



Estudo da viabilidade de aproveitamento da energia solar em cidades da América do Sul através da aplicação do método da fração solar

THAIS FERNANDA SILVA

julho de 2017

ESTUDO DA VIABILIDADE DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR EM CIDADES DA AMÉRICA DO SUL ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DA FRAÇÃO SOLAR

Thais Fernanda Sila

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

ESTUDO DA VIABILIDADE DE APROVEITAMENTO DA ENERGIA SOLAR EM CIDADES DA AMÉRICA DO SUL ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DA FRAÇÃO SOLAR

Thais Fernanda Sila
1160392

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação de Leonardo José da Silva Ribeiro.

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

JÚRI

Presidente

Doutoramento, Francisco José Gomes da Silva
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutoramento, Leonardo José da Silva Ribeiro
Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Co-orientador

Doutoramento, Raquel da Cunha Ribeiro da Silva
Professor Adjunto, Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Co-orientador

Mestrado, Andresa Baptista da Silva
Técnico Superior, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutoramento, Ana Isabel Palmero Marrero
Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto Superior de Engenharia do Porto pela oportunidade de estudo e realização deste trabalho e à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por todo incentivo e embasamento necessário para conclusão desta etapa.

Agradeço ao Professor Doutor Leonardo José da Silva Ribeiro pelos ensinamentos e orientação.

Manifesto também minha gratidão à minha família e namorado, que mesmo longe me deram todo apoio necessário durante este ano.

PALAVRAS CHAVE

Energias renováveis; energia solar; fração solar; coletor solar plano; águas quentes sanitárias.

RESUMO

O trabalho apresenta um estudo sobre a viabilidade de aproveitamento da energia solar em seis diferentes cidades da América do Sul (Buenos Aires, Caracas, Lima, Montevideo, Rio de Janeiro e Quito) no suprimento de demandas energéticas de aquecimento de águas sanitárias em uma residência. Para tanto, primeiramente é feita uma análise quantitativa da irradiação solar mensal que pode ser absorvida por coletores solares pousados nas seis cidades. Em seguida, aplica-se o método da fração solar a fim de conhecer qual a parcela das cargas térmicas de águas quentes sanitárias na residência pode ser suprida pelo coletor solar que compõe o sistema de aquecimento. Ao averiguar e comparar os resultados encontrados notou-se que para todas as cidades, a energia solar apresentou alta participação no suprimento das cargas térmicas, mostrando ser uma ótima alternativa à utilização de energia elétrica para aquecimento de águas sanitárias.

KEYWORDS

Renewable energy; solar energy; solar fraction; flat solar collector; domestic hot water.

ABSTRACT

This paper presents a study on the feasibility of using solar energy in six different cities of South America (Buenos Aires, Caracas, Lima, Montevideo, Rio de Janeiro and Quito) in the supply of energy demands for heating domestic water in a residence. In order to do so, a quantitative analysis of the monthly solar irradiance that can be absorbed by solar collectors is carried out in these six cities. Then, the solar fraction method is applied with the purpose of to know which part of the thermal loads of hot sanitary water in the residence can be supplied by the solar collector that compose the heating system. By searching and comparing the results found, it was observed that for all cities, solar energy showed a high participation in the supply of thermal loads, proving to be a great alternative for heating sanitary waters.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

AQS	Águas quentes sanitárias
ASDC	<i>Atmospheric Science Data Center</i>
CT	Cargas térmicas
IVA	Imposto de valor agregado
PRI	Prazo de retorno de investimento
PVP	Preço de venda ao público

Lista de Unidades

€	Euro
°C	Grau Celsius
J	Joule
K	Kelvin
L	Litro
m	Metro
min	Minuto
kg	Quilograma
kWh	Quilowatt-hora
S	Segundo
W	Watt

GLOSSÁRIO DE TERMOS

Termo	Designação	Unidade
Ha	Altura angular	°
θ	Ângulo de incidência	°
β	Ângulo de inclinação	°
H _s	Ângulo solar	°
H _{ss}	Ângulo solar do pôr do sol	°
A _c	Área do coletor	m ²
χ	Ascensão reta	°
Az	Azimute	°
c	Calor específico	J/(kg.K)
CT _m	Cargas térmicas mensais	kWh
C _{res}	Capacidade de armazenamento do reservatório	L
M	Capacidade de armazenamento do reservatório por área do coletor	L/m ²
α	Coefficiente de absorção	-
U _a	Coefficiente de perdas no sentido ascendente	W/(m ² .°C)
U _d	Coefficiente de perdas no sentido descendente	W/(m ² .°C)
U _o	Coefficiente de perdas pelas orlas	W/(m ² .°C)
ρ	Coefficiente de reflexão total hemisférica	-
τ	Coefficiente de transmissão	-
U _L	Coefficiente global de perdas de calor no coletor	W/(m ² .°C)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W/(m ² .K ⁴)
S ₀	Constante solar	W/m ²
M _{AQS}	Consumo médio diário de águas quentes sanitárias por pessoa	L/(dia.pessoa)
c _{mín}	Consumo mínimo	L/min
δ	Declinação	°
F'	Fator de eficiência do coletor	-
F _R	Fator de remoção de calor do coletor	-
F' _R	Fator de remoção de calor modificado	-
f	Fração solar	-
K _T	Índice de claridade	-
I	Irradiação	J/(m ² .dia)

φ	Latitude	°
$m_{\text{água}}$	Massa volúmica da água	kg/L
n_m	Número de dias do mês	-
n_{hab}	Número de habitantes na residência	-
n_{uso}	Número de vezes que cada habitante utiliza determinado recurso por dia	uso/(dia.pessoa)
n	Número do dia do ano	dia
a_1	Parâmetro de perda de calor	W/(m ² .K)
Q_p	Perda total de energia no coletor	W
E_b	Poder emissivo	W/m ²
S_D	Radiação diária que chega à uma superfície horizontal do exterior da atmosfera	J/m ²
R_{DIF}	Radiação difusa que chega a uma superfície pousada na Terra	J/(m ² .dia)
R_{DIR}	Radiação direta que chega a uma superfície pousada na Terra	J/(m ² .dia)
G	Radiação global média diária mensal	J/(m ² .dia)
R_A	Radiação por albedo que chega a uma superfície pousada na Terra	J/(m ² .dia)
S	Radiação que chega à uma superfície horizontal no exterior da atmosfera a qualquer tempo	W/m ²
S_n	Radiação que chega ao exterior da atmosfera	W/m ²
r	Razão entre radiação incidente em uma superfície inclinada em relação à horizontal	-
η_0	Rendimento do coletor	-
M_p	Representa a capacidade padrão de armazenamento por área	L/m ²
T_s	Temperatura à saída do coletor	K ou °C
T_a	Temperatura ambiente média mensal	K ou °C
T_Q	Temperatura da água aquecida	K ou °C
T_{rede}	Temperatura da água que circula na rede pública	K ou °C
T_{abs}	Temperatura da placa absorvedora	K ou °C
T_{ref}	Temperatura de referência	K ou °C
T_{ar}	Temperatura do ar	K ou °C
$T_{\text{mín}}$	Temperatura mínima aceitável para a água aquecida	K ou °C
t	Tempo de utilização	min/uso
Δt	Total de segundos do mês	s

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – ÓRBITA ELÍPTICA DA TERRA EM TORNO DO SOL. FONTE: FOSTER ET AL. (2009) – ADAPTADA.	34
FIGURA 2 – POSICIONAMENTO DO SOL EM VOLTA DA TERRA (COORDENADAS EQUATORIAIS). FONTE: FOSTER ET AL. (2009).	35
FIGURA 3 – POSICIONAMENTO DO SOL EM VOLTA DA TERRA (COORDENADAS HORIZONTAIS). FONTE: AUTORIA PRÓPRIA.	36
FIGURA 4 - LOCALIZAÇÕES DAS CIDADES DE ESTUDO. FONTE: GOOGLE MAPS – ADAPTADA.....	38
FIGURA 5 – PODER EMISSIVO ESPECTRAL HEMISFÉRICO PELO COMPRIMENTO DE ONDA. FONTE: GOSWAMI (2013) – ADAPTADA.	40
FIGURA 6 – TÍPICO COLETOR SOLAR PLANO. FONTE: DUFFIE E BECKMAN (2013) – ADAPTADA.....	48
FIGURA 7 – ÂNGULO DE INCIDÊNCIA. FONTE: DUFFIE E BECKMAN (2013) – ADAPTADA.....	50
FIGURA 8 – COEFICIENTES DE TRANSMISSÃO E DE ABSORÇÃO PELO ÂNGULO DE INCIDÊNCIA. FONTE: DUFFIE E BECKMAN (2013) – ADAPTADA.	51
FIGURA 9 – ESQUEMA DO SISTEMA SOLAR DE AQUECIMENTO ESTUDADO. FONTE: VULCANO - BOSCH TERMOTECNOLOGIA, S.A. (2014) – ADAPTADA.....	54
FIGURA 10 – PAINEL SOLAR WARMSUN (FKC-2S). FONTE: VULCANO - BOSCH TERMOTECNOLOGIA, S.A.	55
FIGURA 11 – FICHA TÉCNICA DO PAINEL SOLAR WARMSUN (FKC-2S). FONTE: VULCANO - BOSCH TERMOTECNOLOGIA, S.A.	56
FIGURA 12 – CONSUMO TÍPICO DOS EQUIPAMENTOS DOMÉSTICOS QUE UTILIZAM ÁGUA QUENTE. FONTE: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (2008).	58
FIGURA 13 – GRÁFICO DA FRAÇÃO SOLAR EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS X E Y. FONTE: DUFFIE E BECKMAN (2013) –ADAPTADA.	60
FIGURA 14 – VALORES MÉDIOS DIÁRIOS MENSIS DOS ÂNGULOS HORÁRIOS DO PÔR DO SOL PARA CADA CIDADE. DADOS DO ANEXO 6.1.	67
FIGURA 15 – RADIAÇÃO MÉDIA DIÁRIA MENSAL INCIDENTE EM UMA SUPERFÍCIE HORIZONTAL POUSADA NO EXTERIOR DA ATMOSFERA DE CADA CIDADE. DADOS DO ANEXO 6.1.	68
FIGURA 16 – RADIAÇÃO GLOBAL INCIDENTE EM SUPERFÍCIES HORIZONTAIS POUSADAS NAS DIFERENTES CIDADES. DADOS DO ANEXO 6.1.	69
FIGURA 17 – IRRADIAÇÃO MÉDIA DIÁRIA MENSAL ABSORVIDA POR COLETORES POUSADOS NAS DIFERENTES CIDADES. DADOS DO ANEXO 6.1.	79
FIGURA 18 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS MENSIS DA FRAÇÃO SOLAR PARA CARACAS.	82
FIGURA 19 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS MENSIS DA FRAÇÃO SOLAR PARA LIMA.	83

FIGURA 20 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS MENSAIS DA FRAÇÃO SOLAR PARA BUENOS AIRES.	84
FIGURA 21 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS MENSAIS DA FRAÇÃO SOLAR PARA RIO DE JANEIRO.	85
FIGURA 22 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS MENSAIS DA FRAÇÃO SOLAR PARA QUITO.	86
FIGURA 23 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS MENSAIS DA FRAÇÃO SOLAR PARA MONTEVIDEO.	87
FIGURA 24 – COMPONENTES DO SISTEMA ESCOLHIDO E PREÇO - PARTE 1. FONTE: VULCANO - BOSCH TERMOTECNOLOGIA, S.A. (2014) – ADAPTADA.....	89
FIGURA 25 – COMPONENTES DO SISTEMA ESCOLHIDO E PREÇO - PARTE 2. FONTE: VULCANO - BOSCH TERMOTECNOLOGIA, S.A. (2014) – ADAPTADA.....	89

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – POSIÇÕES GEOGRÁFICAS DAS CIDADES DE ESTUDO.	37
TABELA 2 – ÍNDICES MENSIS DE CLARIDADE PARA BUENOS AIRES.	44
TABELA 3 – ÍNDICES MENSIS DE CLARIDADE PARA RIO DE JANEIRO.	44
TABELA 4 – ÍNDICES MENSIS DE CLARIDADE PARA CARACAS.	44
TABELA 5 – ÍNDICES MENSIS DE CLARIDADE PARA LIMA.	44
TABELA 6 – ÍNDICES MENSIS DE CLARIDADE PARA MONTEVIDEO.	44
TABELA 7 – ÍNDICES MENSIS DE CLARIDADE PARA QUITO.	45
TABELA 8 – TEMPERATURA AMBIENTE MÉDIA MENSAL.	62
TABELA 9 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE IRRADIAÇÃO PARA SUPERFÍCIES COM DIFERENTES INCLINAÇÕES EM BUENOS AIRES – PARTE 1.	70
TABELA 10 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE IRRADIAÇÃO PARA SUPERFÍCIES COM DIFERENTES INCLINAÇÕES EM BUENOS AIRES – PARTE 2.	70
TABELA 11 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE IRRADIAÇÃO PARA SUPERFÍCIES COM DIFERENTES INCLINAÇÕES EM CARACAS.	71
TABELA 12 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE IRRADIAÇÃO PARA SUPERFÍCIES COM DIFERENTES INCLINAÇÕES EM RIO DE JANEIRO – PARTE 1.	71
TABELA 13 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE IRRADIAÇÃO PARA SUPERFÍCIES COM DIFERENTES INCLINAÇÕES EM RIO DE JANEIRO – PARTE 2.	72
TABELA 14 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE IRRADIAÇÃO PARA SUPERFÍCIES COM DIFERENTES INCLINAÇÕES EM MONTEVIDEO – PARTE 1.	72
TABELA 15 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE IRRADIAÇÃO PARA SUPERFÍCIES COM DIFERENTES INCLINAÇÕES EM MONTEVIDEO – PARTE 2.	73
TABELA 16 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE IRRADIAÇÃO PARA SUPERFÍCIES COM DIFERENTES INCLINAÇÕES EM LIMA.	73
TABELA 17 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DE IRRADIAÇÃO PARA SUPERFÍCIES COM DIFERENTES INCLINAÇÕES EM QUITO.	74
TABELA 18 – IRRADIAÇÃO QUE CHEGA A UMA SUPERFÍCIE POUSADA EM BUENOS AIRES SOB DIFERENTES ÂNGULOS DE INCLINAÇÃO.	75
TABELA 19 – IRRADIAÇÃO QUE CHEGA A UMA SUPERFÍCIE POUSADA EM CARACAS SOB DIFERENTES ÂNGULOS DE INCLINAÇÃO.	76
TABELA 20 – IRRADIAÇÃO QUE CHEGA A UMA SUPERFÍCIE POUSADA EM RIO DE JANEIRO SOB DIFERENTES ÂNGULOS DE INCLINAÇÃO.	76
TABELA 21 – IRRADIAÇÃO QUE CHEGA A UMA SUPERFÍCIE POUSADA EM QUITO SOB DIFERENTES ÂNGULOS DE INCLINAÇÃO.	77
TABELA 22 – IRRADIAÇÃO QUE CHEGA A UMA SUPERFÍCIE POUSADA EM LIMA SOB DIFERENTES ÂNGULOS DE INCLINAÇÃO.	77
TABELA 23 – IRRADIAÇÃO QUE CHEGA A UMA SUPERFÍCIE POUSADA EM MONTEVIDEO SOB DIFERENTES ÂNGULOS DE INCLINAÇÃO.	78
TABELA 24 – CONSUMO MÉDIO DIÁRIO DE AQS POR PESSOA.	79

TABELA 25 – CARGAS TÉRMICAS MENSAIS CALCULADAS.	80
TABELA 26 – VALORES CONSIDERADOS PARA CÁLCULO DA FRAÇÃO SOLAR.	81
TABELA 27 – FRAÇÃO SOLAR CALCULADA PARA CARACAS.	82
TABELA 28 – FRAÇÃO SOLAR CALCULADA PARA LIMA.	83
TABELA 29 – FRAÇÃO SOLAR CALCULADA PARA BUENOS AIRES.	84
TABELA 30 – FRAÇÃO SOLAR CALCULADA PARA RIO DE JANEIRO.	85
TABELA 31 – FRAÇÃO SOLAR CALCULADA PARA QUITO.	86
TABELA 32 – FRAÇÃO SOLAR CALCULADA PARA MONTEVIDEO.	87
TABELA 33 – PREÇO DO SISTEMA SOLAR DE AQUECIMENTO.	89
TABELA 34 – PREÇO DA ENERGIA ELÉTRICA NAS CIDADES DE ESTUDO.	90
TABELA 35 – VALORES ECONÓMICOS DA ENERGIA TÉRMICA GERADA EM CARACAS E BUENOS AIRES.	91
TABELA 36 – VALORES ECONÓMICOS DA ENERGIA TÉRMICA GERADA EM LIMA E RIO DE JANEIRO.	91
TABELA 37 – VALORES ECONÓMICOS DA ENERGIA TÉRMICA GERADA EM QUITO E MONTEVIDEO.	92
TABELA 38 – TEMPO DE RETORNO DE INVESTIMENTO PARA AS DIFERENTES CIDADES.	92

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Cenário energético mundial	26
1.2	Energia Solar	27
1.2.1	Objetivo do trabalho	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1	Irradiação incidente em um coletor solar plano	33
2.1.1	Posicionamento entre Terra e Sol	33
2.1.2	Propriedades do Sol	39
2.1.3	Potência solar que chega ao exterior da atmosfera.....	41
2.1.4	Radiação que chega a uma superfície horizontal pousada na Terra	42
2.1.5	Índice de Claridade	43
2.1.6	Radiação incidente sobre uma superfície inclinada relativamente à horizontal.....	45
2.1.7	Coletor solar plano	47
2.1.8	Perdas de energia no coletor	52
2.2	Descrição do problema	53
2.2.1	Sistema de aquecimento de água	53
2.2.2	Cargas térmicas de águas quentes sanitárias.....	56
2.3	Método da fração solar	58
2.3.1	Parâmetros adimensionais X e Y	59
2.3.2	Temperatura ambiente média mensal	62
2.3.3	Parâmetros de eficiência do coletor utilizados para fração solar	62
2.3.4	Considerações finais para cálculo da fração solar	63
3	DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS	67
3.1	Valores dos ângulos horários do pôr do sol	67
3.2	Valores da radiação incidente no exterior da atmosfera	68
3.3	Radiação global média diária mensal	68

3.4	Comparação dos resultados da irradiação incidente em uma superfície inclinada com dados obtidos pela NASA	69
3.5	Comparação entre ângulos de inclinação	74
3.6	Cálculo das cargas térmicas	79
3.7	Fração solar calculada	80
3.7.1	Resultado da fração solar para Caracas	81
3.7.2	Resultado da fração solar para Lima	83
3.7.3	Resultado da fração solar para Buenos Aires	84
3.7.4	Resultado da fração solar para Rio de Janeiro	85
3.7.5	Resultado da fração solar para Quito	86
3.7.6	Resultado da fração solar para Montevideo	87
3.8	Análise econômica	88
3.8.1	Custo com o sistema	88
3.8.2	Preço da energia elétrica nas cidades de estudo	90
3.8.3	Economia anual e resultados de PRI	91
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	95
5	REFERÊNCIAS	99
6	ANEXOS	105
6.1	Valores calculados para obtenção dos resultados de irradiação	105
6.2	Valores calculado para obtenção dos resultados de fração solar	117

INTRODUÇÃO

- 1.1 CENÁRIO ENERGÉTICO MUNDIAL
 - 1.2 ENERGIA SOLAR
 - 1.2.1 OBJETIVO DO TRABALHO

1 INTRODUÇÃO

O Sol é a principal fonte de energia terrestre, é o que sustenta toda a vida na Terra e define seus aspectos climáticos. Tal energia é gerada por meio da reação termonuclear do hidrogênio (onde se produz o hélio) e chega na superfície terrestre por meio da radiação eletromagnética, podendo ser aproveitada de diversas maneiras.

Existem processos naturais feitos através da radiação solar que desempenham funções essenciais, como, por exemplo, a fotossíntese realizada pelas plantas e a transmissão de energia para as águas, onde se formam as nuvens e chuvas. No entanto, as necessidades energéticas da humanidade vão além das naturalmente processadas e estão em constante evolução, o que leva a uma exploração dos recursos que permitem gerar energia.

De acordo com Kalogirou (2013), nos séculos passados os combustíveis fósseis forneciam a maior parte da energia que era transformada e utilizada na Terra, por serem mais baratos e mais convenientes que outras fontes. Contudo, esse é um recurso não renovável e como a demanda de energia é alta, dentro de décadas, poderá haver um esgotamento de tal fonte. Além disso, há uma preocupação ambiental quanto a esse tipo de energia, pois a queima dos combustíveis fósseis emite gases e resíduos poluentes, não sendo considerado ambientalmente amigável. Devido a esses fatos, tem-se buscado fontes de energia alternativas para suprir o consumo.

Tendo em vista o potencial da energia solar, o processo de conversão da mesma para energia elétrica ou térmica tomou espaço no cenário energético, já que se trata de uma alternativa renovável, limpa e em abundância. A obtenção da energia solar por coletores solares é o foco do presente trabalho, pois são os primeiros componentes que fazem parte de diversos processos de utilização dessa energia.

Um dos fatores que influenciam a quantidade de radiação solar que um coletor irá receber é a sua localização geográfica, já que a radiação solar atinge as diferentes regiões da Terra com mais ou menos intensidade. A América do Sul será a região do estudo em questão, por ser uma região com diversos países em desenvolvimento e ser pouco estruturada em termos de energias renováveis. Tratar-se-á do potencial

energético solar de seis grandes cidades pertencentes a esta região, sendo elas: Buenos Aires (Argentina), Caracas (Venezuela), Lima (Perú), Montevideo (Uruguai), Quito (Equador) e Rio de Janeiro (Brasil).

O presente tópico será subdividido em uma revisão do cenário energético mundial (aspectos ambientais e geração de energia), em seguida, questões a respeito da aplicação da energia solar na região de estudo serão abordadas e, por fim, o objetivo do trabalho será exposto detalhadamente.

1.1 Cenário energético mundial

O setor energético é o agente principal da geração de capital no mundo e após a crise do petróleo as atenções foram voltadas principalmente aos aspectos econômicos relacionados ao setor. Já nas últimas décadas uma nova preocupação tornou-se o problema mais aparente: a degradação ambiental causada pela produção de energia, Kalogirou (2013).

A ações humanas agredem diretamente o ambiente e essa interferência tem sido cada vez mais significativa devido a fatores como o aumento populacional, o consumo de energia e a atividade industrial, agrícola e de transportes. De acordo com Moreira *et Giometti* (2008), existe atualmente uma grande emissão de gases de efeito estufa (principalmente dióxido de carbono, metano e óxido nitroso) provenientes dessas atividades que são dependentes do uso de combustíveis fósseis. Tal emissão causa um aumento gradativo da temperatura média da Terra, despertando interesse e preocupação nas autoridades e na opinião pública mundial.

Algumas metas ambientais foram propostas pelo acordo internacional Protocolo de Kyoto, no qual os países signatários buscavam limitar a poluição pela queima de combustíveis fósseis causadoras do efeito estufa. Segundo Silva (2009), o protocolo propunha, para o período inicial de 2008 a 2012, uma redução de 5,2% nos níveis de emissão registrados em 1990, sendo o valor da percentagem de redução distinto para cada país, de acordo com as condições do mesmo. Embora as metas percentuais não tenham sido atingidas ao fim de 2012, o protocolo fomentou nos países diversas ações e pesquisas visando estratégias para diminuição da emissão dos gases.

Em meio as estratégias, a utilização de energias alternativas se destaca, segundo Silva e Vieira (2016), por minimizar a dependência dos combustíveis fósseis e diminuir o potencial poluidor das matrizes energéticas tradicionais. No entanto, o consumo de energia proveniente de fontes alternativas e renováveis ainda é pequeno em relação a energia vinda de combustíveis fósseis. Segundo *World Energy Council* (2016) na publicação “*World Energy Resources 2016*”, a soma do consumo mundial de energia referente às fontes de petróleo, carvão mineral e gás natural em 2015 ainda ultrapassam 85% do consumo total. Do restante, 4,44% corresponde à energia nuclear e apenas 10% às energias renováveis, sendo 6,78% de energia hídrica, 1,44% energia eólica, 0,45% energia solar e 0,89% representam outros tipos de energias renováveis. Dados de 2010 presentes na publicação mostram que, apesar de ainda ser uma participação pequena, houve nestes 5 anos um progresso significativo na implantação de energia solar, visto que em 2010 esse setor representava 0,06% do consumo total.

Diante disso, segundo Borges *et al.* (2016) a expectativa mundial é, de forma geral, a possibilidade de obter o desenvolvimento econômico com inclusão social, sem que ocorra uma agressão maior ao meio ambiente e à saúde humana.

1.2 Energia Solar

Imersa ao cenário energético, como mencionado, a energia solar é uma excelente energia alternativa às fontes não renováveis podendo atender a crescente demanda energética, reduzir as emissões de gases poluentes e também promover o acesso à energia em áreas isoladas, Cabral (2012).

A radiação solar pode ser utilizada diretamente como fonte de energia térmica, para aquecimento de fluidos e ambientes ou convertida em energia elétrica.

O aproveitamento térmico para o aquecimento de fluidos é feito com o uso de coletores solares planos ou concentradores, onde os primeiros são mais usados em aplicações residenciais e comerciais para o aquecimento de água (higiene pessoal e lavagem de utensílios e ambientes). Já os concentradores destinam-se a aplicações que requerem temperaturas mais elevadas como, por exemplo, a produção de vapor. Neste caso, pode-se gerar energia mecânica com o auxílio de uma turbina a vapor, e,

posteriormente, eletricidade, por meio de um gerador. Dos vários tipos de aproveitamento da energia solar, os mais usados atualmente são o aquecimento de água e a geração fotovoltaica de energia elétrica, Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL (2005).

A América do Sul possui um enorme potencial solar energético, já que recebe grande incidência em diversos locais. No entanto, esse recurso é ainda pouco explorado na região. No Brasil, por exemplo, dados do Ministério de Minas e Energia ¹ informam que a geração estimada de energia elétrica a partir da fonte solar foi de aproximadamente 0,011% da demanda total em 2015. Já a utilização de coletores solares destinados a obtenção de energia térmica corresponde a uma demanda evitada de energia elétrica de aproximadamente 0,2% do total. Segundo Cabral (2012), o país possui legislações que regulamentam o uso dessa fonte de energia, mas ainda carece de mecanismos mais incisivos e eficazes para tornar viável o uso de sistemas de aquecimento solar e da energia fotovoltaica.

Na Argentina as energias renováveis correspondem a uma baixa participação no setor energético. Segundo Espinasa *et al.* (2017) na publicação “Dossier Energético: Argentina”, em 2013 apenas 0,1% da oferta de energia primária era de fonte solar e eólica, isso se deve a grande disponibilidade de energias fósseis e falta de atenção a projetos que promovam energia limpa.

Já na Venezuela, de acordo com Posso (2004), do potencial total energético aproveitado em 2002 por fontes alternativas 51% é de energia solar, cerca de 4,71 kWh/(m².dia), superando o México e o Estados Unidos. A localização do país, a duração média dos dias e o fato de não possuir grandes diferenças climáticas ao longo dos anos favorecem a exploração da radiação solar.

Diante das evidências, estudos que abordam a geração de energia através da radiação

¹ Disponível em “<http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/17+-+Energia+Solar+-+Brasil+e+Mundo+-+ano+ref.+2015+%28PDF%29/4b03ff2d-1452-4476-907d-d9301226d26c;jsessionid=41E8065CA95D1FABA7C8B26BB66878C9.srv154>”. Acesso em 17 de maio de 2017.

solar colaboram para as estratégias de inclusão de energias limpas e renováveis na região de estudo. Sendo assim, o objetivo do trabalho é exposto a seguir.

1.2.1 Objetivo do trabalho

Os gastos elétricos em residências representam grande parte de todo o consumo de energia elétrica no mundo, principalmente com aquecimento de água para chuveiros, pias e demais equipamentos domésticos. Diante disso, a fim de poupar tais gastos elétricos e concomitantemente contribuir para a diminuição de emissões de gases de efeito estufa, o presente estudo tem como objetivo, apresentar os potenciais energéticos solares das diferentes cidades de estudo, avaliando quanta energia um coletor solar plano é capaz absorver se pousado em tais cidades. Além disso, através do método da fração solar pretende-se analisar, para as diferentes cidades, o potencial de contribuição de coletores solares no suprimento das necessidades energéticas térmicas para aquecimento de águas sanitárias (AQS) em uma habitação onde resida uma família composta por 4 membros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 IRRADIAÇÃO INCIDENTE EM UM COLETOR SOLAR PLANO
 - 2.1.1 POSICIONAMENTO ENTRE TERRA E SOL
 - 2.1.2 PROPRIEDADES DO SOL
 - 2.1.3 POTÊNCIA SOLAR QUE CHEGA AO EXTERIOR DA ATMOSFERA
 - 2.1.4 RADIAÇÃO QUE CHEGA A UMA SUPERFÍCIE HORIZONTAL POUSADA NA TERRA
 - 2.1.5 ÍNDICE DE CLARIDADE
 - 2.1.6 RADIAÇÃO INCIDENTE SOBRE UMA SUPERFÍCIE INCLINADA RELATIVAMENTE À HORIZONTAL
 - 2.1.7 COLETOR SOLAR PLANO
 - 2.1.8 PERDAS DE ENERGIA NO COLETOR
- 2.2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA
 - 2.2.1 SISTEMA DE AQUECIMENTO DE ÁGUA
 - 2.2.2 CARGAS TÉRMICAS DE ÁGUAS QUENTES SANITÁRIAS
- 2.3 MÉTODO DA FRAÇÃO SOLAR
 - 2.3.1 PARÂMETROS ADIMENSIONAIS X E Y
 - 2.3.2 TEMPERATURA AMBIENTE MÉDIA MENSAL
 - 2.3.3 PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA DO COLETOR UTILIZADOS PARA FRAÇÃO SOLAR
 - 2.3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS PARA CÁLCULO DA FRAÇÃO SOLAR

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será introduzida toda a teoria que fundamenta o trabalho, sendo dividida em três partes. A primeira será dedicada a apresentar as informações necessárias para quantificar a energia solar incidente sobre um coletor. A segunda parte se dedica a detalhar a situação que será estudada (descrição do problema). Por fim, a terceira apresenta os conceitos utilizados para aplicação do método da fração solar na análise do desempenho da energia solar para aquecimento de águas quentes sanitárias residenciais.

2.1 Irradiação incidente em um coletor solar plano

2.1.1 Posicionamento entre Terra e Sol

A intensidade da radiação que pode ser captada por um coletor solar pousado na superfície do planeta Terra é dependente da posição na qual o Sol se encontra em relação à mesma, considerando distância e angulação. Dentre os movimentos que a Terra faz, a translação em torno do Sol e a rotação em torno de si mesma define, para cada ponto na superfície terrestre quanta luz solar estará recebendo diretamente em determinado instante.

O movimento de translação da Terra é feito em torno do Sol em uma trajetória elíptica, chamada eclíptica, que define os dias do ano, sendo os 365,25 dias (que compõem 1 ano) correspondentes a essa volta completa. Por ser uma órbita elíptica, a distância entre Sol e Terra varia durante todo ano entre, aproximadamente, $1,47 \times 10^{11}$ metros e $1,52 \times 10^{11}$ metros, Kalogirou (2013).

A rotação da Terra tem uma velocidade aproximadamente constante em torno do seu eixo, que está inclinado em $23,45^\circ$ em relação ao plano da eclíptica do movimento de translação, sendo que essa inclinação permanece constante enquanto a Terra órbita em torno do Sol. Tal inclinação faz com que a disposição da luz solar varie entre o Hemisfério Norte e o Hemisfério Sul, definindo os solstícios de inverno e de verão e os equinócios

de outono e primavera, que são os pontos onde, respetivamente, há maior diferença de luz solar entre os hemisférios e onde a luz solar incide de maneira igual sobre os hemisférios, Foster *et al.* (2009).

A figura 1 ilustra os movimentos da Terra em torno do Sol mostrando o ponto chamado periélio (onde a distância entre ambos é a menor), o ponto chamado afélio (onde a distância é maior) e também os solstícios e equinócios.

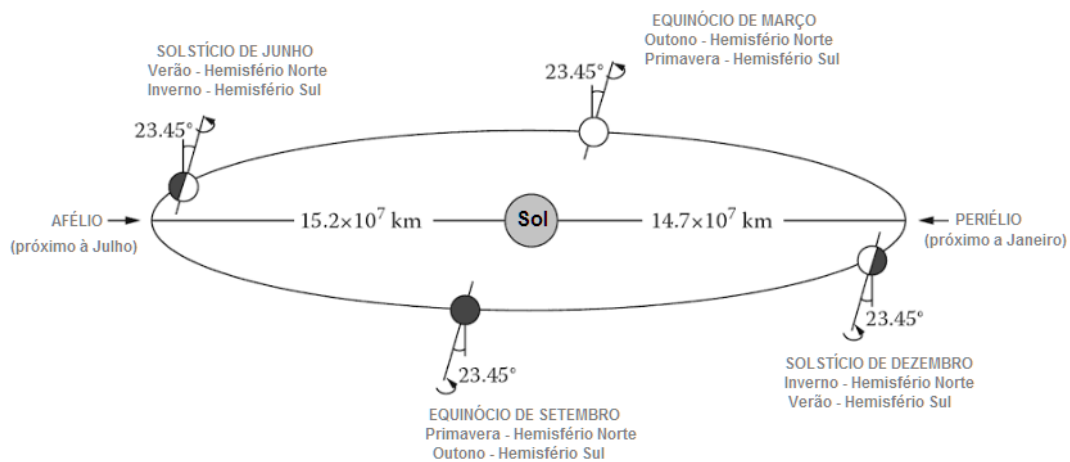


Figura 1 – Órbita elíptica da Terra em torno do Sol. Fonte: Foster *et al.* (2009) – adaptada.

De acordo com o sistema Heliocêntrico, o Sol está no centro do nosso sistema planetário, onde a Terra, os demais planetas, asteroides e satélites giram em torno dele. No entanto, para o estudo quantitativo da radiação solar recebida pela Terra, torna-se interessante uma abordagem considerando um sistema geocêntrico, onde a Terra está fixa e o Sol faz sua trajetória em torno dela.

2.1.1.1 Sistema equatorial de coordenadas celestes

A posição do Sol em relação à Terra pode ser definida pelo sistema equatorial de coordenadas celeste, onde a estrela se encontra dentro de uma esfera chamada celeste, que possui raio arbitrário e cujo o centro coincide com o centro da Terra. Além disso, a propagação do eixo que une Polo Sul e Polo Norte terrestre, é considerado o eixo da esfera celeste e o plano do equador terrestre corresponde ao plano do equador celeste,

que é perpendicular ao eixo mencionado. A linha da trajetória feita pelo Sol em torno da Terra na esfera celeste é chamada eclíptica.

Portanto, pelas coordenadas equatoriais, a posição do Sol dentro da esfera celeste é dada por dois fatores (ilustrados na figura 2). O primeiro é a declinação, δ , que é o ângulo formado pelo plano do equador celeste e o meridiano que passa pelo ponto no qual o Sol se encontra em sua trajetória. O segundo fator é a ascensão reta, χ , que é o ângulo medido sobre o plano do equador a partir do ponto Vernal, no qual a linha de órbita do Sol cruza o plano equatorial no mês de março (equinócio), até o meridiano que passa pela estrela.

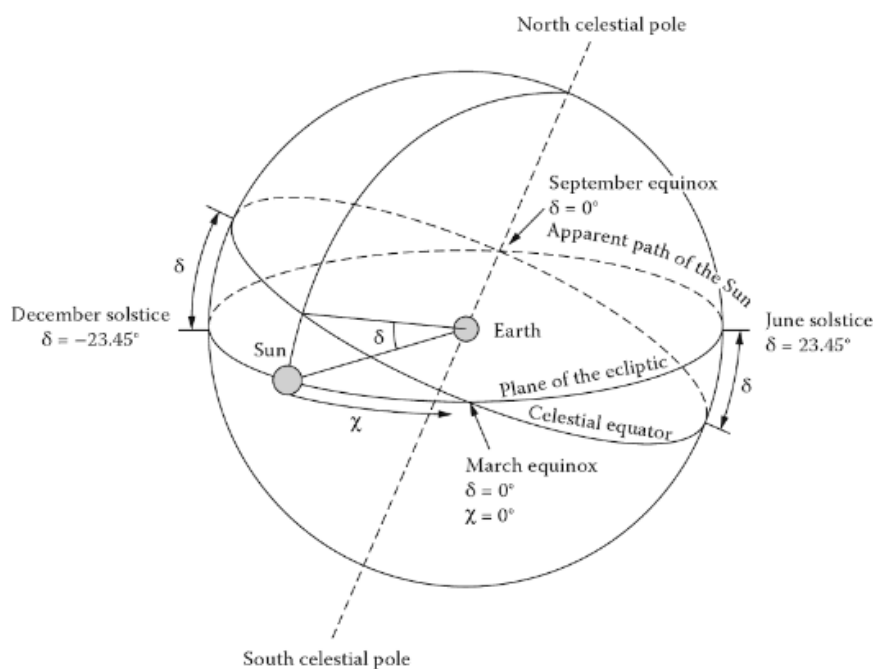


Figura 2 – Posicionamento do Sol em volta da Terra (coordenadas equatoriais). Fonte: Foster *et al.* (2009).

A declinação é positiva quando medida em direção ao Polo Norte celeste e negativa quando medida em relação ao Polo Sul celeste. Ademais, nos equinócios, δ é zero, no solstício de junho é $23,45^\circ$ e no solstício de dezembro é $-23,45^\circ$.

Algumas expressões são utilizadas para cálculo da declinação média diária, δ . A equação 2.1, definida por Cooper (1969) é comumente utilizada devido à sua simplicidade e será adotada no presente estudo.

$$\delta = 23,45 \sin\left(\frac{360}{365} (284 + n)\right) \quad (2.1)$$

Onde, n corresponde ao número do dia do ano, ou seja, para o primeiro dia de janeiro, $n=1$, para o segundo dia de janeiro, $n=2$, e assim sucessivamente até o último dia do ano. Portanto, para um ano bissexto, $1 \leq n \leq 365$.

2.1.1.2 Sistema horizontal de coordenadas celestes

Outros parâmetros de orientação do Sol são abordados a partir do ponto de vista do sistema de coordenadas horizontais. Nesse caso, considera-se uma linha vertical, traçada da cabeça aos pés de um observador na superfície da Terra, que se prolonga, a partir da cabeça, até o ponto na esfera celeste chamado zênite, e, a partir dos pés, até o ponto chamado nadir, que está na direção oposta da esfera celeste. O horizonte celeste é o plano que passa pelo centro da esfera celeste e é paralelo ao plano tangente a superfície da Terra na localização do observador.

Nessa abordagem, a posição do Sol é definida por dois outros elementos: a altura solar, H_a , ângulo medido no plano definido pelos pontos zênite, nadir e astro entre o horizonte celeste e o astro; e o azimute, A_z , ângulo medido sobre o horizonte celeste, entre o ponto cardinal norte do local de observação e o plano definido pelo astro, zênite e nadir. Esse ponto de vista é ilustrado pela figura 3.

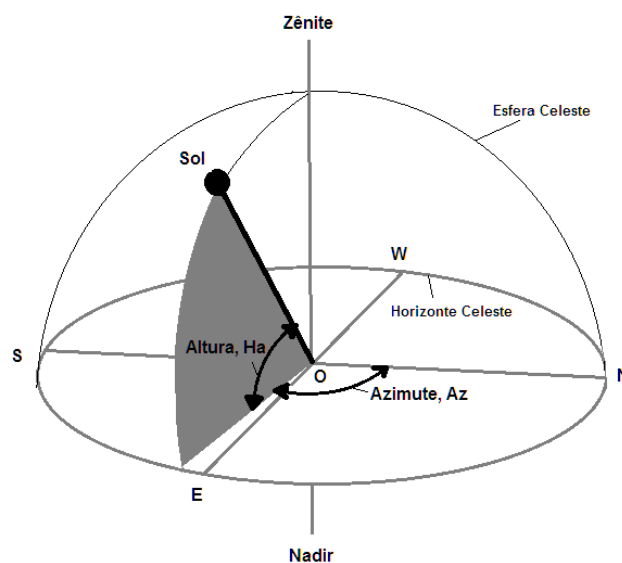


Figura 3 – Posicionamento do Sol em volta da Terra (coordenadas horizontais). Fonte: autoria própria.

Os sistemas de coordenadas equatorial e horizontal se relacionam através das expressões a seguir, derivadas das relações trigonométricas esféricas de Bakulin *et al.* (1987):

$$\sin \delta = \sin \varphi \sin Ha - \cos \varphi \cos Ha \cos Az \quad (2.2)$$

$$\cos \delta \cos \chi = \cos Ha \sin Az \quad (2.3)$$

$$\cos \delta \sin \chi = \cos \varphi \sin Ha + \sin \varphi \cos Ha \cos Az \quad (2.4)$$

Onde φ representa a latitude onde o observador se encontra na superfície terrestre. As latitudes dos locais de estudo serão definidas no tópico a seguir.

2.1.1.3 Posição geográfica das cidades de estudo

As coordenadas que definem a posição geográfica de um determinado local na Terra são a latitude, φ , e a longitude. Sendo a primeira, o valor que define a distância do local ao equador terrestre medida ao longo do meridiano de Greenwich, os locais no Hemisfério Sul têm latitude negativa e os que estão no Hemisfério Norte têm latitude positiva. Já a longitude é definida como a distância do local ao meridiano de Greenwich medida ao longo do equador terrestre, sendo negativa para os locais a oeste do meridiano e positiva para os que estão a leste.

Os valores de latitude e longitude das cidades de estudo são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 – Posições geográficas das cidades de estudo.

Cidade	Latitude	Longitude
1 - Buenos Aires	-34,61°	-58,37°
2 - Caracas	10,48°	-66,90°
3 - Lima	-12,04°	-77,03°
4 - Montevideo	-34,90°	-34,90°
5 - Quito	-0,23°	-78,52°
6 - Rio de Janeiro	-22,90°	-43,17°

Através do da figura 4 é possível observar as localizações das cidades, que estão indicadas com a mesma sequência dada na tabela 1.



Figura 4 - Localizações das cidades de estudo. Fonte: *Google Maps* – adaptada.

2.1.1.4 Ângulo Horário

De acordo com Goswami (2015), os ângulos de altura solar e azimute não são fundamentais, mas estão relacionados com outros três ângulos importantes: declinação, latitude, que já foram mencionadas, e o ângulo horário, que será definido neste tópico.

O deslocamento angular do Sol em relação a um meridiano terrestre é de 15° por hora, já que em um dia (24 horas) o Sol contorna os 360° da Terra. O ângulo horário (designado por H_s) é, portanto, definido como esse deslocamento angular do Sol a leste ou a oeste do meridiano local. H_s é dado pela expressão 2.5.

$$H_s = \frac{15^\circ}{1 h} \times (\text{hora a partir do meio dia solar local}) \quad (2.5)$$

O meio dia solar é considerado o ponto onde o ângulo horário é nulo. Sendo assim, nas horas da manhã o ângulo horário é negativo e nas horas da tarde é positivo, Duffie e

Beckman (2013).

No entanto, para o cálculo da radiação recebida por um coletor, interessa saber especificamente o ângulo horário do pôr do sol de onde se encontra o coletor. A expressão a seguir dá o valor do ângulo horário do pôr do sol e foi obtida através de relações geométricas entre os ângulos mencionados acima.

$$H_{ss} = \cos^{-1}(-\tan \delta \tan \varphi) \quad (2.6)$$

2.1.2 Propriedades do Sol

De acordo com Goswami (2015), o Sol é uma esfera de $13,9 \times 10^5$ km de diâmetro composta de muitas camadas de gases que são progressivamente mais quentes em direção ao seu centro. A camada mais externa, aquela a partir da qual a energia é irradiada para o sistema solar, está aproximadamente a uma temperatura equivalente ao corpo negro de 5760 K. O centro do Sol, no entanto, pode estar a cerca de 20×10^6 K.

Ademais, ele ocupa o centro do sistema planetário no qual a Terra está inserida e, segundo Woolfson (2000), a sua massa vale aproximadamente 99,86% de todo o sistema.

A figura 5 demonstra uma comparação entre o poder emissivo espectral hemisférico do Sol no exterior da atmosfera, o poder emissivo espectral hemisférico do Sol ao nível do mar e o poder emissivo espectral hemisférico de um corpo negro (linha a traço interrompido), todos estes em $W/(m^2 \cdot nm)$ em função do comprimento de onda em nanometro (nm).

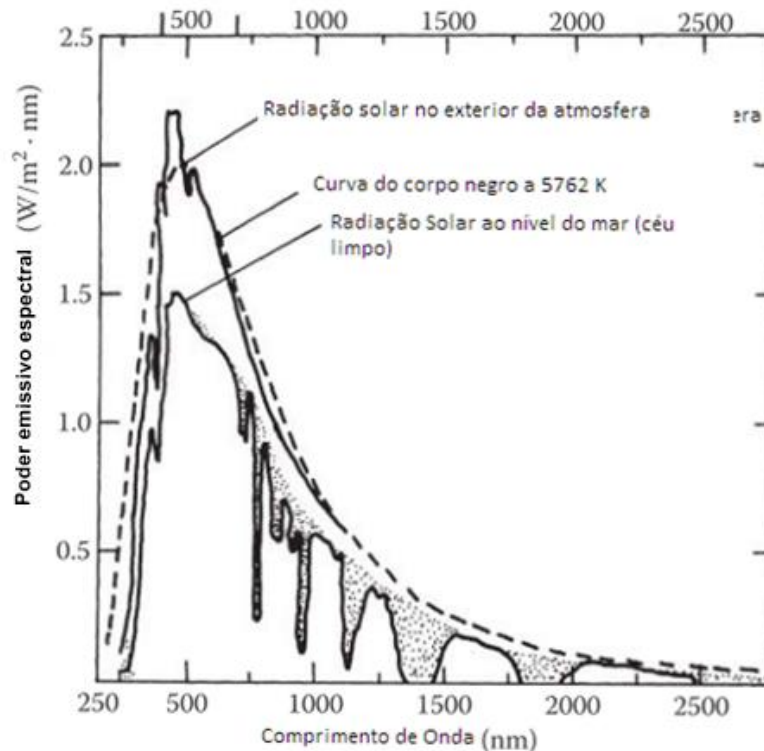


Figura 5 – Poder emissivo espectral hemisférico pelo comprimento de onda. Fonte: Goswami (2013) – adaptada.

A distribuição espectral de radiação de um corpo negro é dada pela lei de Planck. No entanto, de acordo com Duffie e Beckman (2013), para aplicações na engenharia, a potência total é mais interessante, portanto ao integrar a lei de Planck para todo comprimento de onda e todas as direções, chega-se a:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.7)$$

Onde σ é a constante de Stefan-Boltzmann (comumente usada em cálculos envolvendo radiação) que vale $5,6697 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$. A partir dessa equação, pode-se dizer que o poder emissivo total hemisférico de um corpo negro estando à temperatura exterior do Sol é $63288534 \text{ (W/m}^2)$.

Como pode ser visto pela Figura 5 – Poder emissivo espectral hemisférico pelo comprimento de onda. Fonte: Goswami (2013) – adaptada. Figura 5, o poder emissivo espectral hemisférico do Sol é muito próximo ao do corpo negro, portanto, se pode adotar que é equivalente ao valor supracitado para o corpo negro. Através desse valor, é possível calcular a potência térmica total emitida pelo Sol em todas as direções, por meio da multiplicação do poder emissivo, E_b , e da área do Sol. Sendo assim, o cálculo para a potência térmica total

emitida é mostrado a seguir:

$$\begin{aligned} E_b \pi D^2 &= 63288534 (W/m^2) \pi (13,9 \cdot 10^8 m)^2 \\ &= 3,84 \cdot 10^{26} W \end{aligned} \quad (2.8)$$

A radiação emitida pelo Sol e sua relação espacial com a terra resultam em uma intensidade quase fixa da radiação solar fora da atmosfera terrestre. Baseado no cálculo anterior e na distância entre a Terra e o Sol, seria possível obter um valor que exprimisse aproximadamente a energia do Sol recebida por unidade de tempo e por unidade de área em uma superfície perpendicular à direção de propagação da radiação na distância média da Terra e do Sol fora da atmosfera - sendo essa a definição de Duffie e Beckman (2013) para **constante solar**. No entanto, segundo os estudiosos, a constante solar foi diversas vezes obtida com medições feitas diretamente fora da maior parte ou da totalidade da atmosfera terrestre por uma variedade de instrumentos. Adotar-se-á o valor de $1367 W/m^2$, que é sugerido pela *World Radiation Center* e possui incerteza de 1%, segundo Duffie e Beckman (2013).

2.1.3 Potência solar que chega ao exterior da atmosfera

A potência solar no exterior da atmosfera varia com o posicionamento entre Terra e Sol. Portanto, é interessante se obter um valor que representa essa variação da potência extraterrestre ao longo do ano, S_n . A expressão 2.9 dá uma aproximação desse valor em função do dia do ano, expresso em W/m^2 , e é utilizada em várias aplicações na engenharia, de acordo com Duffie e Beckman (2013).

$$S_n = S_0 \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \quad (2.9)$$

Onde S_0 representa o valor da constante solar e n , como citado, indica o número do dia do ano.

Outro fator que proporciona variação da potência que vem do Sol até a atmosfera é a presença de manchas solares, no entanto, segundo Goswami (2015), o efeito das manchas causa variação de até 0,5% na radiação, podendo ser negligenciada.

2.1.3.1 Radiação solar por dia que chega a uma superfície horizontal no exterior da atmosfera

A radiação solar, em Joule, incidente por segundo (potência) num plano horizontal fora da atmosfera a qualquer tempo e localização entre o nascer e o pôr do sol é dado pela equação 2.10:

$$S = S_n (\cos \varphi \cos \delta \cos H_s + \sin \varphi \sin \delta) \quad (2.10)$$

Para esse estudo a radiação solar extraterrestre será abordada como sendo um valor diário total que chega à superfície horizontal em diferentes latitudes, o qual é obtido pela integração da equação 2.10 para todo período do nascer ao pôr do sol. A expressão 2.11 dá esse valor:

$$S_D = \frac{24 \times 3600}{\pi} S_n \left(\cos \varphi \cos \delta H_{ss} + \frac{2\pi H_{ss}}{360} \sin \varphi \sin \delta \right) \quad (2.11)$$

2.1.4 Radiação que chega a uma superfície horizontal pousada na Terra

A maior parte da radiação solar que chega ao exterior da camada atmosférica não é transmitida diretamente à superfície terrestre, já que existem interferências como a absorção de parte da radiação pelo ar e pelo vapor de água ou a dispersão da radiação pelo ar, vapor de água, aerossóis e partículas de poeira. A parte que chega à Terra sem interferências, sem nenhuma mudança na sua direção, é denominada radiação direta, R_{DIR} . Já a parte que é dispersada ou difundida pela atmosfera é chamada radiação difusa, R_{DIF} , Goswami (2015).

Sobre um coletor solar, além de incidir a radiação direta e a difusa também há a radiação proveniente da reflexão da radiação solar no solo e em outras superfícies ao redor do coletor. Essa radiação é denominada albedo, R_A , e sua intensidade é dependente de diversos fatores, como o uso do solo e a composição das superfícies ao redor. A fim de saber quanta radiação por albedo incide em uma superfície, o coeficiente de reflexão total hemisférico, ρ , será introduzido. O estudo de Hunn e Calafell (1977) traz valores para tal coeficiente, que são diferenciados com base no tipo de vegetação e ambiente (urbano ou rural). Utilizar-se-á no presente trabalho o valor de 0,2 para ρ , que se refere

à áreas residenciais em ambientes urbanos.

A soma das radiações direta e difusa será denominada radiação global, designada por G e apresentada na expressão 2.12.

$$G = R_{DIR} + R_{DIF} \quad (2.12)$$

Para as superfícies pousadas na horizontal, a radiação de albedo se relaciona à radiação global conforme a expressão a seguir.

$$R_A = \rho G \quad (2.13)$$

Por fim, a soma de todos os tipos de radiação que incidem na superfície do coletor (incluindo o albedo) será denominada irradiação e designada por I . A expressão a seguir define tal conceito.

$$I = R_{DIR} + R_{DIF} + R_A \quad (2.14)$$

Trabalhar-se-á nesse estudo com valores diários e diários médios mensais, sendo simbolizados, respetivamente, com d e dm . Por exemplo, valores de radiação por albedo diários e diários mensais, serão representados, respetivamente, por R_A^D e R_A^{DM} .

2.1.5 Índice de Claridade

O índice de claridade, K_T , é definido, segundo Perez *et al.* (1990), como razão entre a radiação global diária que chega na superfície terrestre e a radiação diária que chega no exterior da atmosfera. Portanto:

$$K_T = G/S_D \quad (2.15)$$

Os valores de K_T analisam a permeabilidade da atmosfera terrestre à radiação solar. Valores médios diários dos índices de claridade para cada mês foram medidos, ao longo dos anos de 1983 a 2005, e disponibilizados pelo Centro de Informações de Ciência

Atmosférica (*Atmospheric Science Data Center - ASDC*)² da NASA para diferentes localizações na Terra. As tabelas 2, 3, 4, 5, 6 e 7 dão os valores dos K_T para as cidades da América do Sul que serão estudadas no presente trabalho.

Tabela 2 – Índices mensais de claridade para Buenos Aires.

Buenos-Aires ARGENTINA	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
	0,58	0,56	0,55	0,52	0,52	0,49	0,51	0,53	0,56	0,53	0,55	0,56

Tabela 3 – Índices mensais de claridade para Rio de Janeiro.

Rio de Janeiro BRASIL	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
	0,44	0,48	0,48	0,51	0,52	0,57	0,55	0,55	0,45	0,44	0,43	0,42

Tabela 4 – Índices mensais de claridade para Caracas.

Caracas VENEZUELA	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
	0,60	0,59	0,60	0,55	0,52	0,53	0,55	0,56	0,56	0,55	0,55	0,57

Tabela 5 – Índices mensais de claridade para Lima.

Lima PERÚ	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
	0,64	0,66	0,68	0,67	0,59	0,43	0,38	0,39	0,43	0,50	0,55	0,61

Tabela 6 – Índices mensais de claridade para Montevideo.

Montevideo URUGUAI	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
	0,57	0,54	0,53	0,51	0,51	0,48	0,50	0,51	0,53	0,52	0,54	0,56

² Disponível em "<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=>".

Tabela 7 – Índices mensais de claridade para Quito.

Quito	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
EQUADOR	0,40	0,41	0,43	0,42	0,42	0,43	0,45	0,45	0,41	0,40	0,42	0,39

2.1.5.1 Quociente entre radiação difusa e radiação global

De acordo com Goswami (2015), a decomposição da radiação solar que chega na atmosfera em componentes de radiação difusa foi estudada por Liu e Jordan (1977), que correlacionaram a radiação difusa, a radiação global e o índice de claridade. Mais tarde, Collares-Pereira e Rabl (1979) analisaram esse estudo e introduziram o ângulo horário do pôr do sol na correlação, a fim de considerar a variação sazonal na componente difusa. Sendo assim a expressão 2.16 expressa essa correlação que utiliza médias diárias mensais para cada fator.

$$\frac{R_{DIF}^{DM}}{G^{DM}} = 0,775 + 0,00653(H_{SS} - 90) - [0,505 + 0,00455(H_{SS} - 90)] \cos(111K_T - 103) \quad (2.16)$$

2.1.6 Radiação incidente sobre uma superfície inclinada relativamente à horizontal

Até então foram expressos os cálculos necessários para conhecimento da energia que pode ser recebida em superfícies pousadas horizontalmente. Este tópico apresenta a energia incidente em superfícies inclinadas relativamente à energia incidente em superfícies na horizontal.

A radiação que incide diretamente em uma superfície horizontal, R_{DIR} , como visto na equação 2.12 pode ser obtida da subtração da radiação global pela difusa. E pode ser relacionada, considerando valores diários mensais, com a radiação que incide em uma superfície inclinada com um ângulo β em relação à horizontal, $R_{DIR-\beta}^{DM}$, pela razão, r_{DIR} expressa em 2.17:

$$r_{DIR} = \frac{R_{DIR-\beta}^{DM}}{R_{DIR}^{DM}} \quad (2.17)$$

Onde o valor de r_{DIR} , para superfícies pousadas no Hemisfério Norte com inclinações voltadas para o sul, é dado pela expressão 2.18.

$$r_{DIR} = \frac{\cos(\varphi - \beta) \cos \delta \sin H_{min} + \left(\frac{\pi}{180}\right) H_{min} \sin(\varphi - \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin H_{ss} + \left(\frac{\pi}{180}\right) H_{min} \sin \varphi \sin \delta} \quad (2.18)$$

Sendo H_{min} o valor mínimo entre H_{ss} e o valor de $\cos^{-1}[-\tan(\varphi - \beta) \tan \delta]$.

Já para superfícies pousadas no Hemisfério Sul com inclinações voltadas para o norte, o valor de r_{DIR} é dado pela equação 2.19, e nesse caso H_{min} é o valor mínimo entre H_{ss} e $\cos^{-1}[-\tan(\varphi + \beta) \tan \delta]$.

$$r_{DIR} = \frac{\cos(\varphi + \beta) \cos \delta \sin H_{min} + \left(\frac{\pi}{180}\right) H_{min} \sin(\varphi + \beta) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \sin H_{ss} + \left(\frac{\pi}{180}\right) H_{min} \sin \varphi \sin \delta} \quad (2.19)$$

Similar à radiação direta, há também razões médias diárias mensais que expressam a relação entre radiação difusa e albedo para uma superfície inclinada em um ângulo β e uma superfície pousada na horizontal, sendo respectivamente, r_{DIF} e r_A . As razões são dadas pelas equações 2.20 e 2.21.

$$r_{DIF} = \frac{R_{DIF-\beta}^{DM}}{R_{DIF}^{DM}} \quad (2.20)$$

$$r_A = \frac{R_{A-\beta}^{DM}}{R_A^{DM}} \quad (2.21)$$

A razão r_{DIF} é um fator que compara quanta radiação difusa, considerando que esta é proveniente de todas as direções do céu, incide em uma superfície inclinada em relação a uma superfície na horizontal. Diferença que se dá, segundo Goswami (2015), devido ao fato de a superfície inclinada não estar diretamente voltada ao céu. Por meio de uma análise geométrica chega-se a expressão 2.22, onde se pode obter a razão da radiação difusa conhecendo o ângulo de inclinação da superfície em relação a horizontal.

$$r_{DIF} = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (2.22)$$

O albedo pode ser entendido como a radiação difusa proveniente da reflexão do solo, de paredes de edifícios, entre outros elementos que estejam ao redor. A razão r_A é obtida, similar à r_{DIF} , por uma análise geométrica. Tal razão é dada pela expressão 2.23.

$$r_A = \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (2.23)$$

Ademais, a razão, r , que relaciona a irradiação total incidente sobre a superfície inclinada, I_β , e a radiação global, G , incidente sobre a superfície na horizontal é dada pela equação 2.24a.

$$r^{DM} = \frac{I_\beta^{DM}}{G^{DM}} \quad (2.24a)$$

Ao introduzir as expressões acima citadas em 2.24a, tem-se a expressão 2.24b.

$$r^{DM} = \frac{r_{DIR}R_{DIR}^{DM} + r_{DIF}R_{DIF}^{DM} + r_A R_{A-\beta}^{DM}}{G^{DM}} \quad (2.24b)$$

E ainda, pode-se manipular a equação a fim de torná-la dependente do quociente analisado no tópico 2.1.5.1

$$r^{DM} = \left(1 - \frac{R_{DIF}^{DM}}{G^{DM}}\right) r_{DIR} + \frac{R_{DIF}^{DM}}{G^{DM}} \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (2.24c)$$

2.1.7 Coletor solar plano

Coletores solares são, segundo Kalogirou (2013), dispositivos trocadores de calor que absorvem a energia da radiação solar, a convertem em energia térmica e a transferem a um fluido que circula por seus tubos. Ademais, são basicamente duas as formas de classificar os coletores solares: se são concentradores ou não concentradores (planos) e se são estacionários ou não estacionários. Sendo os concentradores, os que tem a mesma área de recepção e de absorção da radiação solar. Tratar-se-á nesse estudo a respeito dos coletores solares planos, que são não concentradores e estacionários.

De acordo com Duffie e Beckman (2013), a gama de comprimentos de onda da radiação solar incidente em um coletor solar plano é de 0,3 a 3 μm , que é consideravelmente

mais curta do que a da radiação captada pela maioria das superfícies absorvedoras de energia. Além disso, os coletores são projetados para aplicações que exigem fornecimento de energia a temperaturas moderadas, até aproximadamente 100°C acima da temperatura ambiente e são considerados mecanicamente mais simples que os coletores de concentração.

A figura 6 mostra uma vista lateral de um típico coletor solar plano. A radiação passa através da cobertura transparente, chega até a placa que absorção, que é normalmente enegrecida permitindo captar grande parte da energia. Em seguida, é então transferida em forma de energia térmica para o fluido (comumente água), que escoa pelos tubos, fazendo-o aquecer. A partir desse ponto, o fluido pode ser diretamente utilizado ou armazenado.

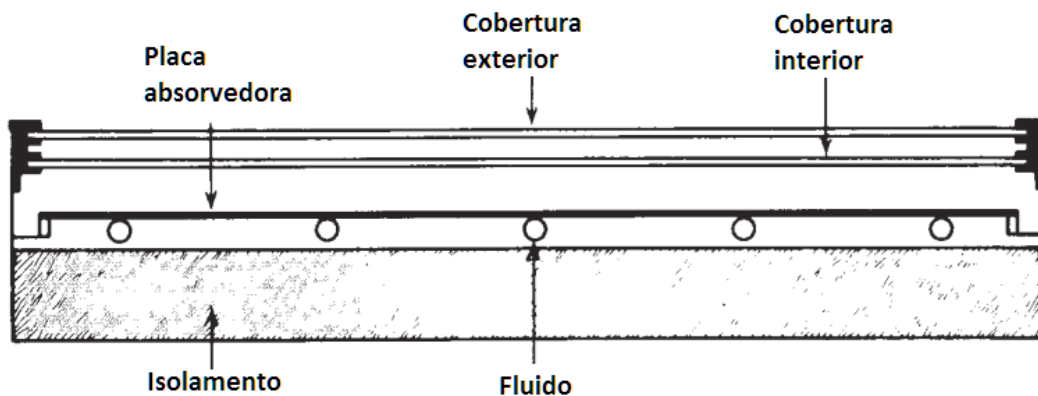


Figura 6 – Típico coletor solar plano. Fonte: Duffie e Beckman (2013) – adaptada.

De acordo com Goswami (2015), o coletor pode ter uma ou mais coberturas transparentes, podendo ser de vidro, plástico, entre outros materiais. A cobertura, além de transmitir a radiação solar à placa absorvedora, reduz as perdas que o coletor poderia ter por convecção (caso a placa absorvedora estivesse exposta ao ar exterior) e reduz as perdas por radiação emitida pela placa absorvedora, visto que a cobertura é transparente para comprimentos de onda curtos (provenientes do Sol) e opacos para comprimentos de ondas maiores (provenientes da placa absorvedora). As perdas de energia também são evitadas pelo isolamento que há ao redor do coletor.

2.1.7.1 Coeficiente de transmissão e coeficiente de absorção

Um fator que indica a relação entre a energia que chega à cobertura e a energia que é transmitida para a placa é o coeficiente de transmissão espectral hemisférico (designado por τ) que, segundo Incropera *et al.* (2007), aponta a resposta de um material semitransparente à radiação incidente. Quanto mais alta for τ , mais energia adentrará o coletor.

Já o fator que indica a razão entre a energia que chega à placa absorvedora e a energia que será captada pela mesma é o coeficiente de absorção, designado por α , que, semelhante à τ , convém que seja o maior possível.

Para cada componente da irradiação total recebida, direta, difusa e albedo, será designado um produto $\tau\alpha$. A energia transmitida e absorvida por unidade de área é dependente de tais produtos como representado em 2.25.

$$I_{\beta}(\tau\alpha) = R_{DIR-\beta}(\tau\alpha)_{DIR} + R_{DIF-\beta}(\tau\alpha)_{DIF} + R_{A-\beta}(\tau\alpha)_A \quad (2.25)$$

Tanto o coeficiente de transmissão quanto o de absorção são fatores dependem do tipo e espessura do material que compõe a cobertura e a placa e também do ângulo de incidência da radiação no coletor, θ . Tal ângulo pode ser obtido com o conhecimento da latitude do local e da inclinação do coletor através da Figura 7 de Duffie e Beckman (2013), feita com dados dos estudos de Klein (1979). Segundo Klein (1979), θ pode ser aproximadamente a média diária, para cada mês, do ângulo no qual a radiação incide no coletor à 2,5 horas contadas a partir do meio dia solar.

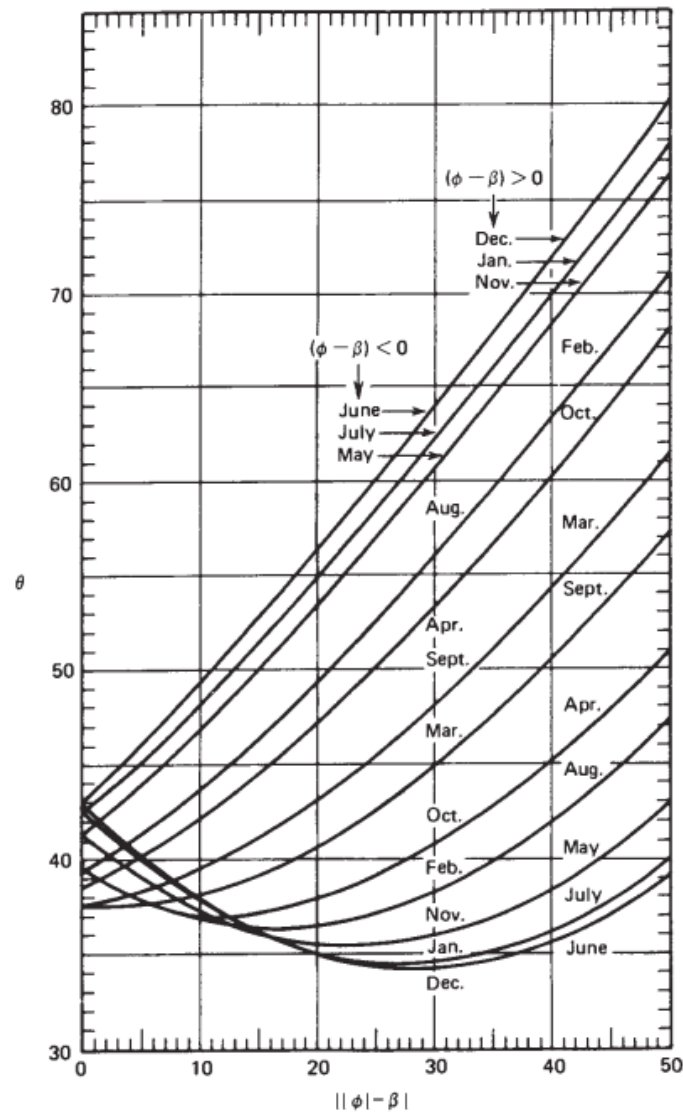


Figura 7 – Ângulo de incidência. Fonte: Duffie e Beckman (2013) – adaptada.

O ângulo no qual a radiação incide no coletor é diferente para cada componente da irradiação total, sendo assim, os valores de τ e α também diferem, bem como o produto $\tau\alpha$. No entanto, valores dos coeficientes de transmissão e absorção do coletor referentes à uma radiação que incide perpendicularmente ao plano do coletor, α_n e τ_n , não variam. Além disso, α_n e τ_n são comumente disponibilizados por fabricantes ou facilmente obtidos experimentalmente. Para o coeficiente de transmissão da cobertura, τ_n , será adotado aqui o valor de 0,88 que, de acordo com Incropera *et al.* (2007), é estabelecido para vidros com baixa taxa de óxido de ferro. Já para o coeficiente de absorção α_n o valor adotado será de 0,95, comumente utilizado para placas de absorção feitas de alumínio.

Klein (1979) analisou em seu estudo a razão $\tau\alpha/(\tau\alpha)_n$ média diária mensal que é dada pela expressão 2.26. Os valores da razão referentes à componente direta da irradiação $(\tau\alpha)_{DIR}/(\tau\alpha)_n$ são dados pela Figura 8, onde considerou a hipótese de 1, 2, 3 ou 4 coberturas de um vidro com índice de refração de 1,526.

$$\frac{\tau\alpha}{(\tau\alpha)_n} = \frac{R_{DIR}r_{DIR} \frac{(\tau\alpha)_{DIR}}{(\tau\alpha)_n} + R_{DIF}r_{DIF} \frac{(\tau\alpha)_{DIF}}{(\tau\alpha)_n} + R_{DIF}r_{DIF} \frac{(\tau\alpha)_{DIF}}{(\tau\alpha)_n}}{I_\beta} \quad (2.26)$$

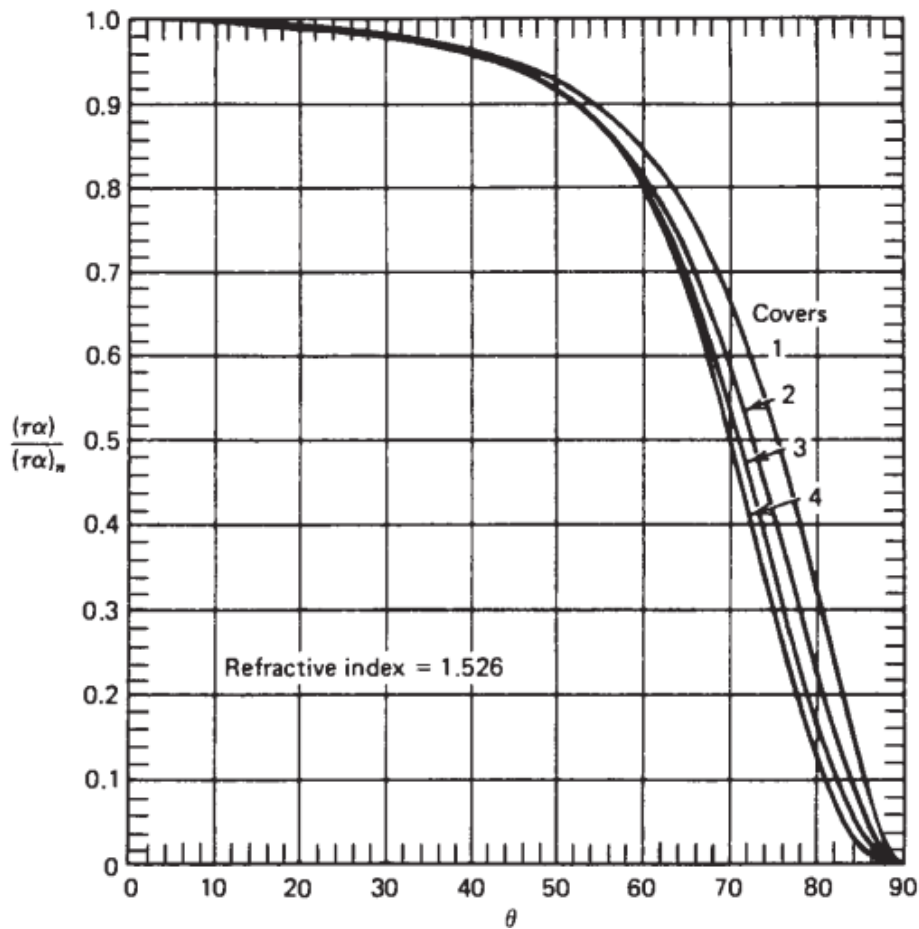


Figura 8 – Coeficientes de transmissão e de absorção pelo ângulo de incidência. Fonte: Duffie e Beckman (2013) – adaptada.

Segundo o autor, os produtos $\tau\alpha$ referentes a radiação difusa e ao albedo são aproximadamente iguais ao produto referente a radiação direta sob um ângulo de incidência de 60°, podendo também ser obtido pela Figura 8.

2.1.8 Perdas de energia no coletor

Quando uma certa quantidade de energia solar atinge a superfície do coletor, grande parte é absorvida e transmitida para o fluido, sendo considerada a energia útil. No entanto, como em todos os sistemas térmicos, perdas de calor para o ambiente ocorrem através das diferentes formas de transferência de calor: condução, convecção e radiação emitida pela placa absorvedora, Kalogirou (2013). Especificamente, as perdas no coletor ocorrem devido às seguintes resistências que a energia se depara, sendo elas:

- Resistência térmica de radiação entre a placa absorvedora e a cobertura de vidro;
- Resistência térmica de convecção entre a placa absorvedora e a cobertura de vidro;
- Resistência térmica de condução na cobertura de vidro;
- Resistência térmica de radiação entre a face exterior da cobertura de vidro e o céu;
- Resistência térmica de convecção entre a face exterior da cobertura de vidro e a atmosfera;
- Resistência térmica de condução no isolamento;
- Resistência térmica de radiação entre a face exterior do fundo do coletor e o céu;
- Resistência térmica de convecção entre a face exterior do fundo do coletor e a atmosfera.

A perda total de potência no coletor, em W, pode ser descrita pela expressão 2.27.

$$Q_p = U_L A_c (T_{abs} - T_{ar}) \quad (2.27)$$

Onde,

A_c é a área do coletor solar em m²;

T_{abs} designa a temperatura da placa absorvedora em °C;

T_{ar} é a temperatura do ar em °C;

U_L é coeficiente global de perdas de calor no coletor em W/(m².°C).

O coeficiente U_L , é definido pela soma das perdas que ocorrem nas diferentes partes do coletor solar, ou seja: perdas no sentido ascendente, designado por U_a ; perdas no sentido descendente, U_d ; e perdas pelas orlas, U_o . Essa relação é expressa por 2.28.

$$U_L = U_a + U_d + U_o \quad (2.28)$$

2.2 Descrição do problema

A situação analisada neste estudo é a instalação de um sistema solar de aquecimento de águas sanitárias em uma habitação. Para tanto, faz-se necessário que se estime o potencial da energia solar dentro de tal sistema, ou seja, qual será a contribuição da mesma para gerar a quantidade de água quente demandada. O presente trabalho utilizará o método da fração solar para obter essa estimativa, o qual será apresentado a diante. Primeiramente, será feita a apresentação do sistema de aquecimento estudado para a instalação na residência hipotética e em seguida as considerações para cálculo das cargas térmicas de águas quentes sanitárias requeridas. Considerar-se-á que nessa habitação residem 4 membros de uma família, portanto, os cálculos de carga térmica serão feitos analisando as necessidades dos mesmos.

2.2.1 Sistema de aquecimento de água

Os cálculos da fração solar serão realizados para um sistema de aquecimento de água que utiliza a energia solar como fonte principal e uma fonte complementar de calor, podendo ser uma caldeira, ou um esquentador a gás. O sistema que será usado para estudo é esquematizado na figura 9.

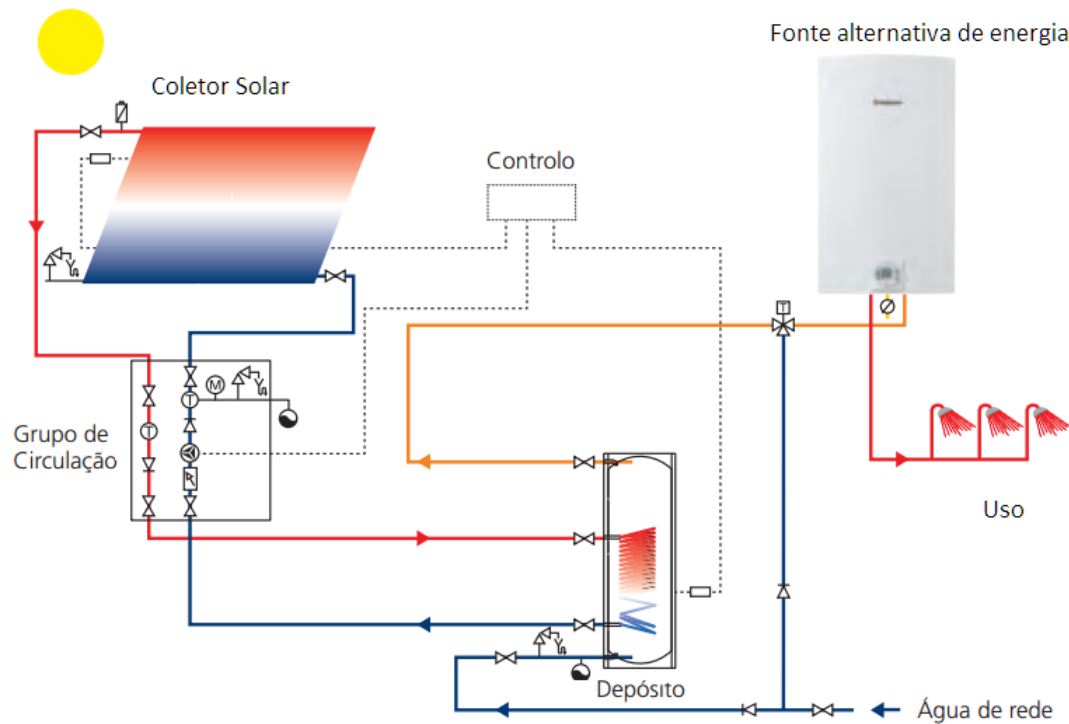


Figura 9 – Esquema do sistema solar de aquecimento estudado. Fonte: Vulcano - Bosch Termotecnologia, S.A. (2014) – adaptada.

A energia solar é absorvida pelo coletor que esquentam a água que é então armazenada e destinada ao uso. No caso de existir um alto consumo residencial, uma fonte de aquecimento alternativa é ativada para poder assegurar que a temperatura da água esteja de acordo com a temperatura solicitada pelo utilizador. O sistema trabalha com 1 coletor solar e 1 depósito de armazenamento de 200 litros de capacidade. Os cálculos de obtenção de energia para a residência de estudo serão feitos usando os dados de um sistema solar de aquecimento (Kit TI/1FKC-2S/200) montado e fabricado pela indústria portuguesa Vulcano - Bosch Termotecnologia S.A., e tal sistema conta com os seguintes equipamentos:

- Painel solar modelo *Warm Sun* FKC-2S (especificado em 2.2.1.1);
- Depósito modelo *S Solar* 200 ZB c – capacidade de 200 litros – uma serpentina;
- Conjunto de ligações hidráulicas entre coletores *WarmSun* FKC-2;
- Estrutura de suporte do coletor modelo FKA 5-2;
- Purgador automático especial para instalações solares modelo ELT 5;
- Grupo de circulação: AGS 5;

- Controlador solar: B-SOL 100 ;
- Vaso de expansão de 25 litros: SAG 25 ;
- Acessório de ligação ao vaso de expansão: AAS 1.

2.2.1.1 Especificações do coletor

O coletor ou painel solar escolhido é o *WarmSun* FKC-2S (figura 10), cujas principais características, de acordo com a ficha técnica do mesmo, são:

- Acabamento altamente seletivo com absorvedor em alumínio;
- Instalação na vertical;
- Circuito hidráulico em grelha de tubos;
- Permite ligação hidráulica em paralelo de canais até 10 painéis;
- Estrutura em SMC de uma só peça;
- Vidro solar estruturado;
- Ligações flexíveis em borracha.



Figura 10 – Painel Solar WarmSun (FKC-2S). Fonte: Vulcano - Bosch Termotecnologia, S.A.

As demais características são especificadas na ficha técnica presente na figura 11.


GAMA		WarmSun
MODELO		FKC-2 S
Certificados		
Montagem		Vertical
Dimensões: A x L x P	mm	2017 x 1175 x 87
Área total	m ²	2,37
Área de abertura	m ²	2,25
Área do absorvedor	m ²	2,18
Volume do absorvedor	m ³	0,94
Peso em vazio	kg	40
Pressão de funcionamento admissível do painel	bar	6
Caudal nominal	l/h	50
Estrutura	Fibra de vidro (SMC)	
Isolamento	Lã mineral, 55 mm espessura	
Absorvedor	Altamente selectivo	
Cobertura do absorvedor	PVD	
Circuito hidráulico	Grelha de tubos	
Curva de rendimento instantâneo segundo EN 12975-2 (baseada na área de abertura)		
Factor de eficiência (η)		0,766
Coefficiente de perdas linear (a ₁)	W/(m ² K)	3,216
Coefficiente de perdas secundário (a ₂)	W/(m ² K ²)	0,015

Figura 11 – Ficha técnica do Painel Solar WarmSun (FKC-2S). Fonte: Vulcano - Bosch Termotecnologia, S.A.

2.2.2 Cargas térmicas de águas quentes sanitárias

A carga térmica que é a energia despendida em sistemas convencionais na preparação das AQS durante um mês será designada por CT_m (kWh/mês) e dada pela expressão dada seguinte:

$$CT_m = \frac{M_{AQS} n_{hab} c_{\text{água}} m_{\text{água}} (T_Q - T_{rede}) n_m}{3600000} \quad (2.29)$$

Onde,

$c_{\text{água}}$ é o calor específico da água, que será utilizado como 4181 J/(kg.K) correspondente à temperatura de 50°C;

$m_{\text{água}}$ é a massa volúmica da água será utilizada nos cálculos como 1 kg/L, já que de 0°C até a temperatura de 50°C a massa volúmica da água mantém-se próxima a tal valor;

T_Q é a temperatura da água aquecida;

T_{rede} é a temperatura da água que circula na rede pública;

n_{hab} é o número de habitantes na residência;

n_m é o número de dias do mês, por exemplo, para janeiro, $n_m = 31$;

M_{QAS} define o consumo médio diário de águas quentes sanitárias por pessoa.

O Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), estabelece requisitos ao projeto de novos edifícios visando questões de conforto térmico sem gastos excessivos de energia. Tais requisitos incluem a questão do aquecimento de águas sanitárias, onde se sugere que o consumo médio diário de referência, designado por M_{AQS} , nos edifícios residenciais deve ser de 40 litros para cada ocupante. No entanto, tal consumo apesar de ideal, é demasiado econômico, visto que comumente se utiliza maior quantidade de água quente.

A norma brasileira NBR 15569 (2008) da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) sugere, na figura 11, a quantidade de água quente que é normalmente gasta por equipamentos presentes em grande parte das residências. Através da figura pode-se obter o consumo mínimo por equipamento que será utilizado no presente trabalho, para que se possa obter um consumo diário de litros por pessoa mais próximo da realidade. Para tanto, utilizar-se-á a expressão a seguir:

$$M_{AQS} = \sum c_{mín} n_{uso} t \quad (2.30)$$

Onde,

$c_{mín}$ é dado pela figura 12 e representa o consumo mínimo por equipamento em L/min;

n_{uso} representa o número de vezes que cada habitante utiliza determinado equipamento por dia – será dado em uso/(dia.pessoa);

t representa o tempo ou ciclo de utilização de cada equipamento a cada vez que é utilizado, sendo os valores da 4ª coluna da figura 12. No entanto, a norma está a considerar que a pessoa utiliza o equipamento apenas uma vez por dia, como a expressão traz a componente n_{uso} , utilizar-se-á o tempo t em min/uso, já que a pessoa pode vir a usar um equipamento mais de uma vez no dia.

Considerar-se-á que a residência onde se pretende aquecer água pelo sistema solar não dispõe de banheira, máquina de lavar louça e água quente na máquina de lavar roupa. Portanto, o consumo total será apresentado para os demais equipamentos descritos na figura 12.

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

Figura 12 – Consumo típico dos equipamentos domésticos que utilizam água quente. Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (2008).

2.3 Método da fração solar

De acordo com Duffie e Beckman (2013), o método da fração ou *f-chart* permite estimar a percentagem de uma dada carga térmica que será fornecida por energia solar em um determinado sistema de aquecimento. Tal método foi criado por Klein *et al.* (1976, 1977) e Beckman *et al.* (1977, 1978) através de correlações obtidas de diversos resultados de simulações experimentais detalhadas. O desenvolvimento do método é feito considerando sistemas de aquecimento padrão, sendo eles, sistemas que utilizam líquido e ar (para aquecimento de espaço e água) ou sistemas destinados somente ao aquecimento de água. Como descrito acima, o presente trabalho trata de um sistema de aquecimento de águas quentes sanitárias.

O método é destinado ao dimensionamento de coletores solares usados em aquecimento de edifícios, onde a temperatura mínima de fornecimento de calor de ao

sistema de que pretende aquecer deve ser de 20°. Ademais foi desenvolvido analisando sistemas com as seguintes características:

- O produto $(\tau\alpha)_n$ entre 0,6 e 0,9;
- As perdas de potência no coletor entre 2,1 e 8,3 W/(m².K);
- A inclinação β do coletor entre 30 e 90 graus;
- Sendo F'_R o fator de remoção de calor modificado e A_c a área do coletor solar, o produto $F'_R A_c$ estando entre 5 e 120 m²;
- As perdas térmicas globais entre a placa e o ambiente pelo topo, base e laterais do coletor que se pretende aquecer estando entre 83 e 667 W/(m².K).

2.3.1 Parâmetros adimensionais X e Y

A fração solar de carga térmica mensal, definida por f, é dada em função de dois parâmetros adimensionais, X e Y. O primeiro está relacionado com as perdas de energia que ocorrem no coletor solar e o segundo com a razão entre a radiação solar absorvida e as cargas térmicas a serem supridas. De acordo com Maia (2013), a fração solar aumenta com o aumento de Y e diminui com o aumento X. Os parâmetros X e Y são dados pelas equações 2.31 e 2.32.

$$X = F_R U_L \frac{F'_R}{F_R} (T_{ref} - T_a) \Delta t \frac{A_c}{CT_m} \quad (2.31)$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n \frac{F'_R}{F_R} \frac{(\tau\alpha)}{(\tau\alpha)_n} I_\beta n_m \frac{A_c}{CT_m} \quad (2.32)$$

Onde:

A_c é a área do coletor solar (m²);

U_L representa o coeficiente global de perdas de calor no coletor (W/m².°C), como mencionado;

Δt representa o total de segundos do mês;

T_a é a temperatura ambiente média mensal (°C) da região onde se pretende instalar o

coletor;

T_{ref} é temperatura de referência derivada empiricamente que corresponde a 100°C;

n_m é o número de dias do mês;

CT_m são as cargas térmicas mensais em Joule.

F_R é o fator de remoção de calor do coletor, o qual representa a razão entre o ganho de energia útil real e o que existiria caso a superfície de absorção do coletor estivesse à mesma temperatura de entrada do fluido;

F'_R é fator de remoção de calor modificado por conta da presença do trocador de calor.

Ademais, segundo Duffie e Beckman (2013), o produto $F_R U_L$ e $F_R(\tau\alpha)_n$ são valores obtidos por testes feitos nos coletores ou comumente informados pelo fabricante.

Portanto, a fração solar, f , é definida, de acordo com Maia (2013), como a fração da carga térmica que é suprida pelos coletores solares. Para sistemas onde o fluido de trabalho seja líquido, como é o caso de estudo, a expressão a 2.33 permite encontrar f :

$$f = 1,029Y - 0,065X - 0,245Y^2 + 0,0018X^2 + 0,0215Y^3 \quad (2.33)$$

Tendo em vista que $0 < Y < 3$, $0 < X < 18$ e caso f seja maior que 1, pode ser considerada 1.

Alguns resultados da relação entre f , X , Y conforme a equação acima são demonstrados no gráfico da figura 13.

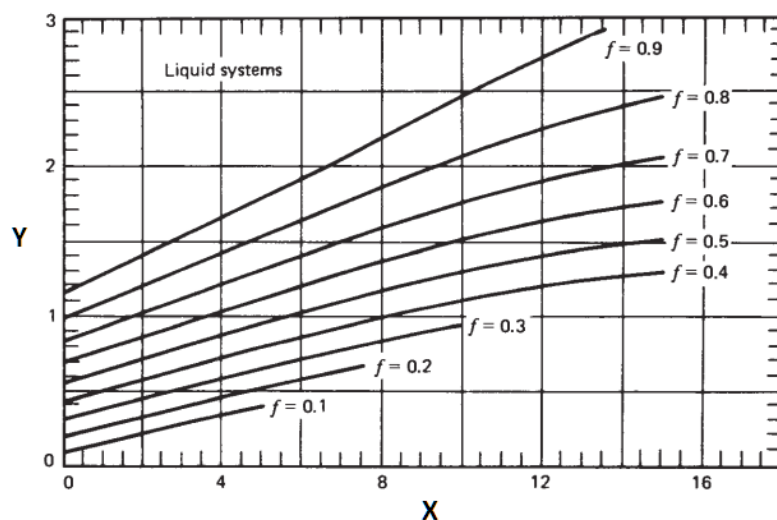


Figura 13 – Gráfico da fração solar em função dos parâmetros X e Y. Fonte: Duffie e Beckman (2013) – adaptada.

2.3.1.1 Correção do parâmetro X - capacidade de armazenamento

Segundo Kalagirou (2013), o desempenho anual do sistema solar de energia que trabalha com líquido é praticamente insensível à capacidade de armazenamento do reservatório (ou tanque) que integra o sistema, isso quando tal capacidade é de mais de 50 litros de água por área do coletor solar. O método da fração solar foi desenvolvido para sistemas que possuam o padrão de 75 L/m² de capacidade de armazenamento. No caso onde esse valor é diferente de 75 L/m², mas está dentro da faixa de 37,5 L/m² a 300 L/m², é possível fazer uma correção ao parâmetro X e calcular f com o novo valor corrigido, designado por X_{C_{arm}}. A correção é expressa a seguir.

$$\frac{X_{C_{arm}}}{X} = \left(\frac{M}{M_p} \right)^{-0,25} \quad (2.34)$$

Onde M representa a capacidade de armazenamento do reservatório por área do coletor do sistema com o qual se está trabalhando e M_p representa a capacidade padrão de armazenamento por área (75 L/m²).

Deve-se atentar ao facto de tal correção ter sido desenvolvida considerando que razão M/M_p dentro da faixa de 0,5 a 4.

2.3.1.2 Correção do parâmetro X - sistemas de aquecimento de águas sanitárias

No caso onde o sistema solar é destinado a aquecer águas para sanitários e cozinha há outra correção a ser feita ao parâmetro X, sendo ela expressa a seguir.

$$\frac{X_{CAQS}}{X} = \frac{11,6 + 1,18T_{mín} + 3,86T_{rede} - 2,32T_a}{100 - T_a} \quad (2.35)$$

Onde, X_{CAQS} designa o parâmetro corrigido, T_{mín} é a temperatura mínima aceitável para a água aquecida e T_a, como mencionado, é a temperatura ambiente média mensal que será dada no tópico a seguir para cada cidade de estudo.

2.3.2 Temperatura ambiente média mensal

Os dados de temperaturas médias mensais das cidades de estudo são apresentadas neste tópico. Tais dados foram baseados em temperaturas máximas e mínimas médias mensais obtidas entre o período de 1981 a 2010 que são disponibilizadas na plataforma virtual *World Weather Information Service*. A tabela 8 apresenta tais informações.

Tabela 8 – Temperatura ambiente média mensal.

	Temperatura média mensal do ar - Ta (°C)					
	Caracas	Lima	Buenos Aires	Montevideo	Rio de Janeiro	Quito
Janeiro	21	22	25	23	24	16
Fevereiro	23	23	24	23	23	16
Março	24	23	22	21	22	15
Abril	24	21	18	17	18	16
Mai	25	19	15	19	17	16
Junho	24	18	12	11	12	15
Julho	24	17	11	11	11	15
Agosto	23	17	13	12	13	16
Setembro	23	17	15	14	14	16
Outubro	23	18	18	16	17	16
Novembro	23	19	21	19	20	15
Dezembro	21	21	23	21	22	16

2.3.3 Parâmetros de eficiência do coletor utilizados para fração solar

O coletor solar escolhido para suprir a demanda de energia da residência possui rótulo de qualidade da *Solar Keymark* que, de acordo com publicação “*A Solar Keymark/ O Rótulo de Qualidade para os Produtos Solares Térmicos na Europa*” (2017) é uma marca de certificação voluntária para produtos solares térmicos, demonstrando aos utilizadores finais que um produto está em conformidade com as normas Europeias (EN 12975).

No banco de dados disponibilizados pela *Solar Keymark* encontram-se inúmeros tipos de coletores solares, e em suas respectivas especificações técnicas são expostos os parâmetros de eficiências dos mesmos, obtidos através de testes. O presente tópico

destina-se a esclarecer os parâmetros presentes na certificação do coletor que serão utilizados para cálculo da fração solar.

O primeiro parâmetro é o rendimento do coletor associado às perdas térmicas nulas, designado por η_0 , que, de acordo com a norma europeia EN 12765, é um agrupamento da eficiência do coletor para radiação direta e difusa. Segundo a norma, η_0 corresponde à combinação do fator de eficiência do coletor, F' , com o produto dos coeficientes de transmissão e absorção $(\tau\alpha)_n$. A expressão 2.36 demonstra o que foi dito.

$$\eta_0 = F'(\tau\alpha)_n \quad (2.36)$$

O segundo parâmetro analisado é definido como parâmetro de perda de calor com temperatura do fluido do coletor sendo igual à temperatura ambiente, é designado por a_1 e equivalente ao produto expresso a seguir:

$$a_1 = F'U_L \quad (2.37)$$

Onde, tal parâmetro é dado em $W/(m^2.K)$.

Através das expressões acima pode-se encontrar o fator F' e o coeficiente de perdas U_L , necessários para cálculo do fator de remoção de calor F_R , que por sua vez, é utilizado para encontrar os parâmetros X e Y. Sendo, assim F_R é dado de expressão 2.38.

$$F_R = \frac{m_f c_p}{A_c U_L} \left[1 - e^{-\left(\frac{A_c U_L F'}{m_f c_p}\right)} \right] \quad (2.38)$$

Onde, m_f é o caudal mássico das condições de teste, expresso na certificação do coletor.

2.3.4 Considerações finais para cálculo da fração solar

O presente tópico é destinado aos fatores necessários para cálculo da fração solar que ainda não foram expressos. Sendo eles:

- Devido a dificuldade de se obter com exatidão os valores de temperatura da água da rede de distribuição pública das diferentes cidades (ou temperatura de entrada no coletor), designada por T_{rede} , se adotará o valor de 20°C.
- Considerar-se-á que a temperatura da água à saída do coletor (água aquecida),

T_{Q_1} é de 50°C;

- Considerar-se-á que a temperatura mínima aceitável para a água aquecida é 30°C;
- A razão F'_R/F_R será considerada como sendo 1, visto que o sistema não possui trocador de calor;
- O caudal mássico, m_f , utilizado nas condições de teste do coletor foi de 0,023 kg/s.

DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

- 3.1 VALORES DOS ÂNGULOS HORÁRIOS DO PÔR DO SOL
- 3.2 VALORES DA RADIAÇÃO INCIDENTE NO EXTERIOR DA ATMOSFERA
 - 3.3 RADIAÇÃO GLOBAL MÉDIA DIÁRIA MENSAL
- 3.4 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS DA IRRADIAÇÃO INCIDENTE EM UMA SUPERFÍCIE INCLINADA COM DADOS OBTIDOS PELA NASA
 - 3.5 COMPARAÇÃO ENTRE ÂNGULOS DE INCLINAÇÃO
 - 3.6 CÁLCULO DAS CARGAS TÉRMICAS
 - 3.7 FRAÇÃO SOLAR CALCULADA
 - 3.7.1 RESULTADO DA FRAÇÃO SOLAR PARA CARACAS
 - 3.7.2 RESULTADO DA FRAÇÃO SOLAR PARA LIMA
 - 3.7.3 RESULTADO DA FRAÇÃO SOLAR PARA BUENOS AIRES
 - 3.7.4 RESULTADO DA FRAÇÃO SOLAR PARA RIO DE JANEIRO
 - 3.7.5 RESULTADO DA FRAÇÃO SOLAR PARA QUITO
 - 3.7.6 RESULTADO DA FRAÇÃO SOLAR PARA MONTEVIDEO
 - 3.8 ANÁLISE ECONÔMICA
 - 3.8.1 CUSTO COM O SISTEMA
 - 3.8.2 PREÇO DA ENERGIA ELÉTRICA NAS CIDADES DE ESTUDO
 - 3.8.3 ECONOMIA ANUAL E RESULTADOS DE PRI

3 DESENVOLVIMENTO E RESULTADOS

Neste capítulo, primeiramente serão apresentados os resultados obtidos para os fatores considerados nos cálculos das irradiações incidentes nos coletores, resumindo os resultados dados no anexo 6.1. Em seguida, será feita uma análise dos resultados de irradiação para indicar qual a melhor inclinação do coletor para cada cidade. Feito isso, os cálculos de carga térmica e resultados das frações solares serão expostos e, por fim, analisar-se-á a viabilidade econômica de implantação do sistema solar de aquecimento.

3.1 Valores dos ângulos horários do pôr do sol

O presente tópico apresenta os valores médios diários mensais dos ângulos horários do pôr do sol para cada cidade de estudo. Tais valores são expostos e podem ser comparados pelo gráfico da figura 14.

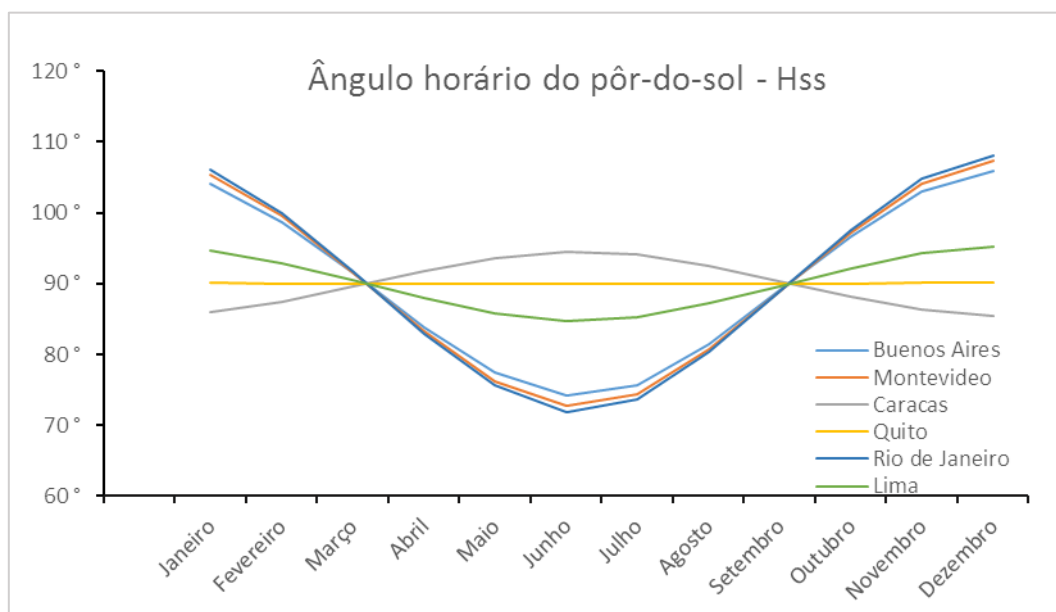


Figura 14 – Valores médios diários mensais dos ângulos horários do pôr do sol para cada cidade. Dados do anexo 6.1.

Como esperado, para todas as cidades, nos meses de inverno os ângulos horários do pôr do sol são menores que no verão. A diferença de curvatura de Caracas para as demais cidades se dá porque os meses que definem as estações são diferentes para o

Hemisfério Sul e para o Hemisfério Norte. Quito, no Equador, não possui grandiosas diferenças de H_{ss} entre os meses pois está próximo à linha do equador.

3.2 Valores da radiação incidente no exterior da atmosfera

Para as diferentes cidades de estudo, os valores da radiação média diária mensal que incide em uma superfície horizontal pousada no exterior da atmosfera, S_D , são apresentadas no gráfico da figura 15.

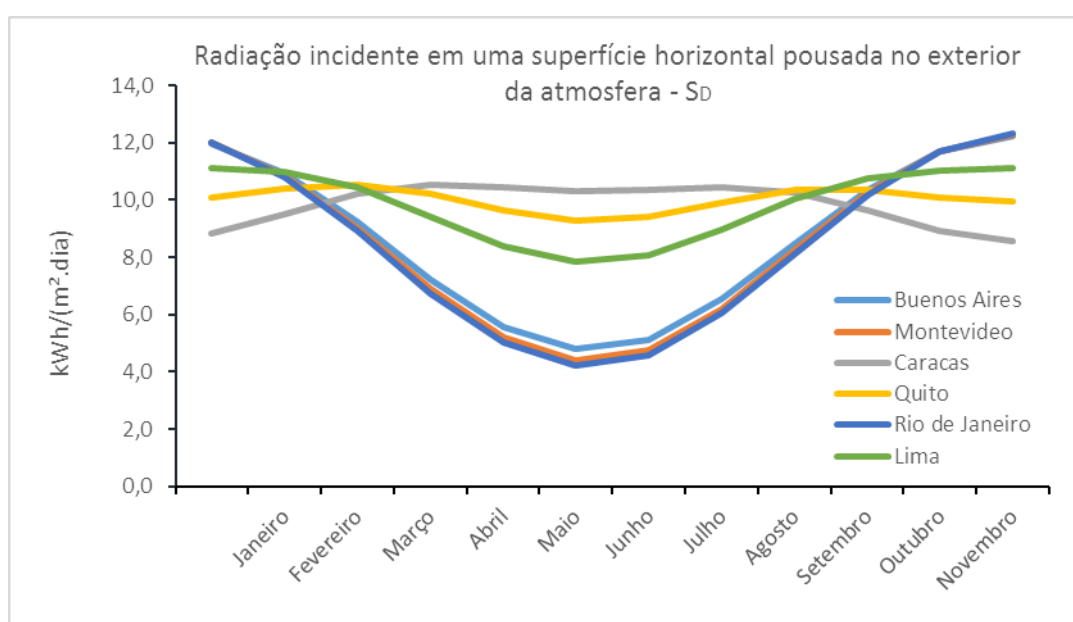


Figura 15 – Radiação média diária mensal incidente em uma superfície horizontal pousada no exterior da atmosfera de cada cidade. Dados do anexo 6.1.

Pelo gráfico é possível observar a forte influência da latitude nos resultados de S_D , visto que as diferenças entre os comportamentos das curvas são maiores quanto maior as diferenças entre as latitudes das cidades.

3.3 Radiação global média diária mensal

A radiação global mostra a forte dependência do índice de claridade supracitado (tópico 2.1.5) para cada cidade. Os resultados calculados para radiação global média diária

mensal que chega a uma superfície horizontal pousada na Terra nos locais de estudo são expostos no gráfico da figura 16.

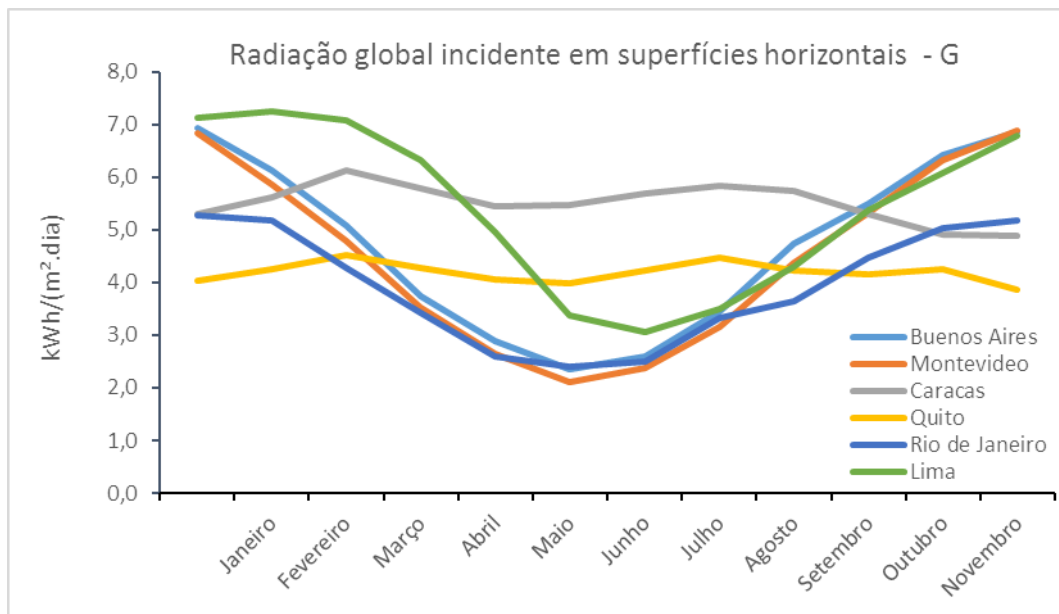


Figura 16 – Radiação global incidente em superfícies horizontais pousadas nas diferentes cidades. Dados do anexo 6.1.

3.4 Comparação dos resultados da irradiação incidente em uma superfície inclinada com dados obtidos pela NASA

Cálculos da irradiação média diária mensal incidente em superfícies pousadas na Terra com diferentes inclinações foram feitos e comparados com os resultados disponibilizados pelo Centro de Informações de Ciência Atmosférica (*Atmospheric Science Data Center - ASDC*)³ da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), a fim de averiguar as diferenças.

Primeiramente, os resultados obtidos para a cidade de Buenos Aires são avaliados. Para esta, os valores disponibilizados pelo ASDC foram para inclinações, β , de 0°, 19°, 34° e 49°. As tabelas 9 e 10 expõem os resultados calculados e os obtidos pela NASA.

³ Disponível em "<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=>".

Tabela 9 – Comparação dos resultados de irradiação para superfícies com diferentes inclinações em Buenos Aires – parte 1.

BUENOS AIRES	0°		19°	
	I β	I β ASDC	I β	I β ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
Janeiro	6,94	7,01	6,65	6,84
Fevereiro	6,12	6,06	6,12	6,17
Março	5,08	4,86	5,44	5,30
Abril	3,75	3,61	4,39	4,28
Mai	2,88	2,70	3,72	3,49
Junho	2,34	2,20	3,16	2,96
Julho	2,61	2,43	3,45	3,21
Agosto	3,46	3,22	4,20	3,95
Setembro	4,75	4,49	5,24	5,07
Outubro	5,49	5,22	5,59	5,44
Novembro	6,43	6,41	6,22	6,32
Dezembro	6,86	6,92	6,49	6,68

Tabela 10 – Comparação dos resultados de irradiação para superfícies com diferentes inclinações em Buenos Aires – parte 2.

BUENOS AIRES	34°		49°	
	I β	I β ASDC	I β	I β ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
Janeiro	6,11	6,31	5,34	5,48
Fevereiro	5,80	5,91	5,23	5,36
Março	5,42	5,34	5,13	5,11
Abril	4,65	4,57	4,66	4,60
Mai	4,16	3,90	4,37	4,10
Junho	3,62	3,39	3,88	3,62
Julho	3,91	3,64	4,15	3,86
Agosto	4,53	4,29	4,63	4,40
Setembro	5,33	5,23	5,15	5,11
Outubro	5,37	5,31	4,91	4,92
Novembro	5,76	5,89	5,07	5,19
Dezembro	5,92	6,12	5,13	5,27

Ao analisar os dados acima, tem-se que a maior diferença de resultados foi de cerca de 8%, referente ao mês de julho para inclinação de 49°.

A tabela 11 traz os dados calculados para irradiação incidente em superfícies pousadas em Caracas com inclinações de 0°, 10° e 25°, juntamente com os dados disponibilizados pelo ASDC. Neste caso, a maior diferença foi de 16% para 25° em junho.

Tabela 11 – Comparação dos resultados de irradiação para superfícies com diferentes inclinações em Caracas.

CARACAS	0°		10°		25°	
	I β	I β ASDC	I β	I β ASDC	I β	I β ASDC
	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$
Janeiro	5,29	5,34	5,75	5,8	6,18	6,22
Fevereiro	5,62	5,69	5,92	5,99	6,13	6,17
Março	6,12	6,10	6,23	6,21	6,13	6,11
Abril	5,79	5,74	5,68	5,65	5,30	5,30
Mai	5,44	5,41	5,20	5,47	4,66	5,34
Junho	5,47	5,37	5,16	5,48	4,54	5,42
Julho	5,69	5,67	5,39	5,77	4,78	5,68
Agosto	5,84	5,79	5,67	5,80	5,21	5,59
Setembro	5,74	5,72	5,76	5,74	5,57	5,54
Outubro	5,31	5,32	5,53	5,52	5,63	5,58
Novembro	4,91	4,98	5,28	5,33	5,61	5,62
Dezembro	4,88	4,93	5,33	5,37	5,78	5,80

Para Rio de Janeiro as inclinações analisadas foram de 0°, 7°, 22° e 37°. Os resultados são expressos pelas tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Comparação dos resultados de irradiação para superfícies com diferentes inclinações em Rio de Janeiro – parte 1.

RIO DE JANEIRO	0°		7°	
	I β	I β ASDC	I β	I β ASDC
	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$	$\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{dia}}$
Janeiro	5,28	5,18	5,26	5,13
Fevereiro	5,18	5,29	5,24	5,30
Março	4,28	4,69	4,44	4,78
Abril	3,44	4,27	3,72	4,48
Mai	2,60	3,58	2,95	3,85
Junho	2,40	3,55	2,82	3,90
Julho	2,51	3,54	2,90	3,85
Agosto	3,32	4,28	3,66	4,56
Setembro	3,64	4,13	3,82	4,24
Outubro	4,48	4,65	4,55	4,68
Novembro	5,02	4,94	5,02	4,90
Dezembro	5,17	5,00	5,13	5,02

Tabela 13 – Comparação dos resultados de irradiação para superfícies com diferentes inclinações em Rio de Janeiro – parte 2.

RIO DE JANEIRO	22°		37°	
	I β	I β ASDC	I β	I β ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
Janeiro	5,06	4,83	4,68	4,34
Fevereiro	5,19	5,14	4,92	4,74
Março	4,63	4,81	4,60	4,61
Abril	4,19	4,75	4,44	4,78
Mai	3,59	4,29	4,03	4,51
Junho	3,61	4,49	4,19	4,83
Julho	3,62	4,36	4,14	4,64
Agosto	4,25	4,98	4,62	5,13
Setembro	4,06	4,33	4,10	4,22
Outubro	4,56	4,59	4,38	4,29
Novembro	4,86	4,66	4,52	4,22
Dezembro	4,91	4,90	4,52	4,58

Para a cidade, a maior diferença entre os resultados se deu no mês de junho para inclinação de 22°, sendo aproximadamente 20%.

Assim como Buenos Aires, os resultados para Montevideo foram comparados para inclinações de 0°, 19°, 34° e 49°. Ilustrados pelas tabelas 14 e 15.

Tabela 14 – Comparação dos resultados de irradiação para superfícies com diferentes inclinações em Montevideo – parte 1.

MONTEVIDEO	0°		19°	
	I β	I β ASDC	I β	I β ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
Janeiro	6,83	6,90	6,59	6,74
Fevereiro	5,86	5,81	5,89	5,92
Março	4,78	4,74	5,16	5,16
Abril	3,52	3,52	4,18	4,17
Mai	2,65	2,66	3,48	3,44
Junho	2,12	2,14	2,93	2,87
Julho	2,37	2,38	3,21	3,14
Agosto	3,16	3,08	3,89	3,76
Setembro	4,36	4,28	4,85	4,81
Outubro	5,33	5,11	5,45	5,33
Novembro	6,31	6,30	6,14	6,22
Dezembro	6,88	6,85	6,56	6,62

Tabela 15 – Comparação dos resultados de irradiação para superfícies com diferentes inclinações em Montevideo – parte 2.

MONTEVIDEO	34°		49°	
	I β	I β ASDC	I β	I β ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
Janeiro	6,10	6,23	5,37	5,43
Fevereiro	5,62	5,68	5,11	5,16
Março	5,17	5,20	4,93	4,97
Abril	4,46	4,44	4,50	4,47
Maio	3,94	3,84	4,17	4,04
Junho	3,40	3,28	3,68	3,51
Julho	3,69	3,56	3,95	3,78
Agosto	4,23	4,08	4,35	4,18
Setembro	4,96	4,95	4,83	4,84
Outubro	5,27	5,20	4,85	4,83
Novembro	5,72	5,81	5,08	5,13
Dezembro	6,02	6,08	5,26	5,24

Para esta cidade os valores foram muito semelhantes, tendo uma diferença máxima de 4% para a declinação de 49° no mês de julho.

Em Lima os resultados são comparados para ângulos de inclinação de 0°, 12° e 27°. Tais valores são expostos a seguir pela tabela 16. Para a cidade a maior diferença entre os resultados foi de 8%, referente à inclinação de 22° no mês de janeiro.

Tabela 16 – Comparação dos resultados de irradiação para superfícies com diferentes inclinações em Lima.

LIMA	0°		12°		27°	
	I β	I β ASDC	I β	I β ASDC	I β	I β ASDC
	kWh m ² .dia	kWh m ² .dia	kWh m ² .dia	kWh m ² .dia	kWh m ² .dia	kWh m ² .dia
Janeiro	7,12	7,09	6,67	7,22	5,85	7,04
Fevereiro	7,25	7,20	6,98	7,17	6,35	6,80
Março	7,09	7,04	7,12	7,10	6,83	6,84
Abril	6,32	6,28	6,66	6,65	6,78	6,79
Maio	4,95	4,90	5,42	5,36	5,75	5,67
Junho	3,37	3,37	3,70	3,65	3,94	3,85
Julho	3,06	3,07	3,31	3,27	3,48	3,39
Agosto	3,50	3,45	3,67	3,60	3,74	3,63
Setembro	4,31	4,30	4,37	4,36	4,26	4,26
Outubro	5,37	5,25	5,25	5,17	4,88	4,85
Novembro	6,07	5,97	5,75	6,03	5,12	5,83
Dezembro	6,78	6,68	6,30	6,83	5,48	6,71

Por fim, para Quito, foi possível analisar os resultados referentes às inclinações de 0° e 15°. Pela tabela 17 pode-se analisar os valores obtidos. Para a cidade a maior diferença entre os resultados calculados e os disponibilizados pelo ASDC foi de 13% para inclinação de 15° no mês janeiro.

Tabela 17 – Comparação dos resultados de irradiação para superfícies com diferentes inclinações em Quito.

QUITO	0°		15°	
	I β	I β ASDC	I β	I β ASDC
	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)	kWh/(m ² .dia)
Janeiro	4,03	4,08	3,64	4,19
Fevereiro	4,26	4,29	3,97	4,32
Março	4,52	4,49	4,38	4,41
Abril	4,28	4,27	4,34	4,30
Mai	4,05	4,07	4,25	4,21
Junho	3,99	3,97	4,27	4,18
Julho	4,24	4,21	4,50	4,42
Agosto	4,46	4,40	4,59	4,49
Setembro	4,24	4,21	4,17	4,15
Outubro	4,15	4,18	3,91	4,18
Novembro	4,24	4,24	3,85	4,33
Dezembro	3,87	3,93	3,47	4,04

De modo geral, os resultados tiveram uma proximidade satisfatória, visto que as diferenças podem existir pois os cálculos de irradiação acompanham diferentes incertezas, principalmente devido à condições climáticas e ambientais.

3.5 Comparação entre ângulos de inclinação

Um coletor solar pode estar posicionado com diferentes ângulos de inclinação em relação a horizontal. Como o coletor solar integrado ao sistema de aquecimento de estudo é estático, faz-se necessário analisar qual inclinação do coletor é melhor para instalação em casas localizadas nas diferentes cidades de estudo. Portanto, considerando que o coletor está voltado para o sul quando pousado no Hemisfério Norte ou voltado para o norte quando pousado no Hemisfério Sul, comparações entre valores médios diários mensais de irradiação, em kWh/(m².dia), incidentes em superfícies com diferentes ângulos de β , são apresentados nas tabelas a seguir (18 a 23).

Os valores de inclinação utilizados para analisar a irradiação foram: 0°, 10°, 20°, 30°, 40°, 50° e 60°. Ademais, é apresentado o valor total anual da irradiação que incide no coletor, em kWh/m², destacando o valor máximo, sendo este o critério usado para definir o ângulo mais favorável.

Primeiramente os resultados obtidos para Buenos Aires são apresentados na tabela 18, onde se pode observar que o total de irradiação anual que chega a uma superfície plana tem um valor máximo quando o ângulo de inclinação da superfície em relação à horizontal é de 30°.

Tabela 18 – Irradiação que chega a uma superfície pousada em Buenos Aires sob diferentes ângulos de inclinação.

IRRADIAÇÃO EM BUENOS AIRES - I β (kWh/m ² .dia)							
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Jan	6,94	6,85	6,63	6,28	5,83	5,28	4,65
Fev	6,12	6,18	6,11	5,91	5,60	5,18	4,67
Mar	5,08	5,32	5,45	5,45	5,34	5,11	4,77
Abr	3,75	4,13	4,41	4,60	4,68	4,65	4,52
Mai	2,88	3,36	3,75	4,06	4,27	4,37	4,37
Jun	2,34	2,80	3,20	3,52	3,75	3,89	3,93
Jul	2,61	3,08	3,48	3,80	4,03	4,16	4,18
Ago	3,46	3,89	4,22	4,47	4,60	4,63	4,54
Set	4,75	5,05	5,25	5,33	5,29	5,13	4,86
Out	5,49	5,59	5,58	5,45	5,21	4,87	4,43
Nov	6,43	6,37	6,20	5,90	5,51	5,02	4,45
Dez	6,86	6,72	6,46	6,10	5,63	5,07	4,45
Iβ (kWh/m²)							
ANUAL	1728,67	1808,75	1851,79	1856,14	1821,52	1749,03	1641,11

A seguir, na tabela 19, os valores de I β referentes a Caracas são apresentados. Nesse caso, a soma anual apresentou maior valor com inclinação de 10°.

Tabela 19 – Irradiação que chega a uma superfície pousada em Caracas sob diferentes ângulos de inclinação.

IRRADIAÇÃO EM CARACAS - I β (kWh/m ² .dia)							
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Jan	5,29	5,75	6,07	6,25	6,28	6,17	5,91
Fev	5,62	5,92	6,10	6,13	6,03	5,79	5,43
Mar	6,12	6,23	6,20	6,03	5,73	5,31	4,78
Abr	5,79	5,68	5,45	5,12	4,68	4,16	3,57
Mai	5,44	5,20	4,86	4,44	3,95	3,41	2,84
Jun	5,47	5,16	4,77	4,29	3,76	3,19	2,61
Jul	5,69	5,39	5,00	4,53	3,98	3,39	2,78
Ago	5,84	5,67	5,39	5,00	4,52	3,96	3,35
Set	5,74	5,76	5,66	5,44	5,11	4,67	4,14
Out	5,31	5,53	5,63	5,60	5,46	5,19	4,81
Nov	4,91	5,28	5,53	5,65	5,65	5,52	5,26
Dez	4,88	5,33	5,67	5,87	5,93	5,86	5,65
I β (kWh/m ²)							
ANUAL	2015,66	2040,46	2022,55	1962,54	1862,50	1726,01	1558,40

Para a cidade do Rio de Janeiro, o ângulo de inclinação que possibilita receber maior irradiação anualmente é de 30°, como pode ser analisado na tabela 20.

Tabela 20 – Irradiação que chega a uma superfície pousada em Rio de Janeiro sob diferentes ângulos de inclinação.

IRRADIAÇÃO EM RIO DE JANEIRO - I β (kWh/m ² .dia)							
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Jan	5,23	5,10	5,10	4,88	4,58	4,21	3,78
Fev	5,25	5,21	5,21	5,08	4,84	4,52	4,12
Mar	4,50	4,62	4,62	4,64	4,57	4,40	4,13
Abr	3,83	4,14	4,14	4,35	4,46	4,47	4,37
Mai	3,09	3,52	3,52	3,85	4,09	4,23	4,26
Jun	3,00	3,52	3,52	3,95	4,28	4,50	4,61
Jul	3,06	3,53	3,53	3,92	4,21	4,40	4,47
Ago	3,79	4,18	4,18	4,48	4,66	4,73	4,68
Set	3,88	4,04	4,04	4,11	4,09	3,98	3,79
Out	4,57	4,57	4,57	4,49	4,31	4,06	3,73
Nov	5,00	4,89	4,89	4,70	4,43	4,08	3,68
Dez	5,10	4,95	4,95	4,72	4,42	4,05	3,63
I β (kWh/m ²)							
ANUAL	1533,11	1593,48	1593,48	1621,01	1614,74	1574,84	1502,62

A tabela 21 apresenta os valores de irradiação para a cidade de Quito, onde a soma anual de irradiação teve valor máximo com inclinação de 0°, ou seja, pousada na horizontal.

Tabela 21 – Irradiação que chega a uma superfície pousada em Quito sob diferentes ângulos de inclinação.

IRRADIAÇÃO EM QUITO - I_{β} (kWh/m ² .dia)							
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Jan	4,03	3,79	3,48	3,12	2,73	2,31	1,91
Fev	4,26	4,08	3,83	3,51	3,13	2,71	2,27
Mar	4,52	4,45	4,29	4,04	3,72	3,34	2,90
Abr	4,28	4,34	4,31	4,20	4,00	3,73	3,38
Mai	4,05	4,20	4,27	4,25	4,15	3,96	3,69
Jun	3,99	4,20	4,32	4,34	4,28	4,13	3,89
Jul	4,24	4,44	4,54	4,56	4,47	4,29	4,03
Ago	4,46	4,57	4,59	4,50	4,33	4,07	3,73
Set	4,24	4,21	4,11	3,92	3,65	3,32	2,94
Out	4,15	4,00	3,79	3,50	3,16	2,77	2,35
Nov	4,24	4,00	3,68	3,31	2,89	2,45	2,02
Dez	3,87	3,62	3,31	2,95	2,57	2,17	1,80
I_{β} (kWh/m ²)							
ANUAL	<u>1535,13</u>	1522,15	1479,94	1409,96	1314,71	1197,90	1065,18

Já para Lima, no Perú, o ângulo de inclinação de 10° foi o mais favorável para obter maior irradiação anual. Os valores obtidos para o local são expressos na tabela 22.

Tabela 22 – Irradiação que chega a uma superfície pousada em Lima sob diferentes ângulos de inclinação.

IRRADIAÇÃO EM LIMA - I_{β} (kWh/m ² .dia)							
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Jan	7,12	6,76	6,26	5,66	4,96	4,20	3,41
Fev	7,25	7,04	6,68	6,19	5,57	4,86	4,08
Mar	7,09	7,13	7,01	6,74	6,31	5,75	5,07
Abr	6,32	6,62	6,77	6,76	6,60	6,29	5,83
Mai	4,95	5,35	5,63	5,78	5,79	5,67	5,42
Jun	3,37	3,65	3,85	3,97	4,00	3,94	3,79
Jul	3,06	3,27	3,42	3,49	3,49	3,41	3,27
Ago	3,50	3,65	3,73	3,73	3,66	3,51	3,29
Set	4,31	4,37	4,34	4,22	4,02	3,74	3,39
Out	5,37	5,28	5,08	4,78	4,39	3,92	3,39
Nov	6,07	5,81	5,44	4,97	4,42	3,81	3,17
Dez	6,78	6,39	5,89	5,29	4,61	3,89	3,15
I_{β} (kWh/m ²)							
ANUAL	1986,48	<u>1990,35</u>	1953,27	1876,42	1762,40	1615,32	1440,97

Para finalizar, os valores de irradiação em diferentes inclinações, referentes a Montevideo, são apresentados na tabela 23.

Tabela 23 – Irradiação que chega a uma superfície pousada em Montevideo sob diferentes ângulos de inclinação.

IRRADIAÇÃO EM MONTEVIDEO - I_{β} (kWh/m ² .dia)							
	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°
Jan	6,83	6,76	6,57	6,26	5,83	5,31	4,71
Fev	5,86	5,93	5,88	5,72	5,44	5,06	4,59
Mar	4,78	5,03	5,17	5,20	5,11	4,91	4,60
Abr	3,52	3,90	4,20	4,40	4,50	4,50	4,39
Mai	2,65	3,12	3,52	3,84	4,06	4,18	4,20
Jun	2,12	2,57	2,97	3,29	3,54	3,69	3,75
Jul	2,37	2,85	3,25	3,58	3,82	3,96	4,01
Ago	3,16	3,58	3,92	4,16	4,31	4,35	4,29
Set	4,36	4,67	4,87	4,96	4,94	4,81	4,57
Out	5,33	5,44	5,45	5,34	5,13	4,81	4,41
Nov	6,31	6,28	6,12	5,86	5,49	5,03	4,48
Dez	6,88	6,77	6,53	6,19	5,74	5,20	4,59
I_{β} (kWh/m ²)							
ANUAL	1651,77	1734,56	1782,19	1792,80	1765,90	1702,31	1604,13

Para a cidade, a inclinação de 30° em relação à horizontal permitiu obter maior valor da soma anual de irradiação.

As variações das médias diárias da irradiação que incide mensalmente, com ângulos de inclinação mais favoráveis, podem ser comparadas entre as cidades no gráfico a seguir (figura 17).

É possível observar que Lima foi a cidade que apresentou maior variação entre os níveis de irradiação mensal. A cidade de Quito apresentou valores bastante similares entre os meses, no entanto tais valores são, em sua maioria, mais baixos quando comparado as demais cidades. Montevideo e Buenos Aires apresentaram valores semelhantes, devido a proximidade de uma cidade à outra. Para Rio de Janeiro a irradiação mostrou comportamento sem grandes variações entre os meses e pouco mais favorável se comparado a Quito nos meses de verão. Por fim, Caracas mostrou grande potencial de irradiação, além de não apresentar grandes variações mensais.

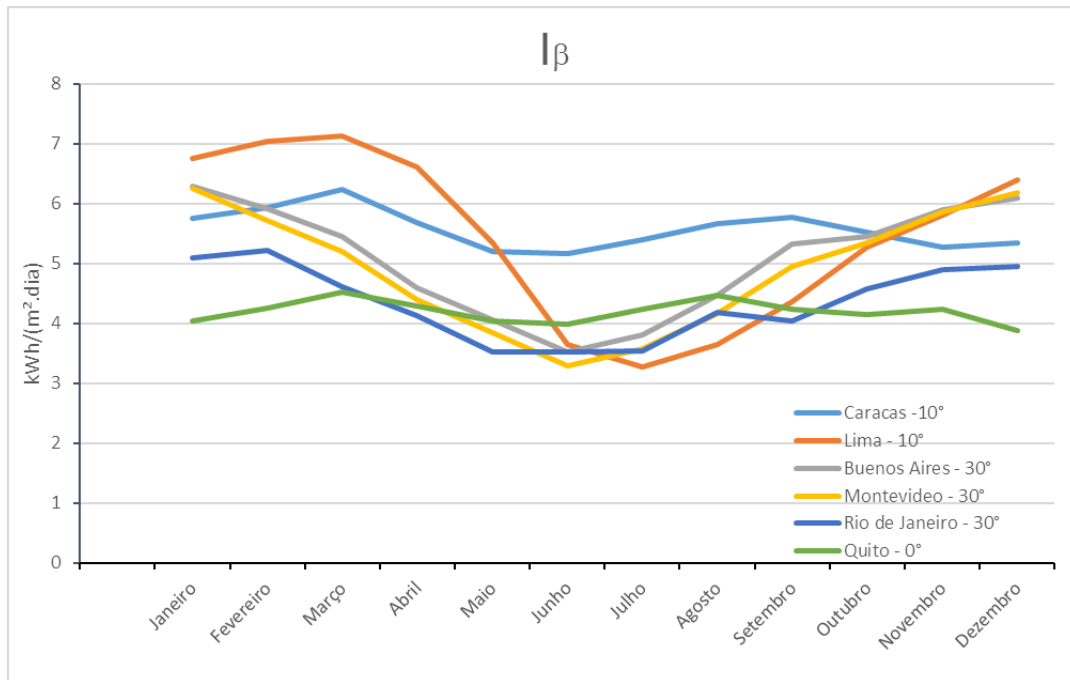


Figura 17 – Irradiação média diária mensal absorvida por coletores pousados nas diferentes cidades. Dados do anexo 6.1.

3.6 Cálculo das cargas térmicas

O cálculo do consumo médio diário de água quente por pessoa residente na habitação de instalação do sistema solar de aquecimento foi feito com base na tabela de consumo sugerida pela norma brasileira NBR 15569, considerando o número de vezes que cada pessoa utiliza água quente em cada equipamento da casa. A tabela 24 mostra os dados apresentados pela norma, os valores considerados para o número de vezes que cada pessoa usa o equipamento no dia, n_{uso} , e os resultados de consumo médio diário por pessoa para cada equipamento, bem como, o somatório dos mesmos.

Tabela 24 – Consumo médio diário de AQS por pessoa.

Equipamento	Consumo	t	Uso - número de vezes no dia	Consumo diário por pessoa
	L/min	min/uso	uso/(dia.pessoa)	L/(pessoa.dia)
ducha de banho	3	10	1	30
lavatório	3	2	2	12
ducha higienica	3	2	1	6
pia de cozinha	2,4	3	1	7,2
				TOTAL – MAQS = 55,2

O somatório dos consumos referentes a cada equipamento, ou seja o M_{AQS} , foi de 55,2 L/dia por pessoa.

Utilizando a equação 2.29 para $n_{hab}=4$ e $M_{AQS}=55,2$ L/dia, a tabela 25 mostra os resultados de carga térmica de cada mês em GJ e kWh.

Tabela 25 – Cargas térmicas mensais calculadas.

Mês	CT_m	
	GJ	kWh
Janeiro	0,86	239,11
Fevereiro	0,78	215,97
Março	0,86	239,11
Abril	0,83	231,40
Mai	0,86	239,11
Junho	0,83	231,40
Julho	0,86	239,11
Agosto	0,86	239,11
Setembro	0,83	231,40
Outubro	0,86	239,11
Novembro	0,83	231,40
Dezembro	0,86	239,11

3.7 Fração solar calculada

Os resultados obtidos para a fração solar da energia usada para gerar águas quentes sanitárias na residência de estudo, ou seja, a parcela das cargas térmicas mensais calculadas no tópico anterior que pode ser fornecida pelo coletor solar integrado ao sistema, serão apresentados no presente tópico. Notoriamente, a localização da residência interfere no resultado, portanto, os resultados obtidos para cada cidade estarão divididos nos próximos subtópicos. As considerações supracitadas para cálculo da fração solar são lembradas na tabela 26. Ademais, as folhas de cálculo de todas as frações solares calculadas estão presentes em anexo.

Tabela 26 – Valores considerados para cálculo da fração solar.

Fração solar	
T_Q	50°C
T_{rede}	20°C
$T_{mín}$	30°C
η	0,766
a_1	3,216 W/(m ² .K)
C_{res}	200 L
n_{hab}	4
$(\tau\alpha)_n$	0,836
Número de coletores	1
A_c	2,18 m ²

A seguir serão mostrados os valores de fração solar para o sistema de aquecimento especificado em 2.2.1.

3.7.1 Resultado da fração solar para Caracas

Para Caracas, obteve-se melhores resultados de irradiação para inclinação de 10° do coletor solar, portanto, o cálculo da fração solar foi feito considerando a irradiação obtida com tal inclinação, visto que se pode dispor o coletor da forma que melhor convier.

A tabela 27 e o gráfico da figura 18 apresentam os resultados para Caracas. Na tabela estão presentes os resultados de X com as correções feitas, Y e fração solar do sistema de aquecimento referente a cada mês, além disso, a última coluna mostra quantos kWh de energia a fração solar representou.

Tabela 27 – Fração solar calculada para Caracas.

1 PAINEL SOLAR (A=2,18 m ²)					
	X (corrigido)	Y	f	CT	
	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	1,16	1,13	0,81	0,69	192,72
Fevereiro	1,08	1,17	0,83	0,65	179,85
Março	1,05	1,23	0,87	0,75	207,71
Abril	1,04	1,11	0,81	0,67	186,34
Mai	0,97	1,01	0,75	0,64	179,12
Junho	1,01	1,00	0,74	0,62	171,38
Julho	1,02	1,05	0,77	0,66	183,62
Agosto	1,07	1,11	0,80	0,69	191,71
Setembro	1,05	1,13	0,82	0,68	188,97
Outubro	1,07	1,09	0,79	0,68	188,76
Novembro	1,09	1,03	0,76	0,63	175,11
Dezembro	1,15	1,04	0,76	0,65	181,15

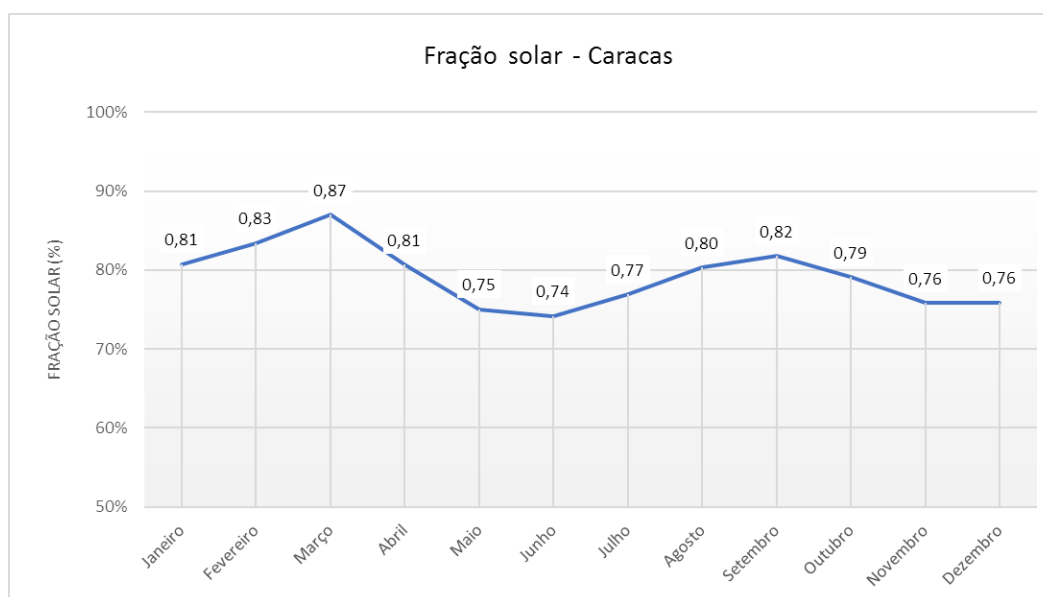


Figura 18 – Comparação entre os resultados mensais da fração solar para Caracas.

O gráfico torna mais visível a variação entre os meses dos valores da fração solar. Como esperado, pelo resultado da irradiação incidente na cidade, a fração solar mensal do sistema de aquecimento para uma residência pousada em Caracas foi satisfatório em todos os meses, visto que a menor percentagem, referente ao mês de junho, ainda representou 74% de toda a carga térmica.

3.7.2 Resultado da fração solar para Lima

Para Lima, as frações mensais solares referentes ao sistema com 1 painel solar são calculadas utilizando a inclinação mais favorável para a região, ou seja, 10°. Similar à tabela referente a Caracas, a tabela 28 expressa os resultados para Lima.

Tabela 28 – Fração solar calculada para Lima.

1 PAINEL SOLAR (A=2,18 m ²)					
	X (corrigido)	Y	f	CT	
	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	1,10	1,32	0,91	0,78	217,34
Fevereiro	1,07	1,39	0,95	0,73	203,73
Março	1,09	1,42	0,96	0,82	228,56
Abril	1,17	1,32	0,91	0,75	208,88
Mai	1,27	1,06	0,76	0,65	181,07
Junho	1,34	0,71	0,53	0,44	122,81
Julho	1,37	0,64	0,48	0,41	113,29
Agosto	1,39	0,71	0,53	0,45	126,32
Setembro	1,38	0,85	0,63	0,52	144,70
Outubro	1,33	1,03	0,74	0,64	176,87
Novembro	1,26	1,13	0,80	0,67	185,38
Dezembro	1,18	1,24	0,87	0,75	207,02

Pela figura 19 se pode notar que a variação foi alta, visto que há um decaimento grandioso nos meses de inverno e valores próximos a 100% nos meses de verão.

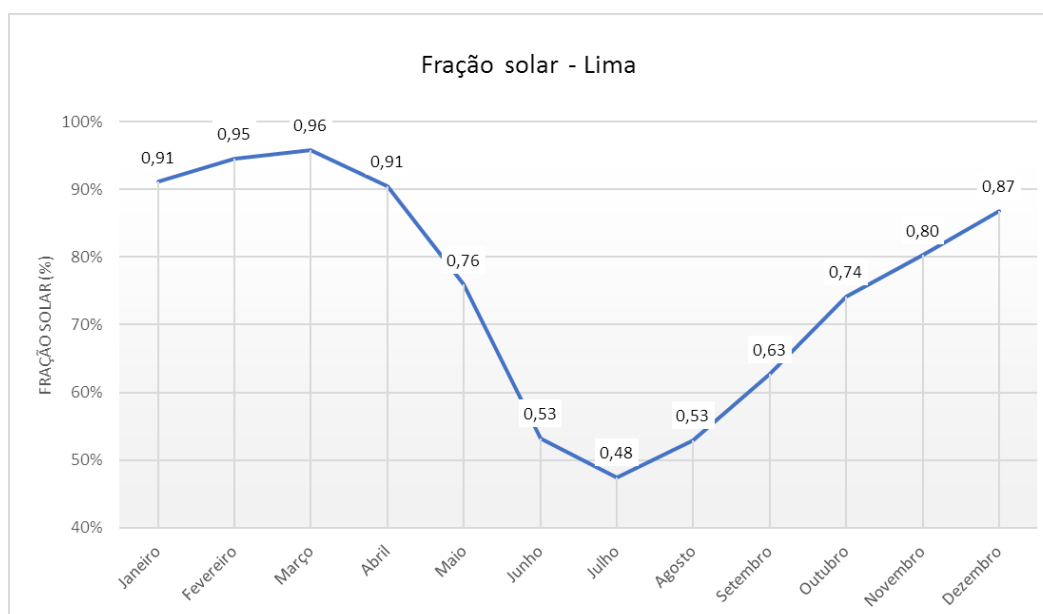


Figura 19 – Comparação entre os resultados mensais da fração solar para Lima.

3.7.3 Resultado da fração solar para Buenos Aires

Em Buenos Aires a inclinação mais favorável foi de 30°, portanto, a fração solar foi calculada utilizando a irradiação para tal inclinação. Os resultados mensais para a cidade são expressos na tabela 29 e no gráfico da figura 20.

Tabela 29 – Fração solar calculada para Buenos Aires.

1 PAINEL SOLAR (A=2,18 m ²)					
	X (corrigido)	Y	f	CT	
	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	0,97	1,19	0,85	0,73	203,42
Fevereiro	1,03	1,12	0,81	0,63	174,48
Março	1,11	1,04	0,76	0,65	181,67
Abril	1,30	0,89	0,65	0,54	150,81
Maio	1,46	0,78	0,58	0,49	137,38
Junho	1,60	0,68	0,49	0,41	113,80
Julho	1,63	0,73	0,53	0,46	126,46
Agosto	1,54	0,86	0,62	0,54	148,65
Setembro	1,47	1,03	0,73	0,61	168,30
Outubro	1,31	1,03	0,74	0,64	177,20
Novembro	1,18	1,11	0,79	0,66	183,13
Dezembro	1,05	1,14	0,82	0,70	195,02

Buenos Aires, também obteve um grande decaimento da fração solar no mês de junho, onde representou 49%.

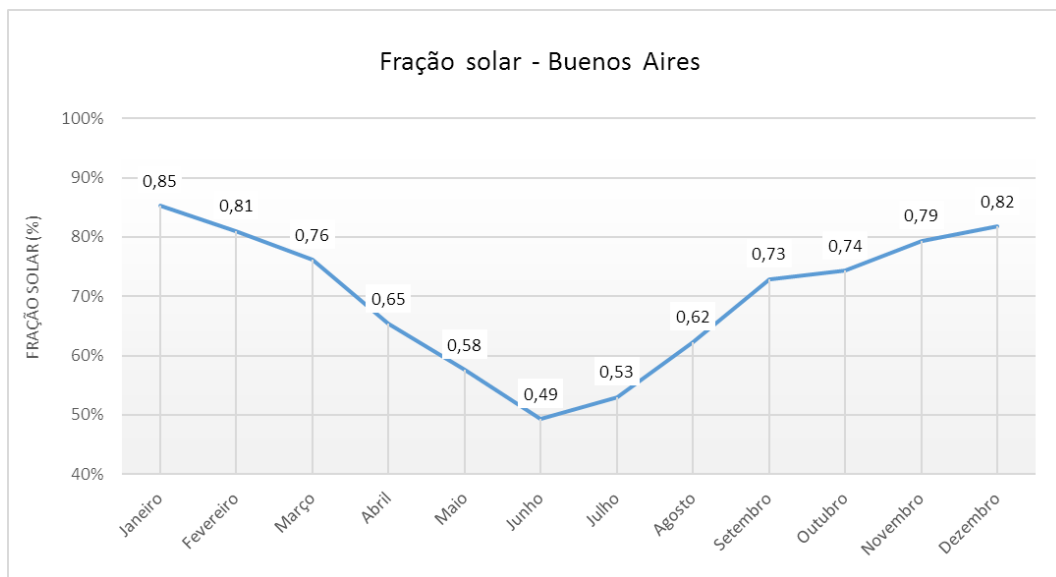


Figura 20 – Comparação entre os resultados mensais da fração solar para Buenos Aires.

3.7.4 Resultado da fração solar para Rio de Janeiro

Para o Rio de Janeiro, a fração solar foi calculada considerando o painel solar posicionado com 30° de inclinação. Os resultados são expressos na tabela 30 e no gráfico da figura 21.

Tabela 30 – Fração solar calculada para Rio de Janeiro.

1 PAINEL SOLAR (A=2,18 m ²)					
	X (corrigido)	Y	f	CT	
	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	1,16	0,91	0,68	0,58	161,88
Fevereiro	1,08	0,96	0,71	0,56	154,23
Março	1,05	0,89	0,67	0,58	160,85
Abril	1,04	0,85	0,64	0,54	149,04
Mai	0,97	0,76	0,59	0,50	139,98
Junho	1,01	0,78	0,60	0,50	138,48
Julho	1,02	0,77	0,59	0,51	141,73
Agosto	1,07	0,88	0,66	0,57	158,13
Setembro	1,05	0,79	0,61	0,50	140,18
Outubro	1,07	0,85	0,64	0,55	154,04
Novembro	1,09	0,88	0,66	0,55	152,93
Dezembro	1,15	0,88	0,66	0,56	156,76

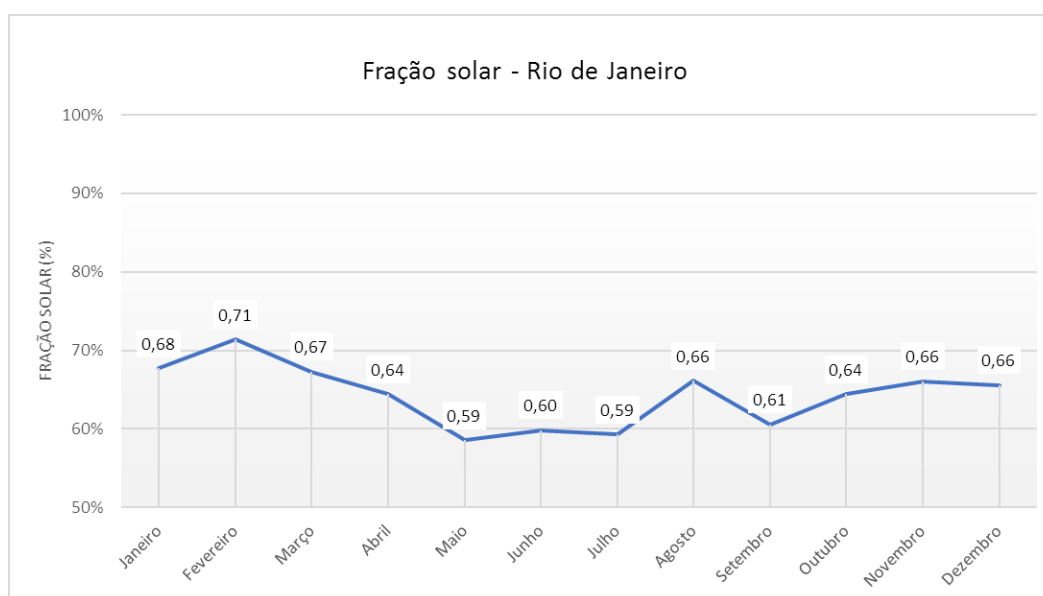


Figura 21 – Comparação entre os resultados mensais da fração solar para Rio de Janeiro.

As frações solares mensais não apresentaram grande variação, e representaram, em todos os meses, valores acima de 59% da carga térmica total.

3.7.5 Resultado da fração solar para Quito

Para Quito, os cálculos de fração solar foram feitos para irradiação incidente no painel disposto na horizontal. Os resultados detalhados estão na tabela 31 e a comparação mensal pode ser feita pelo gráfico da figura 22.

Tabela 31 – Fração solar calculada para Quito.

1 PAINEL SOLAR (A=2,18 m ²)					
	X (corrigido)	Y	f	CT	
	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	1,43	0,78	0,57	0,49	136,53
Fevereiro	1,43	0,83	0,61	0,47	130,61
Março	1,44	0,88	0,64	0,55	152,96
Abril	1,43	0,83	0,61	0,51	140,71
Maió	1,43	0,78	0,58	0,50	137,53
Junho	1,44	0,77	0,57	0,47	131,12
Julho	1,44	0,82	0,60	0,52	143,33
Agosto	1,41	0,87	0,64	0,55	151,48
Setembro	1,42	0,82	0,61	0,50	139,72
Outubro	1,43	0,80	0,59	0,51	141,04
Novembro	1,44	0,82	0,60	0,50	138,91
Dezembro	1,43	0,74	0,55	0,47	131,12

Para a cidade, os resultados de fração solar não tiveram variações significativas e ficaram entre 55% e 64%, que representam uma boa participação no suprimento das CT.

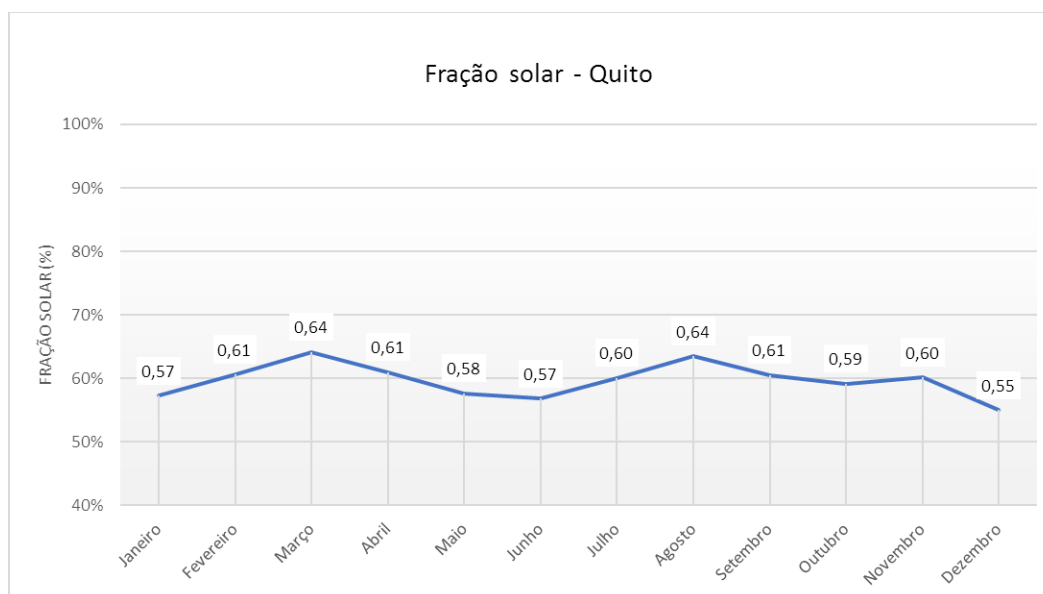


Figura 22 – Comparação entre os resultados mensais da fração solar para Quito.

3.7.6 Resultado da fração solar para Montevideo

Por fim, os resultados para Montevideo foram feitos considerando ângulo de inclinação de 30°, tais resultados são expostos a seguir na tabela 32 e no gráfico da figura 23.

Tabela 32 – Fração solar calculada para Montevideo.

1 PAINEL SOLAR (A=2,18 m ²)					
	X (corrigido)	Y	f	CT	
	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	1,06	1,21	0,86	0,73	203,96
Fevereiro	1,09	1,11	0,80	0,62	173,14
Março	1,18	1,03	0,75	0,64	178,12
Abril	1,34	0,88	0,64	0,54	148,79
Mai	1,25	0,77	0,58	0,50	137,64
Junho	1,63	0,66	0,48	0,40	109,99
Julho	1,65	0,72	0,52	0,44	123,18
Agosto	1,60	0,83	0,60	0,51	142,86
Setembro	1,53	0,98	0,70	0,58	161,58
Outubro	1,41	1,04	0,74	0,64	177,35
Novembro	1,27	1,13	0,80	0,67	185,08
Dezembro	1,15	1,19	0,84	0,72	200,41

Tal qual os valores de irradiação incidente, os resultados da fração solar para Montevideo foram bastante parecidos com Buenos Aires, apresentando decaimento significativo no mês de junho.

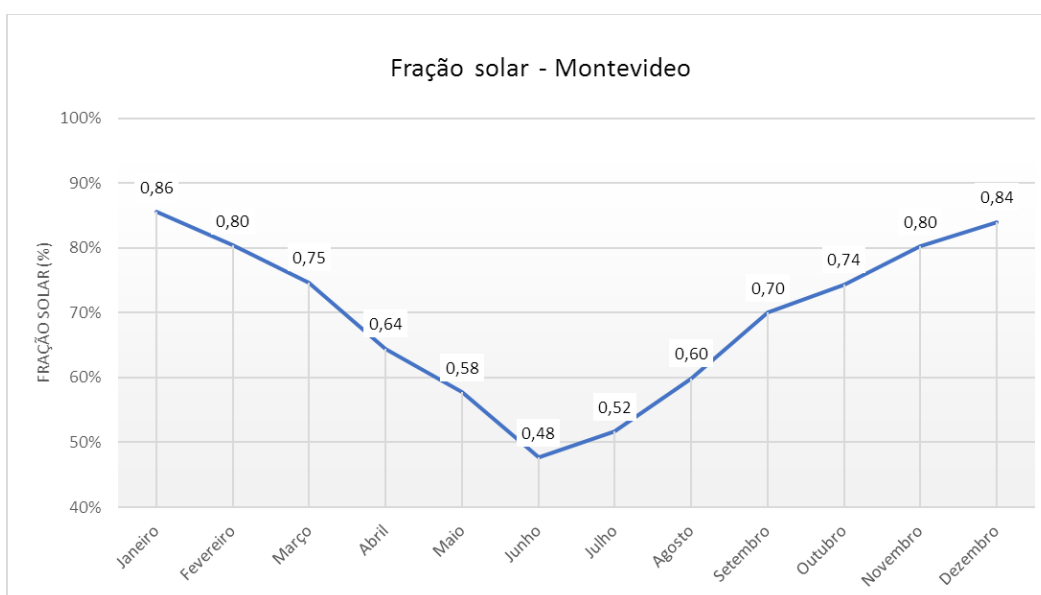


Figura 23 – Comparação entre os resultados mensais da fração solar para Montevideo.

3.8 Análise econômica

A fim de conhecer a viabilidade econômica de implantação do sistema estudado, é necessário saber qual será o tempo que o investimento leva para ficar pago, através do que se pretende poupar em gastos com a energia elétrica. Tal tempo será tratado como prazo de retorno do investimento (PRI).

De acordo com Maia (2013), o prazo de retorno é o período no qual um projeto leva para recuperar o capital inicialmente investido e goza de alguma popularidade por ser um conceito intuitivo de aplicação simples, no entanto, peca pelo facto de considerar os fluxos monetários constantes ao longo do tempo.

Ou seja, tais resultados servem para obter uma estimativa de tal tempo, mas trazem imprecisão devido ao fato de existirem prováveis variações dos preços de energia elétrica durante os anos.

Tendo em vista o quanto se economiza anualmente, é possível calcular o prazo de retorno do investimento aproximado pela seguinte expressão:

$$PRI = \frac{\text{preço do sistema}}{\text{economia anual}} \quad (2.39)$$

Para se obter os valores de PRI, serão apresentados nos próximos subtópicos os custos referentes ao sistema solar de aquecimento, os preços da energia elétrica e a economia anual em cada cidade de estudo.

3.8.1 Custo com o sistema

A empresa Vulcano disponibiliza no catálogo “Tabela de preços Solar Térmico” (2014) diferentes opções de conjuntos de equipamentos para o aquecimento solar e seus respectivos preços. As figuras 24 e 25 mostram parte do catálogo referente a composição dos e preços dos kits de sistemas solares e destaca o sistema escolhido para o presente estudo.

Composição dos Kits Sistemas Solares Circulação Forçada

DEPÓSITOS DE 1 SERPENTINA						
TIPO DE TELHADO	COLETOR SOLAR		DEPÓSITOS 1 SERPENTINA	KIT DE LIGAÇÃO	ESTRUTURA DE SUPORTE*	PURGADOR AUTOMÁTICO
	TIPO COLETOR	QUANTIDADE				
TELHADO PLANO	PremiumSun FKT-2S	1	S 200-ZB	FS 23-2	FKF 3-2	ELT 6
	WarmSun FKC-2S			FS 22-2	FKF 3-2	ELT 5
	Compactos FCC-2S			WFS 22	WMF 11	
TELHADO INCLINADO	PremiumSun FKT-2S	1	S 200-ZB	FS 24-2	FKA 5-2	ELT 6
	WarmSun FKC-2S			FS 20-2	FKA 5-2	ELT 5
	Compactos FCC-2S			WFS 20	WMT 1	

Figura 24 – Componentes do sistema escolhido e preço - parte 1. Fonte: Vulcano - Bosch Termotecnologia, S.A. (2014) – adaptada.

ACESSÓRIOS COMUNS	KIT SISTEMA SOLAR 1 SERPENTINA	CÓDIGO	PVP S/ IVA
• Grupo de circulação: AGS 5 • Controlador solar: B-SOL 100 • Vaso de Expansão de 25 litros: SAG 25 • Acessório de ligação ao vaso de expansão: AAS 1	TP / 1FKT-2S / 200	7 717 500 241	2 485,00 €
	TP / 1FKC-2S / 200	7 736 501 181	2 338,00 €
	TP / 1FCC-2S / 160	7 736 500 188	2 093,00 €
• Grupo de circulação: AGS 5 • Controlador solar: B-SOL 100 • Vaso de Expansão de 25 litros: SAG 25 • Acessório de ligação ao vaso de expansão: AAS 1	TI / 1FKT-2S / 200	7 717 500 257	2 440,00 €
	TI / 1FKC-2S / 200	7 736 501 185	2 210,00 €
	TI / 1FCC-2S / 160	7 736 500 197	1 990,00 €

Figura 25 – Componentes do sistema escolhido e preço - parte 2. Fonte: Vulcano - Bosch Termotecnologia, S.A. (2014) – adaptada.

Portanto, como exposto no catálogo o preço de venda ao público (PVP) do sistema sem o imposto de valor agregado (IVA) é de 2210 euros. Considerando que o preço do IVA em Portugal (sede da empresa Vulcano) em 2017 é de 23%, tem-se, na tabela 33, o valor aproximado do sistema.

Tabela 33 – Preço do sistema solar de aquecimento.

	Preço sem IVA (Euro)	Preço Final (Euro)
Kit TI/1FKC-2S/200	2210 €	2718,3 €

3.8.2 Preço da energia elétrica nas cidades de estudo

Os preços da energia elétrica, especificamente do kWh, atual nas diferentes cidades de estudo são apresentados a seguir (tabela 34), primeiramente, na moeda do país, que é especificada na segunda coluna e em seguida em euro (com a aplicação da cotação do euro referente a 27 de maio de 2017). As fontes informativas dos dados também estão presentes na tabela.

Tabela 34 – Preço da energia elétrica nas cidades de estudo.

CLASSE DE CONSUMO - RESIDENCIAL ATÉ 300 kWh - INCLUÍDO TRIBUTOS					
Cidade - País	Moeda do país	Preço do kWh	Cotação Euro (27/05/2017)	Preço do kWh (Euro)	Fonte
Rio de Janeiro BRA	Reais (BRL)	0,692	3,68	0,19	Light ⁴
Caracas VEN	Bolívar Venezuelano (BOB)	1,970	7,76	0,25	El Estimulo ⁵
Buenos Aires ARG	Peso Argentino (ARS)	0,931	18,06	0,05	EDESUR ⁶
Montevideo URU	Peso Uruguaio (UYU)	5,517	31,68	0,19	UTE ⁷
Quito ECU	Dólar Americano (USD)	0,101	1,12	0,09	Agencia de regulación y control de electricidad ⁸
Lima PER	Novo Sol (PEN)	0,533	3,67	0,15	Luz del Sur ⁹

No caso onde não se utiliza um sistema de aquecimento com fonte solar, a energia elétrica consumida com o aquecimento de águas quentes sanitárias é cobrada de acordo

⁴ Disponível em "<http://www.light.com.br/para-residencias/Sua-Conta/composicao-da-tarifa.aspx>".

⁵ Disponível em "<http://elestimulo.com/elinteres/estas-son-las-tarifas-electricas-vigentes-desde-diciembre-en-venezuela/>".

⁶ Disponível em "http://www.edesur.com.ar/cuadro_tarifario_marzo.pdf".

⁷ Disponível em "http://www.ute.com.uy/sispubnoticias/pubadjuntos/21637_Pliego%20Tarifario%20enero%202016.pdf".

⁸ Disponível em "<http://www.regulacionelectrica.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2017/01/Pliego-y-Cargos-Tarifarios-SPEE-2017.pdf>".

⁹ Disponível em "<https://www.luzdelsur.com.pe/media/pdf/tarifas/TARIFAS.pdf>".

a tabela 34, caso contrário esse dinheiro estaria sendo poupado. A partir disso é possível analisar em quanto tempo o dinheiro poupado será equivalente ao investido com o sistema solar. O tópico a seguir apresenta os cálculos de PRI.

3.8.3 Economia anual e resultados de PRI

O tópico 3.7 referente a fração solar mostrou quanta energia em kWh será gerada por meio da irradiação proveniente do Sol. Através desses valores e do preço do kWh apresentado no tópico acima é possível analisar o quanto essa energia representa em termos económicos. Sendo assim, nas tabelas 35, 36 e 37, tem-se os valores de energia gerada, em kWh, para as diferentes cidades, e quanto representam em euros.

Tabela 35 – Valores económicos da energia térmica gerada em Caracas e Buenos Aires.

Caracas		Buenos Aires	
kWh	Euros	kWh	Euros
193	48,9	207	10,6
180	45,7	177	9,1
208	52,7	185	9,5
186	47,3	154	7,9
179	45,5	140	7,2
171	43,5	116	6,0
184	46,6	129	6,6
192	48,7	151	7,8
189	48,0	171	8,8
189	47,9	180	9,3
175	44,5	186	9,6
181	46,0	198	10,2
Total anual	565,5 €	Total anual	102,8 €

Tabela 36 – Valores económicos da energia térmica gerada em Lima e Rio de Janeiro.

Lima		Rio de Janeiro	
kWh	Euros	kWh	Euro
218	31,7	165	31,0
204	29,7	157	29,5
229	33,3	164	30,8
209	30,4	152	28,5
181	26,4	142	26,8
123	17,9	141	26,5
113	16,5	144	27,1
126	18,4	161	30,3
145	21,1	143	26,8
177	25,8	157	29,5
186	27,0	156	29,3
207	30,2	159	30,0
Total anual	308,40 €	Total anual	346,20 €

Tabela 37 – Valores económicos da energia térmica gerada em Quito e Montevideo.

Quito		Montevideo	
kWh	Euro	kWh	Euro
136	12,3	204	38,2
130	11,8	173	32,4
153	13,8	178	33,4
141	12,7	149	27,9
138	12,4	138	25,8
131	11,8	110	20,6
143	12,9	123	23,1
152	13,6	143	26,8
140	12,6	162	30,3
141	12,7	178	33,2
139	12,5	185	34,7
131	11,8	201	37,6
Total anual	150,80 €	Total anual	363,90 €

Contudo, os resultados de PRI para as diferentes cidades são expostos na tabela 38.

Tabela 38 – Tempo de retorno de investimento para as diferentes cidades.

Custo com o Kit TI/1FKC-2S/200	2718,3 €	
Cidade	Economia anual	PRI
Caracas	565,6 €	5 anos
Buenos Aires	102,8 €	27 anos
Lima	308,4 €	9 anos
Rio de Janeiro	346,2 €	8 anos
Quito	150,8 €	19 anos
Montevideo	363,9 €	8 anos

O PRI para as cidades de Caracas, Lima, Rio de Janeiro e Montevideo tiveram resultados satisfatórios, visto que para todas as cidades o investimento pode ser pago em menos de 10 anos. Caracas obteve o menor PRI, pelos altos índices de irradiação e também pelo elevado custo da energia elétrica no país. Em Buenos Aires o custo da energia elétrica é baixo, e, somado ao peso da moeda do país, a economia anual mostrou-se pequena, o que ocasionou um prazo de retorno de investimento alto. Quito, similar a Buenos Aires, mostrou uma economia anual baixa, devido aos mesmos fatores somados aos valores de fração solar mais baixos que as demais cidades.

Considerando que o sistema tem um tempo de vida de aproximadamente 20 anos, para Buenos Aires e Quito, torna-se inviável economicamente a instalação desse sistema.

CONCLUSÕES

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho apresenta um estudo que permite, primeiramente, quantificar a energia solar recebida por um painel solar considerando as diferentes hipóteses de estar pousado em uma das seis cidades da América do Sul que foram utilizadas para estudo, sendo elas: Buenos Aires (Argentina), Caracas (Venezuela), Lima (Perú), Montevideo (Uruguai), Rio de Janeiro (Brasil) e Quito (Equador). Em seguida, a partir dos resultados desta primeira etapa, aplicou-se o método da fração solar a fim de analisar qual seria a contribuição da energia solar em cada cidade no suprimento de necessidades energéticas de aquecimento de águas sanitárias em uma residência habitada por 4 indivíduos.

Os cálculos para a irradiação recebida pelo coletor quando pousado nas diferentes cidades resultaram em valores variados. Buenos Aires apresentou um valor total anual de irradiação mais alto para a situação onde o coletor instalado possui inclinação de 30° em relação a horizontal, tal inclinação também mostrou ser a mais vantajosa para as cidades de Montevideo e Rio de Janeiro. Já para Lima e Caracas a inclinação que apresentou melhor resultado foi a de 10°. Para Quito, no Equador, com coletor pousado na horizontal (0°) foi possível obter maiores valores de irradiação. Ao comparar as irradiações mensais para cada cidade com sua respectiva inclinação mais favorável, pôde-se concluir que Caracas destaca-se por manter valores altos sem variações grandiosas entre os meses. Lima apresentou os valores mais altos, entre as demais cidades, para os cinco primeiros meses do ano, no entanto, para os meses de junho, julho e agosto os valores foram baixos. Os resultados para Buenos Aires e Montevideo foram muito próximos em todos os meses, apresentando decréscimo de janeiro até junho e em seguida, crescimento até dezembro. Para Quito, os resultados tiveram valores de irradiação baixos se comparado as demais cidades, devido aos baixos índices de claridade, além disso, foram praticamente constantes entre os meses, devido a proximidade à linha do equador. Rio de Janeiro apresentou pouca variação dos valores de irradiação entre os meses, sendo estes próximos aos valores de Quito.

Para aplicação do método da fração solar nas diferentes cidades, usou-se dados do mesmo sistema de aquecimento e para as mesmas necessidades térmicas, portanto, o que variou de uma cidade pra outra foram os valores de irradiação correspondentes às inclinações mais vantajosas para cada cidade e os coeficientes de absorção e transmissão. Sendo assim, as variações mensais para os resultados de fração solar tiveram comportamento semelhante às variações dos resultados de irradiação. A fração solar do sistema de aquecimento de águas sanitárias na residência apresentou, para todos os meses, valores acima de 74% para a cidade de Caracas. Para Buenos Aires e Montevideo os valores de fração solar variaram entre aproximadamente 50% e 85%. As frações solares calculadas para Rio de Janeiro estiveram entre 59% e 71%. Assim como os valores de irradiação, para Lima as frações solares apresentaram grande variação e estiveram entre 49% e 97%. Por fim, os resultados de fração solar para Quito estiveram entre 55% a 74%.

De modo geral, para todas as cidades, pode-se dizer que os resultados demonstram uma participação significativa da energia solar no suprimento de águas quentes sanitárias de residências. No entanto, pela estimativa econômica, para as cidades de Buenos Aires e Quito a instalação do sistema utilizado para estudo não é economicamente vantajosa, devido aos resultados demasiado altos de prazo de retorno do investimento, por fatores como o baixo valor da moeda nacional, se comparada ao euro, e o fato de o preço da energia elétrica não ser elevado nos países em questão. Todavia, tal tempo de retorno pode vir a ser menor, visto que as tarifas de energia elétrica estão sujeitas a aumentar com o passar dos anos.

Como sugestão, poderia ser estudada a instalação de sistemas solares de aquecimento de águas quentes fabricados por empresas da região e a aplicação do método da fração solar para outras localidades.

Ademais, sugere-se para trabalhos futuros um estudo que aborde a geração de energia elétrica através do uso de coletores solares concentradores. Visto que tais coletores atingem temperaturas mais elevadas que os coletores solares planos, são capazes de produzir vapor necessário para fazer trabalhar uma turbina, que, por sua vez, pode integrar um sistema de geração de energia elétrica.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 REFERÊNCIAS

- Almer, C., & Winkler, R. (2015). Analysing the Effectiveness of International Environmental Policies: The Case of the Kyoto Protocol. *Department of Economics - University of Bath* .
- Agencia de regulación y control de electricidad. (2017). *Pliego Tarifário para las empresas eléctricas*. Ecuador. Obtido de Agencia de Regulación y Control de Electricidad.
- Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. (2005). *Atlas de Energia Elétrica do Brasil - 2ª Edição*. Obtido de ANEEL: [www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-energia_solar\(3\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/03-energia_solar(3).pdf)
- Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT. (2008). *NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto - Projeto e Instalação*.
- Bakulin, P., Kononovitch, E., & Moroz, V. I. (1987). *Curso de Astronomia General*. Moscovo: Mir Editorial.
- Ballesteros, A. (s.d.). *Estas son las tarifas eléctricas en Venezuela*. Obtido em 27 de maio de 2017, de El Interes: <http://elestimulo.com/elinteres/estas-son-las-tarifas-electricas-vigentes-desde-diciembre-en-venezuela/>
- Borges, A., Silva, M., Alves, C., & Torres, E. (2016). Energias Renováveis: uma contextualização da biomassa como fonte de energia. *REDE – Revista Eletrônica do PRODEMA*, 23-36.
- Cabral, I. (2012). Energia Solar – Estudo comparativo entre Brasil e Alemanha. *Trabalho de Conclusão de Curso*. Paracambi, Rio de Janeiro.
- Cooper, P. (1969). The absorption of radiation in solar stills. *Solar Energy*, 12, pp. 333-346.
- Costa, D. J. (2013). Estudo comparativo de soluções tecnológicas para aquecimento solar térmico. *Dissertação de Mestrado - Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro* . Vila Real.

- Dubois, S., & Morosini, F. (maio/agosto de 2016). Mudanças climáticas: os desafios do controle do direito internacional ambiental e do protocolo de kyoto em particular. *13(26)*, 195-210.
- Duffie, J., & Beckman, W. (2013). *Solar Engineering of Thermal processes*. John Wiley & Sons.
- Edesur - Cuadro Tarifario. (s.d.). Obtido em 30 de maio de 2017, de Edesur: http://www.edesur.com.ar/cuadro_tarifario_marzo.pdf
- Empresa de distribución eléctrica Luz del Sur S.A.A. (2017). Precios para la venta de energía eléctrica. *Lima - Perú*.
- Espinasa, R., Teixeira, A., & Anaya, F. (2017). Dossier Energético: Argentina. Banco Interamericano de Desarrollo.
- Foster, R., Ghassemi, M., & Cota, A. (2009). *Solar Energy: Renewable Energy and the Environment*. Boca Raton: CRC Press Book.
- Goswami, D. Y. (2015). *Principles of Solar Engineering* (3ª ed.). Boca Raton: CRC Press.
- Hunn, B., & Calafell, D. (1977). Determination of average ground reflectivity for solar collectors. Em *Solar Energy* (Vol. 19, pp. 87-89). Pergamon Press.
- Incropera, F., Dewitt, D., Bergman, T., & Lavine, A. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6ª ed.). (J. W. Sons, Ed.)
- Iqbal, M. (1983). *An introduction to solar radiation*. Vancouver: Academic Press.
- Kalogirou, S. A. (2013). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press.
- Klein, S. A. (Maio de 1979). Calculation of the monthly-average transmittance-absorptance product. *Solar Energy*, Vol. 23, pp. 547-551.
- Light. (s.d.). *Portal Light | Para Residencias > Sua Conta > Composição da Tarifa*. Obtido em 27 de maio de 2017, de <http://www.light.com.br/para-residencias/Sua-Conta/composicao-da-tarifa.aspx>

- Maia, H. M. (2013). Estudo de aplicação de coletores solares na produção de eletricidade e calor para uso doméstico. Dissertação de Mestrado - Instituto Superior de Engenharia do Porto. Porto, Portugal.
- Moreira, H. M., & Giometti, A. L. (2008). Protocolo de Quioto e as possibilidades de inserção do Brasil no Mecanismo de Desenvolvimento Limpo por meio de projetos em energia limpa. Obtido de <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0102-85292008000100001&lng=en&nrm=iso>
- NASA. (s.d.). *NASA Surface meteorology and Solar Energy - Location*. Obtido em 26 de Março de 2017, de Atmospheric Science Data Center: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=>
- Pereira, A. (2002). Do fundo ao mecanismo: gênese, características e perspectivas para mecanismo de desenvolvimento limpo: ao encontro ou de encontro à equidade. *tese de pós-graduação - Universidade Federal do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., & Zelenka, A. (1990). Making full use of the clearness index for parameterizing hourly insolation conditions. Em *Solar Energy* (pp. 111-114). New York: Pergamon Press.
- Posso, F. (2004). Estudio del desarrollo de las energías alternativas en Venezuela. *Anales de la Universidad Metropolitana*, pp. 147-164.
- Regulamento das características do Comportamento Térmico de Edifícios - RCCTE. (s.d.). *Decreto-Lei n.º 80/2006*.
- Silva, A. M., & Vieira, R. (2016). Wind energy: concepts and basic characteristics for a possible supplement of the brazilian energy matrix. *6*(2).
- Silva, D. H. (2009). Protocolos de Montreal e Kyoto: pontos em comum. *52*(2).

Solar Keymark. (fevereiro de 2017). A Solar Keymark / O Rótulo de Qualidade para os Produtos Solares Térmicos na Europa. Bruxelas. Obtido em 5 de maio de 2017, http://www.estif.org/solarkeymarknew/images/downloads/brochures/New_brochures_2017/solar_keymark_a5_pt.pdf

Tyagi, V., Panwar, N., N.A., R., & Kothari, R. (2012). Review on solar air heating system with and without thermal energy storage system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews - Elsevier*.

Usinas y Trasmisiones Eléctricas (UTE). (s.d.). *Pliego tarifario*. Acesso em 30 de maio de 2017, disponível em Portal UTE: http://www.ute.com.uy/sispubnoticias/pubadjuntos/21637_Pliego%20Tarifario%20enero%202016.pdf

Vulcano. (outubro de 2014). *Tabela de preços solar térmico / Vulcano - Soluções de água quente*. Obtido de Solar Condicionado: <http://www.solarcondicionado.pt/files/price-tables/Tabela-Preços-Painéis-Solares-VULCANO-2014.pdf>

WMO Programmes. (s.d.). Obtido em 31 de Maio de 2017, de World Weather Information Service: <http://worldweather.wmo.int/en/home.html>

Woolfson, M. M. (2000). *The Origin and Evolution of the Solar System*. CRC Press.

World Energy Council. (2016). *World Energy Resources 2016*. United Kingdom. Obtido em 23 de março de 2017, de www.worldenergy.org

ANEXOS

- 6.1 VALORES CALCULADOS PARA OBTENÇÃO DOS RESULTADOS DE IRRADIAÇÃO
- 6.2 VALORES CALCULADO PARA OBTENÇÃO DOS RESULTADOS DE FRAÇÃO SOLAR

6 ANEXOS

6.1 Valores calculados para obtenção dos resultados de irradiação

Tabela 1 – Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Buenos Aires – parte 1.

médias mensais - Buenos Aires							
Mês	Hss	S_D	Declinação (δ)	Índice de claridade (K_T)	G	Rdif/G	Hmin
	Grau	$J/(m^2 \cdot dia)$	Rad	-	$J/(m^2 \cdot dia)$	$J/(m^2 \cdot dia)$	
Janeiro	104,12	4,31E+07	-0,36	0,58	2,50E+07	0,408	1,588
Fevereiro	98,74	3,94E+07	-0,23	0,56	2,20E+07	0,406	1,582
Março	91,54	3,32E+07	-0,04	0,55	1,83E+07	0,391	1,573
Abril	83,84	2,59E+07	0,17	0,52	1,35E+07	0,387	1,563
Mai	77,39	2,00E+07	0,33	0,52	1,04E+07	0,366	1,555
Junho	74,18	1,72E+07	0,40	0,49	8,42E+06	0,374	1,551
Julho	75,69	1,84E+07	0,37	0,51	9,38E+06	0,367	1,553
Agosto	81,50	2,35E+07	0,23	0,53	1,25E+07	0,373	1,560
Setembro	88,97	3,05E+07	0,03	0,56	1,71E+07	0,377	1,570
Outubro	96,64	3,73E+07	-0,18	0,53	1,98E+07	0,421	1,579
Novembro	102,95	4,21E+07	-0,34	0,55	2,32E+07	0,426	1,587
Dezembro	105,86	4,41E+07	-0,40	0,56	2,47E+07	0,427	1,590

Tabela 2– Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Buenos Aires – parte 2.

médias mensais - Buenos Aires									
Mês	DIRECTA		DIFUSA		ALBEDO		r	I _β	
	(1-Rdif/G)*rdir		Rdif/G _H *(1+cosβ ₁)/2		ρ*(1-cosβ ₁)/2				
	-	J/(m ² dia)	-	J/(m ² dia)	-	J/(m ² dia)		-	J/(m ² dia)
Janeiro	0,51	12758263,96	0,38	9527319,86	0,01340	334963,00	0,90	2,26E+07	6,28
Fevereiro	0,57	12635354,93	0,38	8359253,45	0,01340	295411,90	0,97	2,13E+07	5,91
Março	0,69	12700055,97	0,37	6677427,63	0,01340	244979,67	1,07	1,96E+07	5,45
Abril	0,85	11509845,56	0,36	4872647,77	0,01340	180767,07	1,23	1,66E+07	4,60
Mai	1,05	10932648,84	0,34	3549688,63	0,01340	139128,64	1,41	1,46E+07	4,06
Junho	1,14	9611651,12	0,35	2943096,99	0,01340	112861,30	1,50	1,27E+07	3,52
Julho	1,10	10359596,84	0,34	3211972,66	0,01340	125670,45	1,46	1,37E+07	3,80
Agosto	0,93	11570568,49	0,35	4337445,11	0,01340	166881,08	1,29	1,61E+07	4,47
Setembro	0,76	12950411,68	0,35	6013960,11	0,01340	228891,38	1,12	1,92E+07	5,33
Outubro	0,59	11584637,98	0,39	7767929,18	0,01340	264985,84	0,99	1,96E+07	5,45
Novembro	0,51	11740133,07	0,40	9204531,92	0,01340	310265,03	0,92	2,13E+07	5,90
Dezembro	0,48	11775342,64	0,40	9843267,36	0,01340	330634,27	0,89	2,19E+07	6,10

Tabela 3 – Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Caracas – parte 1.

médias mensais - Caracas							
Mês	Hss	S_D	Declinação (δ)	Índice de claridade (K_T)	G	Rdif/G	Hmin
	Grau	$J/(m^2 \cdot dia)$	Rad	-	$J/(m^2 \cdot dia)$	$J/(m^2 \cdot dia)$	
Janeiro	85,96	3,18E+07	-0,36	0,60	1,91E+07	0,345	1,568
Fevereiro	87,48	3,43E+07	-0,23	0,59	2,02E+07	0,355	1,569
Março	89,56	3,67E+07	-0,04	0,60	2,20E+07	0,355	1,570
Abril	91,78	3,79E+07	0,17	0,55	2,08E+07	0,392	1,572
Mai	93,62	3,76E+07	0,33	0,52	1,96E+07	0,418	1,574
Junho	94,52	3,71E+07	0,40	0,53	1,97E+07	0,414	1,574
Julho	94,10	3,72E+07	0,37	0,55	2,05E+07	0,399	1,574
Agosto	92,45	3,75E+07	0,23	0,56	2,10E+07	0,388	1,573
Setembro	90,30	3,69E+07	0,03	0,56	2,07E+07	0,381	1,571
Outubro	88,08	3,48E+07	-0,18	0,55	1,91E+07	0,381	1,569
Novembro	86,29	3,21E+07	-0,34	0,55	1,77E+07	0,375	1,568
Dezembro	85,47	3,08E+07	-0,40	0,57	1,76E+07	0,361	1,567

Tabela 4– Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Caracas – parte 2.

médias mensais - Caracas									
Mês	DIRECTA		DIFUSA		ALBEDO		r	I _β	
	(1-Rdif/G)*rdir		Rdif/G _H *(1+cosβ ₁)/2		ρ*(1-cosβ ₁)/2				
	-	J/(m ² dia)	-	J/(m ² dia)	-	J/(m ² dia)		-	J/(m ² dia)
Janeiro	0,74	14127341,26	0,34	6528991,83	0,00152	28955,30	1,09	2,07E+07	5,75
Fevereiro	0,70	14170542,37	0,35	7123649,51	0,00152	30717,64	1,05	2,13E+07	5,92
Março	0,66	14627222,15	0,35	7769739,50	0,00152	33494,62	1,02	2,24E+07	6,23
Abril	0,59	12306902,77	0,39	8109734,19	0,00152	31660,27	0,98	2,04E+07	5,68
Mai	0,54	10556916,06	0,42	8126171,38	0,00152	29725,63	0,96	1,87E+07	5,20
Junho	0,53	10457883,33	0,41	8088227,91	0,00152	29889,69	0,94	1,86E+07	5,16
Julho	0,55	11277519,05	0,40	8108435,62	0,00152	31097,76	0,95	1,94E+07	5,39
Agosto	0,58	12299301,47	0,38	8087839,64	0,00152	31942,38	0,97	2,04E+07	5,67
Setembro	0,62	12899770,20	0,38	7815460,75	0,00152	31384,84	1,00	2,07E+07	5,76
Outubro	0,66	12653610,28	0,38	7225719,96	0,00152	29038,30	1,04	1,99E+07	5,53
Novembro	0,70	12386894,45	0,37	6587245,28	0,00152	26856,90	1,07	1,90E+07	5,28
Dezembro	0,73	12883859,71	0,36	6293608,12	0,00152	26698,39	1,09	1,92E+07	5,33

Tabela 5– Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Lima – parte 1.

médias mensais - Lima							
Mês	Hss	S_D	Declinação (δ)	Índice de claridade (K_T)	G	Rdif/G	Hmin
	Grau	$J/(m^2 \cdot dia)$	Rad	-	$J/(m^2 \cdot dia)$	$J/(m^2 \cdot dia)$	
Janeiro	94,66	4,01E+07	-0,36	0,64	2,56E+07	0,347	1,584
Fevereiro	92,90	3,95E+07	-0,23	0,66	2,61E+07	0,333	1,579
Março	90,51	3,75E+07	-0,04	0,68	2,55E+07	0,318	1,572
Abril	87,95	3,39E+07	0,17	0,67	2,27E+07	0,316	1,565
Mai	85,83	3,02E+07	0,33	0,59	1,78E+07	0,350	1,559
Junho	84,79	2,82E+07	0,40	0,43	1,21E+07	0,455	1,556
Julho	85,28	2,90E+07	0,37	0,38	1,10E+07	0,497	1,557
Agosto	87,18	3,23E+07	0,23	0,39	1,26E+07	0,497	1,563
Setembro	89,66	3,61E+07	0,03	0,43	1,55E+07	0,474	1,570
Outubro	92,21	3,87E+07	-0,18	0,50	1,93E+07	0,428	1,577
Novembro	94,28	3,98E+07	-0,34	0,55	2,19E+07	0,400	1,583
Dezembro	95,23	4,00E+07	-0,40	0,61	2,44E+07	0,365	1,586

Tabela 6– Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Lima – parte 2.

médias mensais - Lima									
Mês	DIRECTA		DIFUSA		ALBEDO		r	I _β	
	(1-Rdif/G)*rdir		Rdif/G _H *(1+cosβ ₁)/2		ρ*(1-cosβ ₁)/2				
	-	J/(m ² dia)	-	J/(m ² dia)	-	J/(m ² dia)		-	J/(m ² dia)
Janeiro	0,60	15452584,39	0,34	8829710,89	0,00152	38953,66	0,95	2,43E+07	6,76
Fevereiro	0,64	16678099,87	0,33	8610074,02	0,00152	39624,80	0,97	2,53E+07	7,04
Março	0,69	17580853,60	0,32	8046736,35	0,00152	38761,31	1,01	2,57E+07	7,13
Abril	0,73	16663133,21	0,31	7129262,96	0,00152	34546,77	1,05	2,38E+07	6,62
Mai	0,73	13037864,58	0,35	6197026,89	0,00152	27076,58	1,08	1,93E+07	5,35
Junho	0,63	7636878,86	0,45	5479832,13	0,00152	18436,34	1,08	1,31E+07	3,65
Julho	0,57	6327745,53	0,49	5443860,39	0,00152	16758,07	1,07	1,18E+07	3,27
Agosto	0,55	6917143,20	0,49	6215217,44	0,00152	19149,59	1,04	1,32E+07	3,65
Setembro	0,54	8405681,85	0,47	7289497,78	0,00152	23559,34	1,01	1,57E+07	4,37
Outubro	0,56	10754601,64	0,43	8223740,04	0,00152	29385,58	0,98	1,90E+07	5,28
Novembro	0,56	12213157,37	0,40	8675271,76	0,00152	33224,64	0,96	2,09E+07	5,81
Dezembro	0,58	14141224,85	0,36	8840406,67	0,00152	37087,57	0,94	2,30E+07	6,39

Tabela 7– Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Montevideo – parte 1.

médias mensais - Montevideo							
Mês	Hss	S_D	Declinação (δ)	Índice de claridade (K_T)	G	Rdif/G	Hmin
	Grau	$J/(m^2 \cdot dia)$	Rad	-	$J/(m^2 \cdot dia)$	$J/(m^2 \cdot dia)$	
Janeiro	105,42	4,32E+07	-0,36	0,57	2,46E+07	0,419	1,603
Fevereiro	99,54	3,91E+07	-0,23	0,54	2,11E+07	0,423	1,591
Março	91,68	3,25E+07	-0,04	0,53	1,72E+07	0,405	1,574
Abril	83,27	2,48E+07	0,17	0,51	1,27E+07	0,392	1,556
Mai	76,23	1,87E+07	0,33	0,51	9,53E+06	0,369	1,542
Junho	72,71	1,59E+07	0,40	0,48	7,62E+06	0,376	1,534
Julho	74,37	1,71E+07	0,37	0,50	8,55E+06	0,369	1,538
Agosto	80,72	2,23E+07	0,23	0,51	1,14E+07	0,383	1,551
Setembro	88,88	2,96E+07	0,03	0,53	1,57E+07	0,396	1,568
Outubro	97,25	3,69E+07	-0,18	0,52	1,92E+07	0,430	1,586
Novembro	104,14	4,21E+07	-0,34	0,54	2,27E+07	0,437	1,601
Dezembro	107,33	4,43E+07	-0,40	0,56	2,48E+07	0,432	1,607

Tabela 8 – Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Montevideo – parte 2.

médias mensais - Montevideo									
Mês	DIRECTA		DIFUSA		ALBEDO		r	I _β	
	(1-Rdif/G)*rdir		Rdif/G _H *(1+cosβ ₁)/2		ρ*(1-cosβ ₁)/2				
	-	J/(m ² .dia)	-	J/(m ² .dia)	-	J/(m ² .dia)		-	J/(m ² .dia)
Janeiro	0,51	12571816,79	0,39	9621310,86	0,01340	329655,42	0,92	2,25E+07	6,26
Fevereiro	0,57	11991640,55	0,39	8321449,29	0,01340	282633,94	0,98	2,06E+07	5,72
Março	0,69	11960847,38	0,38	6512489,49	0,01340	230737,29	1,09	1,87E+07	5,20
Abril	0,87	11050695,83	0,37	4632073,86	0,01340	169743,37	1,25	1,59E+07	4,40
Mai	1,09	10404158,87	0,34	3280189,89	0,01340	127726,28	1,45	1,38E+07	3,84
Junho	1,19	9086567,77	0,35	2670477,19	0,01340	102062,89	1,56	1,19E+07	3,29
Julho	1,15	9827502,24	0,34	2941189,32	0,01340	114512,32	1,51	1,29E+07	3,58
Agosto	0,94	10757042,22	0,36	4075344,89	0,01340	152597,61	1,32	1,50E+07	4,16
Setembro	0,75	11828751,62	0,37	5809798,00	0,01340	210412,87	1,14	1,78E+07	4,96
Outubro	0,59	11283221,11	0,40	7696353,90	0,01340	256918,59	1,00	1,92E+07	5,34
Novembro	0,51	11522425,17	0,41	9266546,51	0,01340	304480,64	0,93	2,11E+07	5,86
Dezembro	0,48	11964326,22	0,40	9985589,23	0,01340	332003,73	0,90	2,23E+07	6,19

Tabela 9– Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Rio de Janeiro – parte 1.

médias mensais - Rio de Janeiro							
Mês	Hss	S_D	Declinação (δ)	Índice de claridade (K_T)	G	Rdif/G	Hmin
	Grau	$J/(m^2 \cdot dia)$	Rad	-	$J/(m^2 \cdot dia)$	$J/(m^2 \cdot dia)$	
Janeiro	106,14	4,32E+07	-0,36	0,44	1,90E+07	0,527	1,612
Fevereiro	99,98	3,89E+07	-0,23	0,48	1,87E+07	0,470	1,596
Março	91,75	3,21E+07	-0,04	0,48	1,54E+07	0,442	1,575
Abril	82,97	2,42E+07	0,17	0,51	1,24E+07	0,391	1,553
Mai	75,59	1,80E+07	0,33	0,52	9,37E+06	0,361	1,534
Junho	71,90	1,52E+07	0,40	0,57	8,65E+06	0,321	1,525
Julho	73,64	1,64E+07	0,37	0,55	9,03E+06	0,337	1,530
Agosto	80,30	2,17E+07	0,23	0,55	1,19E+07	0,357	1,546
Setembro	88,83	2,92E+07	0,03	0,45	1,31E+07	0,455	1,568
Outubro	97,58	3,66E+07	-0,18	0,44	1,61E+07	0,495	1,590
Novembro	104,80	4,21E+07	-0,34	0,43	1,81E+07	0,532	1,608
Dezembro	108,15	4,43E+07	-0,40	0,42	1,86E+07	0,554	1,616

Tabela 10 – Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Rio de Janeiro – parte 2.

médias mensais - Rio de Janeiro									
Mês	DIRECTA		DIFUSA		ALBEDO		r	I _β	
	(1-Rdif/G)*rdir		Rdif/G _H *(1+cosβ ₁)/2		ρ*(1-cosβ ₁)/2				
	-	J/(m ² dia)	-	J/(m ² dia)	-	J/(m ² dia)		-	J/(m ² dia)
Janeiro	0,42	7975171,22	0,49	9349934,97	0,01340	254534,68	0,93	1,76E+07	4,88
Fevereiro	0,53	9835381,07	0,44	8191922,02	0,01340	250048,49	0,98	1,83E+07	5,08
Março	0,66	10160704,40	0,41	6348463,21	0,01340	206305,98	1,09	1,67E+07	4,64
Abril	0,89	10983367,76	0,36	4509822,82	0,01340	165688,36	1,27	1,57E+07	4,35
Mai	1,13	10588460,88	0,34	3151868,79	0,01340	125517,59	1,48	1,39E+07	3,85
Junho	1,33	11513366,43	0,30	2592876,53	0,01340	115890,58	1,64	1,42E+07	3,95
Julho	1,24	11163482,99	0,31	2838870,82	0,01340	120915,30	1,56	1,41E+07	3,92
Agosto	1,00	11970795,92	0,33	3980575,85	0,01340	159964,24	1,35	1,61E+07	4,48
Setembro	0,69	9050261,36	0,42	5564812,39	0,01340	175773,25	1,13	1,48E+07	4,11
Outubro	0,53	8488901,88	0,46	7447467,31	0,01340	215902,69	1,00	1,62E+07	4,49
Novembro	0,43	7704726,80	0,50	8969291,03	0,01340	242272,90	0,94	1,69E+07	4,70
Dezembro	0,38	7127540,26	0,52	9622467,83	0,01340	249426,03	0,91	1,70E+07	4,72

Tabela 11– Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Quito – parte 1.

médias mensais - Quito							
Mês	Hss	S_D	Declinação (δ)	Índice de claridade (K_T)	G	Rdif/G	Hmin
	Grau	$J/(m^2 \cdot dia)$	Rad	-	$J/(m^2 \cdot dia)$	$J/(m^2 \cdot dia)$	
Janeiro	90,07	3,63E+07	-0,36	0,40	1,45E+07	0,500	1,572
Fevereiro	90,04	3,74E+07	-0,23	0,41	1,53E+07	0,492	1,572
Março	90,01	3,78E+07	-0,04	0,43	1,63E+07	0,475	1,571
Abril	89,97	3,67E+07	0,17	0,42	1,54E+07	0,483	1,570
Mai	89,94	3,47E+07	0,33	0,42	1,46E+07	0,483	1,570
Junho	89,92	3,34E+07	0,40	0,43	1,44E+07	0,475	1,569
Julho	89,93	3,39E+07	0,37	0,45	1,53E+07	0,459	1,570
Agosto	89,96	3,57E+07	0,23	0,45	1,61E+07	0,459	1,570
Setembro	89,99	3,72E+07	0,03	0,41	1,53E+07	0,491	1,571
Outubro	90,03	3,73E+07	-0,18	0,40	1,49E+07	0,500	1,571
Novembro	90,06	3,64E+07	-0,34	0,42	1,53E+07	0,483	1,572
Dezembro	90,08	3,57E+07	-0,40	0,39	1,39E+07	0,509	1,572

Tabela 12– Dados calculados para obtenção dos valores mensais de irradiação para Quito – parte 2.

médias mensais - Quito									
Mês	DIRECTA		DIFUSA		ALBEDO		r	I _β	
	(1-Rdif/G)*rdir		Rdif/G _H *(1+cosβ ₁)/2		ρ*(1-cosβ ₁)/2				
	-	J/(m ² . dia)	-	J/(m ² . dia)	-	J/(m ² . dia)		-	J/(m ² . dia)
Janeiro	0,50	7254638,88	0,50	7261498,45	0,00000	0,00	1,00	1,45E+07	4,03
Fevereiro	0,51	7801292,88	0,49	7546005,82	0,00000	0,00	1,00	1,53E+07	4,26
Março	0,53	8541190,72	0,47	7727676,38	0,00000	0,00	1,00	1,63E+07	4,52
Abril	0,52	7968337,70	0,48	7446206,81	0,00000	0,00	1,00	1,54E+07	4,28
Mai	0,52	7535486,20	0,48	7038275,18	0,00000	0,00	1,00	1,46E+07	4,05
Junho	0,53	7551283,04	0,47	6823195,60	0,00000	0,00	1,00	1,44E+07	3,99
Julho	0,54	8255752,51	0,46	6994601,82	0,00000	0,00	1,00	1,53E+07	4,24
Agosto	0,54	8699209,02	0,46	7373382,43	0,00000	0,00	1,00	1,61E+07	4,46
Setembro	0,51	7757792,82	0,49	7498209,31	0,00000	0,00	1,00	1,53E+07	4,24
Outubro	0,50	7459780,47	0,50	7462452,37	0,00000	0,00	1,00	1,49E+07	4,15
Novembro	0,52	7889286,96	0,48	7383118,20	0,00000	0,00	1,00	1,53E+07	4,24
Dezembro	0,49	6846963,64	0,51	7093186,68	0,00000	0,00	1,00	1,39E+07	3,87

6.2 Valores calculado para obtenção dos resultados de fração solar

Tabela 13 – Dados calculados para obtenção das frações solares em Buenos Aires.

	$I\beta$	T_a	Δt	N	CT		$(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$	$(\tau\alpha)_n$	X	X_{c-arm}	X_{c-aqs}	Y	f	parcela suprida da CT	
	J/(m ² .dia)	°C	s	dia	J	GJ	-	-	-	-	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	2,3E+07	25	2678400	31	8,6E+08	0,86	0,905	0,836	1,638	1,558	0,971	1,191	0,853	0,732	203,42
Fevereiro	2,1E+07	24	2419200	28	7,8E+08	0,78	0,904	0,836	1,663	1,582	1,026	1,119	0,810	0,628	174,48
Março	2,0E+07	22	2678400	31	8,6E+08	0,86	0,915	0,836	1,701	1,617	1,108	1,044	0,762	0,654	181,67
Abril	1,7E+07	18	2592000	30	8,3E+08	0,83	0,920	0,836	1,786	1,698	1,296	0,887	0,653	0,543	150,81
Mai	1,5E+07	15	2678400	31	8,6E+08	0,86	0,923	0,836	1,859	1,768	1,458	0,785	0,576	0,495	137,38
Junho	1,3E+07	12	2592000	30	8,3E+08	0,83	0,922	0,836	1,924	1,829	1,600	0,679	0,493	0,410	113,80
Julho	1,4E+07	11	2678400	31	8,6E+08	0,86	0,921	0,836	1,939	1,844	1,634	0,734	0,530	0,455	126,46
Agosto	1,6E+07	13	2678400	31	8,6E+08	0,86	0,923	0,836	1,897	1,804	1,542	0,863	0,623	0,535	148,65
Setembro	1,9E+07	15	2592000	30	8,3E+08	0,83	0,919	0,836	1,863	1,772	1,468	1,025	0,729	0,606	168,30
Outubro	2,0E+07	18	2678400	31	8,6E+08	0,86	0,906	0,836	1,793	1,705	1,313	1,033	0,743	0,638	177,20
Novembro	2,1E+07	21	2592000	30	8,3E+08	0,83	0,895	0,836	1,733	1,648	1,180	1,106	0,793	0,659	183,13
Dezembro	2,2E+07	23	2678400	31	8,6E+08	0,86	0,890	0,836	1,674	1,592	1,050	1,135	0,818	0,702	195,02

Tabela 14– Dados calculados para obtenção das frações solares em Caracas.

	$I\beta$	T_{ar}	Δt	N	CT		$(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$	$(\tau\alpha)_n$	X	X_{c-arm}	X_{c-aqs}	Y	f	parcela suprida da CT	
	J/(m ² dia)	°C	s	dia	J	GJ	-	-	-	-	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	2,07E+07	21	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,92	0,84	1,73	1,64	1,17	1,13	0,81	0,69	192,56
Fevereiro	2,13E+07	23	2419200	28	7,75E+08	0,78	0,92	0,84	1,69	1,61	1,08	1,17	0,83	0,65	179,69
Março	2,24E+07	24	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,93	0,84	1,67	1,59	1,05	1,23	0,87	0,75	207,52
Abril	2,04E+07	24	2592000	30	8,31E+08	0,83	0,92	0,84	1,67	1,59	1,04	1,11	0,81	0,67	186,18
Mai	1,87E+07	25	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,91	0,84	1,64	1,56	0,98	1,01	0,75	0,64	178,99
Junho	1,86E+07	24	2592000	30	8,31E+08	0,83	0,91	0,84	1,66	1,58	1,01	1,00	0,74	0,62	171,25
Julho	1,94E+07	24	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,91	0,84	1,66	1,58	1,03	1,05	0,77	0,66	183,47
Agosto	2,04E+07	23	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,92	0,84	1,69	1,60	1,07	1,11	0,80	0,69	191,55
Setembro	2,07E+07	23	2592000	30	8,31E+08	0,83	0,92	0,84	1,67	1,59	1,05	1,14	0,82	0,68	188,81
Outubro	1,99E+07	23	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,92	0,84	1,68	1,60	1,07	1,09	0,79	0,68	188,61
Novembro	1,90E+07	23	2592000	30	8,31E+08	0,83	0,92	0,84	1,69	1,61	1,09	1,04	0,76	0,63	174,98
Dezembro	1,92E+07	21	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,92	0,84	1,72	1,64	1,15	1,04	0,76	0,65	181,01

Tabela 15– Dados calculados para obtenção das frações solares em Lima.

	$I\beta$	T_{ar}	Δt	N	CT		$(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$	$(\tau\alpha)_n$	X	X_{c-arm}	X_{c-aqs}	Y	f	parcela suprida da CT	
	J/(m ² dia)	°C	s	dia	J	GJ	-	-	-	-	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	2,43E+07	22	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,91	0,84	1,70	1,61	1,10	1,32	0,91	0,78	217,34
Fevereiro	2,53E+07	23	2419200	28	7,75E+08	0,78	0,92	0,84	1,69	1,60	1,07	1,39	0,95	0,73	203,73
Março	2,57E+07	23	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,93	0,84	1,69	1,61	1,09	1,42	0,96	0,82	228,56
Abril	2,38E+07	21	2592000	30	8,31E+08	0,83	0,93	0,84	1,73	1,64	1,17	1,32	0,91	0,75	208,88
Mai	1,93E+07	19	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,92	0,84	1,77	1,69	1,27	1,06	0,76	0,65	181,07
Junho	1,31E+07	18	2592000	30	8,31E+08	0,83	0,91	0,84	1,80	1,72	1,34	0,71	0,53	0,44	122,81
Julho	1,18E+07	17	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,91	0,84	1,82	1,73	1,37	0,64	0,48	0,41	113,29
Agosto	1,32E+07	17	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,91	0,84	1,83	1,74	1,39	0,71	0,53	0,45	126,32
Setembro	1,57E+07	17	2592000	30	8,31E+08	0,83	0,92	0,84	1,82	1,73	1,38	0,85	0,63	0,52	144,70
Outubro	1,90E+07	18	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,92	0,84	1,80	1,71	1,33	1,03	0,74	0,64	176,87
Novembro	2,09E+07	19	2592000	30	8,31E+08	0,83	0,91	0,84	1,77	1,68	1,26	1,13	0,80	0,67	185,38
Dezembro	23018719	21	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,91	0,84	1,73	1,65	1,18	1,24	0,87	0,75	207,02

Tabela 16– Dados calculados para obtenção das frações solares em Montevideo.

	$I\beta$	Tar	Δt	N	CT		$(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$	$(\tau\alpha)_n$	X	Xc-arm	Xc-aqs	Y	f	parcela suprida da CT	
	J/(m ² dia)	°C	s	dia	J	GJ	-	-	-	-	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	2,25E+07	23	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,90	0,84	1,68	1,60	1,06	1,21	0,86	0,73	203,96
Fevereiro	2,06E+07	23	2419200	28	7,75E+08	0,78	0,91	0,84	1,69	1,61	1,09	1,11	0,80	0,62	173,14
Março	1,87E+07	21	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,92	0,84	1,73	1,65	1,18	1,03	0,75	0,64	178,12
Abril	1,59E+07	17	2592000	30	8,31E+08	0,83	0,93	0,84	1,81	1,72	1,34	0,88	0,64	0,54	148,79
Maiο	1,38E+07	19	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,94	0,84	1,76	1,68	1,25	0,77	0,58	0,50	137,64
Junho	1,19E+07	11	2592000	30	8,31E+08	0,83	0,94	0,84	1,94	1,84	1,63	0,66	0,48	0,40	109,99
Julho	1,29E+07	11	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,94	0,84	1,94	1,85	1,65	0,72	0,52	0,44	123,18
Agosto	1,50E+07	12	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,94	0,84	1,92	1,83	1,60	0,83	0,60	0,51	142,86
Setembro	1,78E+07	14	2592000	30	8,31E+08	0,83	0,93	0,84	1,89	1,80	1,53	0,98	0,70	0,58	161,58
Outubro	1,92E+07	16	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,92	0,84	1,84	1,75	1,41	1,04	0,74	0,64	177,35
Novembro	2,11E+07	19	2592000	30	8,31E+08	0,83	0,90	0,84	1,77	1,69	1,27	1,13	0,80	0,67	185,08
Dezembro	2,23E+07	21	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,90	0,84	1,72	1,63	1,15	1,19	0,84	0,72	200,41

Tabela 17– Dados calculados para obtenção das frações solares em Rio de Janeiro.

	$I\beta$	Tar	Δt	N	CT		$(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$	$(\tau\alpha)_n$	X	Xc-arm	Xc-aqs	Y	f	parcela suprida da CT	
	J/(m ² dia)	°C	s	dia	J	GJ	-	-	-	-	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	1,76E+07	21	2678400	31	8,61E+08	0,86	0,89	0,84	1,72	1,64	1,16	0,91	0,68	0,58	161,88
Fevereiro	1,83E+07	23	2419200	28	7,77E+08	0,78	0,91	0,84	1,69	1,60	1,08	0,96	0,71	0,56	154,23
Março	1,67E+07	24	2678400	31	8,61E+08	0,86	0,92	0,84	1,67	1,59	1,05	0,89	0,67	0,58	160,85
Abril	1,57E+07	24	2592000	30	8,33E+08	0,83	0,93	0,84	1,67	1,58	1,04	0,85	0,64	0,54	149,04
Maiο	1,39E+07	25	2678400	31	8,61E+08	0,86	0,94	0,84	1,64	1,56	0,97	0,76	0,59	0,50	139,98
Junho	1,42E+07	24	2592000	30	8,33E+08	0,83	0,94	0,84	1,65	1,57	1,01	0,78	0,60	0,50	138,48
Julho	1,41E+07	24	2678400	31	8,61E+08	0,86	0,94	0,84	1,66	1,58	1,02	0,77	0,59	0,51	141,73
Agosto	1,61E+07	23	2678400	31	8,61E+08	0,86	0,94	0,84	1,68	1,60	1,07	0,88	0,66	0,57	158,13
Setembro	1,48E+07	23	2592000	30	8,33E+08	0,83	0,92	0,84	1,67	1,59	1,05	0,79	0,61	0,50	140,18
Outubro	1,62E+07	23	2678400	31	8,61E+08	0,86	0,91	0,84	1,68	1,60	1,07	0,85	0,64	0,55	154,04
Novembro	1,69E+07	23	2592000	30	8,33E+08	0,83	0,90	0,84	1,69	1,60	1,09	0,88	0,66	0,55	152,93
Dezembro	1,70E+07	21	2678400	31	8,61E+08	0,86	0,89	0,84	1,72	1,63	1,15	0,88	0,66	0,56	156,76

Tabela 18– Dados calculados para obtenção das frações solares em Quito.

	$I\beta$	Tar	Δt	N	CT		$(\tau\alpha)/(\tau\alpha)_n$	$(\tau\alpha)_n$	X	Xc-arm	Xc-aqs	Y	f	parcela suprida da CT	
	J/(m ² dia)	°C	s	dia	J	GJ	-	-	-	-	-	-	-	GJ	kWh
Janeiro	1,45E+07	16	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,90	0,84	1,85	1,76	1,43	0,78	0,57	0,49	136,53
Fevereiro	1,53E+07	16	2419200	28	7,75E+08	0,78	0,91	0,84	1,85	1,76	1,43	0,83	0,61	0,47	130,61
Março	1,63E+07	15	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,91	0,84	1,85	1,76	1,44	0,88	0,64	0,55	152,96
Abril	1,54E+07	16	2592000	30	8,31E+08	0,83	0,91	0,84	1,85	1,76	1,43	0,83	0,61	0,51	140,71
Maio	1,46E+07	16	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,91	0,84	1,85	1,76	1,43	0,78	0,58	0,50	137,53
Junho	1,44E+07	15	2592000	30	8,31E+08	0,83	0,90	0,84	1,85	1,76	1,44	0,77	0,57	0,47	131,12
Julho	1,53E+07	15	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,91	0,84	1,85	1,76	1,44	0,82	0,60	0,52	143,33
Agosto	1,61E+07	16	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,91	0,84	1,84	1,75	1,41	0,87	0,64	0,55	151,48
Setembro	1,53E+07	16	2592000	30	8,31E+08	0,83	0,91	0,84	1,84	1,75	1,42	0,82	0,61	0,50	139,72
Outubro	1,49E+07	16	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,91	0,84	1,84	1,75	1,43	0,80	0,59	0,51	141,04
Novembro	1,53E+07	15	2592000	30	8,31E+08	0,83	0,91	0,84	1,85	1,76	1,44	0,82	0,60	0,50	138,91
Dezembro	1,39E+07	16	2678400	31	8,59E+08	0,86	0,90	0,84	1,85	1,76	1,43	0,74	0,55	0,47	131,12