térmico



Fonte: figura 11.2.2 em DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W. A. (2013)

Várias ferramentas financeiras podem ser utilizadas na análise econômica e quatro delas foram selecionadas de DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W. A. (2013):

Custo do ciclo de vida: é a soma de todos os custos incorridos com o sistema, para um período selecionado que represente a expectativa de vida útil deste sistema. Os valores futuros devem ser transportados como valores presentes, com uma taxa de desconto, tipicamente escolhida a partir da melhor alternativa de investimento. Nesta análise, quanto menor este custo calculado para atender a demanda energética, melhor é a solução economicamente.

Economia realizada no ciclo de vida: similar ao cálculo anterior, onde são levadas em conta as diferenças entre o custo do ciclo de vida se o sistema tivesse apenas a fonte auxiliar de energia, menos o custo do sistema combinado solar e auxiliar. De forma similar ao cálculo anterior, uma taxa de desconto deve ser aplicada para trazer todos os valores envolvidos para a data presente. Nesta análise, quanto maior a economia realizada, melhor é a solução economicamente.

Tempo de retorno do investimento: tempo para que os valores economizados com a economia de energia auxiliar são suficientes para pagar o investimento. Outras definições alternativas de tempo de retorno são apresentadas, porém esta é a definição que se aproxima do ponto de vista do usuário final, que substitui a fonte auxiliar pela fonte solar. Os valores economizados podem ser fixos ou corrigidos

pela taxa de desconto, caso em que o valor calculado é denominado tempo de retorno descontado. Quanto menor o tempo de retorno, melhor é a solução economicamente.

Taxa interna de retorno: é a taxa de juros que zera o fluxo de caixa para o tempo de vida previsto para a instalação. Esta taxa pode ser comparada com a taxa de oportunidade do melhor investimento alternativo para avaliação da viabilidade econômica do investimento. Taxas de retorno superiores à taxa de oportunidade determinam a viabilidade econômica do investimento.

Todas estas ferramentas têm em comum os pontos principais de análise, que são o custo do investimento e o desempenho energético do sistema que garante a substituição da fonte auxiliar. Este último está diretamente relacionado à fração solar.

Estas ferramentas econômicas são dependentes do valor escolhido como taxa de retorno ou oportunidade e do eventual impacto da incorporação de estimativas de inflação, uma vez que os períodos de ciclo de vida são de vários anos. A escolha sem critérios de valores para esta taxa pode comprometer os resultados obtidos.

Uma sugestão para escolha destas taxas pode ser a de títulos do tesouro nacional, que são alternativas de investimento de longo prazo, da mesma ordem de grandeza das expectativas de vida útil dos sistemas solares. Em particular, uma simplificação pode ser adotada quando um título em particular é selecionado: Tesouro IPCA+. Este título indica uma taxa de retorno acima da inflação e sua utilização permite desprezar o eventual efeito inflacionário nos valores futuros, ou seja, é correto supor que o custo da energia auxiliar será corrigido pela taxa de inflação desconhecida e desconsiderá-la, pois a taxa de desconto é o valor adicional de remuneração deste título acima deste valor desconhecido. Estes títulos possuem suas taxas publicadas em TESOURO NACIONAL (2016).

3 DESENVOLVIMENTO DA ANÁLISE COMPARATIVA

3.1 Análise crítica do texto da norma

Nesta comparação entre as metodologias propostas pela norma estão apresentadas as diferenças entre elas e pontos de atenção em cada uma delas que podem afetar os resultados obtidos.

Apesar de que duas metodologias são recomendadas pela norma para o dimensionamento dos sistemas de aproveitamento solar, apenas uma delas é apresentada com um roteiro. A metodologia Carta f é apenas referenciada de uma obra em inglês, cujo acesso e o entendimento pode não ser fácil para todo usuário da norma.

A comparação entre a Figura 2.6 e a Figura 2.7 evidencia que a metodologia 2 segue um roteiro oposto ao roteiro da metodologia Carta f . Para a Carta f , o valor final de cálculo é a fração solar anual $\mathcal{F}$, que é um valor conhecido de antemão na metodologia 2, informado como 0,7. Na metodologia 2 o valor final de cálculo é a área total dos coletores, valor que deve ser adotado no início do método Carta f , e cuja alteração naquela metodologia requer refazer todos os cálculos para avaliação do impacto no aproveitamento.

De forma geral, a metodologia Carta f utiliza mais informações que a metodologia 2, pois a primeira trabalha com os valores mensais do aporte energético e de temperatura ambiente, enquanto a metodologia 2 apenas utiliza valores médios anuais destas grandezas.

Pontos de atenção da utilização da metodologia Carta f

A Carta f é uma metodologia baseada em resultados estatísticos de muitas simulações realizadas com parâmetros usuais para os Estados Unidos, e a aplicabilidade no caso brasileiro requer uma avaliação das eventuais diferenças entre os modelos adotados originalmente e os modelos e valores usuais no Brasil. Ela foi apresentada por seus autores como um método simplificado em relação às

simulações e com a recomendação para utilização nas instalações padronizadas usuais daquele país.

O modelo adotado na simulação, mostrado na Figura 2.2, conta com um trocador de calor que está explicitamente fora do escopo da norma ABNT (2008). O efeito da presença do trocador deve ser o de reduzir o desempenho energético dos sistemas.

As faixas de inclinação β apresentadas na Tabela 2.1 indicam valores entre 30° e 90°, que coloca esta faixa acima das inclinações usuais no Brasil, que são menores ou junto à extremidade inferior da faixa utilizada para β . A norma ABNT (2008) recomenda como inclinação ótima o valor do módulo da latitude mais 10°, que no Brasil corresponde em seu extremo sul ao valor de β igual a 44°.

Os valores de insolação, radiação e temperatura média são significativamente diferentes nos Estados Unidos e no Brasil. O efeito destas diferenças nas frações solares não é de fácil avaliação, porém o Apêndice A apresenta uma avaliação do efeito da variação da fração solar em função da distribuição do aporte energético que se constitui em um alerta da possível variação nos resultados brasileiros. Na demonstração deste apêndice é apresentado que distribuições com maior variação resultam em valores de fração solar inferior. A análise desenvolvida no Apêndice B mostra que existe uma relação entre a latitude e o aumento da variação das distribuições para as localidades estudadas no Brasil. Se as variações forem maiores nos Estados Unidos que no Brasil conforme a tendência apresentada, os valores calculados da fração solar para aquele país devem ser inferiores aos observados no Brasil.

Apesar das eventuais imprecisões nos valores da fração solar obtida com o método da Carta f , este método é valioso para avaliação relativa entre soluções de projeto, pois utiliza os cálculos energéticos em valores mensais, detalhando as necessidades do período mais crítico do inverno. Uma vantagem importante da metodologia Carta f é que a mesma pode ser refeita para variações no tamanho dos coletores e do reservatório, obtendo um conjunto de resultados que podem ser comparados e utilizados em avaliações econômicas, como exemplificado no item 3.4.

Deve-se recordar a recomendação dos próprios autores para considerar apenas o valor da fração solar anual $\mathcal{F}$ como de melhor precisão para utilização. A principal

utilização do valor absoluto da fração solar calculada é na avaliação econômica da instalação e as eventuais imprecisões neste valor podem afetar os resultados, porém deve-se recordar que as variações inerentes aos processos meteorológicos já trazem uma imprecisão nas avaliações quantitativas dos resultados destes estudos.

Pontos de atenção da utilização da metodologia 2

A metodologia 2 é de utilização simplificada quando comparada com a Carta f , sendo de utilização recomendada apenas para os dimensionamentos de unidades unifamiliares, esta restrição é dada pela própria norma ABNT (2008).

A opção da norma por oferecer um método simplificado é de grande valor, porém é observado que algumas particularidades deste método podem levar o dimensionamento para valores opostos ao melhor aproveitamento, como analisado a seguir.

O primeiro ponto de destaque é a associação direta apresentada pela equação (2.10) entre o volume do reservatório V_R e a energia útil E_{util} , pois a área dos coletores possui dependência direta com este último termo.

A equação (2.10) pode ser combinada com a equação (2.9) e ser reescrita pela equação (3.1). A equação (3.1) não está na norma ABNT (2008) e é uma análise deste trabalho.

$$E_{util} = \frac{V_{cons} \rho C_p (T_{cons} - T_{aa})}{3600} \quad (3.1)$$

Onde:

E_{util} = Energia útil diária [kWh/dia]

V_{cons} = Volume de consumo diário [m³]

ρ = Massa específica da água igual a 1.000 [kg/m³]

C_p = Calor específico da água igual a 4,18 [kJ/kg °C]

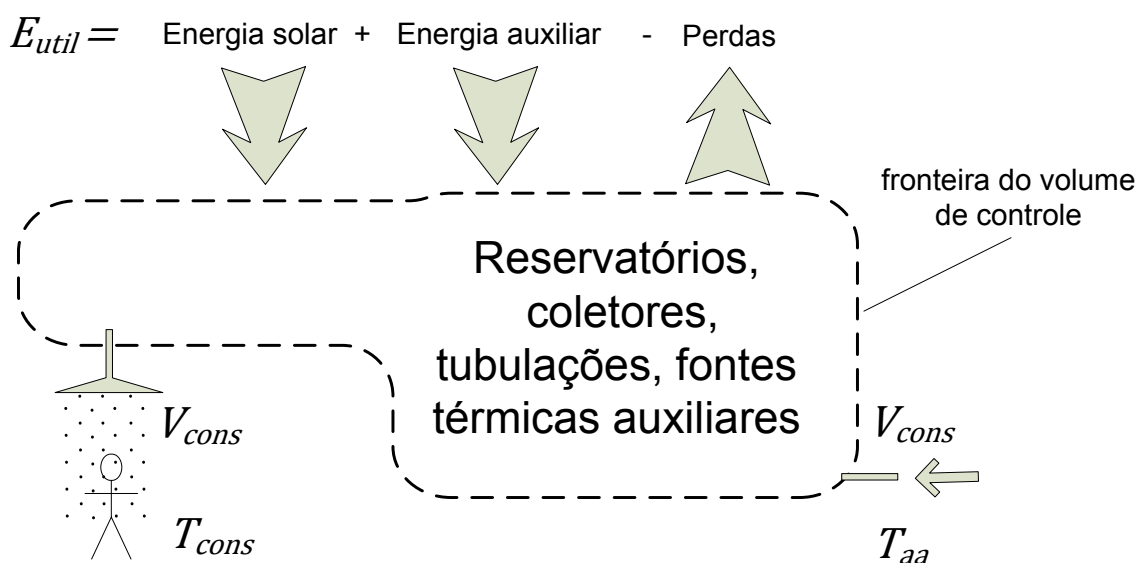
T_{cons} = Temperatura de consumo [°C]

$$T_{aa} = \text{Temperatura ambiente média anual [} ^\circ\text{C]}$$

Nesta nova equação, fica evidenciado que a energia útil E_{util} não deveria depender na formulação de cálculo do valor adotado para a temperatura de projeto de armazenamento T_{arm} e do consequente volume do reservatório térmico V_R .

Um modo alternativo de reconhecer a independência da energia útil E_{util} dos parâmetros de armazenamento temperatura T_{arm} e volume do reservatório térmico V_R está representado na Figura 3.1, que é o balanço energético da primeira lei da termodinâmica de longo período, ou seja, valores médios tais como considerados no equacionamento das metodologias analisadas. Este balanço é aplicado ao volume de controle que engloba todo o sistema. Nesta figura é evidenciado que o equilíbrio energético de longo período se dá apenas com a variação da temperatura de saída menos a temperatura da entrada do volume de água de consumo; o volume de água é igual na entrada e saída do volume de controle, pois o equacionamento não leva em conta eventual perda mássica. As variações internas, como a proporção de mistura de água quente e fria que atende a temperatura de consumo não afeta o equacionamento da energia útil.

Figura 3.1 Representação da análise do equilíbrio energético de longo período independente dos constituintes internos do sistema de aproveitamento solar



Fonte: elaborado pelo autor

Porém, ao utilizar a equação original (2.10) da metodologia 2, se o projetista por qualquer razão aumentar o volume do reservatório térmico sem a correção da temperatura de armazenamento, ele será penalizado por uma necessidade energética calculada maior. Uma possível razão para adotar volume do reservatório diferente do calculado é a disponibilidade de modelos comerciais em tamanhos maiores daqueles calculados. Os reservatórios são oferecidos pelo mercado com capacidades múltiplas de 100 L, conforme INMETRO (2016c).

Neste ponto da metodologia 2, o dimensionamento do reservatório não é apenas simplificado para valores abaixo do volume de consumo, sem levar em conta o perfil de consumo, mas também indica uma relação inversa daquela indicada no método da Carta f e em simulações numéricas, ou seja, por esta metodologia, maiores reservatórios penalizam a instalação com uma necessidade de aporte energético maior.

O valor da temperatura de armazenamento deve ser adotado pelo projetista, que fica incentivado a adotar temperaturas de projeto altas para reduzir o volume e o custo do reservatório, até o limite recomendado de 75% do volume de consumo. O resultado pode ser um volume subdimensionado que pode comprometer o desempenho do sistema. A Figura 2.17 mostra que valores reduzidos de reservatório pode ter um impacto significativo na fração solar do sistema.

O método da Carta f explicita que suas simulações são realizadas com mistura total do fluido no reservatório, optando por uma abordagem mais conservadora. A metodologia Carta f penaliza instalações com uma relação de volume do reservatório $V_R < 75 \text{ L/m}^2$ de área dos coletores, pois esta é a relação utilizada nas simulações que originaram o método.

A metodologia 2 não explicita suas premissas, porém a equação (2.9) reflete a premissa de uma estratificação plena, que equivale a um movimento pistonado no interior do reservatório, que nunca ocorre na plenitude. Esta premissa é resultado da suposição implícita na equação (2.9) que o volume de água na temperatura de armazenamento está disponível para mistura em sua totalidade, sem contar com a redução de temperatura provocada pela mistura da água de reposição, que é introduzida no reservatório durante seu esvaziamento. Este tipo de movimento exige aproveitamentos em períodos curtos para evitar a troca de calor entre eventuais

camadas térmicas formadas no interior do reservatório e movimentos lentos no circuito primário, para evitar correntes com turbulências. Uma instalação com apoio de motobomba provavelmente não terá a formação de camadas térmicas plenamente estabelecidas.

Nenhuma das duas metodologias permite que o projetista considere uma curva de demanda horária que represente suas características particulares de projeto para determinar o volume do reservatório. A metodologia Carta f utilizou uma demanda padrão em suas simulações e a mesma está refletida em seus resultados estatísticos. A metodologia 2 procura determinar este volume apenas a partir do volume total de consumo.

As perdas térmicas da tubulação e do reservatório são calculadas de forma simplificada pela equação (2.13), como uma proporção constante de 15% da energia útil. Um valor de particular interesse em um dimensionamento mais detalhado destas perdas é o coeficiente global de perda de calor do reservatório térmico U_s , expresso em kW/°C. Este valor não é disponibilizado nas tabelas do INMETRO, mas é disponível em vários catálogos dos fabricantes de reservatório, pois é um valor necessário para a determinação do valor apresentado da perda específica mensal. Com o valor de U_s é possível estimar as perdas com maior precisão que apenas como uma percentagem da energia útil, conforme a equação (2.13).

O valor de I_G indicado na equação (2.14) de cálculo da área coletora é descrito como:

I_G é o valor da irradiação global média anual para o local de instalação, expresso em quilowatts hora por metro quadrado dia (kWh/m².dia).

Esta descrição não deixa claro se esta média anual refere-se ao plano horizontal ou inclinado, porém em seu anexo E indica o mapa da referência PEREIRA, E. B. et al. (2006) com os valores de irradiação do plano horizontal. Também apresenta um exemplo numérico onde o valor utilizado aparenta sair deste mapa, ou seja, valor da irradiação no plano horizontal. Uma análise nas equações (2.12) e (2.13) indica que o valor de I_G que deveria ser utilizado é o da irradiação na inclinação denominada ótima do plano inclinado do coletor, pois o fator de correção FC_{instal} visa corrigir o aporte em relação a esta inclinação ótima e a eventual variação da orientação

azimutal em relação à orientação ótima em direção ao equador. Por se tratar de valor médio anual, a diferença entre os valores médios do plano horizontal e inclinado não é grande. A indicação de uso do valor médio no plano horizontal pode ter sido adotada como uma simplificação de cálculo da norma. A Tabela 3.2 ilustra como os valores médios anuais da irradiação possuem uma variação relativamente pequena em relação à inclinação, apesar das maiores e importantes variações observadas nos valores mensais. A variação maior nos valores médios anuais ocorre para a localidade mais ao sul, Santa Maria, da ordem de 6%. Para a localidade mais ao norte, Petrolina, esta variação não atinge 1%.

Caso seja conhecido o valor da irradiação na orientação utilizada no coletor, é possível dispensar o fator de correção dado pela equação (2.12), ou seja, atribuir o valor $FC_{instal} = 1$. CRESESB (2015) é um exemplo de referência que fornece os valores médios para várias inclinações de interesse em projetos de aproveitamento solar e que podem ser utilizados diretamente ou através de interpolações para a estimativa do aporte energético no plano inclinado do coletor.

O valor da fração solar, dado como constante e pré-estabelecido pela metodologia 2, é de grande impacto na análise econômica do aproveitamento, pois todo benefício econômico da instalação solar depende da quantidade de energia que substitui a fonte auxiliar de maior custo. Nos exemplos analisados no item 3.3, foram encontradas diferenças entre os resultados das duas metodologias. As análises desenvolvidas nos Apêndices A e B indicam que o valor indicado como uma constante de 0,7 pode não ser justificável para a variação de parâmetros que interferem neste valor, em particular a variação das distribuições das médias diárias de irradiação solar, cuja importância é destacada nestes dois apêndices. Se este valor indicado de 0,7 for inferior ao observado, as análises econômicas tenderão a estimar uma atratividade menor ao investimento solar que a atratividade real, desincentivando este tipo de instalação. Se o valor indicado de 0,7 for superior, o sistema será subdimensionado, podendo apresentar um desempenho inferior ao esperado, com consequências econômicas ou de conforto do usuário que contava com o maior desempenho.

3.2 Instalações típicas para três regiões brasileiras (escolha de carga térmica representativa)

Para efeito de exposição dos métodos analisados neste trabalho, foram selecionadas três localidades com características de insolação diversas. Esta escolha deu-se entre as localidades para as quais são disponíveis valores detalhados de insolação em NREL (2014), que é a fonte mais detalhada que foi avaliada no item 2.4. Para estes pontos também estão disponíveis os dados de estações solarimétricas em CRESESB (2015).

As localidades escolhidas foram:

Petrolina, Pernambuco: latitude -9,35°; longitude -40,55°

Belo Horizonte, Minas Gerais: latitude -19,85°; longitude -43,95°

Santa Maria, Rio Grande do Sul: latitude: -29,7°; longitude -53,7°

Estas três localidades se encontram em regiões com características solarimétricas significativamente diferentes, com os valores de irradiação obtidos nas referências avaliadas indicados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Irradiação média anual no plano horizontal para as três localidades selecionadas conforme várias referências

Fonte	Petrolina kWh/(m ² dia)	Belo Horizonte kWh/(m ² dia)	Santa Maria kWh/(m ² dia)
TIBA, C. et al. (2000)	5,00	4,44	4,17
PEREIRA, E. B. et al. (2006)	5,43	5,43	4,73
NREL (2014)	5,74	5,22	4,38
CRESESB (2015)	5,37	4,35	4,65
Valor médio	5,39	4,86	4,48

Fonte: elaborado pelo autor

Os valores mensais, utilizados na metodologia Carta *f*, somente estão disponíveis em CRESESB (2015) ou através de cálculo a partir dos dados de NREL (2014). Na Tabela 3.2 estão reproduzidos os valores obtidos de CRESESB (2015).

Tabela 3.2 – Irradiação média mensal para as três localidades exemplo conforme CRESESB (2015)

Estação: Petrolina

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Plano Horizontal	0° N	5,6	6,5	5,5	5	4,9	4,5	4,7	5,2	5,4	6	5,7	5,6	5,37
Ângulo igual a latitude	9° N	5,3	6,3	5,5	5,2	5,2	4,9	5	5,5	5,5	5,9	5,5	5,3	5,41
Maior média anual	8° N	5,4	6,3	5,5	5,2	5,2	4,8	5	5,4	5,5	5,9	5,5	5,3	5,41
Maior mínimo mensal	14° N	5,1	6,2	5,4	5,2	5,3	5,1	5,2	5,6	5,5	5,7	5,3	5,1	5,39

Estação: Belo Horizonte

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Plano Horizontal	0° N	4,3	5,6	4,1	4,3	3,7	3,7	4	4,4	4,7	4,4	4,8	4,3	4,35
Ângulo igual a latitude	20° N	4	5,3	4,1	4,7	4,4	4,6	4,9	5	4,9	4,3	4,5	4	4,55
Maior média anual	20° N	4	5,3	4,1	4,7	4,4	4,6	4,9	5	4,9	4,3	4,5	4	4,55
Maior mínimo mensal	12° N	4,1	5,5	4,1	4,6	4,1	4,3	4,6	4,8	4,9	4,4	4,6	4,1	4,51

Estação: Santa Maria

Ângulo	Inclinação	Irradiação solar diária média mensal [kWh/m ² .dia]												
		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Plano Horizontal	0° N	6	5,6	4,9	4	3,1	2,5	2,8	3,4	4,2	5,7	6,6	7	4,65
Ângulo igual a latitude	30° N	5,3	5,4	5,1	4,9	4,3	3,6	4	4,4	4,6	5,6	6	6	4,92
Maior média anual	24° N	5,5	5,5	5,2	4,8	4,1	3,4	3,8	4,2	4,6	5,7	6,2	6,3	4,94
Maior mínimo mensal	50° N	4,4	4,6	4,8	4,9	4,6	3,9	4,3	4,5	4,4	4,9	4,9	4,8	4,58

Fonte: CRESESB (2015)

Estas localidades apresentam as médias mensais das temperaturas ambientais indicadas na Tabela 3.3.

A escolha de coletores representativos foi uma série de coletores¹⁴ com $Fr(ta)n = 0,70$ e $FrUL = 3,905 \text{ W/(m}^2\text{°C)}$. Estes coletores estão indicados em INMETRO (2016a), com disponibilidade nas dimensões de 1 m², 1,4 m² e 2 m². Estes coletores receberam a classificação “A” da etiqueta nacional de conservação de energia, apesar de que seus índices não são os maiores dos catalogados pelo INMETRO.

¹⁴ Fabricante RINNAI, modelos RSC-1000T, RSC-1400T e RSC-2000T

O cálculo de $F'_R(\overline{\tau\alpha})$ a partir do valor de $Fr(ta)n$ foi realizado com a correção de 0,96, conforme recomendação de DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W. A. (2013) para coletores com uma cobertura, vista no item 2.2, resultado em $F'_R(\overline{\tau\alpha}) = 0,672$.

Tabela 3.3 – Média mensal e anual da temperatura ambiente das três localidades exemplo

	Petrolina °C	Belo Horizonte °C	Santa Maria °C
Jan	26,2	22,9	24,6
Fev	26,3	22,6	24,1
Mar	25,9	21,9	22,1
Abr	25,4	20,2	18,8
Mai	24,1	18,2	16,2
Jun	22,9	17,1	14,2
Jul	22,2	17,7	14,6
Ago	22,6	19,3	15,6
Set	24,1	21	17,3
Out	25,7	21,9	19,7
Nov	26,0	22,1	22,1
Dez	26,1	21,5	22,3
Média anual	24,8	20,5	19,3

Fonte: CLIMATE-DATA.ORG (2012)

Tabela 3.4 – Volumes de consumo apurados como demanda exemplo de quatro moradores

Ponto de uso	Q_{pu} L/min	t_u min/pessoa	$f_{req_{uso}}$ pessoa/dia	V_{cons} L/dia
Ducha	9,0	10	4	360
Lavatório	3,9	2	4	31,2
Pia de cozinha	4,8	3	4	57,6
Total				448,8

Fonte: elaborado pelo autor

Para a demanda foi adotado o consumo de uma família de quatro pessoas. Como ilustração da representatividade deste valor, os censos realizados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística mostrou que os domicílios brasileiros possuíam 3,8 moradores em média em 2000 e 3,3 moradores em 2010. O cálculo do consumo foi baseado nos valores sugeridos pela norma, conforme Tabela 2.2 e a seguinte demanda: ducha de banho com consumo de 9 L/min, lavatório com consumo de 3,9 L/min e pia de cozinha com consumo de 4,8 L/min; estes valores de consumo

correspondem às médias dos limites indicados na norma. A demanda total deste exemplo ficou determinada com os valores indicados na Tabela 3.4.

A temperatura de consumo T_w adotada foi o valor sugerido pela norma de 40°C.

3.3 Dimensionamento da área de coletores para cada instalação e método

Exemplo de cálculo pela Carta f para as três localidades apresentadas no item 3.2.

As etapas de cálculos são aquelas indicadas no item 2.2 e representadas na Figura 2.3. Os valores dos parâmetros da instalação são adotados: área coletora, parâmetros de eficiência e volume do reservatório. Na prática são realizadas várias séries de cálculo de forma a avaliar a melhor combinação destes parâmetros.

Esta metodologia requer a utilização do aporte energético mensal; neste exemplo foram utilizados os valores indicados no item anterior, do CRESESB (2015) indicados na Tabela 3.2. Esta tabela fornece o aporte energético para várias inclinações, sendo que se torna necessário adotar uma inclinação β em relação ao plano horizontal para o coletor. Neste exemplo foram utilizados para Petrolina e Santa Maria os valores com maior mínimo mensal, que são 14° e 50° respectivamente; para Belo Horizonte foi utilizado o valor da inclinação com maior média anual, de 20°. A escolha para todos os casos foi a de fornecer os maiores valores de aporte energético nos meses mais frios, que é um critério de projeto orientado a favorecer o aproveitamento do usuário neste período de maior necessidade. A orientação azimutal é a mais favorável, ou seja, os coletores orientados para o norte geográfico.

A temperatura da água na rede T_m deve ser estimada a partir das temperaturas ambiente $\overline{T_a}$. Existem várias alternativas, tais como adotar valores iguais a cada mês ou adotar que o valor da temperatura da rede é igual à temperatura ambiente média anual. Neste exemplo foi adotado um valor intermediário: a temperatura da rede é igual ao valor médio da temperatura ambiente do mês e do mês anterior, procurando representar a inércia térmica existente no sistema de abastecimento, conforme equação (3.2), onde o índice i indica o valor a cada mês.

$$T_{m_i} = \frac{\overline{T_{a_i}} + \overline{T_{a_{i-1}}}}{2} \quad (3.2)$$

Onde:

T_m = Temperatura da água de entrada no sistema, ou seja, a temperatura da rede [°C]

$\overline{T_a}$ = Temperatura média mensal ambiente [°C]

Para cada localidade, foram obtidas as frações solares anuais para combinações variadas das áreas dos coletores A_c e dos volumes dos reservatórios V_R . Estes resultados estão apresentados na Tabela 3.5. Alguns valores estão destacados em cinza e riscados, pois estão fora da faixa de cálculo da formulação do método e mesmo a extrapolação gráfica a partir da Figura 2.6 pode carecer de significado para valores muito acima da faixa experimental do método, que apenas indica frações solares até 0,9.

O método da Carta f foi elaborado para simulações com a relação entre o volume do reservatório V_R e a área dos coletores A_c de 75 L/m². Esta relação aplicada aos exemplos acima corresponde, por exemplo, a um volume 450 L para a área de 6 m² e 600 L para 8 m². Ao adotar valores de volume inferiores a esta relação, as frações solares são impactadas desfavoravelmente.

O Apêndice C apresenta exemplos de cálculo detalhado da fração solar anual $\mathcal{F}$ para cada uma das três localidades consideradas, com a indicação das equações e das tabelas utilizadas. As combinações de volume dos reservatórios V_R e da área dos coletores A_c selecionadas nesta exemplificação estão indicadas em destaque na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Frações solares anuais $\mathcal{F}$ obtidas com a metodologia Carta f para três localidades exemplos

Petrolina

Reservatório	Área total dos coletores					
	2 m ²	3 m ²	4 m ²	5 m ²	6 m ²	8 m ²
300 L	0,59	0,74*	0,84	0,90	0,93	0,96
400 L	0,60	0,76	0,86	0,92	0,95	0,98
500 L	0,60	0,77	0,87	0,93	0,96	0,99

Belo Horizonte

Reservatório	Área total dos coletores					
	2 m ²	3 m ²	4 m ²	5 m ²	6 m ²	8 m ²
300 L	0,40	0,53	0,63	0,70	0,75	0,82
400 L	0,41	0,54	0,64	0,72	0,77*	0,84
500 L	0,42	0,55	0,66	0,73	0,79	0,86
600 L	0,42	0,56	0,67	0,75	0,80	0,87

Santa Maria

Reservatório	Área total dos coletores					
	2 m ²	3 m ²	4 m ²	5 m ²	6 m ²	8 m ²
300 L	0,38	0,50	0,60	0,67	0,72	0,79
400 L	0,39	0,52	0,61	0,69	0,74*	0,81
500 L	0,39	0,53	0,63	0,70	0,76	0,83
600 L	0,40	0,53	0,64	0,71	0,77	0,84

*Cálculos detalhados como exemplos no Apêndice C

Fonte: elaborado pelo autor

Exemplo de cálculo pela Metodologia 2 para as mesmas três localidades apresentadas no item 3.2 e utilizadas na exemplificação acima.

As etapas de cálculos são aquelas indicadas no item 2.3 e representadas na Figura 2.7.

Nesta avaliação, foi utilizado o mesmo volume de consumo V_{cons} , a mesma temperatura de consumo T_w e coletores com as mesmas características energéticas e mesma orientação azimutal γ , que correspondem aos seguintes valores:

$$V_{cons} = 448,8 \text{ L, conforme Tabela 3.4}$$

$$T_w = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{Fr}(\text{ta})_n = 0,70 \text{ e } \text{FrUL} = 3,905 \text{ W}/(\text{m}^2\text{ } ^\circ\text{C})$$

$$\gamma = 0^\circ \text{ (orientação ótima, para o norte)}$$

Também foram selecionadas as mesmas inclinações β em relação ao plano horizontal que foram utilizadas no exemplo acima, e estão indicadas na Tabela 3.6, junto com a indicação do aporte energético anual obtido no plano do coletor com esta inclinação.

Tabela 3.6 – Cálculo da área dos coletores pela Metodologia 2 para três localidades exemplo

Grandeza	Fonte	Unidade	Petrolina	Belo Horizonte	Santa Maria
Inclinação β		°	14	20	50
I_G no plano coletor	Tab. 7	kWh/(m ² dia)	5,39	4,55	4,58
T_{aa}	Tab. 8	°C	24,8	20,5	19,3
V_R	nota 1	m ³	0,4	0,4	0,4
T_{arm}	Eq. 2.9	°C	41,85	42,38	42,53
E_{util}	Eq. 2.10	kWh/dia	7,92	10,16	10,79
$PPMDE$	Eq. 2.11	kWh/(m ² dia)	2,95	2,95	2,95
FC_{instal}	nota 2		1	1	1
E_{perdas}	Eq. 2.13	kWh/dia	1,19	1,52	1,62
A_c	Eq. 2.14	m ²	2,8	4,3	4,5

Fonte: elaborado pelo autor

Notas: 1: O valor adotado para o reservatório é o menor valor comercial disponível que atende a relação da norma $V_R \geq 0,75 V_{cons}$.
No exemplo, $0,75 \times 448,8 = 336,6 \text{ L}$, resultando em $V_R = 400 \text{ L}$.

2: Como foi utilizada a irradiação média anual no plano do coletor, o fator de correção é igualado à unidade, conforme análise no item 3.1.

A Tabela 3.7 apresenta os valores de fração solar anual $\mathcal{F}$ que são obtidos na metodologia Carta f , com os valores da área do coletor A_c e volume do reservatório V_R calculados com a metodologia 2, indicados acima. Pela metodologia 2, a fração solar anual $\mathcal{F}$ é constante, pré-estabelecida e igual a 0,7. Nesta comparação é observado que a fração solar estimada pela Carta f superou o valor pré-estabelecido para a localidade de Petrolina e ficou inferior nas duas outras localidades.

Tabela 3.7 – Valores da fração solar anual $\mathcal{F}$ para comparação entre as metodologias

Grandeza	Unidade	Petrolina	Belo Horizonte	Santa Maria
A_c	m ²	2,8	4,3	4,5
V_R	m ³	0,40	0,40	0,40
$\mathcal{F}$ Carta f		0,73	0,67	0,65
$\mathcal{F}$ metodologia 2		0,70	0,70	0,70

Fonte: elaborado pelo autor

3.4 Utilização dos resultados de dimensionamento na seleção econômica de alternativas

A essência da análise econômica de obras é a comparação entre o investimento e o retorno obtido. No caso dos aproveitamentos solares, o retorno está diretamente associado à fração solar, pois o maior benefício tende a ser a redução do custo da energia obtida pela fonte solar em relação à fonte alternativa e a fração solar é a proporção em que isto ocorre.

A metodologia Carta f é centrada na obtenção das frações solares, permitindo a obtenção destas frações solares para várias alternativas de projetos. A Tabela 3.5 ilustra a grande quantidade de combinações que podem ser analisadas. Com os custos dos equipamentos e da energia é possível encontrar uma combinação que resulte no melhor retorno para o investimento. Ainda que os valores reais que serão obtidos pelos usuários a cada mês serão diferentes daqueles calculados, na medida em que o aporte energético sofre variações em relação aos valores médios mensais utilizados pelo método, a variação das frações solares anuais é um indicativo importante para a busca das melhores combinações.

A melhor fração solar em termos econômicos será aquela que provoca o mais rápido retorno do investimento. Esta combinação dependerá principalmente do custo dos coletores, visto que a área destes coletores é o principal fator que afeta o aproveitamento energético, e do custo da energia alternativa, cuja substituição irá determinar o retorno do investimento. A simplificação de que uma fração solar pré-estabelecida é a melhor fração pode não se justificar em termos econômicos.

Para exemplificar a escolha econômica da melhor alternativa de projeto, baseado nos resultados de fração solar, foi realizado um levantamento do custo unitário dos coletores solares¹⁵ apresentados e utilizados nos itens 3.2 e 3.3:

- Modelo RSC-1000T com 1 m²: R\$ 607
- Modelo RSC-1400T com 1,4 m²: R\$ 742
- Modelo RSC-2000T com 2 m²: R\$ 930

Estes custos ilustram uma dificuldade que os valores reais incorporam nos cálculos, pois o custo por área de coletor varia com o modelo escolhido. Uma vez que é recomendável utilizar apenas um modelo nas instalações solares, para uniformizar o fluxo de água entre coletores, observamos que neste exemplo, atender a área de 5 m² com cinco coletores de 1 m² é mais caro que atender 6 m² com três coletores de 2 m².

A Tabela 3.8 apresenta os resultados do exemplo, onde foram considerados apenas os resultados obtidos para a localidade de Santa Maria, tais como apresentados no item 3.3, com o reservatório de 500 L. Admitiu-se um custo da energia auxiliar de 0,60 R\$/kWh e um custo adicional para o sistema de aquecimento solar, além dos coletores calculados em separado, de R\$ 4.000 igual para todas as alternativas.

Tabela 3.8 – Exemplo de escolha de alternativa de menor tempo de retorno do investimento

	Área total dos coletores					
	2 m ²	3 m ²	4 m ²	5 m ²	6 m ²	8 m ²
Frações solares anuais $\mathcal{F}$	0,39	0,53	0,63	0,70	0,76	0,83
Consumo auxiliar evitado kWh/ano	1555	2075	2473	2770	2988	3262
Custo auxiliar evitado R\$/ano	933	1245	1484	1662	1793	1957
Custo dos coletores R\$	930	1821	1860	3035	2790	3720
Custo do sistema R\$	4930	5821	5860	7035	6790	7720
Tempo de retorno (anos)	5,3	4,7	4,0	4,2	3,8	3,9

Fonte: elaborado pelo autor

O melhor período de retorno foi obtido com 6 m² e uma fração solar de 0,76, porém as soluções com 4 m² e 8 m² também possuem períodos de retorno próximos. Uma análise mais aprofundada deveria considerar uma taxa de desconto para o cálculo econômico e a eventual mudança de custo com outras alternativas de reservatório, podendo apontar para outra combinação alternativa. De forma geral, maiores custos

¹⁵ Levantamento realizado pelo autor em outubro de 2016 junto a fornecedores do equipamento em São Paulo

da energia auxiliar tendem a favorecer instalações de maiores frações solares, compensando o maior custo inicial.

Na metodologia 2 apenas uma combinação de reservatório e área de coletores é calculada para cada localidade, para a qual sempre é admitida a fração solar 0,7. Neste caso, pouca análise econômica é possível e a metodologia não oferece apoio para a avaliação de alternativas.

3.5 Sugestões de melhorias às duas metodologias de dimensionamento

A norma ABNT (2008) permite que métodos de dimensionamento alternativos sejam utilizados no lugar das duas metodologias sugeridas, porém é inegável que a utilização dos métodos sugeridos na norma fornece uma segurança aos projetistas, que pode até mesmo atingir uma dimensão legal.

Neste item são apresentadas sugestões referentes às duas propostas de dimensionamento existentes que poderiam ser consideradas em uma eventual revisão da norma ou como iniciativas de oferta de alternativas.

A melhor forma de dimensionamento de um sistema de aquecimento de água solar é uma simulação a partir de uma base confiável com dados que cubram um período amplo, para o qual a norma ou os vários órgãos associados atualmente não oferecem apoio. A simulação tem a vantagem de oferecer frações solares calculadas que levam em conta dados históricos com suas variabilidades, cuja importância está destacada no Apêndice A.

Atualmente é possível diminuir o custo de simulações com a oferta de sistemas na internet. O sítio do CRESESB (2015) é um exemplo positivo da oferta de informações de uma grande base de dados e de resultados de processamentos com grande valor em projetos. Ela oferece, em uma plataforma amigável, o resultado de uma base de dados solarimétricos com a identificação e oferta de resultados para várias inclinações de interesse de projetistas, tais como a maior média anual ou o maior mínimo anual.

É possível construir uma aplicação disponibilizada na internet que ofereça a simulação do sistema de aquecimento de água coberto no escopo da norma ABNT (2008), indicado na Figura 2.1, que é relativamente simples se comparado com aquele utilizado nas simulações para construção da metodologia da Carta f , mostrado na Figura 2.2. Esta aplicação poderá incorporar as características usuais no Brasil e oferecer opções de perfis de consumo representativos. Sua base de dados pode ser uma dentre as várias já disponíveis. Neste trabalho, no Apêndice B foram utilizados os dados de NREL (2014), que já estão formatados para simulações para vinte localidades brasileiras.

Para estas simulações ou para melhorias em métodos simplificados, seria útil se o INMETRO acrescentasse os valores dos coeficientes globais de perda de calor U_s , dos reservatórios térmicos certificados, valor usualmente expresso em $\text{kW}/^\circ\text{C}$ e que permite determinar a perda de calor destes equipamentos.

A metodologia da Carta f é a metodologia simplificada de maior utilidade para a avaliação de alternativas de projeto para uma avaliação econômica. Para facilitar sua utilização, a norma poderia facilitar o acesso a um roteiro, assim como fez com a metodologia 2. Ainda mais importante seria a revisão dos valores propostos pela metodologia, que deveriam ser validados para instalações com as características de escopo da norma e com as condições brasileiras. Esta revisão deverá provocar novos valores de frações solares anuais, que devem ser mais representativos para as instalações brasileiras. Os incentivos ao uso da metodologia da Carta f poderá proporcionar um aumento na maturidade dos projetos por incentivar a comparação entre alternativas e a explicitação dos ganhos esperados a cada mês durante todo ano.

A oferta de uma metodologia ainda mais simplificada como a metodologia 2 é de grande utilidade, porém ela não deveria apresentar um valor de referência de fração solar fixo, mas apenas uma faixa ampla que o mesmo deve se situar. Deveria incorporar a recomendação que avaliações econômicas devem utilizar os roteiros que efetivamente calculam a fração solar.

É recomendado também que a metodologia 2 tivesse uma revisão na relação indicada entre o volume do reservatório V_R e a energia útil E_{util} a ser atendida pelo

aproveitamento, para evitar que a aplicação do roteiro levasse a aumentos desnecessários dos coletores ou subdimensionamento de reservatórios. Esta relação está estabelecida na equação (2.10) e avaliada detalhadamente no item 3.1. A alternativa recomendada neste trabalho é a utilização da equação (3.1) no lugar da equação (2.10).

Outro ponto de atenção refere-se à explicitação do valor da irradiação global média anual I_G indicada na equação (2.14), cuja indefinição está também discutida no item 3.1.

O dimensionamento do reservatório térmico poderia ser realizado com um roteiro adicional a parte, uma vez que nenhuma das duas metodologias atualmente existentes permite considerar a curva horária da demanda, que é um fator determinante do desempenho da reserva térmica.

Deve-se recordar que o escopo da norma ABNT (2008) não é apenas de pequenas instalações e eventuais melhorias nos cálculos podem ter um impacto significativo na implantação de sistemas maiores de aproveitamento solar. Mesmo as instalações menores merecem um dimensionamento cuidadoso, pois ocorrem em quantidades cujo impacto do conjunto também é importante. São justamente estas últimas que mais demandam um dimensionamento que seja simultaneamente de baixo custo e que possa oferecer resultados confiáveis.

4 CONCLUSÕES

A norma técnica ABNT (2008) oferece duas orientações de dimensionamento que possuem aspectos favoráveis e outros que podem gerar questionamento que foram analisados neste trabalho. As duas metodologias são simplificadas em relação a um dimensionamento baseado em simulação, apesar de que a norma apresenta apenas a metodologia 2 como simplificada. Foram analisadas algumas vantagens e deficiências em cada uma das metodologias, que podem orientar os projetistas quanto à limitação dos resultados obtidos.

Foi destacado que as duas metodologias podem carecer de precisão para as condições brasileiras. Algumas recomendações de revisão das metodologias foram apresentadas e foi destacada a importância que a oferta de uma nova aplicação para simulação teria para melhoria dos dimensionamentos dos aproveitamentos solares, considerando que o custo atual da implantação deste tipo de aplicação é significativamente menor nos dias atuais.

A revisão das técnicas econômicas permitiu confirmar o papel central que o valor da fração solar estimada para uma instalação de aquecimento solar possui no resultado da viabilidade econômica desta instalação. Deu-se uma atenção no entendimento de como esta grandeza é formada, com o destaque que existe uma grande importância da variação da distribuição da irradiação média diária na formação das frações solares obtidas pelos aproveitamentos. Esta análise não foi explicitamente encontrada em nenhuma das referências estudadas e pode se constituir em uma base para um estudo futuro. Salienta-se que as simulações que utilizam dados horários automaticamente incorporam estas variações das irradiações médias diárias e, por isto mesmo, devem fornecer resultados mais precisos. No caso particular da metodologia da Carta f , como é baseada em simulações, também incorporou as variações dos dados solares em suas estimativas; o problema é que não considerou esta variação da distribuição de dados solares na formulação de seus adimensionais X e Y , ou seja, não permite que localidades com diferentes distribuições pudessem ter suas frações solares revisadas pelo efeito destas diferenças. Como a metodologia está sugerida para utilização no Brasil, que apresenta variações significativas das distribuições de médias diárias de irradiação,

avaliadas neste trabalho, uma das recomendações apresentadas foi a revisão das frações solares calculadas a partir de simulações que utilizem dados das localidades brasileiras. No caso particular da metodologia 2, as variações nos componentes da formação da fração solar indicam que a atribuição de um valor fixo pré-estabelecido pode carecer da precisão que seria desejável para que a fração solar possa ser utilizada em avaliações econômicas de projeto.

A recomendação deste trabalho é que sempre que for desejada uma análise econômica de um aproveitamento solar, a metodologia Carta f seja escolhida, pois é a única entre as duas que permite a avaliação dos impactos da variação dos elementos principais constituintes do sistema de aproveitamento solar nos desempenhos a serem obtidos.

Nos exemplos numéricos apresentados, foram observadas as diferenças entre as frações solares anuais estimadas por cada método, sem se detectar uma tendência uniforme, visto que apenas três localidades foram analisadas e as duas metodologias tiveram casos com os maiores valores. O exemplo de avaliação econômica mostrou que a melhor alternativa deve ser avaliada entre as opções de cálculo, com valores reais de custo e que a melhor alternativa não está em um valor pré-estabelecido de fração solar, mas naquela alternativa que apresenta o melhor retorno do investimento.

REFERÊNCIAS

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

_____. **NBR 10185**: Reservatórios térmicos para líquidos destinados a sistemas de energia solar - Determinação de desempenho térmico - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2013. 12 p.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO BRITO. **Potencial solar – Sundata**. Rio de Janeiro, 2015, CEPEL. Disponível em < <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=sundata&>>. Acesso em 11 set. 2015.

CLIMATE-DATA.ORG. **Dados climáticos para cidades mundiais**. Oedheim, [2012]. Dados para o Brasil disponível em <<http://pt.climate-data.org/country/114/>>. Acesso em 17 out. 2016.

DUFFIE, J.A.; BECKMAN, W. A. Solar Heating and Cooling. **Science**, v.191, n.4223, p. 143-149. 1976. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/1742010>. Acesso em 19 ago. 2016.

_____. **Solar engineering of thermal processes** 4th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013. 910 p.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Portaria nº 395**, de 10 de novembro de 2008. Brasília: MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR, 2008. 77p. Disponível em < <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001383.pdf>>. Acesso em 14 set. 2016.

_____. **PBE- Coletor Solar aplicação Banho e Piscina**. Tabelas de Consumo / Eficiência Energética. Brasília: MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR, 2016a. 7 p. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/coletores-solares-banho-e-piscina.pdf>>. Acesso em 14 set. 2016.

_____. **PBE- Sistema Acoplado de Aquecimento Solar de Água.** Tabelas de Consumo / Eficiência Energética. Brasília: MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR, 2016b. 2 p. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/sistemas-acoplados.pdf>>. Acesso em 14 set. 2016.

_____. **PBE- Reservatórios Térmicos de alta e baixa pressão.** Tabelas de Consumo / Eficiência Energética. Brasília: MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR, 2016c. 4 p. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/reservatorios-tecnicos-alta-e-baixa-pressao.pdf>>. Acesso em 14 set. 2016.

_____. **PBE- Reservatórios Térmicos Operação de Nível OpN.** Tabelas de Consumo / Eficiência Energética. Brasília: MINISTÉRIO DO DESENVOLVIMENTO, INDÚSTRIA E COMÉRCIO EXTERIOR, 2016d. 4 p. Disponível em <<http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/reservatorios-termicos-operacao-nivel-opn.pdf>>. Acesso em 14 set. 2016.

National Renewable Energy Laboratory. **Brazil Hourly DNI, GHI and Diffuse Solar Data.** Golden, CO: U.S. Department of Energy, 2014. Arquivo compactado com arquivos de dados formatados. Disponível em <<http://en.openei.org/doe-opendata/dataset/brazil-hourly-dni-ghi-and-diffuse-solar-data>>. Acesso em 8 out. 2016

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas brasileiro de energia solar** 1ª ed. São José dos Campos: INPE, 2006. 60 p. Disponível em <http://ftp.cptec.inpe.br/labren/publ/livros/brazil_solar_atlas_R1.pdf>. Acesso em 11 set. 2016.

PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Critérios para a concessão do selo PROCEL de economia de energia a sistemas e equipamentos para aquecimento solar de água.** Documento complementar ao regulamento para concessão do selo PROCEL de economia de energia. Revisão I. Rio de Janeiro: Eletrobras, 2010. 4 p.

TESOURO NACIONAL. **Rentabilidade dos títulos públicos**. Brasília: Tesouro Nacional. 2016. Disponível em < <http://www.tesouro.fazenda.gov.br/tesouro-direto-precos-e-taxas-dos-titulos>>. Acesso em 25 de set. de 2016.

TIBA, C. et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil**: banco de dados solarimétricos. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p. Disponível em <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf>. Acesso em 11 set. 2016.

APÊNDICE A – Avaliação da fração solar a partir da distribuição diária da irradiação

A metodologia 2 indica como valor fixo pré-estabelecido no método para a fração solar 0,7, sem justificar qual a razão para este valor.

Por essa metodologia, o sistema é dimensionado para atender à necessidade energética mais as perdas com um aporte energético igual à radiação diária global média anual I_G . A fração solar real que será obtida com este aporte específico é função da distribuição das radiações diárias H_{dia} em relação a este valor médio, pois nos dias que este aporte é menor que o necessário para atender a demanda, a fonte auxiliar deverá ser acionada, diminuindo a fração solar. Além da distribuição, a fração solar também depende das características de desempenho energético dos coletores, pois são estas características que determinam a parcela de aproveitamento real, que somente ocorre acima de um patamar crítico de irradiação.

Neste Apêndice é analisada de forma simplificada qual é a distribuição que resultaria no valor indicado de 0,7 e qual é a variação desta fração com mudanças na distribuição. O Apêndice B avalia quais são as distribuições encontradas no Brasil.

Os valores calculados nesta análise não são substitutos dos valores mais precisos que são obtidos com simulações numéricas, principalmente pelas simplificações adotadas, porém permitem um entendimento das variáveis envolvidas, tendências e desvios da fração solar em aproveitamentos calculados apenas a partir de valores médios.

Simplificações adotadas:

A distribuição pode ser aproximada a uma curva de distribuição normal centrada no valor da irradiação diária média anual I_G e com desvio padrão σ , cujo impacto de sua variação se deseja avaliar.

O reservatório térmico é suficiente para absorver as diferenças horárias dentro de um dia, mas não guarda energia para o dia seguinte. Com esta simplificação, um aporte energético diário igual à demanda resultará em uma fração solar igual a 1, independente das variações horárias. O mesmo valor

de fração solar é obtido para todas as vezes que o aporte energético é superior à demanda.

A fração solar é aproximada a uma reta entre os valores da irradiação diária crítica I_c e irradiação diária média anual I_G .

A irradiação diária crítica é admitida como 1 kWh/m² dia. O valor real depende das características de aproveitamento energético dos coletores, da distribuição horária da irradiação e da proporção de irradiação difusa. O valor adotado é uma estimativa do autor para elaboração deste modelo simplificado.

A fração solar diária será dada pela equação (A.1):

$$f_{dia}(H_{dia}) = \begin{cases} 0 & \text{se } H_{dia} < I_c \\ \frac{H_{dia} - I_c}{I_G - I_c} & \text{se } I_c \leq H_{dia} < I_G \\ 1 & \text{se } H_{dia} \geq I_G \end{cases} \quad (A.1)$$

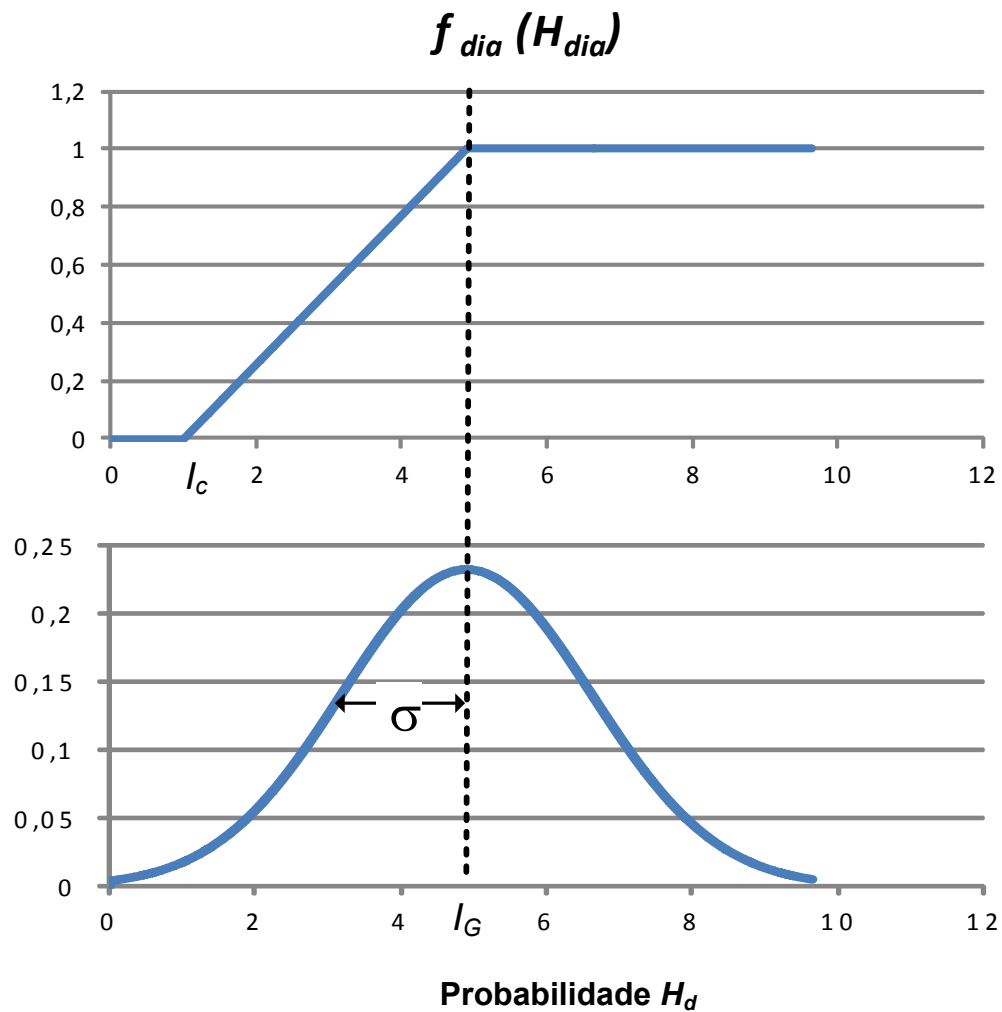
Como, por hipótese, o aporte diário segue a distribuição normal, em 50% dos dias a fração solar será igual a 1, pois a irradiação será maior ou igual à média anual.

Temos a distribuição de probabilidades deste aporte $P_{H_{dia}}$ dada pela equação (A.2), que é a equação da distribuição normal de média I_G e com desvio padrão σ :

$$P_{H_{dia}} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(H_{dia} - I_G)^2}{2\sigma^2}} \quad (A.2)$$

A Figura A.1 mostra um exemplo da distribuição de probabilidades de irradiação diária centrada no valor médio I_G e com desvio padrão σ , alinhada com a função da fração solar associada à irradiação solar diária neste modelo simplificado proposto.

Figura A.1 - Exemplo da estimativa da fração solar e da distribuição de probabilidade da irradiação diária



Fonte: elaborado pelo autor

A fração solar média de longo período será a integração do produto das funções (A.1) e (A.2) em todo intervalo, a partir do menor valor fisicamente possível, zero:

$$\mathcal{F} = \int_0^{\infty} f_{dia}(H_{dia}) \cdot P_{H_{dia}} dH_{dia} \quad (A.3)$$

A parcela para $H_{dia} \geq I_G$ é igual a 0,5, correspondente à metade da distribuição normal multiplicado pela unidade; este valor soma à outra metade da distribuição, como está indicada na equação (A.4), onde o valor é nulo para o intervalo de 0 a I_c , pois $f_{dia} = 0$ neste intervalo.

$$\mathcal{F} = \int_{I_c}^{I_G} \frac{H_{dia} - I_c}{I_G - I_c} \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(H_{dia} - I_G)^2}{2\sigma^2}} dH_{dia} + 0,5 \quad (A.4)$$

A Tabela A.1 mostra os valores de fração solar obtidos numericamente para $I_G = 4,901 \text{ kW/m}^2$, valor aparentemente adotado pela norma ABNT (2008) como valor médio e diferentes valores de σ , calculados como uma percentagem do valor de I_G .

A Figura A.2 mostra estes valores graficamente.

Pelos valores obtidos, pode-se concluir que a fração solar $\mathcal{F} = 0,7$ é obtida em um caso particular que a distribuição diária tem um desvio padrão de cerca de 70% do valor médio anual I_G .

O Apêndice B analisa as distribuições no Brasil, visando avaliar a aproximação pela distribuição normal adotada nesta análise e verificar os valores de desvio padrão observados.

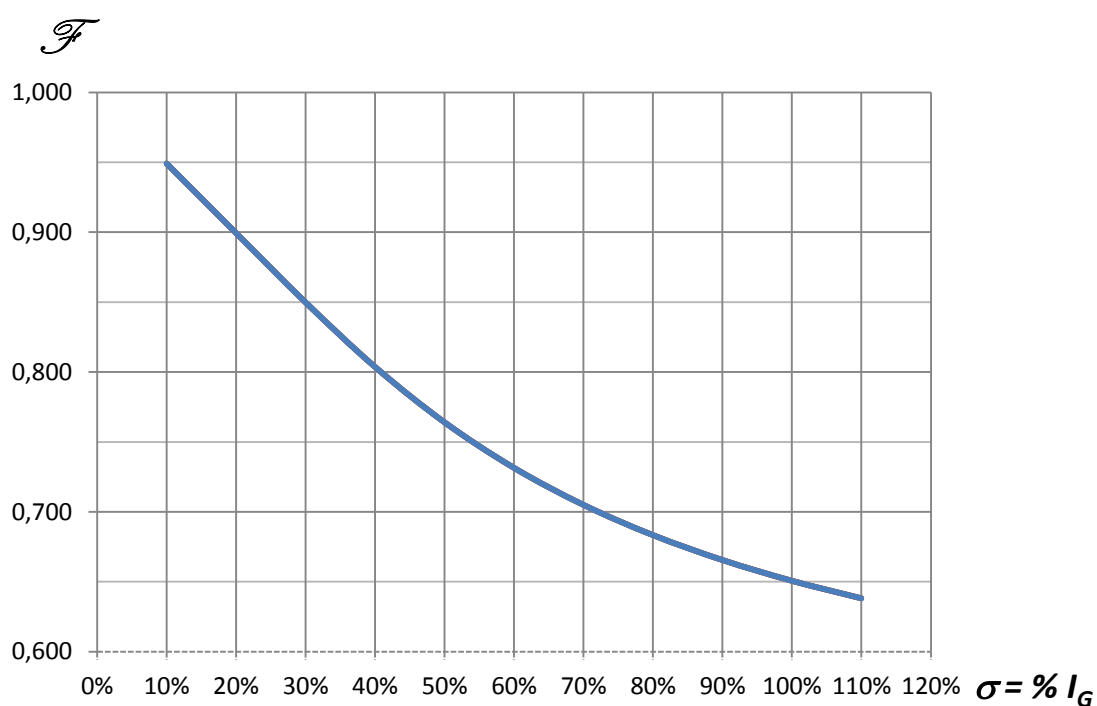
Nesta avaliação foi possível concluir que a aproximação pela distribuição normal é boa, porém os valores de desvio padrões no Brasil estão entre 15% a 45%. Com estes valores, para este modelo simplificado, as frações solares esperadas são significativamente maiores que o valor 0,7 indicado na norma, pois se distribuem entre 0,78 e 0,92.

Tabela A.1 – Valores estimados de fração solar pelo modelo simplificado a partir da distribuição de irradiação diária

$I_G = \text{valor médio} = 4,901 \text{ kWh/m}^2$		
Desvio padrão σ		Fração solar
% de I_G	kWh/m ²	$\mathcal{F}$
10%	0,490	0,949
20%	0,980	0,899
30%	1,470	0,850
40%	1,960	0,804
50%	2,451	0,764
60%	2,941	0,732
70%	3,431	0,705
80%	3,921	0,683
90%	4,411	0,666
100%	4,901	0,651
110%	5,391	0,638

Fonte: elaborado pelo autor

Figura A.2 - Fração solar em função do desvio padrão da distribuição de radiação solar diária estimada pelo modelo simplificado



Fonte: elaborado pelo autor

APÊNDICE B – Avaliação das distribuições diárias de irradiação no Brasil

A referência NREL (2014) disponibiliza os dados horários de irradiação global no plano horizontal para vinte localidades do Brasil, mostradas na Figura 2.12. Com estes valores, foi possível calcular o aporte diário energético da irradiação, que é a soma dos valores horários. Com os valores diários, foi possível calcular o valor médio e o desvio padrão da distribuição de valores diários.

Os objetivos desta análise foram:

Avaliar se a distribuição normal é uma boa aproximação para a distribuição de irradiações diárias, hipótese adotada no Apêndice A.

Conhecer os desvios padrões que ocorrem no Brasil e avaliar qual é a faixa correspondente da fração solar que será obtida com um dimensionamento igual ao valor médio de irradiação, tal como proposto na metodologia 2 da norma ABNT (2008). Com isto, é possível avaliar o valor indicado fixo nesta metodologia de 0,7.

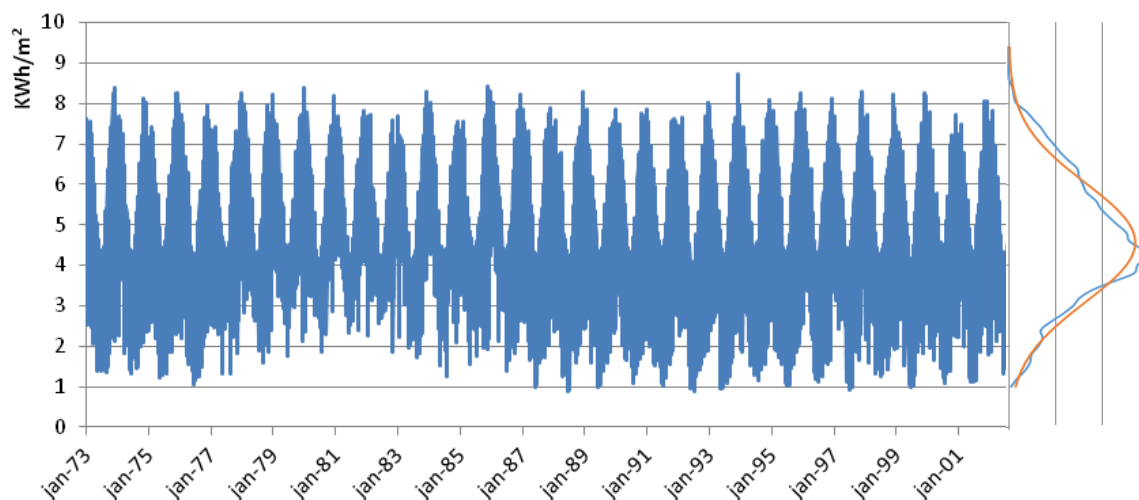
Ao avaliar os dados de um único ano, a distribuição real sofre desvios significativos em relação à distribuição normal de mesma média e desvio padrão, pois são apenas 365 pontos. Quando analisamos uma amostra maior, observamos que a aproximação é bastante aderente.

A Figura B.1 mostra os dados considerados para um dos pontos, São Paulo. Esta amostra contém as irradiações diárias global no plano horizontal de 10.804 dias. A distribuição da função de densidade de probabilidade e a distribuição normal calculada para esta amostra estão mostradas na extremidade direita para ilustrar a relação e formação destes valores a partir da amostra de dados.

A Tabela B.1 apresenta os resultados da análise dos dados das distribuições de irradiação diária para os vinte pontos disponíveis, com um gráfico da função de densidade de probabilidade comparativo entre a distribuição observada e a distribuição normal calculada com a média e desvio padrão da amostra; todos os gráficos desta tabela estão na mesma escala, com os valores das abscissas

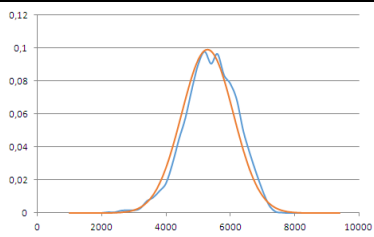
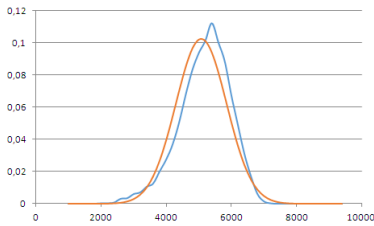
indicados em Wh/m^2 , permitindo a comparação visual. As localidades estão ordenadas pelas latitudes.

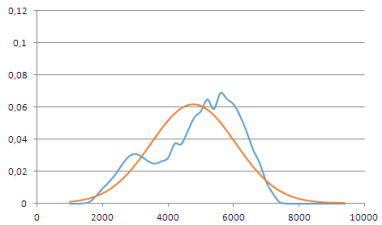
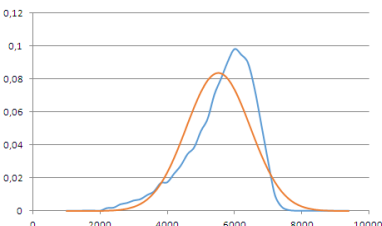
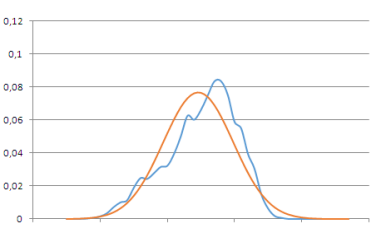
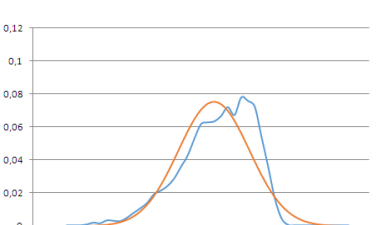
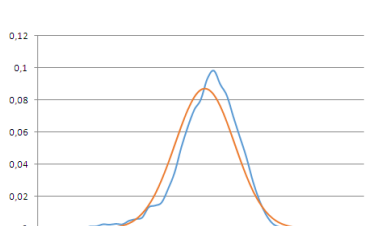
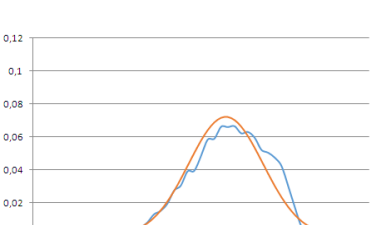
Figura B.1 - Amostra da irradiação diária no plano horizontal - São Paulo

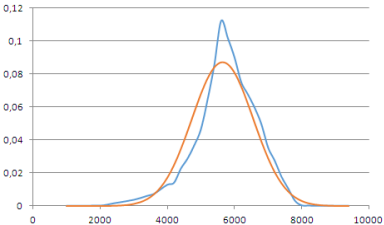
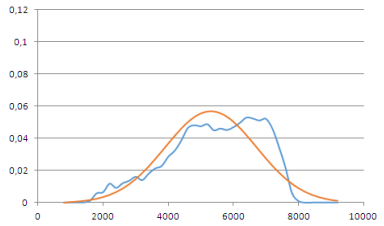
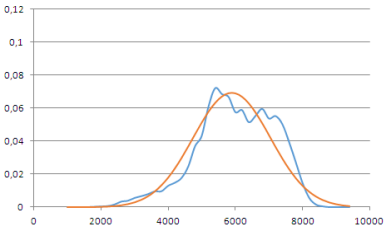
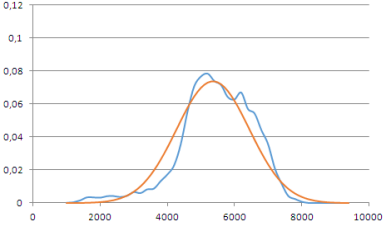
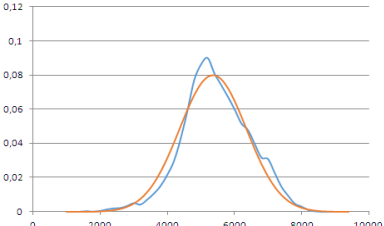
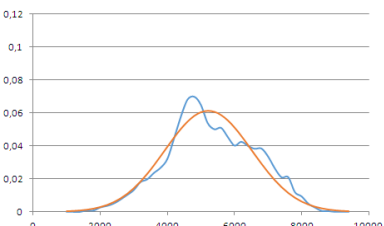


Fonte: elaborado pelo autor

Tabela B.1 – Características das distribuições das irradiações globais diárias no plano horizontal para vinte localidades do Brasil

Localidade	Latitude Longitude °	Média H_{dia} kWh/m^2	Desvio padrão kWh/m^2 % H_{dia}	Função densidade de probabilidade Wh/m^2
BOA VISTA	2,833 -60,700	5,29	0,81 15%	
BELÉM	-1,383 -48,483	5,08	0,78 15%	

Localidade	Latitude Longitude °	Média H_{dia} kWh/m ²	Desvio padrão kWh/m ²	% H_{dia}	Função densidade de probabilidade Wh/m ²
MANAUS	-3,133 -60,017	4,77	1,29	27%	
FORTALEZA	-3,783 -38,533	5,52	0,95	17%	
JACAREACANGA	-6,267 -57,733	4,92	1,04	21%	
RECIFE	-8,067 -34,85	5,39	1,06	20%	
PORTO VELHO	-8,767 -63,917	5,12	0,91	18%	
PETROLINA	-9,35 -40,55	5,74	1,11	19%	

Localidade	Latitude Longitude °	Média H_{dia} kWh/m ²	Desvio padrão kWh/m ² % H_{dia}	Função densidade de probabilidade Wh/m ²
PORTO NACIONAL	-10,7 -48,4	5,64	0,91 16%	
SALVADOR	-13,017 -38,517	5,31	1,40 26%	
BOM JESUS DA LAPA	-13,267 -43,417	5,89	1,15 20%	
CUIABA	-15,65 -56,1	5,36	1,08 20%	
BRASÍLIA	-15,867 -47,933	5,36	1,00 19%	
BELO HORIZONTE	-19,85 -43,95	5,22	1,30 25%	

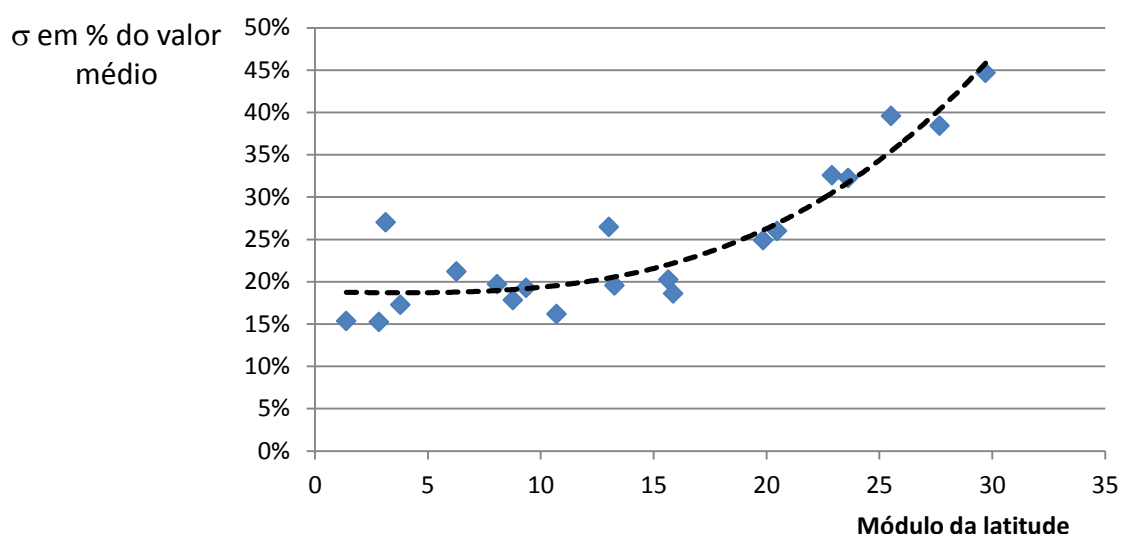


Fonte: elaborado pelo autor

Os valores da Tabela B.1 mostram que existe uma tendência de aumento dos desvios padrões com o aumento da latitude, principalmente para valores acima de 10°. Isto pode ser visualizado na Figura B.2.

No Apêndice A, foi apresentada a relação inversa existente entre a fração solar e o desvio padrão da distribuição diária da irradiação global, ou seja, distribuições com maior variações devem conduzir a aproveitamentos com menor fração solar se estes aproveitamentos estiverem com o mesmo dimensionamento em relação ao aporte médio de longo prazo. Com a associação observada entre a latitude e a distribuição, podemos esperar menores frações solares nas maiores latitudes, para instalações dimensionadas de forma igual em relação ao valor médio de longo prazo. A metodologia 2 da norma ABNT (2008) sugere o aporte médio como valor de dimensionamento da área dos coletores, implicando em frações diferentes para cada localidade.

Figura B.2 - Relação entre o módulo da latitude e o desvio padrão da distribuição de irradiação global diária em pontos do Brasil



Fonte: elaborado pelo autor

Os gráficos apresentados na Tabela B.1 mostram que a aproximação pela distribuição normal é próxima das distribuições dos dados reais na maioria das localidades avaliadas, existindo uma tendência de que o desvio seja de valores de frequência maiores que a média nas latitudes baixas e de valores de frequência menores nas latitudes altas; este efeito, se comprovado em mais localidades, reforça a tendência de que as localidades com maior latitude devem ter menor fração solar

nos aproveitamentos dimensionados para o valor médio, pois a frequência maior de valores abaixo da média irá provocar maior necessidade de geração energética pela fonte auxiliar, diminuindo a fração solar do aproveitamento.

APÊNDICE C – Tabelas com exemplos de cálculos pela metodologia Carta f

Os dados a seguir são referentes aos exemplos do item 3.3: Dimensionamento da área de coletores para cada instalação e método.

Tabela C.1 – Exemplo de cálculo pela metodologia Carta f - Petrolina

Mês	N dias/mês	H_T Tab. 7 kWh/m²dia	H_T Tab. 7 MJ/m²dia	T_{amb} Tab. 8 °C	T_w Eq. 3.2 °C	L Eq. 2.3 GJ/mês	X Eq. 2.1	X_c Eq. 2.4 e 2.5	Y Eq. 2.2	f Eq. 2.6	fL GJ/mês
Janeiro	31	5,1	18,36	26,2	26,2	0,81	2,87	4,93	1,42	0,75	0,61
Fevereiro	28	6,2	22,3	26,3	26,3	0,72	2,89	4,96	1,74	0,89	0,64
Março	31	5,4	19,4	25,9	26,1	0,81	2,88	4,94	1,50	0,79	0,64
Abril	30	5,2	18,7	25,4	25,7	0,81	2,80	4,81	1,40	0,75	0,61
Maio	31	5,3	19,1	24,1	24,8	0,89	2,69	4,59	1,34	0,73	0,65
Junho	30	5,1	18,4	22,9	23,5	0,93	2,52	4,28	1,20	0,67	0,62
Julho	31	5,2	18,7	22,2	22,6	1,01	2,41	4,06	1,15	0,66	0,67
Agosto	31	5,6	20,2	22,6	22,4	1,02	2,37	3,99	1,23	0,70	0,72
Setembro	30	5,5	19,8	24,1	23,4	0,94	2,46	4,15	1,28	0,72	0,68
Outubro	31	5,7	20,5	25,7	24,9	0,88	2,65	4,51	1,46	0,79	0,69
Novembro	30	5,3	19,1	26,0	25,9	0,80	2,82	4,83	1,45	0,77	0,61
Dezembro	31	5,1	18,4	26,1	26,1	0,81	2,86	4,90	1,41	0,75	0,61

Fonte: elaborado pelo autor

Área dos coletores $A_c = 3 \text{ m}^2$

$$F'_R(\overline{\tau\alpha}) = 0,672$$

Temperatura de consumo $T_m = 40^\circ\text{C}$

Volume do reservatório = $V_R = 300 \text{ L}$

$$FrUL = 3,905, \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$$

Volume de consumo diário = $V_{\text{cons}} = 488,9 \text{ L}$

Fração solar anual $\mathcal{F} = 0,743$

Tabela C.2 – Exemplo de cálculo pela metodologia Carta *f* – Belo Horizonte

Mês	<i>N</i> dias/mês	<i>H_T</i> <i>Tab. 7</i> kWh/m²dia	<i>H_T</i> <i>Tab. 7</i> MJ/m²dia	<i>T_{amb}</i> <i>Tab. 8</i> °C	<i>T_w</i> <i>Eq. 3.2</i> °C	<i>L</i> <i>Eq. 2.3</i> GJ/mês	<i>X</i> <i>Eq. 2.1</i>	<i>X_c</i> <i>Eq. 2.4 e 2.5</i>	<i>Y</i> <i>Eq. 2.2</i>	<i>f</i> <i>Eq. 2.6</i>	<i>fL</i> GJ/mês
Janeiro	31	4,0	14,40	22,9	22,2	1,04	4,67	8,68	1,74	0,73	0,76
Fevereiro	28	5,3	19,1	22,6	22,8	0,91	4,84	9,05	2,38	0,91	0,82
Março	31	4,1	14,8	21,9	22,3	1,03	4,75	8,86	1,79	0,74	0,77
Abril	30	4,7	16,9	20,2	21,1	1,07	4,54	8,44	1,92	0,80	0,86
Maio	31	4,4	15,8	18,2	19,2	1,21	4,24	7,82	1,64	0,72	0,88
Junho	30	4,6	16,6	17,1	17,7	1,26	4,00	7,32	1,59	0,72	0,91
Julho	31	4,9	17,6	17,7	17,4	1,31	3,93	7,15	1,68	0,77	1,01
Agosto	31	5,0	18,0	19,3	18,5	1,25	4,05	7,39	1,80	0,80	1,00
Setembro	30	4,9	17,6	21,0	20,2	1,12	4,29	7,90	1,91	0,82	0,92
Outubro	31	4,3	15,5	21,9	21,5	1,08	4,54	8,42	1,79	0,76	0,82
Novembro	30	4,5	16,2	22,1	22,0	1,01	4,67	8,69	1,93	0,80	0,81
Dezembro	31	4,0	14,4	21,5	21,8	1,06	4,65	8,66	1,70	0,72	0,76

Fonte: elaborado pelo autor

Área dos coletores $A_c = 6 \text{ m}^2$

$$F'_R(\overline{\tau\alpha}) = 0,672$$

Temperatura de consumo $T_m = 40^\circ\text{C}$

Volume do reservatório = $V_R = 400 \text{ L}$

$$FrUL = 3,905, \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$$

Volume de consumo diário = $V_{\text{cons}} = 488,9 \text{ L}$

Fração solar anual $\mathcal{F} = 0,773$

Tabela C.3 – Exemplo de cálculo pela metodologia Carta *f* – Santa Maria

Mês	<i>N</i> dias/mês	<i>H_T</i> <i>Tab. 7</i> kWh/m²dia	<i>H_T</i> <i>Tab. 7</i> MJ/m²dia	<i>T_{amb}</i> <i>Tab. 8</i> °C	<i>T_w</i> <i>Eq. 3.2</i> °C	<i>L</i> <i>Eq. 2.3</i> GJ/mês	<i>X</i> <i>Eq. 2.1</i>	<i>X_c</i> <i>Eq. 2.4 e 2.5</i>	<i>Y</i> <i>Eq. 2.2</i>	<i>f</i> <i>Eq. 2.6</i>	<i>fL</i> GJ/mês
Janeiro	31	4,4	15,84	24,6	23,5	0,96	4,92	9,17	2,06	0,82	0,79
Fevereiro	28	4,6	16,6	24,1	24,4	0,82	5,23	9,86	2,27	0,86	0,71
Março	31	4,8	17,3	22,1	23,1	0,98	4,97	9,34	2,20	0,86	0,84
Abril	30	4,9	17,6	18,8	20,5	1,10	4,48	8,33	1,94	0,81	0,90
Maio	31	4,6	16,6	16,2	17,5	1,31	4,02	7,36	1,58	0,72	0,94
Junho	30	3,9	14,0	14,2	15,2	1,40	3,73	6,77	1,22	0,57	0,80
Julho	31	4,3	15,5	14,6	14,4	1,49	3,60	6,47	1,30	0,63	0,93
Agosto	31	4,5	16,2	15,6	15,1	1,45	3,66	6,59	1,40	0,67	0,97
Setembro	30	4,4	15,8	17,3	16,5	1,33	3,79	6,86	1,45	0,68	0,90
Outubro	31	4,9	17,6	19,7	18,5	1,25	4,03	7,35	1,76	0,79	0,99
Novembro	30	4,9	17,6	22,1	20,9	1,07	4,40	8,11	1,98	0,84	0,90
Dezembro	31	4,8	17,3	22,3	22,2	1,04	4,71	8,77	2,09	0,84	0,87

Fonte: elaborado pelo autor

Área dos coletores $A_c = 6 \text{ m}^2$

$$F'_R(\overline{\tau\alpha}) = 0,672$$

Temperatura de consumo $T_m = 40^\circ\text{C}$

Volume do reservatório = $V_R = 400 \text{ L}$

$$FrUL = 3,905, \text{ W}/(\text{m}^2\text{°C})$$

Volume de consumo diário = $V_{\text{cons}} = 488,9 \text{ L}$

Fração solar anual $\mathcal{F} = 0,742$