

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

PECE – PROGRAMA DE EDUCAÇÃO CONTINUADA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

ANDREY SOARES

**Estudo comparativo de coletores solares para utilização de energia solar
térmica em processos industriais na região de Ribeirão Preto**

**São Paulo
2015**

ANDREY SOARES

Estudo comparativo de coletores solares para utilização de energia solar
térmica em processos industriais na região de Ribeirão Preto

Monografia de conclusão do curso de especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de concentração: Energia Solar.
Orientador: Prof. Dr. Cláudio Pacheco.

São Paulo
2015

Catálogo-na-publicação

Oliveira, Andrey Soares de

Estudo comparativo de coletores solares para utilização de energia solar térmica em processos industriais na região de Ribeirão Preto SP. / A. S. Oliveira -- São Paulo, 2015.

105 p.

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

1.Energia Solar. 2.Energias Renováveis. 3.Energia Térmica. 4.Processos Industriais I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

À minha noiva, com amor, admiração e gratidão por sua
compreensão, carinho, e incansável apoio ao longo
do período do curso e da elaboração deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Cláudio Pacheco, pela atenção e apoio durante a sua orientação e que nos meses de convivência, muito me ensinou, contribuindo para meu crescimento profissional, científico, intelectual e pessoal.

A todos os Professores do curso de Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência energética do PECE que ao empenharem-se em transmitir seus conhecimentos superaram as expectativas de aprendizagem dos alunos.

Aos meus amigos e colegas do PECE, que durante as várias horas de estudo que estivemos juntos possibilitou-me um grande aprofundamento nos assuntos das disciplinas realizadas.

RESUMO

OLIVEIRA, AS. Estudo comparativo de coletores solares para utilização de energia solar térmica em processos industriais na região de Ribeirão Preto. 2015. 105p. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – PECE – Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

A geração de energia por fontes renováveis tem como principal benefício a redução do impacto ambiental originado principalmente pela queima de combustíveis fósseis para utilização de energia elétrica, mecânica ou térmica. A energia elétrica como fonte final de utilização de energia é preocupação de todos, no entanto a energia final em forma térmica não é muito considerada no momento presente embora tivesse sido priorizada nos anos de 1970 e 1980. Devido a isso, identificar setores representativos do país no consumo de energia térmica como fonte final de utilização, motivou o autor a um estudo de caso nos segmentos industriais de alimentos e bebidas na região de Ribeirão Preto- SP devido ao significativo potencial de utilização de energia solar térmica. O estudo comparativo do desempenho de diferentes coletores solares identificou os mais adequados a cada processo industrial em função da temperatura de operação unitária considerada. Utilizou-se para este estudo o método de Liu e Jordan para avaliação da energia solar sobre planos inclinados combinado com a avaliação de desempenho de diferentes coletores utilizando a irradiação solar e temperaturas de operação com base horária. Este trabalho propiciou o entendimento da aplicação de energia solar térmica em processos industriais, bem como a escolha do coletor solar adequado para cada operação unitária que requeira aquecimento. Este trabalho procura despertar nos empreendedores industriais o desafio de usar a energia solar em seus processos.

Palavras-chave: Energia Solar; Energias Renováveis, Energia Térmica, Processos Industriais.

ABSTRACT

OLIVEIRA, AS. Comparative study of solar collectors for use of solar thermal energy for industrial processes in the region of Ribeirão Preto. 2015. 105p. Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética) – PECE – Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

Power generation from renewable sources has a main benefit to reducing the environmental impact originated mainly from burning fossil fuels to produce electric, mechanical or thermal energy. The final thermal energy is not much considered at the present time. Because of this, it deserves to identify representative sectors of the country where the consumption of thermal energy as the primary source is significant. The author developed a case study in the industries of food and beverages in the region of Ribeirão Preto - SP due to the significant potential for solar thermal energy use. The comparative performance of various solar collectors enables us to identify the most suited to each industrial process as a function of operating process temperature considered. The method of Liu and Jordan enabled the evaluation of solar energy on slopes surfaces combined with the performance evaluation of different collectors using solar irradiation and operating temperatures hourly basis. This work provides a better understanding of the application of solar thermal energy in industrial processes, the choice of solar collector suitable for every operation that requires heating and encourages of entrepreneurs to use solar energy in their industrial processes.

Keywords: Solar energy; Renewable Energy, Thermal Energy, Industrial Processes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Consumo Final Energético no Brasil por Setor.....	25
Figura 1.2 – Consumo Final Energético no Brasil por setor Industrial	26
Figura 1.3 – Distribuição regional no Brasil de estabelecimentos da Industria de Alimentos e Bebidas	26
Figura 2.1 - Consumo de Energéticos na Industria de Alimentos e Bebidas	30
Figura 2.2 - Consumo de energia em usos finais na Industria de Alimentos e Bebidas.....	31
Figura 2.3 - Consumo de Energéticos por uso finais usos finais na Industria de Alimentos e Bebidas	32
Figura 2.4 – Correlação do Índice de Claridade.	36
Figura 2.5 – Relação de Irradiações Horárias e Diárias.	40
Figura 2.6 - Relação de Irradiações Horárias e Diárias Difusas.....	41
Figura 2.7 – Plano posicionado sobre o eixo horizontal leste-oeste com simples ajuste diário	45
Figura 2.8 - Plano posicionado sobre o eixo horizontal leste-oeste com contínuo ajuste.	46
Figura 2.9 - Plano posicionado sobre o eixo norte-sul com contínuo ajuste.	47
Figura 2.10 - Plano com inclinação fixa rotacionado sobre o eixo vertical.	48
Figura 2.11 – Plano rotacionado sobre o eixo norte-sul paralelo ao eixo da terra.	48
Figura 2.12 – Plano com contínuo ajuste sobre os dois eixos.	49
Figura 2.13 – Balanço de Energia de Coletores Solares.....	51
Figura 2.14 – Indicações dos tipos de área de coletores solares.....	53
Figura 2.15 – Distribuição Interna de Temperaturas de Coletores Solares.	54
Figura 3.1 - Irradiações Diária Média Mensal no Plano Horizontal em Ribeirão Preto	61
Figura 3.2 - Irradiações Diária Média Mensal no Plano Inclinado em Ribeirão Preto	64
Figura 3.3 Irradiação horária sobre a superfície horizontal – Dia (10) médio do mês de dezembro	72

Figura 3.4 Irradiação horária sobre a superfície inclinada ($\Phi=\beta$) e irradiação direta normal – Dia (10) médio do mês de dezembro.....	73
Figura 3.5 Irradiação horária sobre a superfície horizontal – Dia (11) médio do mês de junho.	73
Figura 3.6 Irradiação horária sobre a superfície inclinada ($\Phi=\beta$) e irradiação direta normal – Dia (11) médio do mês de junho.	74
Figura 3.7 Irradiação horária sobre a superfície inclinada ($\Phi=\beta$) e irradiação direta normal – Dia (16) médio do mês de março.....	74
Figura 3.8 Irradiação horária sobre a superfície inclinada ($\Phi=\beta$) e irradiação direta normal – Dia (15) médio do mês de setembro.....	75
Figura 3.9 – Temperatura do Ar em Ribeirão Preto em 26/08/2015.....	75
Figura 3.10 – Modelo de Distribuição de Temperatura em Ribeirão Preto.	76
Figura 3.11 – Curva de eficiência de coletores solares nacionais brasileiros.....	78
Figura 3.12 – Curva de eficiência de coletores disponíveis na Europa.....	78
Figura 3.13 - Curva de Eficiência de Coletores Nacionais Brasileiros e Europeus.	81
Figura 3.14 Eficiência de coletores ao longo das horas do dia – Dia (11) médio de Junho – Temperatura de Fluido a 40°C	85
Figura 3.15 Eficiência de coletores ao longo das horas do dia – Dia (11) médio de Junho – Temperatura de Fluido a 90°C	85
Figura 3.16 Eficiência de coletores ao longo das horas do dia – Dia (10) médio de Dezembro – Temperatura de Fluido a 40°C	86
Figura 3.17 Eficiência de coletores ao longo das horas do dia – Dia (10) médio de Dezembro – Temperatura de Fluido a 40°C	87
Figura 3.18 Figura 3.19 Energia útil diária com temperatura de fluido a 40°C para os dias médios dos meses de março, junho, setembro e dezembro.	88
Figura 3.20 Energia útil diária com temperatura de fluido a 90°C para os dias médios dos meses de março, junho, setembro e dezembro.	88
Figura 3.21 Energia útil mês com temperatura de fluido a 90°C para os meses de março, junho, setembro e dezembro.....	89
Figura 3.22 Eficiência total anual por coletor	90
Figura 3.23 Eficiência útil total anual por coletor.....	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – PIB 2012 da Cidade de Ribeirão Preto	27
Tabela 2.2 – Exportações de Ribeirão Preto.....	28
Tabela 2.3 –Consumo de Energéticos na Industria de Alimentos e Bebidas	30
Tabela 2.4 - Consumo de energia em usos finais na Industria de Alimentos e Bebidas	31
Tabela 2.5 - Consumo de Energéticos por uso finais usos finais na Industria de Alimentos e Bebidas	32
Tabela 2.6 – Níveis de Temperatura dos Processos que Mais utilizam Energia na Industria de Alimentos e Bebidas	33
Tabela 2.7 Radiação Extraterrestre Diária Média Mensal.....	35
Tabela 2.8 – Dias médios dos Meses Recomendados	37
Tabela 3.1 – Potencial Solarimétrico de Ribeirão Preto - SP	57
Tabela 3.2 - condições climáticas de Ribeirão Preto SP	57
Tabela 3.3 Irradiações no plano Horizontal e Inclinado do CRESESB.	59
Tabela 3.4 – Irradiações Diária Média Mensal no Plano Horizontal em Ribeirão Preto	61
Tabela 3.5 – Comparação de resultados de <i>Rb</i> obtidos com os do CRESESB	63
Tabela 3.6 - Irradiações Diária Média Mensal no Plano Inclinado em Ribeirão Preto	64
Tabela 3.7 Irradiação horária para o dia médio do mês de Janeiro	71
Tabela 3.8 – Dados de Eficiência de coletores solares disponíveis no mercado brasileiro.....	76
Tabela 3.9 - Dados de Eficiência de coletores solares disponíveis no mercado brasileiro.	78
Tabela 3.10 Eficiência ao longo das horas do dia a temperatura de entrada do fluido a 40°C.	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

EPE	Empresa de Pesquisa Energética.
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PIB	Produto Interno Bruto
CNI	Confederação Nacional da Indústria
A.D	Aquecimento Direto
A.P	Calor de Processo
F.M	Força Motriz
MME	Ministério de Minas e Energia
Ageitec	Agência Embrapa de Informação Tecnológica
FPC	Flat plate collectors
CPC	Compound parabolic collectors
ETC	Evacuated tube collectors
LFR	Linear Fresnel reflector
PTC	Parabolic trough collector
CTC	Cylindrical trough collector
PDR	Parabolic dish reflector
HFC	Heliostat field collector
DNI	Direct Normal Irradiation
CRESESB	Centro de Referência em para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito
CEPAGRI	Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
PGEB	Potencial de geração de energia no Brasil
PUC	Potencial de Utilização de Coletores
EUGGN	Energia útil Gerada por Gás Natural
EFGGN	Energia Final Gerada por Gás Natural

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área do coletor.
a, b	Coeficientes de relações empíricas.
a_{1a}	Coeficiente de perda de calor de primeira ordem.
a_{2a}	Coeficiente de perda de calor de segunda ordem
A_{ab}	Área de abertura.
A_{OC}	Área de ocupada.
F_R	Fator de Remoção de Calor
G	Irradiância no plano horizontal.
G_b	Irradiância direta no plano horizontal.
G_{bn}	Irradiância direta normal.
G_{bT}	Irradiância direta no plano inclinado.
G_d	Irradiância difusa no plano horizontal.
G_{dT}	Irradiância difusa no plano inclinado.
G_T	Irradiância no plano inclinado.
$G_{(refl\ do\ solo)}$	Irradiância por refletividade no plano horizontal.
$G_{T(refl\ do\ solo)}$	Irradiância por refletividade no plano inclinado.
GSC	Constante solar, em 1353 W/m ² .
$\bar{H}$	Irradiação integrada diária média mensal na superfície horizontal.
$\bar{H}_0$	Radiação extraterrestre integrada diária média mensal
$\bar{H}_b$	Irradiação direta integrada diária média mensal na superfície horizontal.
$\bar{H}_d$	Irradiação difusa integrada diária média mensal na superfície horizontal.
$\bar{H}_T$	Irradiação total integrada diária média mensal na superfície inclinada.
$H_{T(refl\ do\ solo)}$	Irradiação por refletividade integrada diária média mensal na superfície inclinada.
H_0	Radiação integrada diária sobre superfície horizontal.
HL	Hora Legal.
HS	Hora Solar.
I	Irradiação horária.
I_b	Irradiação direta horária.
I_{bT}	Irradiação direta horária no plano inclinado.

I_d	Irradiação difusa horária.
I_{dT}	Irradiação difusa horária no plano inclinado.
I_T	Irradiação horária no plano inclinado.
$I_{T(refl \ do \ solo)}$	Irradiação por refletividade horária no plano inclinado.
$\bar{K}_T$	Índice de claridade médio.
L	Longitude da local.
L_O	Longitude da hora legal.
n	Dia do ano.
Q_u	Energia Útil.
$\bar{R}$	Média da razão da irradiação total integrada diária média mensal na superfície inclinada pela irradiação integrada diária média mensal na superfície horizontal.
$\bar{R}_b$	Média da razão da irradiação direta integrada diária média mensal na superfície inclinada pela irradiação direta integrada diária média mensal na superfície horizontal.
R_b	Razão da irradiação direta integrada diária média mensal na superfície inclinada pela irradiação direta integrada diária média mensal na superfície horizontal.
r_d	Razão da Irradiação difusa horária pela irradiação difusa integrada diária.
r_t	Razão da Irradiação horária pela irradiação integrada diária.
$T_{f,av}$	Temperatura média do fluído.
T_a	Temperatura ambiente.
T_{fi}	Temperatura de entrada do fluído.
T_{fo}	Temperatura de saída do fluído.
T_{pm}	Temperatura principal de placa.
tep	Tonelada equivalente de petróleo.
U_L	Coeficiente Global de Troca de Calor
α	Absortividade da Placa
β	Inclinação da superfície em °.
γ	Ângulo do azimute da superfície.
γ_s	Ângulo do azimute solar.
δ	Declinação Solar, em °.

ρ_g	Refletividade do Solo
ρ_{GN}	Massa Específica do Gás Natural
η	Rendimento da placa.
η_0	Rendimento quando a diferença de temperatura da placa e o ambiente é zero.
η_{GN}	Rendimento de conversão do Gás Natural
θ	Ângulo de incidência.
θ_z	Ângulo Zenital.
τ	Transmitância do Vidro
ϕ	Latitude do local, em °
ω	Ângulo horário
ω_s	Ângulo horário do pôr do sol

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	25
1.1	Característica de consumo energético brasileiro.....	25
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1	O Potencial industrial de Ribeirão Preto SP.....	27
2.2	Caracterização energética do setor de alimentos.....	28
2.3	Disponibilidade de energia solar.....	33
2.3.1	Irradiação diária média mensal em um plano horizontal.....	33
2.3.2	Irradiação diária média mensal em um plano inclinado.....	37
2.3.3	Irradiação horária a partir da Irradiação diária média mensal.....	39
2.3.4	Irradiação no plano inclinado a partir da Irradiação horária no plano horizontal.....	42
2.3.5	Irradiação Direta no Plano Normal.....	44
2.4	Características dos coletores Solares utilizados neste estudo.....	50
2.5	Teste de Desempenho de Coletores Solares.....	50
3	DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO.....	57
3.1	Dados Básicos de Ribeirão Preto.....	57
3.2	Avaliação da Irradiação em Ribeirão Preto.....	58
3.2.1	Avaliação da Irradiação Diária Média Mensal em Ribeirão Preto.....	58
3.2.2	Avaliação da Irradiação horária em Ribeirão Preto.....	65
(1)	Considerações.....	72
3.3	Desempenho dos coletores solares.....	76
3.3.1	Desempenho dos coletores solares com dados médios.....	76
(1)	Desempenho dos coletores brasileiros.....	76
(2)	Desempenho dos coletores europeus.....	78
(3)	Comparação de desempenho de coletores solares brasileiros e europeus.....	79
(a)	Principais Resultados e Considerações.....	80
3.3.2	Desempenho dos coletores solares com dados horários.....	81
(a)	Principais Resultados.....	84
3.4	Potencial de geração de energia solar térmica no Brasil.....	90
4	CONCLUSÃO	95
	REFERÊNCIAS	97

ANEXO A.1 – Eficiência ao Longo das horas do dia	99
ANEXO A.2 – Eficiência ao Longo das horas do dia	100
ANEXO B.1 – Energia útil dia	101
ANEXO B.2 – Energia útil dia	102
ANEXO C.1 – Energia útil mês	103
ANEXO C.2 – Energia útil mês	104
ANEXO D – Energia útil mês	105

1 INTRODUÇÃO

Nem sempre está presente para aqueles que trabalham com fornecimento e distribuição de energia elétrica ou combustíveis quais são os setores industriais que apresentam maiores consumos destes energéticos.

Um dos objetivos neste estudo é apresentar qual o setor e a localização no país que representam o maior consumo energético. Com base nessas informações é possível realizar avaliações setoriais de consumo e estudos para suprimento desta energia.

A partir da análise das informações da Empresa de Pesquisa Energética (EPE) um setor industrial da cidade de Ribeirão Preto - SP será um forte consumidor de energia térmica.

A revisão bibliográfica sobre a radiação solar é principal teoria para este estudo pois o suprimento de energia será feito por meio do aproveitamento solar térmico.

1.1 Característica de consumo energético brasileiro.

O setor industrial é o maior consumidor final de energia no Brasil e representa, portanto 36%, e bem perto é o setor de transportes com 34% como mostra a figura 1.1. O setor de transportes ainda é um grande consumidor devido a extensão geográfica do país e sendo a maioria dos transportes de produtos realizados por caminhões.



Figura 1.1 – Consumo Final Energético no Brasil por Setor

Fonte: Oliveira. & Pacheco. - AGRENER, com base nos dados da EPE, ano 2013.

No Brasil existem alguns setores que tem grande representatividade produtiva, como o setor automobilístico e petroquímico, no entanto o maior consumidor final de energia no setor industrial é o de alimentos e bebidas com 26% como mostra o figura 1.2.



Figura 1.2 – Consumo Final Energético no Brasil por setor Industrial

Fonte: Oliveira. & Pacheco - AGRENER, com base nos dados da EPE, ano 2013.

Os estabelecimentos da indústria de alimentos e bebidas representam 43% na região Sudeste como mostra o figura 1.3.

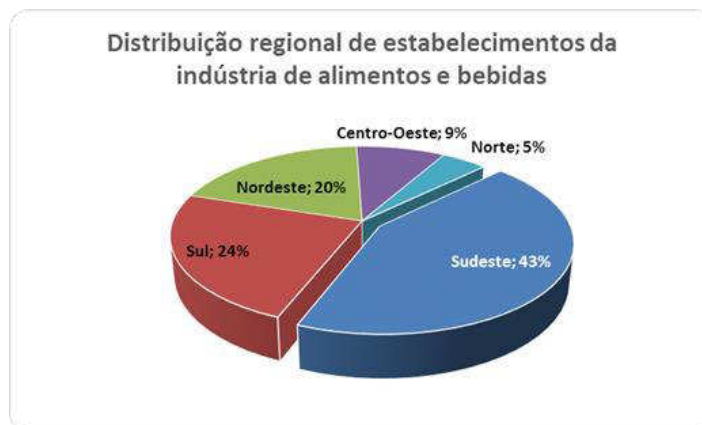


Figura 1.3 – Distribuição regional no Brasil de estabelecimentos da Indústria de Alimentos e Bebidas

Fonte: Oliveira. & Pacheco - AGRENER, com base nos dados da EPE, ano 2013.

O Sudeste brasileiro segundo o IBGE em 2013 projetou a população em 84,4 milhões, sendo a mais populosa do país com 42% da população brasileira, sendo o estado de São Paulo o maior com 51,7%.

A partir dessas informações escolheu-se a cidade de Ribeirão Preto - SP para estudo. O item 2.1 mostra o potencial industrial da cidade.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O Potencial industrial de Ribeirão Preto SP.

Com base em informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) apresentada na tabela 2.1 a indústria é o segundo setor mais relevante para a economia do município, representa R\$ 2.798.759.000 (dois bilhões, setecentos e noventa e oito milhões e setecentos e cinquenta e nove mil reais) do Produto Interno Bruto (PIB) municipal.

Tabela 2.1 – PIB 2012 da Cidade de Ribeirão Preto

Produto Interno Bruto (PIB)	
Ribeirão Preto	
Variável	R\$
Agropecuária	78.286.000
Indústria	2.798.759.000
Serviços	14.963.559.000

Fonte: IBGE, 2012

Segundo o site da prefeitura municipal de Ribeirão Preto em 2015 “estão presentes na região várias indústrias de suco de laranja, beneficiadoras de café, soja, amendoim, indústrias alimentícias, indústrias de ração, fertilizantes, entre outras. Ou seja, existe um amplo complexo agroindustrial na região”.

O destaque na cidade é para os setores de produção de alimentos e bebidas; indústrias da área de saúde; papel, papelão e gráfica; metalúrgica, têxtil e vestuário.

O município possui várias empresas industriais multinacionais, tais como a Coca-Cola, Nestlé, 3M, Microsoft, Holcim, Carrefour, Grupo Walmart, Netafim, OHL (Ambient), Wolf Seeds, Embratel, Agrichem, AmBev, Comingersoll, Weber Saint-Gobain, State Grid Corporation of China, Bayer, Valeant Pharmaceuticals, Accor, AGCO Máquinas e Equipamentos Agrícolas, Dow AgroSciences, ADR System, FMC Corporation, Kaffa Cafés, AYU Global Resources, entre outras.

A principal fonte de renda do setor primário é a cana-de-açúcar onde retira a matéria prima para fabricação do álcool e do açúcar, sendo que é um dos maiores polos produtores destes produtos no estado de São Paulo.

A tabela 2.2 mostra os principais países que a cidade de Ribeirão Preto faz exportações.

Tabela 2.2 – Exportações de Ribeirão Preto

Principais Países - Exportações de Ribeirão Preto			
País	2012 (US\$)	2013 (US\$)	2014 (US\$)
VENEZUELA	17.461.963	23.266.424	28.353.176
PAISES BAIXOS (HOLANDA)	6.011.900	7.291.521	21.770.277
ARGENTINA	10.476.452	7.085.408	14.376.552
ESTADOS UNIDOS	14.054.404	15.743.597	12.274.354
ANGOLA	6.429.489	7.937.451	11.859.102
COLOMBIA	11.740.285	11.762.388	11.184.222

Fonte: Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, ano 2013. – Balança Comercial Brasileira por Município – 28/12/2014

2.2 Caracterização energética do setor de alimentos.

Segundo o relatório setorial de alimentos e bebidas da Confederação Nacional da Indústria (CNI) as utilizações de energia deste segmento são para as seguintes finalidades: aquecimento direto (A.D.), calor de processo (C.P.), refrigeração, força motriz (F.M.) e iluminação.

As informações desses processos estão mais detalhadas a seguir conforme relatório setorial deste seguinte da CNI.

Aquecimento direto

- ✓ Operação de assar; tostar; aquecimento em atmosfera controlada;
- ✓ Secagem;
- ✓ Esterilização.

Calor de processo

- ✓ Branqueamento (imersão em vapor ou em água fervendo para ajudar a preservação ou descascamento);
- ✓ Cozimento;
- ✓ Destilação (evaporação de uma mistura e posterior condensação para a purificação ou a extração, principalmente conduzida por vapor);
- ✓ Evaporação (uso do calor para retirar água de uma solução);

- ✓ Fritura;
- ✓ Pasteurização (aquecimento controlado para atingir uma temperatura mínima por um tempo especificado);
- ✓ Fermentação (aquecimento brando por períodos longos com fermento);
- ✓ Aquecimento;
- ✓ Esterilização;
- ✓ Limpeza (lavagem a quente de máquinas e instalações, frequentemente com água em pressão elevada).

Refrigeração

- ✓ Resfriamento e congelamento - Na maior parte por compressão mecânica de vapor em instalações frigoríficas;
- ✓ Resfriamento (sem refrigeração direta) - usando convecção forçada de ar ou de água;
- ✓ Armazenamento com refrigeração e congelamento;
- ✓ Condicionamento de ar.

Força motriz

- ✓ Extrusão (pressurização mecânica de um produto através de bocais);
- ✓ Moagem, trituração ou pulverização;
- ✓ Mistura;
- ✓ Separação - pré-concentração de líquidos utilizando peneiramento, filtração, ultrafiltrarão ou membranas;

Iluminação

- ✓ Iluminação das instalações prediais e plantas industriais - aquecimento ou calefação, iluminação.

Identificando qual é o energético mais consumido e qual a sua finalidade para este seguimento industrial nos direciona a uma escolha adequada na realização deste estudo.

O relatório setorial de alimentos e bebidas da CNI possibilitou a escolha do processo de maior potencial de aplicação devido ao seu consumo energético.

Na caracterização energética do setor de alimentos foram excluídas as informações do setor de fabricação de açúcar devido ao alto consumo energético de derivados da cana.

A tabela 2.3 apresenta os energéticos, a energia final (E.Final) e a energia útil (E.Útil) com o rendimento devido a conversão de energia para utilização na indústria. As unidades de energias estão em “mil toneladas equivalente de petróleo (Mil tep).

Tabela 2.3 –Consumo de Energéticos na Indústria de Alimentos e Bebidas

Consumo de energia final, de energia útil e rendimento de conversão, por energético, na indústria de alimentos e bebidas em 2004, destacando-se a fabricação de açúcar

Energéticos	Alimentos e bebidas, excluindo a fabricação de açúcar			Fabricação de açúcar		
	E.Final	E. Útil	Rend.	E.Final	E. Útil	Rend.
	Mil tep	Mil tep	(%)	Mil tep	Mil tep	(%)
Gás natural	491,0	373,6	76,1	0,0	0,0	0,0
Carvão vapor	47,0	27,3	57,2	0,0	0,0	0,0
Lenha	1.772,1	1.162,8	65,6	0,0	0,0	0,0
Produtos da cana	0,0	0,0	76,0	12.782,5	9.842,5	77,0
Óleo diesel	73,8	32,6	44,2	0,0	0,0	0,0
Óleo combustível	606,1	461,1	76,1	0,0	0,0	0,0
GLP	71,5	31,4	43,9	0,0	0,0	0,0
Elettricidade	1.383,4	1.095,1	79,2	323,8	278,7	86,1
Outras fontes	17,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	4.492,8	3.183,8	70,9	13.106,3	10.121,2	77,2

Elaboração: Rocha, Carlos Roberto - Oportunidades de eficiência energética para a indústria: relatório setorial: alimentos e bebidas / Carlos Roberto - Rocha, Sérgio Bajay, Filipe Debonzi Gorla. – Brasília: CNI, 2010. Dados: MME, 2005^a

A figura 2.1 demonstra que o maior consumo de energia é de lenha com 39,8% e em segundo lugar a eletricidade com 30,8%, ou seja, o consumo de eletricidade está em 21,82% a menos em relação ao consumo de lenha.

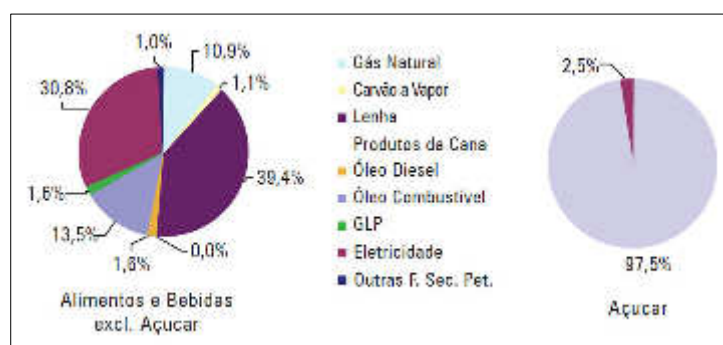


Figura 2.1 - Consumo de Energéticos na Indústria de Alimentos e Bebidas

Elaboração: Rocha, Carlos Roberto - Oportunidades de eficiência energética para a indústria: relatório setorial: alimentos e bebidas / Carlos Roberto - Rocha, Sérgio Bajay, Filipe Debonzi Gorla. – Brasília: CNI, 2010. Dados: MME

Dentre os usos finais de energia do setor de alimentos e bebidas há dois que se destacam por sua grande utilização, que são o calor de processo com 43,3% e o aquecimento direto com 31,9%, sendo o aquecimento direto 26,33% a menor em relação ao calor de processo. A tabela 2.4 e a figura 2.2 demonstra essas informações.

Tabela 2.4 - Consumo de energia em usos finais na Indústria de Alimentos e Bebidas

Consumo de energia final, de energia útil e rendimento de conversão, por usos finais, na indústria de alimentos e bebidas em 2004, destacando-se a fabricação de açúcar

Usos finais	Alimentos e bebidas, excluindo a fabricação de açúcar			Fabricação de açúcar		
	E. Final	E. Útil	Rend.	E. Final	E. Útil	Rend.
	Mil tep	Mil tep	(%)	Mil tep	Mil tep	(%)
Força motriz	555,9	452,4	81,4	294,9	255,4	86,6
Calor de processo	1.944,7	1.598,2	82,2	12.782,5	9.842,5	77,0
Aquecimento direto	1.434,9	752,1	52,4	2,1	1,3	55,0
Refrigeração	481,7	352,6	73,2	10,9	8,1	75,0
Iluminação	58,5	14,0	24,0	16,0	3,8	24,0
Eletroquímica	8,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Outros	4,4	4,4	100,0	0,0	0,0	0,0
Total	4.492,8	3.183,8	70,9	13.106,3	10.121,2	77,2

Elaboração: Rocha, Carlos Roberto - Oportunidades de eficiência energética para a indústria: relatório setorial: alimentos e bebidas / Carlos Roberto - Rocha, Sérgio Bajay, Filipe Debonzi Gorla. – Brasília: CNI, 2010. Dados: MME, 2005^a

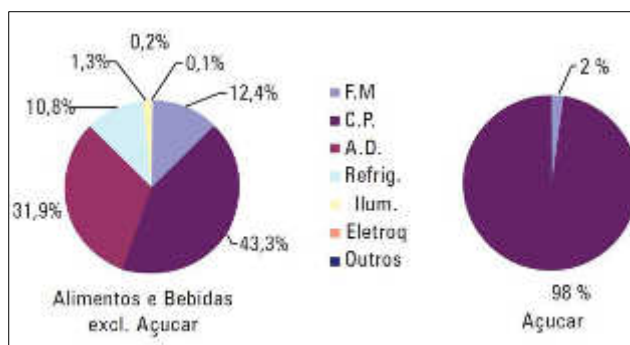


Figura 2.2 - Consumo de energia em usos finais na Indústria de Alimentos e Bebidas

Elaboração: Rocha, Carlos Roberto - Oportunidades de eficiência energética para a indústria: relatório setorial: alimentos e bebidas / Carlos Roberto - Rocha, Sérgio Bajay, Filipe Debonzi Gorla. – Brasília: CNI, 2010. Dados: MME, 2005^a

Para utilização de energia em calor de processo e aquecimento direto destacam-se a utilização da lenha, o óleo combustível e o gás natural. Essas informações se confirmam na tabela 2.5 e na figura 2.3 abaixo.

Tabela 2.5 - Consumo de Energéticos por uso finais usos finais na Indústria de Alimentos e Bebidas

Distribuição, por usos finais, do consumo, em mil tep, dos energéticos utilizados na indústria de alimentos e bebidas, excluída a fabricação de açúcar, em 2004

Energéticos	Alimentos e bebidas, excluindo a fabricação de açúcar						
	Força motriz	Calor de Processo	Aquecimento direto	Refrigeração	Iluminação	Processo Eletroquímico	Outros
Gás natural	0,0	328,4	162,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Carvão vapor	0,0	35,5	12,3	0,0	0,0	0,0	0,0
Lenha	0,0	965,1	807,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Produtos da cana	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Óleo diesel	70,2	1,5	2,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Óleo combustível	0,0	394,1	190,8	21,2	0,0	0,0	0,0
GLP	24,1	0,0	47,4	0,0	0,0	0,0	0,0
Eletricidade	461,5	196,6	189,1	463,4	58,5	0,0	0,0
Outras fontes sec. petr.	0,0	23,6	23,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Total	565,9	1.944,7	1.434,9	484,7	58,5	0,0	0,0

Elaboração: Rocha, Carlos Roberto - Oportunidades de eficiência energética para a indústria: relatório setorial: alimentos e bebidas / Carlos Roberto - Rocha, Sérgio Bajay, Filipe Debonzi Gorla. – Brasília: CNI, 2010. Dados: MME, 2005^a

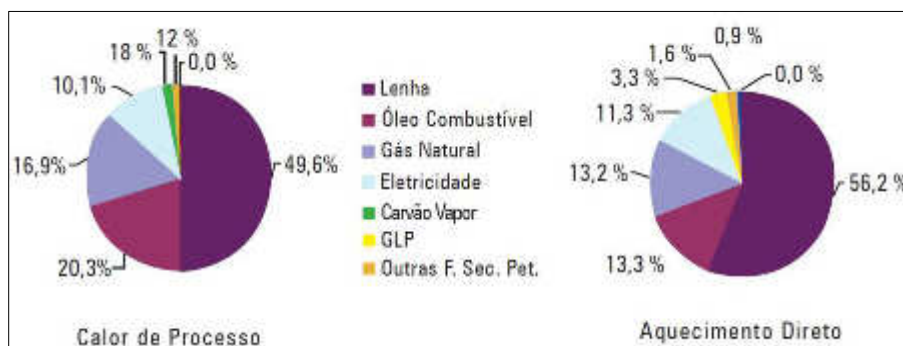


Figura 2.3 - Consumo de Energéticos por uso finais usos finais na Indústria de Alimentos e Bebidas

Elaboração: Rocha, Carlos Roberto - Oportunidades de eficiência energética para a indústria: relatório setorial: alimentos e bebidas / Carlos Roberto - Rocha, Sérgio Bajay, Filipe Debonzi Gorla. – Brasília: CNI, 2010. Dados: MME, 2005^a

Portanto a tabela 2.6 resume os principais processos consumidores de energia e suas temperaturas de processo.

Tabela 2.6 – Níveis de Temperatura dos Processos que Mais utilizam Energia na Indústria de Alimentos e Bebidas

Energia térmica:	Processo	Nível de temperatura (°C)
Aquecimento direto	Secagem	30 - 90
Calor de processo	Branqueamento	>vapor d'água - 110°C
Calor de processo	Cozimento	> 100°C
Calor de processo	Destilação	-----
Calor de processo	Evaporação	95 - 105
Calor de processo	Fritura	> 100°C
Calor de processo	Pasteurização	62 - 110
Calor de processo	Fermentação	-----
Calor de processo	Tratamento de aquecimento	40 - 60
Calor de processo	Esterilização	138 - 150
Calor de processo	Limpeza	40 - 80

Elaboração: Fonte: Oliveira.A - AGRENER

Essas informações possibilitam realizar o desenvolvimento do estudo de desempenho de coletores com base nas informações de temperatura utilizada nos processos que mais demandam energia.

2.3 Disponibilidade de energia solar.

Utilizando como bibliografia principal o livro “Solar Engineering of Thermal Processes” de Duffie e Beckman é disponibilizado neste capítulo as equações detalhadas de forma organizada que disponibilize o entendimento do processo para cálculo da disponibilidade da energia solar com base unitária diária e horária.

2.3.1 Irradiação diária média mensal em um plano horizontal.

A irradiação diária média mensal total é realizada pelas medições nos locais feitos por equipamentos de medição chamados piranômetros. Com os dados dessas irradiações e aplicando a teoria disponibilizada pelo Duffie podemos encontrar as componentes de irradiação direta, difusa e albedo. Para alcançá-las precisa-se inicialmente da radiação extraterrestre em um determinado dia ou a radiação extraterrestre integrada diária média mensal.

A avaliação da radiação extraterrestre em um determinado dia pode ser feita pela Equação 2.1.

$$H_0 = 2,75 \cdot 10^4 \cdot GSC \cdot \left[1 + 0,033 \cdot \cos\left(\frac{360 \cdot n}{365}\right) \right] \cdot [1,75 \cdot 10^{-2} \cdot \omega_s \cdot \sin \delta \cdot \cos \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \sin \omega_s] \quad (2.1)$$

Aonde:

H_0 : radiação integrada diária sobre superfície horizontal, em MJ/m²;

GSC : é a constante solar, em 1353 W/m²

n : dia do ano, retirado da Tabela de Valores para avaliações mensais de Duffie.

δ : declinação Solar, em °.

ϕ : latitude do local, em °.

ω_s : ângulo horário do pôr do sol, calculado pela Equação (2.2)

$$\omega_s = \arccos\{-\tan(\phi) \cdot \tan(\delta)\} \quad (2.2)$$

A avaliação da radiação extraterrestre integrada diária média mensal é encontrada a partir da Equação 2.3.

$$\bar{H}_0 = \frac{1}{n} \sum_{1}^n H_0 \quad (2.3)$$

Aonde, " n " nesta expressão é o total de dias do mês considerado;

Estes valores estão disponíveis na Tabela 2.7, Tabela 1.10.1 de Duffie.

Tabela 2.7 Radiação Extraterrestre Diária Média Mensal

Table L10.1 Monthly Average Daily Extraterrestrial Radiation, MJ/m²

ϕ	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
90	0.0	0.0	1.2	19.3	37.2	44.8	41.2	26.5	5.4	0.0	0.0	0.0
85	0.0	0.0	2.2	19.2	37.0	44.7	41.0	26.4	6.4	0.0	0.0	0.0
80	0.0	0.0	4.7	19.6	36.6	44.2	40.5	26.1	9.0	0.6	0.0	0.0
75	0.0	0.7	7.8	21.0	35.9	43.3	39.8	26.3	11.9	2.2	0.0	0.0
70	0.1	2.7	10.9	23.1	35.3	42.1	38.7	27.5	14.8	4.9	0.3	0.0
65	1.2	5.4	13.9	25.4	35.7	41.0	38.3	29.2	17.7	7.8	2.0	0.4
60	3.5	8.3	16.9	27.6	36.6	41.0	38.8	30.9	20.5	10.8	4.5	2.3
55	6.2	11.3	19.8	29.6	37.6	41.3	39.4	32.6	23.1	13.8	7.3	4.8
50	9.1	14.4	22.5	31.5	38.5	41.5	40.0	34.1	25.5	16.7	10.3	7.7
45	12.2	17.4	25.1	33.2	39.2	41.7	40.4	35.3	27.8	19.6	13.3	10.7
40	15.3	20.3	27.4	34.6	39.7	41.7	40.6	36.4	29.8	22.4	16.4	13.7
35	18.3	23.1	29.6	35.8	40.0	41.5	40.6	37.3	31.7	25.0	19.3	16.8
30	21.3	25.7	31.5	36.8	40.0	41.1	40.4	37.8	33.2	27.4	22.2	19.9
25	24.2	28.2	33.2	37.5	39.8	40.4	40.0	38.2	34.6	29.6	25.0	22.9
20	27.0	30.5	34.7	37.9	39.3	39.5	39.3	38.2	35.6	31.6	27.7	25.8
15	29.6	32.6	35.9	38.0	38.5	38.4	38.3	38.0	36.4	33.4	30.1	28.5
10	32.0	34.4	36.8	37.9	37.5	37.0	37.1	37.5	37.0	35.0	32.4	31.1
5	34.2	36.0	37.5	37.4	36.3	35.3	35.6	36.7	37.2	36.3	34.5	33.5
0	36.2	37.4	37.8	36.7	34.8	33.5	34.0	35.7	37.2	37.3	36.3	35.7
-5	38.0	38.5	37.9	35.8	33.0	31.4	32.1	34.4	36.9	38.0	37.9	37.6
-10	39.5	39.3	37.7	34.5	31.1	29.2	29.9	32.9	36.3	38.5	39.3	39.4
-15	40.8	39.8	37.2	33.0	28.9	26.8	27.6	31.1	35.4	38.7	40.4	40.9
-20	41.8	40.0	36.4	31.3	26.6	24.2	25.2	29.1	34.3	38.6	41.2	42.1
-25	42.5	40.0	35.4	29.3	24.1	21.5	22.6	27.0	32.9	38.2	41.7	43.1
-30	43.0	39.7	34.0	27.2	21.4	18.7	19.9	24.6	31.2	37.6	42.0	43.8
-35	43.2	39.1	32.5	24.8	18.6	15.8	17.0	22.1	29.3	36.6	42.0	44.2
-40	43.1	38.2	30.6	22.3	15.8	12.9	14.2	19.4	27.2	35.5	41.7	44.5
-45	42.8	37.1	28.6	19.6	12.9	10.0	11.3	16.6	24.9	34.0	41.2	44.5
-50	42.3	35.7	26.3	16.8	10.0	7.2	8.4	13.8	22.4	32.4	40.5	44.3
-55	41.7	34.1	23.9	13.9	7.2	4.5	5.7	10.9	19.8	30.5	39.6	44.0
-60	41.0	32.4	21.2	10.9	4.5	2.2	3.1	8.0	17.0	28.4	38.7	43.7
-65	40.5	30.6	18.5	7.9	2.1	0.3	1.0	5.2	14.1	26.2	37.8	43.7
-70	40.8	28.8	15.6	5.0	0.4	0.0	0.0	2.6	11.1	24.0	37.4	44.9
-75	41.9	27.6	12.6	2.4	0.0	0.0	0.0	0.8	8.0	21.9	38.1	46.2
-80	42.7	27.4	9.7	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	5.0	20.6	38.8	47.1
-85	43.2	27.7	7.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.4	20.3	39.3	47.6
-90	43.3	27.8	6.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.4	20.4	39.4	47.8

Fonte: Duffie.

Para encontrar as componentes da irradiação total, sendo a irradiação direta e difusa diária média mensal na superfície horizontal é necessário utilizar o “Estudo Dedutivo de Componentes de Irradiação Direta e Difusa Diária Média Mensal” de Duffie.

Este estudo relaciona o índice de claridade com a irradiação diária média mensal na superfície horizontal (medida no local por piranômetros) e a radiação total extraterrestre diária média mensal.

O índice de claridade é dado pela fórmula abaixo 2.4.

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (2.4)$$

Com o índice de claridade é possível encontrar pela equação 2.5 e pela figura 2.4 a razão da irradiação difusa e direta diária média mensal.

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0,775 + 0,00653 \cdot (\omega_s - 90) - [0,505 + 0,00455 \cdot (\omega_s - 90)] \cdot \cos[115 \cdot \bar{K}_T - 103] \quad (2.5)$$

Aonde:

$\bar{H}_d$: irradiação difusa diária média mensal na superfície horizontal.

$\bar{H}$: irradiação integrada diária média mensal na superfície horizontal

ω_s : ângulo horário do pôr do sol

O ângulo horário do pôr do sol é dado pela equação 2.6:

$$\omega_s = \text{Arcos}\{-\tan \phi \cdot \tan \delta\} \quad (2.6)$$

Aonde:

ϕ : latitude do local de estudo, em $^\circ$;

δ : declinação solar.

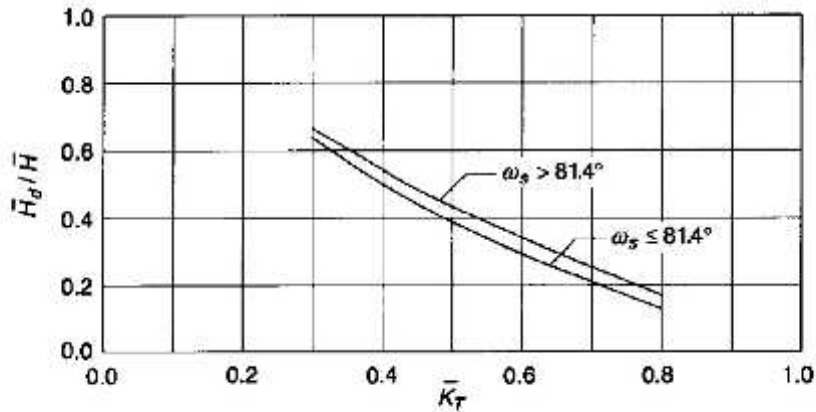


Figure 2.12.2 Suggested correlation of $\bar{H}_d/\bar{H}$ versus $\bar{K}_T$ and ω_s . Adapted from Erbs et al. (1982).

Figura 2.4 – Correlação do Índice de Claridade.

Para estudos de irradiação diária média mensal utiliza-se as informações de declinação solar para dias médios do mês. Essa informação pode ser retirada da tabela 2.8, na tabela 1.6.1 de Duffie.

Tabela 2.8 – Dias médios dos Meses Recomendados

Table 1.6.1 Recommended Average Days for Months and Values of n by Months^a

Month	n for i th Day of Month	For Average Day of Month		
		Date	n	$\bar{d}$
January	i	17	17	-20.9
February	$31 + i$	16	47	-13.0
March	$59 + i$	16	75	-2.4
April	$90 + i$	15	105	9.4
May	$120 + i$	15	135	18.8
June	$151 + i$	11	162	23.1
July	$181 + i$	17	198	21.2
August	$212 + i$	16	228	13.5
September	$243 + i$	15	258	2.2
October	$273 + i$	15	288	-9.6
November	$304 + i$	14	318	-18.9
December	$334 + i$	10	344	-23.0

^aFrom Klein (1977). Do not use for $|\phi| > 66.5^\circ$.

Com a relação de $\bar{H}_d/\bar{H}$ encontra-se a radiação difusa pela equação 2.7.

$$\bar{H}_d = \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \cdot \bar{H} \quad (2.7)$$

A radiação direta se dará pela equação 2.8.

$$\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d \quad (2.8)$$

As horas de Insolação é dada pela equação 2.9.

$$N = \frac{2}{15} \cdot \omega_s \quad (2.9)$$

2.3.2 Irradiação diária média mensal em um plano inclinado.

Existem três modelos para calcular a irradiação direta e difusa no plano inclinado, porém para estimar esta irradiação no plano inclinado com valores estimados por média diária mensal utiliza-se o modelo de irradiação média diária mensal sobre uma superfície inclinada fixa de Liu and Jordan (1962) modificado por Klein (1977).

Segundo o método de Liu e Jordan “considera-se que as superfícies estão direcionadas para o equador e, as irradiações difusa e refletiva podem ser consideradas isoentrópicas; temos

então a razão " $\bar{R}$ " (equação 2.10) de irradiação total média no plano inclinado ($\bar{H}_T$) e a radiação média total no plano horizontal ($\bar{H}$);”.

Obs.: Definem-se então os subscritos: b (beam) para radiação direta, d (difuse) radiação difusa e T (tilt) para superfícies inclinadas.

$$\bar{R} = \frac{\bar{H}_T}{\bar{H}} = \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \cdot \bar{R}_b + \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (2.10)$$

Portanto dividindo a equação 2.10 por $\bar{H}$ temos que H_T será:

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b \cdot \bar{R}_b + \bar{H}_d \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + \bar{H} \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (2.11)$$

Ou,

$$\bar{H}_T = \bar{H} \cdot \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \cdot \bar{R}_b + \bar{H}_d \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + \bar{H} \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (2.12)$$

Aonde respectivamente as irradiações diárias média mensal no plano inclinado direta, difusa e por refletividade do solo serão:

$$\bar{H}_{bT} = \bar{H} \cdot \left(1 - \frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}\right) \cdot \bar{R}_b \quad (2.13)$$

$$\bar{H}_{dT} = \bar{H}_d \cdot \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) \quad (2.14)$$

$$\bar{H}_{T(refl\ do\ solo)} = \bar{H} \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (2.15)$$

Liu and Jordan assumiram também que a razão $\bar{R}_b$, da irradiação direta diária média mensal e radiação direta diária média mensal no plano inclinado fosse estimada pelo seu valor sem a atmosfera, ou seja:

$$\bar{R}_b = \frac{\bar{H}_{bT}}{\bar{H}_b} \quad (2.16)$$

Portanto Liu e Jordan consideram que:

Para superfícies no hemisfério norte inclinadas diretamente para o Equador com ângulo do azimute “ γ ” é zero, temos:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \text{sen } \omega_s^* + (\pi/180) \cdot \omega_s^* \cdot \text{sen}(\phi - \beta) \cdot \text{sen } \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \text{sen } \omega_s + (\pi/180) \cdot \omega_s \cdot \text{sen } \phi \cdot \text{sen } \delta} \quad (2.17)$$

Nessa expressão o símbolo ω_s^* representa o ângulo horário do pôr do sol para a superfície inclinada no dia médio do mês (ver tabela 2.9), que pode ser calculado por:

$$\omega_s^* = \text{mínimo} - \text{entre} - [\arccos(-\tan \phi \cdot \tan \delta)] - e - [\arccos(-\tan(\phi - \beta) \cdot \tan \delta)] \quad (2.18)$$

Para superfícies no hemisfério sul inclinadas diretamente para o Equador ($\gamma = 180^\circ$) temos:

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cdot \cos \delta \cdot \text{sen } \omega_s^* + (\pi/180) \cdot \omega_s^* \cdot \text{sen}(\phi + \beta) \cdot \text{sen } \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \text{sen } \omega_s + (\pi/180) \cdot \omega_s \cdot \text{sen } \phi \cdot \text{sen } \delta} \quad (2.19)$$

e,

$$\omega_s^* = \text{mínimo} - \text{entre} - [\arccos(-\tan \phi \cdot \tan \delta)] - e - [\arccos(-\tan(\phi + \beta) \cdot \tan \delta)] \quad (2.20)$$

2.3.3 Irradiação horária a partir da Irradiação diária média mensal.

Segundo o livro Solar Engineering of Thermal Process “estudos estatísticos de distribuição horária da radiação total no plano horizontal por meio de informações médias para uma determinada informação numérica gerou a figura 2.5 da razão r_t que é em função da irradiação horária pela radiação mensal”, conforme equação 2.21.

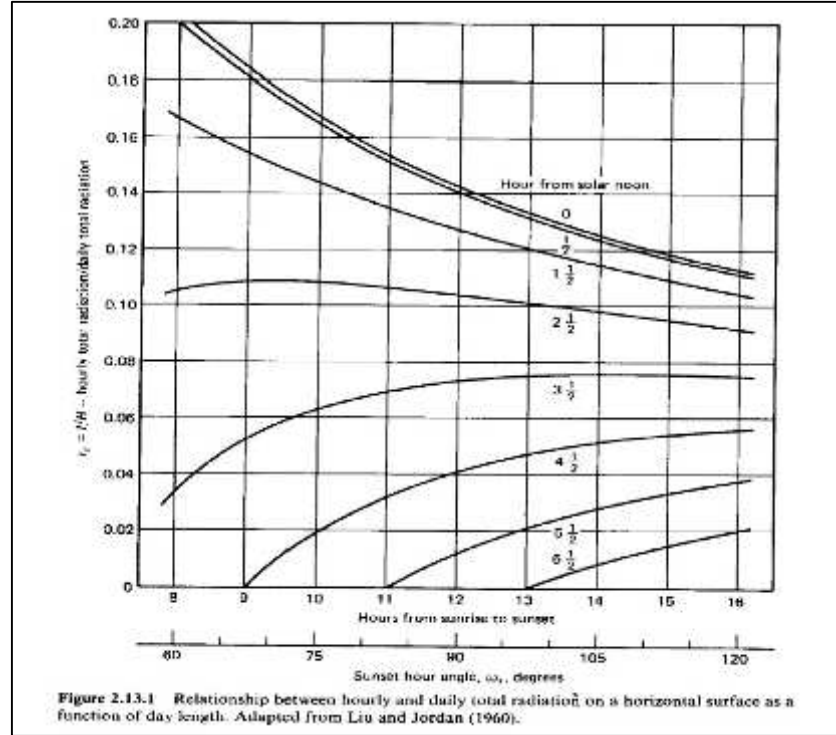


Figura 2.5 – Relação de Irradiações Horárias e Diárias.

$$r_t = \frac{I}{H} \quad (2.21)$$

ou

$$r_t = \frac{I}{\bar{H}} \quad (2.22)$$

Para obter o r_t temos as seguintes equações.

$$r_t = \frac{\pi}{24} \cdot (a + b \cdot \cos \omega) \cdot \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \cdot \omega_s}{180} \cdot \cos \omega_s} \quad (2.23)$$

Aonde os coeficientes a e b são dados por:

$$a = 0,409 + 0,5016 \cdot \sin(\omega_s - 60) \quad (2.24)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \cdot \sin(\omega_s - 60) \quad (2.25)$$

Da mesma forma se dá a relação entre a irradiação difusa horária I_d com a média diária mensal $\bar{H}$ se dá a relação $\frac{I_d}{\bar{H}_d}$.

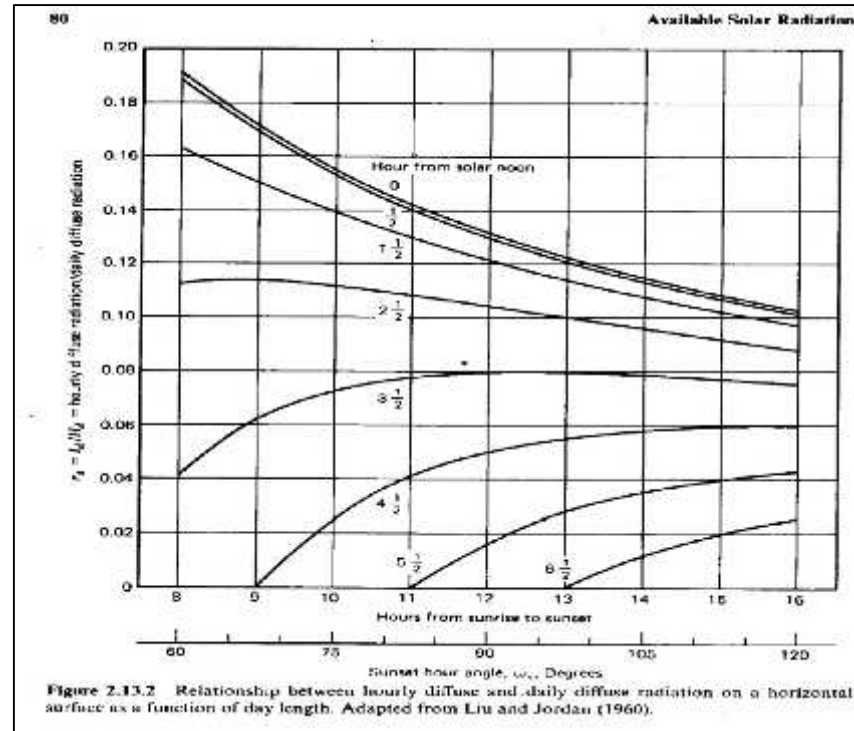


Figura 2.6 - Relação de Irradiações Horárias e Diárias Difusas

$$r_d = \frac{I_d}{\bar{H}_d} \quad (2.26)$$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \cdot \omega_s}{180} \cdot \cos \omega_s} \quad (2.27)$$

E para obter os resultados a radiação horária direta, temos:

$$I = I_b + I_d \quad (2.28)$$

Portanto para encontrar a razão r_t , é necessário obter o ω_s e o ω em um determinado horário e dia, para isso é necessário obter a Hora Solar (HS), latitude do local (ϕ), declinação solar (δ), número do dia do ano (n) e Cor (variável para cálculo de n).

Portanto as equações utilizadas serão:

$$\omega = (HS - 12) \cdot 15 \quad (2.29)$$

$$n = Dia + (Mes - 1) \cdot 30 + Cor \quad (2.30)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} Se\ Mes \leq 2 \rightarrow Cor = Int\left(\frac{Mes}{2}\right) \\ Se\ 2 < Mes \leq 8 \rightarrow Cor = \left(Int\left(\frac{Mes}{2}\right) - 2\right) \\ Se\ Mes > 8 \rightarrow Cor = \left(Int\left(\frac{Mes}{2} + \frac{1}{2}\right) - 2\right) \end{array} \right. \quad (2.31)$$

$$Se\ 2 < Mes \leq 8 \rightarrow Cor = \left(Int\left(\frac{Mes}{2}\right) - 2\right) \quad (2.32)$$

$$Se\ Mes > 8 \rightarrow Cor = \left(Int\left(\frac{Mes}{2} + \frac{1}{2}\right) - 2\right) \quad (2.33)$$

$$\delta = 23,45 \cdot Sen\left(\frac{360}{365} * (284 + n)\right) \quad (2.34)$$

2.3.4 Irradiação no plano inclinado a partir da Irradiação horária no plano horizontal.

Liu e Jordan consideraram que a radiação total sobre uma superfície inclinada é composta por radiação direta mais radiação difusa e mais radiação solar refletida difusamente pelo solo (albedo).

A razão “R” de radiação integrada horária no plano inclinado pela radiação no plano horizontal será:

$$R = \frac{I_T}{I} = \frac{I_b}{I} \cdot R_b + \frac{I_d}{I} \cdot \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (2.35)$$

Dividindo a equação 2.33 por I teremos a irradiação total integrada horária (I_T).

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) + I \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2}\right) \quad (2.36)$$

Aonde as irradiações integradas horárias no plano inclinado direta, difusa e por refletividade do solo serão:

$$I_{bT} = I_b R_b \quad (2.37)$$

$$I_{dT} = I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2}\right) \quad (2.38)$$

$$I_{T(\text{refletividade do solo})} = I \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2.39)$$

Para superfícies no hemisfério norte inclinadas diretamente para o Equador ($\gamma=0^\circ$) temos:

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (2.40)$$

e,

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.41)$$

Para superfícies no hemisfério sul inclinadas diretamente para o Equador ($\gamma = 180^\circ$) temos:

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin(\phi + \beta) \cdot \sin \delta}{\cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (2.42)$$

e,

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2.43)$$

Aonde θ_z é o ângulo zenital dado pela equação xxxxx .

$$\cos \theta_z = \sin(\delta) \cdot \sin(\Phi) + \cos(\delta) \cdot \cos(\Phi) \cdot \cos(\omega)$$

Para encontrar irradiação no plano inclinado total, e suas componentes direta, difusa e refletividade do solo teremos a seguinte relação entre I (J/m²h) e G (W/m²).

$$G = I \frac{J}{m^2 h} \cdot 1 \frac{h}{3600s} = \frac{I}{3600} \cdot \frac{W}{m^2} \quad (2.44)$$

Obs: $\frac{J}{s} = W$

Portanto:

$$G_T = \frac{I_T}{3600} \quad (2.45)$$

Segue a mesma sequência para as outras irradiações.

$$G_{bT} = \frac{I_{bT}}{3600} \quad (2.46)$$

$$G_{dT} = \frac{I_{dT}}{3600} \quad (2.47)$$

$$G_{T(\text{refletividade do solo})} = \frac{I_{(\text{refletividade do solo})}}{3600} \quad (2.48)$$

Aonde:

G_T : irradiação total na superfície inclinada.

G_{bT} : irradiação total direta na superfície inclinada.

$G_{T(\text{refl do solo})}$: irradiação total por refletividade do solo na superfície inclinada

2.3.5 Irradiação Direta no Plano Normal.

A irradiação na superfície que se movem em vários caminhos prescritos, que são realizados normalmente por coletores concentradores são calculadas utilizando o ângulo de incidência. Os subscritos “bn” indica beam normal (direta normal).

$$G_{bn} = \frac{G_{bT}}{\cos \theta} \quad (2.49)$$

Segundo Duffie, se as informações de radiação sobre a superfície horizontal foram usadas deve-se aplicar

Alguns coletores não movimentam em todos os eixos, portanto para cada tipo de rastreador há uma equação que relaciona o ângulo de incidência θ .

Segundo Duffie “Para um plano sobre o eixo horizontal leste-oeste com um simples ajuste diário, o ângulo de incidência normal sobre a superfície para cada dia é dado pela equação 2.50.”

$$\cos \theta = \sin^2 \delta + \cos^2 \delta \cdot \cos \omega \quad (2.50)$$

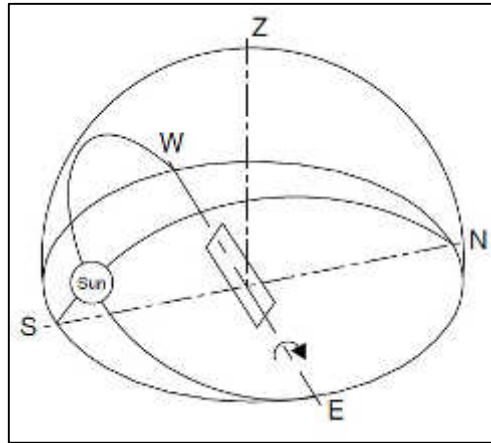


Figura 2.7 – Plano posicionado sobre o eixo horizontal leste-oeste com simples ajuste diário

Segundo Duffie “O ângulo para esta superfície fixa para cada dia será dado pela equação 2.51. ”

$$\beta = |\phi - \delta| \quad (2.51)$$

Segundo Duffie “O Ângulo de azimute para o dia será 0° ou 180° dependendo da latitude e declinação. ”

$$\gamma = \begin{cases} 0^\circ & \text{se } \phi - \delta > 0 \\ 180^\circ & \text{se } \phi - \delta \leq 0 \end{cases} \quad (2.52)$$

Para um plano sobre um eixo horizontal leste-oeste com contínuo ajuste para minimizar o ângulo de incidência é dada pela equação 2.53.

$$\cos \theta = (1 - \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega)^{1/2} \quad (2.53)$$

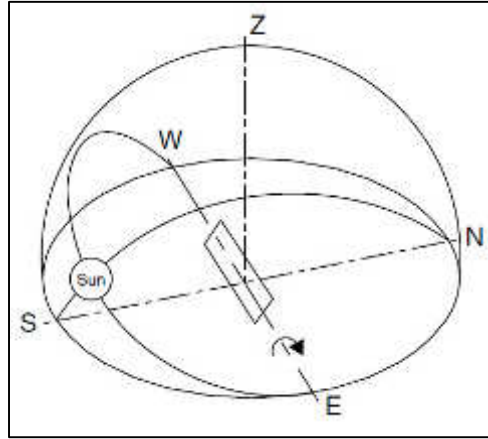


Figura 2.8 - Plano posicionado sobre o eixo horizontal leste-oeste com contínuo ajuste.

A curva para esta superfície será dada pela equação 2.54.

$$\tan \beta = \tan \theta_z \cdot |\cos \gamma_s| \quad (2.54)$$

O ângulo azimuth da superfície para este modo de orientação irá mudar entre 0° e 180° se o ângulo azimuth solar passa através $+90^\circ$ e -90° . Para este hemisfério o ângulo de azimuth será dado pela equação 2.55.

$$\gamma = \begin{cases} 0^\circ & \text{se } |\gamma_s| < 90 \\ 180^\circ & \text{se } |\gamma_s| \geq 90 \end{cases} \quad (2.55)$$

Para um plano sobre o eixo horizontal norte-sul com contínuo ajuste para minimizar o ângulo de incidência, o ângulo de incidência é dado pela equação 2.56.

$$\cos \theta = (\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega)^{\frac{1}{2}} \quad (2.56)$$

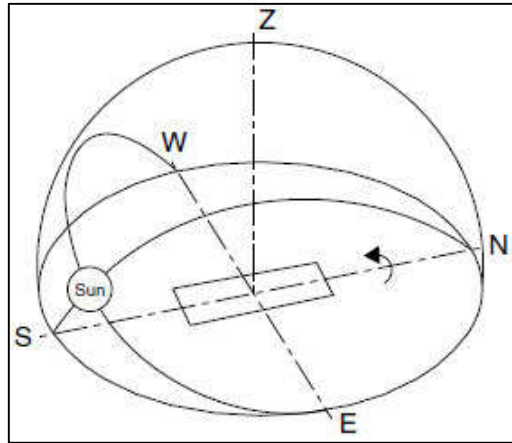


Figura 2.9 - Plano posicionado sobre o eixo norte-sul com contínuo ajuste.

A curva é dada pela equação 2.57.

$$\tan \beta = \tan \theta_z \cdot |\cos(\gamma - \gamma_s)| \quad (2.57)$$

O ângulo azimute da superfície γ será 90° ou -90° dependendo do ângulo do azimute solar.

$$\gamma = \begin{cases} 90^\circ & \text{se } \gamma_s > 90^\circ \\ -90^\circ & \text{se } \gamma_s \leq 0^\circ \end{cases} \quad (2.58)$$

Para um plano com inclinação fixa rotacionado sobre o eixo vertical, o ângulo de incidência é minimizado quando o azimute da superfície e o ângulo do azimute solar são iguais (ou seja, a inclinação da superfície é igual a latitude). Portanto o ângulo de incidência é dado pela equação 2.59.

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cdot \cos \beta + \sin \theta_z \cdot \sin \beta \quad (2.59)$$

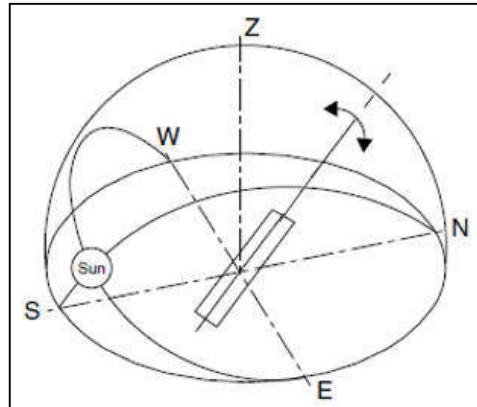


Figura 2.10 - Plano com inclinação fixa rotacionado sobre o eixo vertical.

A inclinação é fixa e constante.

$$\beta = \text{constante} \quad (2.60)$$

O ângulo do azimute da superfície é

$$\gamma = \gamma_s \quad (2.61)$$

Para um plano rotacionado sobre o eixo norte-sul paralelo ao eixo da terra (ou seja, com ângulo igual latitude) com continuo ajuste para minimizar o ângulo de incidência temos a seguinte equação.

$$\cos \theta = \cos \delta \quad (2.62)$$

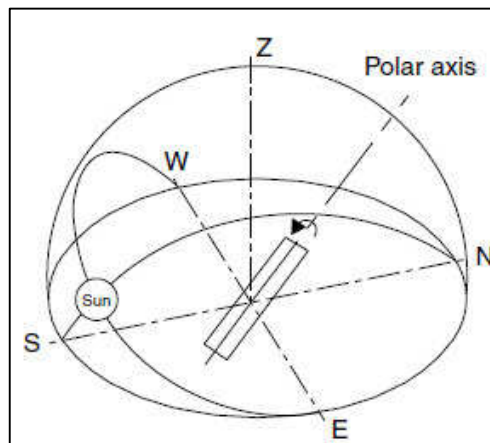


Figura 2.11 – Plano rotacionado sobre o eixo norte-sul paralelo ao eixo da terra.

A inclinação varia continuamente e é dada pela equação 2.63.

$$\tan \beta = \frac{\tan \phi}{\cos \gamma} \quad (2.63)$$

O ângulo do azimute da superfície é

$$\gamma = \tan^{-1} \frac{\sin \theta_z \cdot \sin \gamma_s}{\cos \theta' \cdot \sin \theta} + 180 \cdot C1 \cdot C2 \quad (2.64)$$

Aonde

$$\cos \theta' = \cos \theta_z \cdot \cos \phi + \sin \theta_z \cdot \sin \phi \cdot \cos \gamma_s \quad (2.65)$$

$$C1 = \begin{cases} 0 & \text{se } \left(\tan^{-1} \frac{\sin \theta_z \cdot \sin \gamma_s}{\cos \theta' \cdot \sin \theta} \right) \gamma_s \geq 90 \\ +1 & \text{de outra maneira} \end{cases} \quad (2.66)$$

$$C2 = \begin{cases} +1 & \text{se } \gamma_s \geq 0 \\ -90^\circ & \text{se } \gamma_s < 0 \end{cases} \quad (2.67)$$

Para um plano que está continuamente ajustando sobre os dois eixos para minimizar o ângulo de incidência, temos.

$$\cos \theta = 1 \quad (2.68)$$

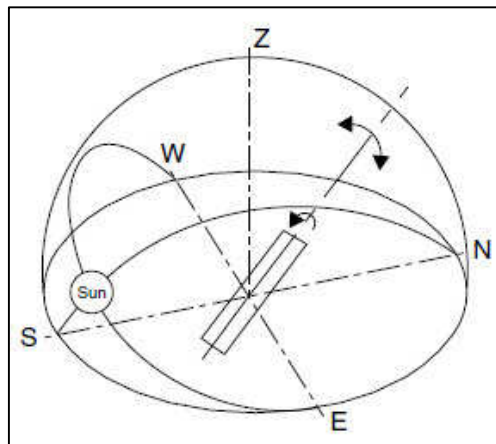


Figura 2.12 – Plano com contínuo ajuste sobre os dois eixos.

$$\beta = \theta_z \quad (2.69)$$

$$\gamma = \gamma_s \quad (2.70)$$

2.4 Características dos coletores Solares utilizados neste estudo.

Segundo Kalogirou Coletores solares térmicos é um tipo especial de trocador de calor que transforma energia de radiação solar em energia de aquecimento e transfere este calor para o fluido (usualmente água, óleo térmico ou etileno glicol) que passa pelo coletor.

Há basicamente dois tipos de coletores solares: coletor estacionário e concentrador.

Os coletores estacionários são permanentemente fixos em uma posição e não rastreiam o sol.

Há três tipos de coletores que encaixam nessa categoria.

- ✓ Coletores Planos - Flat plate collectors (FPC);
- ✓ Coletor Parabólico Composto - Compound parabolic collectors (CPC);
- ✓ Coletor de Tubo Evacuado - Evacuated tube collectors (ETC).

Os coletores concentradores rastreiam o sol e possuem um dispositivo óptico (usualmente espelho de alta refletividade) que reflete a radiação direta para a superfície do absorvedor.

Os coletores que encaixam nessa categoria são:

- ✓ Rastreamento em um eixo (Single-axis tracking)
- ✓ Refletor Linear Fresnel (Linear Fresnel reflector (LFR))
- ✓ Coletor Parabólica tipo Calha (Parabolic trough collector (PTC))
- ✓ Coletor Cilíndrico tipo Calha (Cylindrical trough collector (CTC))

Rastreamento em dois eixos (Two-axes tracking)

- ✓ Refletor Parabólico tipo prato (Parabolic dish reflector (PDR))
- ✓ Coletor de Campo Heliostático (Heliostat field collector (HFC))

2.5 Teste de Desempenho de Coletores Solares.

Cada um dos tipos dos coletores apresentados no capítulo 2.5 possui modelos diferentes que podem apresentar resultados de melhor desempenho. Para identificar qual coletor é mais adequado a uma determinada aplicação é necessário identificar qual o desempenho de cada um.

O seu desempenho depende do balanço da sua absorção de calor e da sua perda para o meio. A figura 2.13 exemplifica o funcionamento.

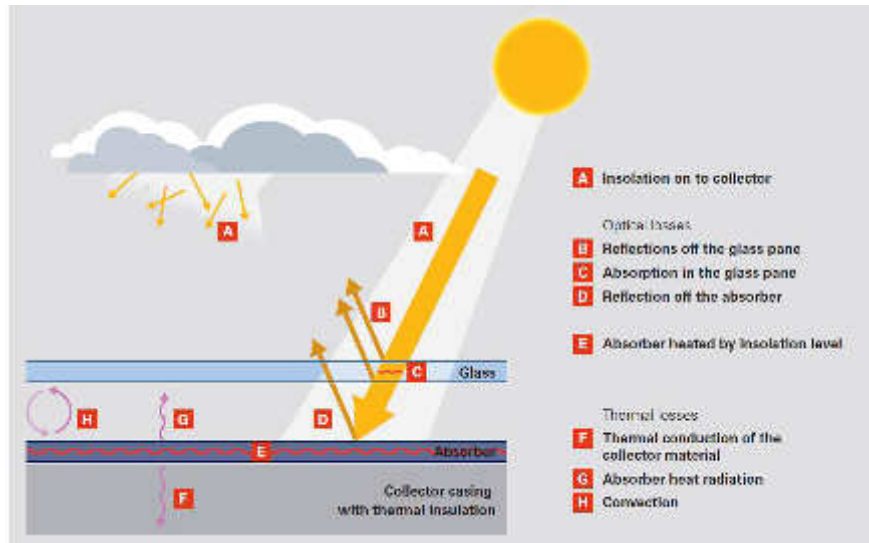


Figura 2.13 – Balanço de Energia de Coletores Solares

Fonte: Solar district heating (SDH)

A eficiência dos coletores estacionários pode ser calculada pelas equações 2.71 e 2.72 abaixo.

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_N - F_R U_L \cdot \frac{(T_{fi} - T_a)}{G_T} \quad (2.71)$$

Sendo:

η : Rendimento da Placa

F_R : Fator de Remoção de Calor

U_L : Coeficiente Global de Troca de Calor

τ : Transmitância do Vidro

α : Absortividade da Placa

T_{fi} : Inlet fluid temperature (temperatura de entrada do fluído)

T_a : Temperatura ambiente.

O índice (N) no produto $(\tau\alpha)_N$ indica estar este valor sendo medido para um ângulo de incidência da radiação igual a zero, a norma de ensaio indica as condições em que esta restrição é considerada como atendida.

G_T : Radiação incidente sobre a superfície inclinada.

$$\eta = \eta_0 - a_{1a} \cdot \frac{\Delta \bar{T}}{G_T} - a_{2a} \cdot \frac{\Delta \bar{T}^2}{G_T} \quad (2.72)$$

Ou,

$$\eta = \eta_0 - a_{1a} \cdot \frac{(T_{f,av} - T_a)}{G_T} - a_{2a} \cdot \frac{(T_{f,av} - T_a)^2}{G_T} \quad (2.73)$$

G_T : Irradiação solar no plano coletor [W / m²]

$T_{f,av}$: Temperatura média do fluido.

Parâmetros a serem fornecidos pelo fabricante:

η_0 : Rendimento quando a diferença de temperatura da placa e o ambiente é zero.

a_{1a} : Coeficiente de perda de calor de primeira ordem.

a_{2a} : Coeficiente de perda de calor de segunda ordem.

A: Área do coletor.

A equação 2.74 é utilizada para cálculo de eficiência dos coletores europeus utilizando coletores concentradores.

$$\eta = \eta_0 - a_{1a} \cdot \frac{(T_{f,av} - T_a)}{DNI} - a_{2a} \cdot \frac{(T_{f,av} - T_a)^2}{DNI} \quad (2.74)$$

Onde:

DNI é direct normal irradiation, ou seja a radiação direta incidente

Essa diferença de equações de primeira ordem e segunda ordem vem a ser o denominador que define o desempenho η . A equação de segundo grau utilizou-se para o cálculo de desempenho a área de abertura (Aperture area), quanto a equação de primeira ordem utilizou a Área total ocupada pelo coletor (Gross área).

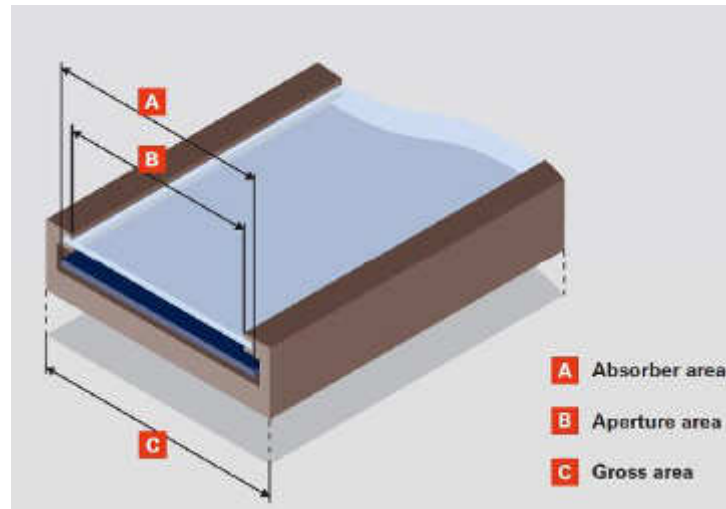


Figura 2.14 – Indicações dos tipos de área de coletores solares.

Comparação de diferentes maneiras de indicar a área do coletor
 Fonte: Daniel Trier, Plan Energi – Solar District Heating

Segundo Duffie “Não importa qual a área é utilizada, desde que seja especificado claramente, de modo que a mesma área de base possa ser usada em cálculos de desenvolvimentos seguintes.”

Por exemplo, se um coletor com seus parâmetros em uma equação de segundo grau baseado na área de abertura do coletor e que possui uma área de ocupação de $4,37 \text{ m}^2$, η_0 , a_{1a} e a_{2a} , o desempenho baseado na área ocupada pelo coletor pode ser obtido multiplicando o desempenho por $4,10/4,37$.

A temperatura T_{fi} utilizada na equação 2.71 é devido ao fator F_R realizado neste teste de desempenho em laboratório, que convencionou o aproveitamento de calor que é definido como a faixa de transferência de calor que ocorre quando há o maior ganho de energia pelo coletor, isso ocorre quando a temperatura total do fluido dentro do coletor é igual a temperatura de entrada do fluido.

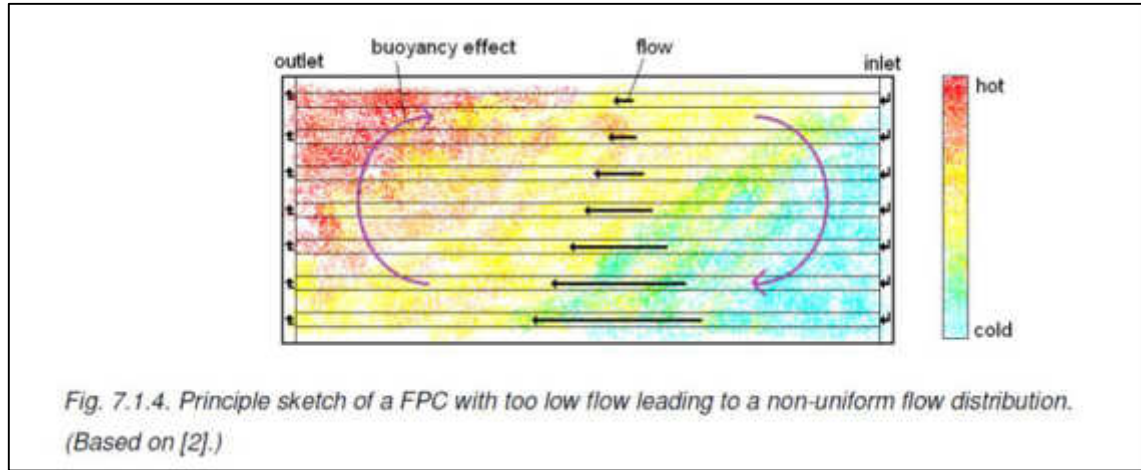


Figura 2.15 – Distribuição Interna de Temperaturas de Coletores Solares.

Na equação 2.72 ou 2.73 usual na Europa, utiliza a temperatura média aritmética do fluido na entrada e saída. Existe uma relação típica para coletores de aquecimento de líquidos que Duffie sugere utilizar a temperatura de placa T_{pm} e T_{fi} que segue na equação 2.x.

Segundo Duffie, dados de testes de coletores são expressados nos Estados Unidos em $\frac{(T_{fi}-T_a)}{G_T}$. Outros países expressam a função em $\frac{(T_{f,av}-T_a)}{G_T}$ ou $\frac{(T_{f,av}-T_a)}{DNI}$. As informações de teste exibidas em $T_{f,av}$ representa a média aritmética das temperaturas do fluido de entrada e saída (equação 2.75).

$$T_{f,av} = \frac{(T_{fi} + T_{fo})}{2} \quad (2.75)$$

Se a equação está no formato da equação 2.76 é possível obter a equação 2.77.

$$\eta = F_R(\tau\alpha)_N - F_R U_L \cdot \frac{(T_{fi} - T_a)}{G_T} \quad (2.76)$$

$$\eta = F_{av}(\tau\alpha)_n - F_{av} U_L \cdot \frac{(T_{f,av} - T_a)}{G_T} \quad (2.77)$$

Para realizar esta conversão utiliza-se o fluxo do fluido que passa pelo coletor sendo possível assim obter os parâmetros da equação 2.77 utilizando as relações das equações 2.78, 2.79, 2.80 e 2.81.

$$F_R(\tau\alpha)_n = F_{av}(\tau\alpha)_n \cdot \left(1 + \frac{A_c F_{av} U_L}{2\dot{m}C_p}\right)^{-1} \quad (2.78)$$

$$F_{av}(\tau\alpha)_n = F_R(\tau\alpha)_n \cdot \left(1 - \frac{A_c F_R U_L}{2\dot{m}C_p}\right)^{-1} \quad (2.79)$$

$$F_R U_L = F_{av} U_L \cdot \left(1 + \frac{A_c F_{av} U_L}{2\dot{m}C_p}\right)^{-1} \quad (2.80)$$

e

$$F_{av} U_L = F_R U_L \cdot \left(1 - \frac{A_c F_R U_L}{2\dot{m}C_p}\right)^{-1} \quad (2.81)$$

Nos Estados Unidos é prática comum adotar $T_{f,av}$ como a mesma temperatura T_{fi} .

3.2 Avaliação da Irradiação em Ribeirão Preto.

3.2.1 Avaliação da Irradiação Diária Média Mensal em Ribeirão Preto.

A partir da tabela 2.7 pode-se retirar a Irradiação Extraterrestre em Ribeirão Preto.

Todos as exemplificações de cálculos serão feitas para o mês de janeiro, portanto teremos:

$\bar{H}_0$ na Latitude de -20 em Janeiro temos:

$$41,8 \frac{MJ}{m^2 dia} \quad (3.0)$$

$\bar{H}_0$ na Latitude de -25 em Janeiro temos:

$$42,5 \frac{MJ}{m^2 dia} \quad (3.1)$$

Realizando a interpolação teremos a seguinte equação para encontrar os valores referente a Ribeirão Preto.

$\bar{H}_0$ na Latitude de $-21,18$ em janeiro será:

$$\bar{H}_0 = \frac{(42,5 - 41,8) \cdot (-21,18 - (-20,00))}{(-25,00 - (-20,00))} + 41,8 \frac{MJ}{m^2 dia} \quad (3.2)$$

$$\bar{H}_0 = 41,97 \frac{MJ}{m^2 dia} \quad (3.3)$$

Os dados do CRESESB estavam em kWh/m²dia para as radiações integradas diárias, e foi convertido para MJ/m²dia.

Em janeiro temos:

$$\bar{H} = 5,37 \frac{kWh}{m^2 dia} \cdot 3600 \frac{s}{h} \cdot \frac{1}{1000} \frac{MJ}{kW} = 19,33 \frac{MJ}{m^2 dia} \quad (3.4)$$

Segue abaixo os resultados obtidos para todos os meses do ano.

Tabela 3.3 Irradiações no plano Horizontal e Inclinado do CRESESB.

Mês	$\bar{H}$	$\bar{H}_T$
unidade	MJ/m²dia	MJ/m²dia
Jan	19,33	17,64
Fev	19,26	18,43
Mar	18,50	18,94
Abr	17,10	19,15
Mai	14,69	17,86
Jun	13,68	17,42
Jul	14,58	18,25
Ago	16,96	19,76
Set	17,53	18,54
Out	19,69	19,22
Nov	20,77	19,12
Dez	19,26	17,35

Fonte dos dados: CRESESB, Elaboração própria.

Com a equação 2.4 foi possível encontrar o índice de claridade diário média mensal para o mês de janeiro.

$$\bar{K}_T = \frac{19,33}{41,97} \quad (3.5)$$

$$\bar{K}_T = 0,46 \quad (3.6)$$

Segundo a equação 2.5 o $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$ é em função do índice de claridade diário média mensal $\bar{K}_T$ e o ângulo horário do pôr do sol ω_s . O ω_s é em função da latitude Φ e da declinação solar δ . A declinação solar δ será retirada da tabela 2.8.

Portanto o ângulo horário do pôr do sol no dia médio do mês de janeiro será:

$$\omega_s = \text{Arcos}\{-\tan(-21,18) \cdot \tan(-20,9)\} \quad (3.7)$$

$$\omega_s = 98,51^\circ \quad (3.8)$$

Portanto a relação de $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$ será:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0,775 + 0,00653 \cdot (98,5 - 90) - [0,505 + 0,00455 \cdot (98,5 - 90)] \cdot \cos[115 \cdot 0,46 - 103] \quad (3.9)$$

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0,48 \quad (3.10)$$

Portanto:

$$\bar{H}_d = 0,48 \cdot \bar{H} \quad (3.11)$$

$$\bar{H}_d = 0,48 \cdot 19,33 = 9,30 \frac{MJ}{m^2 dia} \quad (3.12)$$

A radiação direta $\bar{H}_b$ será:

$$\bar{H}_b = \bar{H} - \bar{H}_d \quad (3.13)$$

$$\bar{H}_b = 1933 - 9,30 = 10,03 \frac{MJ}{m^2 dia} \quad (3.14)$$

Utilizando a equação 2.9 a duração da insolação no dia médio do mês de janeiro será:

$$N = \frac{2}{15} \cdot 98,5 \quad (3.15)$$

$$N = 13,13 \quad (3.16)$$

Portanto:

$$N = 13h + (60min \cdot 0,13) \quad (3.17)$$

$$N = 13h08min \quad (3.18)$$

A partir dos cálculos anteriores foram realizados mesmos cálculos para os outros meses do ano com a latitude de Ribeirão Preto de 21,18°.

Tabela 3.4 – Irradiações Diária Média Mensal no Plano Horizontal em Ribeirão Preto

MÊS	N	$\bar{H}_0$	$\bar{H}$	$\bar{H}_b$	$\bar{H}_d$	$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$	$\bar{K}_T$
mês	h:m	MJ/m²dia	MJ/m²dia	MJ/m²dia	MJ/m²dia	%	%
Jan	13:08	41,97	19,33	10,03	9,30	0,48	0,46
Fev	12:41	40,00	19,26	10,55	8,71	0,45	0,48
Mar	12:07	36,16	18,50	10,81	7,69	0,42	0,51
Abr	11:30	30,83	17,10	10,73	6,37	0,37	0,55
Mai	10:59	26,01	14,69	9,47	5,21	0,36	0,56
Jun	10:43	23,56	13,68	9,02	4,66	0,34	0,58
Jul	10:50	24,59	14,58	9,68	4,90	0,34	0,59
Ago	11:17	28,60	16,96	11,10	5,86	0,35	0,59
Set	11:53	33,97	17,53	10,40	7,13	0,41	0,52
Out	12:30	38,51	19,69	11,32	8,37	0,43	0,51
Nov	13:01	41,32	20,77	11,54	9,23	0,44	0,50
Dez	13:15	42,34	19,26	9,83	9,43	0,49	0,45

Nota-se que as maiores irradiações no plano horizontal são nos meses de janeiro, fevereiro, novembro e dezembro, onde aumentam as irradiância difusa e a direta e inversamente o índice de claridade.

O figura 3.1 resume parte dos dados da tabela 3.3.

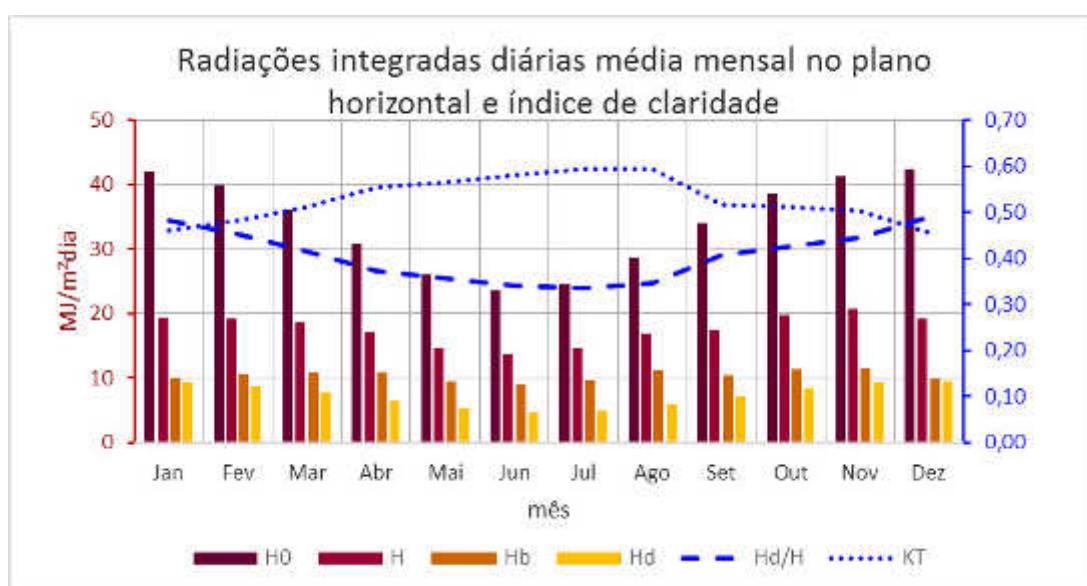


Figura 3.1 - Fonte: Oliveira.A – AGRENER - Irradiações Diária Média Mensal no Plano Horizontal em Ribeirão Preto

Para encontrar a irradiação no plano inclinado vamos considerar a inclinação da placa igual a latitude.

A radiação total no plano inclinado pode ser encontrada pela equação 2.11, O CRESESB também disponibilizou esta informação na tabela 3.1.

Os sistemas de medição de radiação das estações são feitos no plano horizontal, essa informação de radiação no plano inclinado foi calculada utilizando algum método que ainda não sabemos. A ideia é utilizar a radiação no plano inclinado do CRESESB para cálculo da razão R_b e comparar o resultado de R_b pelo método de Liu e Jordan.

O H_T está na inclinação igual a latitude, ou seja 21° .

Utilizando a equação 2.11, os dados do CRESESB da radiação diária no plano inclinado e isolando o R_b teremos:

$$\bar{R}_b = \frac{\frac{17,64}{19,33} - 0,48 \cdot \left(\frac{1 + \cos(21,18)}{2} \right) - 0,2 \cdot \left(\frac{1 - \cos(21,18)}{2} \right)}{(1 - 0,48)} \quad (3.19)$$

$$\bar{R}_b = 0,85 \quad (3.20)$$

Ou utilizando a fórmula 2.19 de Liu e Jordan para encontrar $\bar{R}_b$ teremos:

$$\omega_s^* = \text{mínimo} - \text{entre} - [\arcsin(-\tan(21,18) \cdot \tan -20,90)] - e - [\arcsin(-\tan(-21,18 + 23,5) \cdot \tan -20,9)] \quad (3.21)$$

$$\omega_s^* = \text{mínimo} - \text{entre} - [98,5^\circ] - e - [90^\circ] \quad (3.22)$$

$$\omega_s^* = 90^\circ \quad (3.23)$$

$$\bar{R}_b = \frac{\cos(-21,18 + 23,5) \cdot \cos -20,9 \cdot \sin 90 + \left(\frac{\pi}{180} \right) \cdot 90 \cdot \sin(-21,18 + 21,00) \cdot \sin -20,9}{\cos -21,18 \cdot \cos -20,9 \cdot \sin \omega_s + \left(\frac{\pi}{180} \right) \cdot 98,5 \cdot \sin -21,18 \cdot \sin -20,9} \quad (3.24)$$

$$\bar{R}_b = 0,86 \quad (3.25)$$

Os dados obtidos para os meses do ano encontram-se na tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Comparação de resultados de $\bar{R}_b$ obtidos com os do CRESESB .

Mês	$\bar{R}_b$	$\bar{R}_b$
unidade	Dados: CRESESB %	Dados obtidos por Liu e Jordan %
Jan	0,85	0,86
Fev	0,94	0,94
Mar	1,05	1,05
Abr	1,20	1,19
Mai	1,34	1,33
Jun	1,42	1,40
Jul	1,39	1,37
Ago	1,26	1,24
Set	1,11	1,10
Out	0,97	0,97
Nov	0,87	0,88
Dez	0,83	0,84

Os resultados obtidos de $\bar{R}_b$ pelas equações 3.19 e 3.24 estão realmente próximos. Isso demonstra que o CRESESB utiliza o método de Liu e Jordan para encontrar a radiação no plano inclinado.

Vamos adotar os resultados obtidos pelo método de Liu e Jordan de $\bar{R}_b$.

Obteremos os resultados da radiação diária média mensal no plano inclinado direta, difusa e por refletividade do solo pelas equações, 2.13, 2.14 e 2.15:

$$H_{bT} = 19,33 \cdot (1 - 0,48) \cdot 0,86 = 8,67 \frac{MJ}{m^2 dia} \quad (3.26)$$

$$H_{dT} = 9,30 \cdot \left(\frac{1 + \cos(21,00)}{2} \right) = 8,99 MJ/m^2 dia \quad (3.27)$$

$$H_{(refl do solo)} = 19,33 \cdot 0,2 \cdot \left(\frac{1 - \cos(21,00)}{2} \right) = 0,13 \frac{MJ}{m^2 dia} \quad (3.28)$$

Os resumos dos dados obtidos da radiação no plano inclinado encontram-se na tabela 3.6 e figura 3.2.

Tabela 3.6 - Irradiações Diária Média Mensal no Plano Inclinado em Ribeirão Preto

MÊS	$\bar{H}_T$	H_{bT}	H_{dT}	$H_{(refl\ do\ solo)}$	$\bar{R}$	$\bar{R}_b$
mês	MJ/m²dia	MJ/m²dia	MJ/m²dia	MJ/m²dia	%	%
Jan	17,77	8,65	8,99	0,13	0,92	0,86
Fev	18,43	9,88	8,42	0,13	0,96	0,94
Mar	18,86	11,30	7,43	0,13	1,02	1,05
Abr	19,01	12,74	6,16	0,12	1,11	1,19
Mai	17,70	12,57	5,04	0,10	1,21	1,33
Jun	17,25	12,66	4,50	0,09	1,26	1,40
Jul	18,07	13,24	4,74	0,10	1,24	1,37
Ago	19,58	13,81	5,66	0,11	1,15	1,24
Set	18,43	11,42	6,89	0,12	1,05	1,10
Out	19,21	10,99	8,09	0,13	0,98	0,97
Nov	19,23	10,17	8,92	0,14	0,93	0,88
Dez	17,53	8,29	9,11	0,13	0,91	0,84

Para obter irradiações totais sem muitas variações durante o ano utilizamos o plano inclinado igual latitude que favorece ao aumento da irradiância nos meses em que no plano horizontal eram menores. Isso acontece devido ao aumento da irradiação direta sobre o plano inclinado. Nos meses onde a irradiância era alta no plano horizontal ocorre uma queda da irradiância.

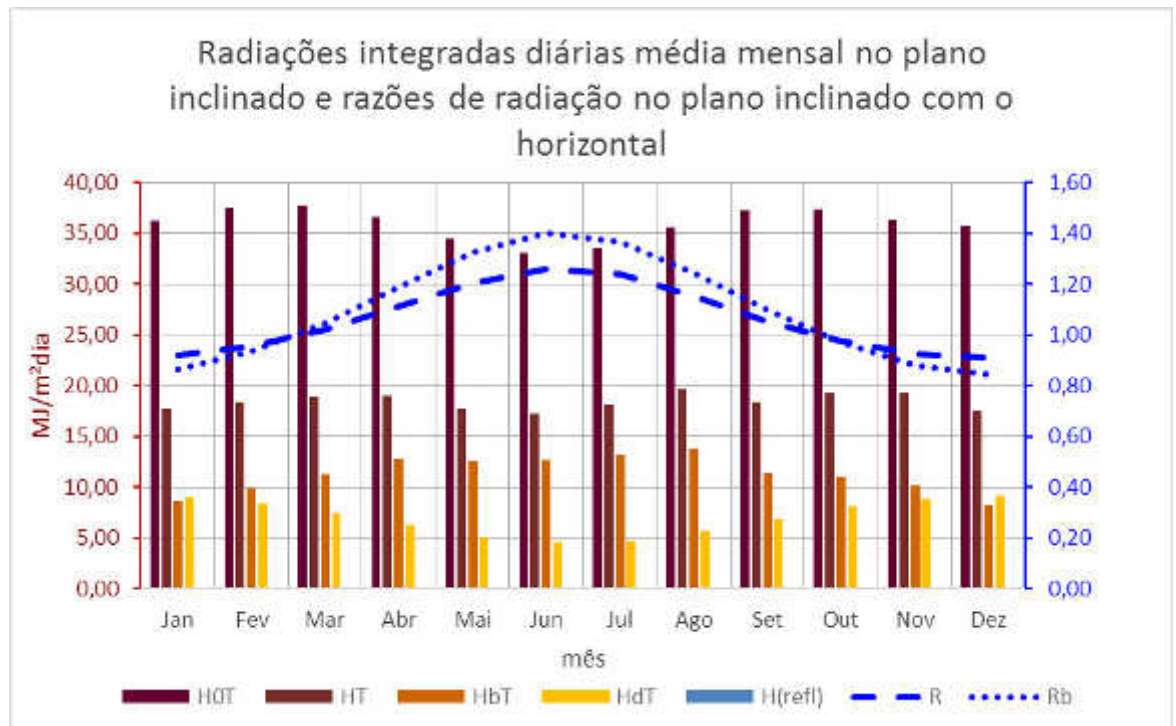


Figura 3.2 - Irradiações Diária Média Mensal no Plano Inclinado em Ribeirão Preto

3.2.2 Avaliação da Irradiação horária em Ribeirão Preto.

Devido aos processos da indústria do setor de alimentos trabalharem com temperaturas definidas ao processo envolvido, vamos apresentar o comportamento de energia hora a hora para que assim possamos identificar em qual momento do dia as temperaturas estarão ideais para o processo fabril.

Como os cálculos serão avaliados hora a hora será necessário utilizar os valores de ω_s e ω para sua respectiva hora do dia. Vamos continuar obtendo resultados do mês de janeiro, e definimos para exemplificar os cálculos o dia 01 de Janeiro na hora solar de 12,5hs (12h30min).

Portanto para encontrar a ω_s e ω será necessário obtermos os seguintes resultados para na Hora Solar (HS) de 12,5: latitude (Φ), declinação solar (δ), número do dia do ano (n), variável para cálculo de n (Cor).

Para facilitar a aplicação vamos também identificar a Hora legal da região e para isso serão necessários os seguintes dados: HS, Corhora, L_0 , L , E , B .

As equações para obter esses resultados são as 3.29, 3.30, 3.31, 3.32.

$$HS = HL + Corhora \quad (3.29)$$

$$Corhora = \frac{4 \cdot (L_0 - L) + E}{60} \quad (3.30)$$

$$E = 9,87 \cdot \text{Sen}(2B) - 7,53 \cdot \text{Cos}(B) - 1,5 \cdot \text{Sin}(B) \quad (3.31)$$

$$B = \left(\left(\frac{360}{364} \right) \cdot (n - 81) \right) \quad (3.32)$$

Com base nos resultados das equações 3.29, 3.30, 3.31, 3.32. podemos obter o dia do ano “ n ” e a declinação solar “ δ ”.

Mês de Janeiro é igual a 1, portanto:

$$n = 01 + (1 - 1) \cdot 30 + \text{Int} \left(\frac{1}{2} \right) = 1 \quad (3.33)$$

Utilizando a equação 3.34 teremos que a declinação solar será:

$$\delta = 23,45 \cdot \text{Sen}\left(\frac{360}{365} \cdot (284 + 1)\right) = -23,01^\circ \quad (3.34)$$

Com base na equação 3.29 obteremos que a HL na HS de 12,5 será:

$$B = \left(\left(\frac{360}{364}\right) \cdot (1 - 81)\right) = -79,12 \quad (3.35)$$

$$E = 9,87 \cdot \text{Sen}(2 \cdot -79,12) - 7,53 \cdot \text{Cos}(-79,12) - 1,5 \cdot \text{Sen}(-79,12) \quad (3.36)$$

$$E = -3,61 \quad (3.37)$$

$$L0 = 3,00 \quad (3.38)$$

$$L0 = 3,00 \cdot 15 \quad (3.39)$$

$$L0 = 45^\circ \quad (3.40)$$

$$L = 47,81 (W) \quad (3.41)$$

$$\text{Corhora} = \frac{4 \cdot (45^\circ - 47,81) + (-3,61)}{60} = -0,25 \quad (3.42)$$

$$HL = 12,5 - (-0,25) = 12,75h \text{ ou } 12h45min \quad (3.43)$$

Com base no resultado da declinação solar podemos obter ω_s pela equação 3.44.

$$\omega_s = \text{arcos}(-\text{Tan}(\phi) \cdot \text{Tan}(\delta)) \quad (3.44)$$

$$\omega_s = \text{arcos}(-\text{Tan}(-21,18) \cdot \text{Tan}(-23,01)) = 99,47^\circ \quad (3.45)$$

Pela equação 2.29 teremos o ω .

$$\omega = (12,5 - 12) \cdot 15 = 7,5^\circ \quad (3.46)$$

Para obter o r_t utilizaremos a fórmulas abaixo.

Os coeficientes a e b são dados pelas equações 2.24 e 2.25:

$$a = 0,409 + 0,5016 \cdot \text{sen}(99,47 - 60) = 0,73 \quad (3.47)$$

$$b = 0,6609 - 0,4767 \cdot \text{sen}(99,47 - 60) = 0,36 \quad (3.48)$$

$$r_t = \frac{\pi}{24} \cdot (0,73 + 0,36 \cdot \cos 7,5) \cdot \frac{\cos 7,5 - \cos 99,47}{\text{sen } 99,47 - \frac{\pi \cdot 99,47}{180} \cdot \cos 99,47} \quad (3.49)$$

$$r_t = 0,129 \quad (3.50)$$

Portanto a radiação integrada horária será I será dada pela equação 2.22:

$$I = r_t \cdot \bar{H} \quad (3.51)$$

$$I = 0,129 \cdot 19,33 = 2,49 \frac{MJ}{m^2h} \quad (3.52)$$

Com esses dados é possível encontrar o r_d e os valores da radiação horária difusa no plano horizontal I_d hora a hora pela equação 3.53.

$$I_d = r_d \cdot \bar{H}_d \quad (3.53)$$

Portanto utilizando as equações acima teremos os seguintes resultados.

$$r_d = \frac{\pi}{24} \cdot \frac{\cos 7,5 - \cos 99,47}{\text{sen } 99,47 - \frac{\pi \cdot 99,47}{180} \cdot \cos 99,47} = 0,12 \quad (3.54)$$

$$I_d = r_d \cdot \bar{H}_d \quad (3.55)$$

$$I_d = 0,12 \cdot 9,3 = 1,12 \frac{MJ}{m^2h} \quad (3.56)$$

Portanto a radiação direta integrada horária I_b será dada pela equação 3.58:

$$I = I_b + I_d \quad (3.57)$$

Isolando I_b :

$$I_b = I - I_d \quad (3.58)$$

$$I_b = 2,49 - 1,11 = 1,38 \frac{MJ}{m^2h} \quad (3.59)$$

Portanto, para se chegar a radiação horária no plano inclinado ($\beta = \phi$) total, direta, difusa e refletividade precisamos, $\phi, \beta, \delta, \omega, R_b, \rho_g$:

Portanto para superfícies no hemisfério sul inclinadas diretamente para o Equador ($\gamma = 180^\circ$) temos:

$$R_b = \frac{\cos(-21,18 \pm 21,18) \cdot \cos -23,01 \cdot \cos 7,5 + \sin(-21,18 + 21,18) \cdot \sin -23,01}{\cos -21,18 \cdot \cos -23,01 \cdot \cos 7,5 + \sin -21,18 \cdot \sin -23,01} \quad (3.60)$$

$$R_b = 0,92 \quad (3.61)$$

Portanto o I_T, I_{bT}, I_{dT} , e $I_{(refl\ do\ solo)}$ será:

$$I_{bT} = 1,38 \cdot 0,92 = 1,27 \frac{MJ}{m^2h} \quad (3.62)$$

$$I_{dT} = 1,11 \cdot \left(\frac{1 + \cos 21,18}{2} \right) = 1,07 \frac{MJ}{m^2h} \quad (3.63)$$

$$I_{T(refl\ do\ solo)} = 2,49 \cdot 0,2 \cdot \left(\frac{1 - \cos 21,18}{2} \right) = 0,02 \frac{MJ}{m^2h} \quad (3.64)$$

$$I_T = 1,27 + 1,07 + 0,02 = 2,36 \frac{MJ}{m^2 h} \quad (3.65)$$

Para encontrar a potência de radiação no plano inclinado total G_T , difusa G_{dT} , direta G_{bT} , e sua refletividade do solo $G_{T(refletividade\ do\ solo)}$ teremos.

$$G_{\frac{W}{m^2}} = I \frac{MJ}{m^2 h} \cdot 1 \frac{h}{3600s} \cdot 1.000.000 \frac{J}{MJ} = I \cdot \frac{1.000.000}{3600} \cdot \frac{J}{m^2 s} \quad (3.66)$$

$$G_{\frac{W}{m^2}} = I \cdot \frac{1.000.000}{3600} \cdot \frac{W}{m^2} \quad (3.67)$$

Portanto:

$$G_T = 2,36 \frac{MJ}{m^2 h} \cdot \frac{1.000.000}{3600s} \cdot \frac{J}{MJ} = \quad (3.68)$$

$$G_T = 655,07 \frac{W}{m^2} \quad (3.69)$$

$$G_{bT} = 1,27 \cdot \frac{MJ}{m^2 h} \cdot \frac{1.000.000}{3600s} \cdot \frac{J}{MJ} \quad (3.70)$$

$$G_{bT} = 353,37 \frac{W}{m^2} \quad (3.71)$$

$$G_{dT} = 1,07 \cdot \frac{MJ}{m^2 h} \cdot \frac{1.000.000}{3600s} \cdot \frac{J}{MJ} \quad (3.72)$$

$$G_{dT} = 297,03 \frac{W}{m^2} \quad (3.73)$$

$$G_{T(refl\ do\ solo)} = 0,02 \cdot \frac{MJ}{m^2 h} \cdot \frac{1.000.000}{3600s} \cdot \frac{J}{MJ} \quad (3.74)$$

$$G_{T(refl\ do\ solo)} = 4,67 \frac{W}{m^2} \quad (3.75)$$

A radiação direta normal é necessária para este estudo, pois nele há um coletor tipo PTC. Portanto para encontrar a radiação normal direta precisamos do ângulo de incidência.

Para este coletor utilizaremos um ajuste manual diário do da inclinação do coletor “beta”, portanto para este tipo de coletor utilizaremos a equação 2.50 para encontrar o ângulo de incidência, a equação 2.51 para informar qual deve a inclinação de ângulo beta do coletor

$$\beta = |-21,18 - 23,01| \quad (3.76)$$

$$\beta = |-21,18 - 23,01| = 1,83 \quad (3.77)$$

$$\omega = (12,5 - 12) \cdot 15 \quad (3.78)$$

$$\omega = 7,5 \quad (3.79)$$

$$\theta = \arccos(\sin^2 - 23,01 + \cos^2 - 23,01 \cdot \cos 7,5) \quad (3.80)$$

$$\theta = 6,9 \quad (3.81)$$

Como estamos considerando que o concentrador está rastreando somente o ângulo zenital teremos um ângulo beta para cada dia portanto a radiação direta no plano inclinado G_{bT} será igual a radiação direta normal G_b , n para este tipo de rastreamento. Com isso para encontrar a radiação no plano inclinado a cada dia precisamos de um novo R_b que será dado pela equação 2.41.

$$\theta_z = \arccos(\sin(-23,01) \cdot \sin(-21,18) + \cos(-23,01) \cdot \cos(-21,18) \cdot \cos(7,5)) \quad (3.82)$$

$$\theta_z = 7,19 \quad (3.83)$$

$$R_b = \frac{\cos 6,9}{\cos 7,19} \quad (3.84)$$

$$R_b = 1,00 \quad (3.85)$$

$$G_{bn} = G_{bT} = G_b \cdot R_b \quad (3.86)$$

(1) Considerações.

Para o dia médio do mês de dezembro as irradiações na superfície horizontal G , G_b e G_d (figura 3.3) são maiores que irradiações na superfície inclinada ($\Phi = \beta$) G_T , G_{bT} , G_{dT} , e G_{reflet} ; pois as irradiações no plano horizontal favorecem a absorvidade da radiação solar pois o ângulo de incidência é menor. A irradiação direta normal como mostra a figura 3.4 demonstra que há uma maior incidência de radiação solar direta, tendo um pequeno ganho comparada a radiação direta no plano inclinado e praticamente igual a radiação no plano horizontal que no caso também se encontra com um ângulo de incidência baixo.

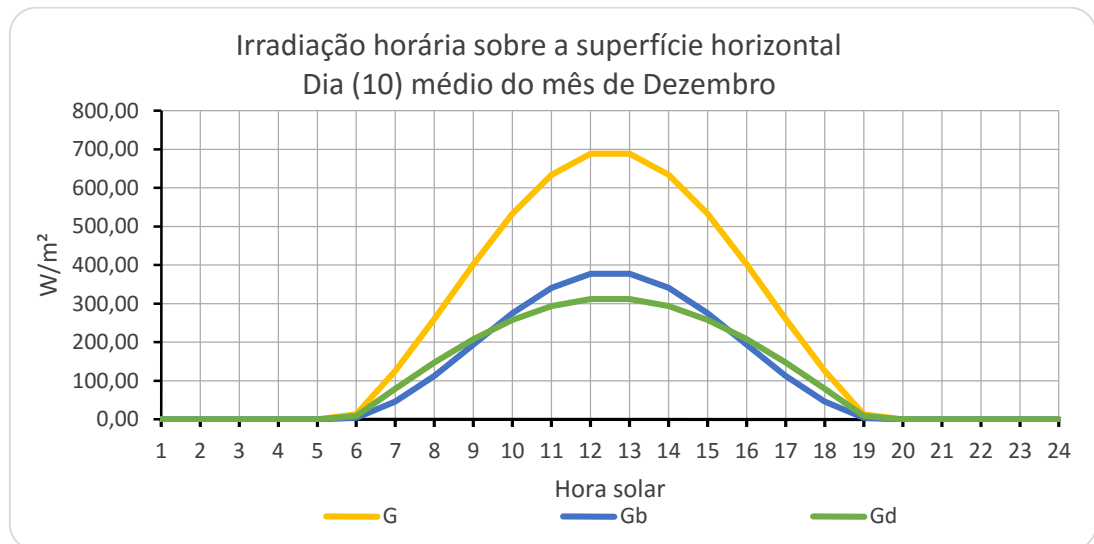


Figura 3.3 Fonte: Oliveira. & Pacheco - AGRENER - Irradiação horária sobre a superfície horizontal – Dia (10) médio do mês de dezembro

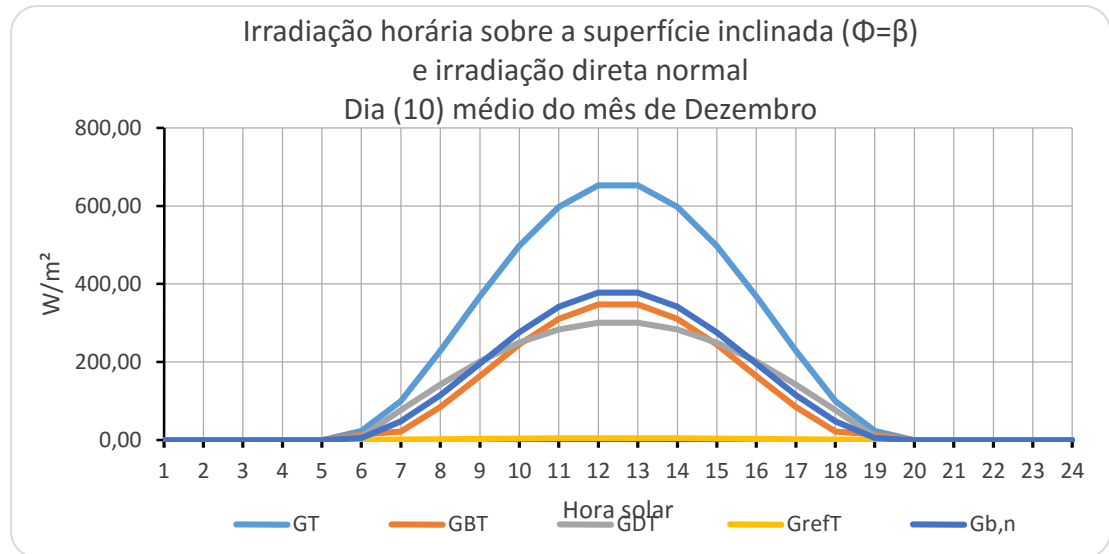


Figura 3.4 Fonte: Oliveira. & Pacheco - AGRENER - Irradiação horária sobre a superfície inclinada ($\Phi=\beta$) e irradiação direta normal – Dia (10) médio do mês de dezembro.

Para o dia médio do mês de junho as irradiações no plano inclinado estão perpendiculares a radiação solar, portanto elas possuem maior irradiação comparadas as do plano horizontal. A irradiação direta normal no mês de junho representa um ganho de irradiação comparada a irradiação no plano inclinado fixo.

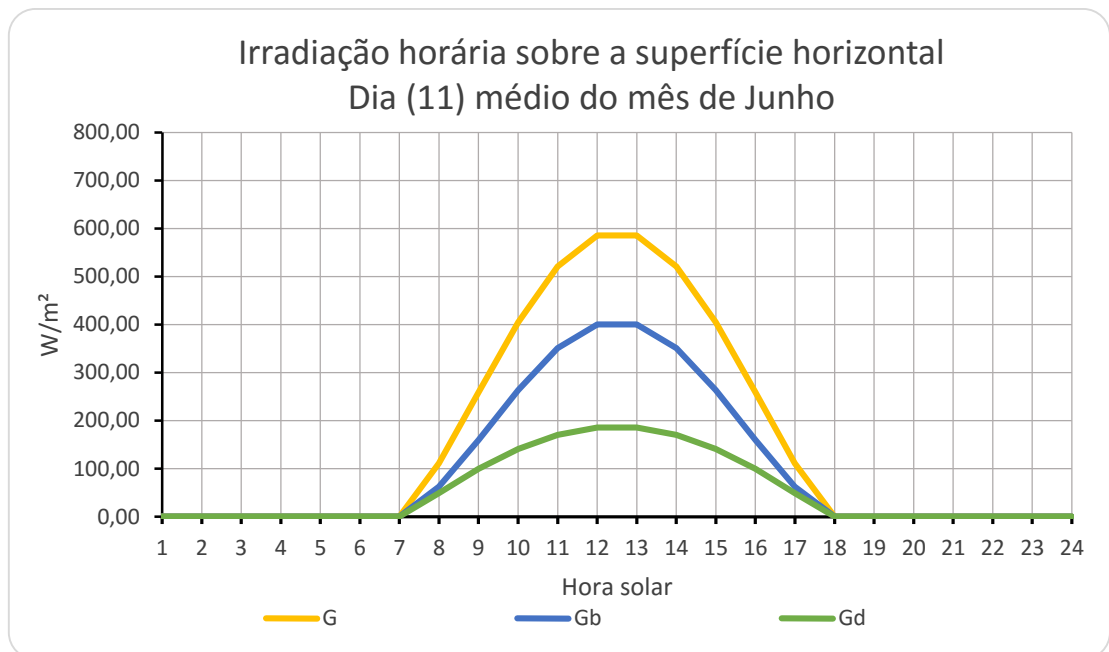


Figura 3.5 Irradiação horária sobre a superfície horizontal – Dia (11) médio do mês de junho.

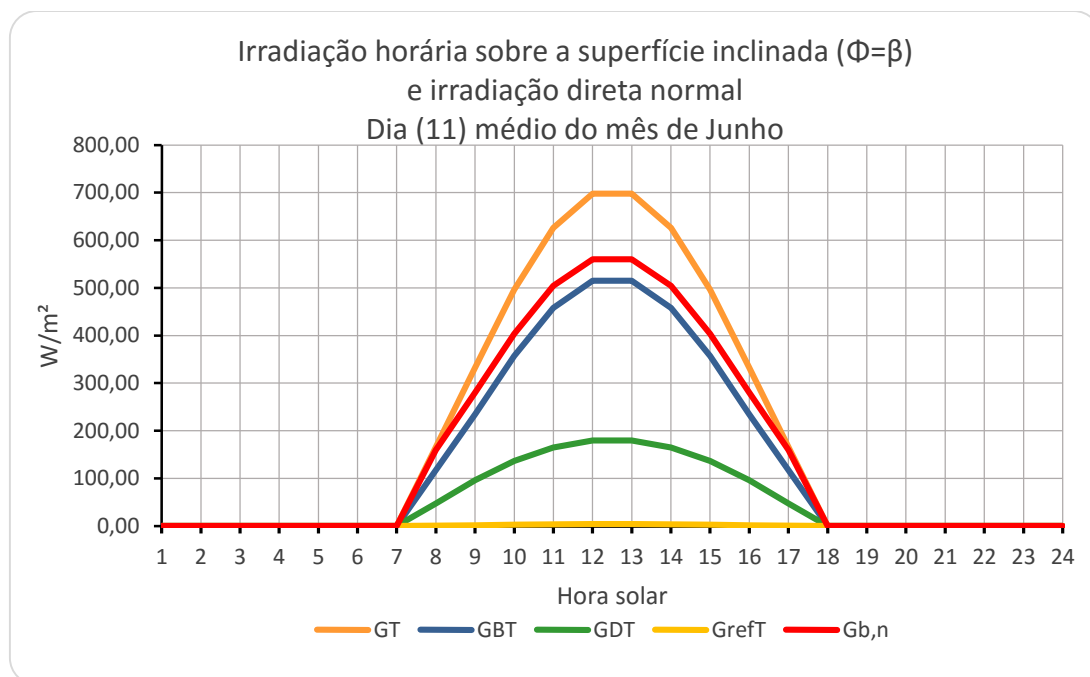


Figura 3.6 Irradiação horária sobre a superfície inclinada ($\Phi=\beta$) e irradiação direta normal – Dia (11) médio do mês de junho.

A radiação direta normal é igual a radiação direta normal no plano inclinado nos meses onde acontece o equinócio que é em março e setembro, conforme figura 3.7 e 3.8.

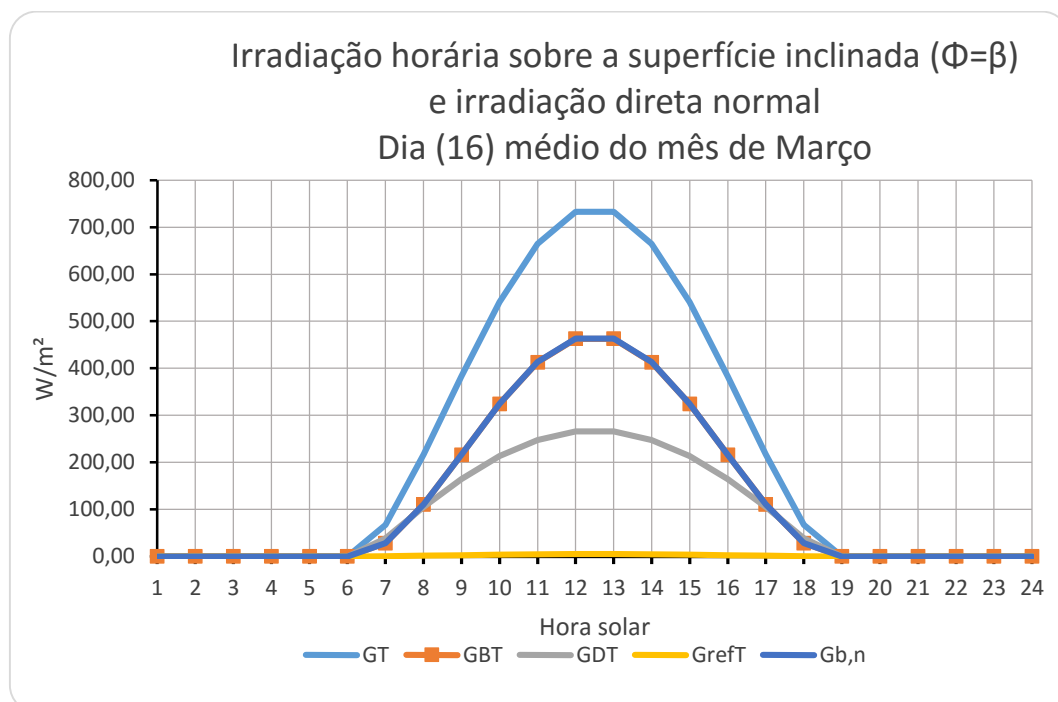


Figura 3.7 Irradiação horária sobre a superfície inclinada ($\Phi=\beta$) e irradiação direta normal – Dia (16) médio do mês de março.

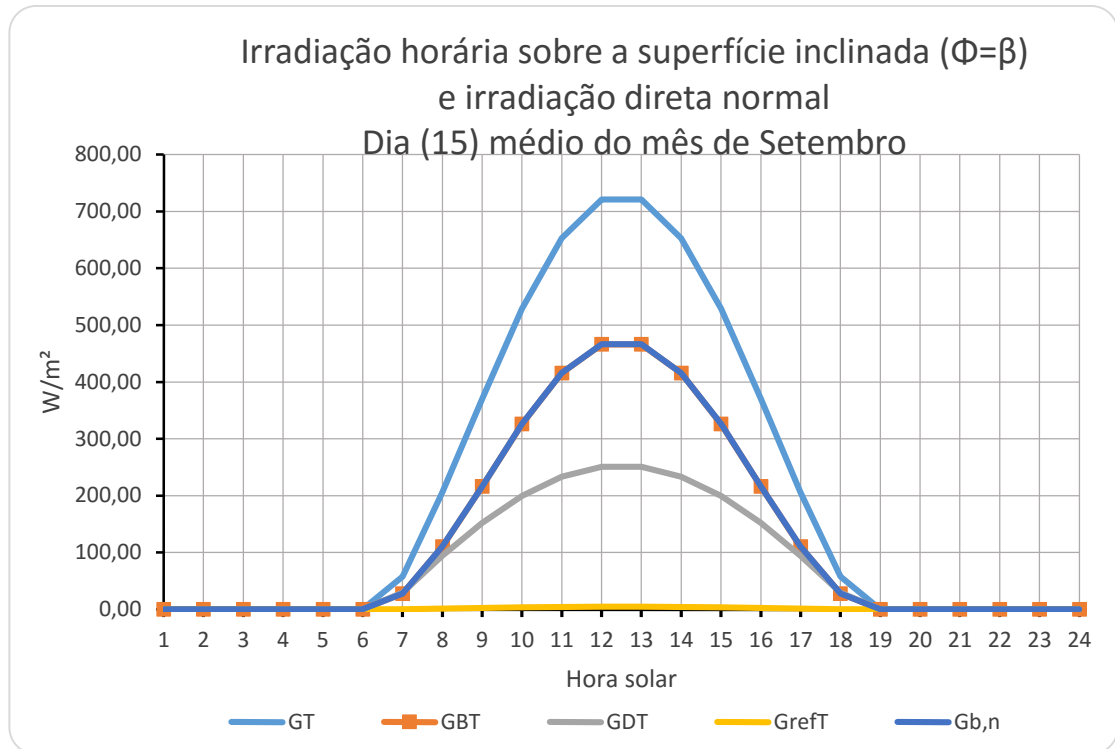


Figura 3.8 Irradiação horária sobre a superfície inclinada ($\Phi=\beta$) e irradiação direta normal – Dia (15) médio do mês de setembro.

Com base nos dados de temperatura máxima e mínima mensal da tabela 3.9 do CRESESB foi distribuído a temperatura durante cada horário do dia, como referência a distribuição de temperatura do clima tempo na região de Ribeirão Preto, considerando que a menor temperatura será às 05:30 hora solar e a máxima será às 14:30 e 15:30 hora solar, após as 15:30 ocorre uma queda da temperatura até as 5:30 da manhã do próximo dia.

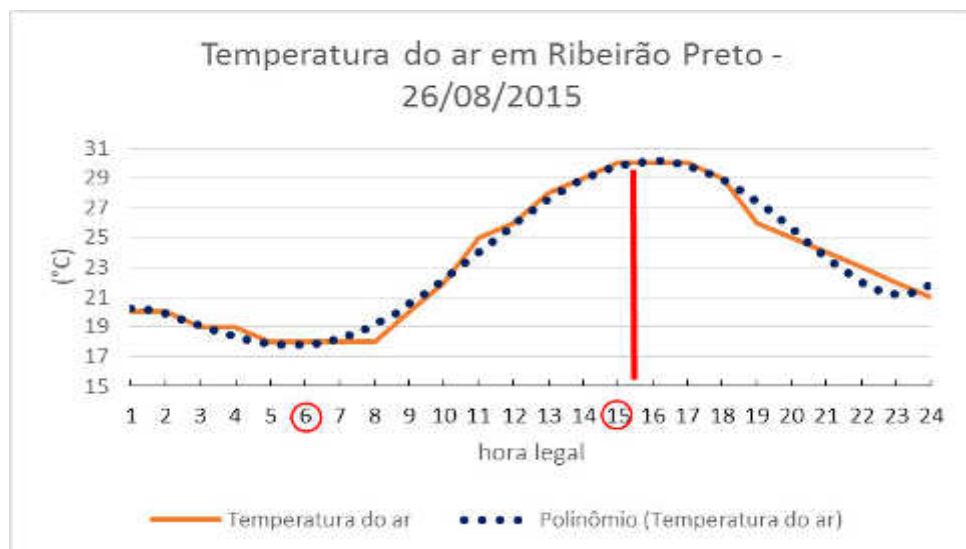


Figura 3.9 – Temperatura do Ar em Ribeirão Preto em 26/08/2015

Fonte: Clima Tempo

Por exemplo, a Tabela do CRESESB 3.2 temos as seguintes para janeiro a temperatura máxima 30°C e mínima 20°C. As temperaturas foram distribuídas conforme a figura 3.10.

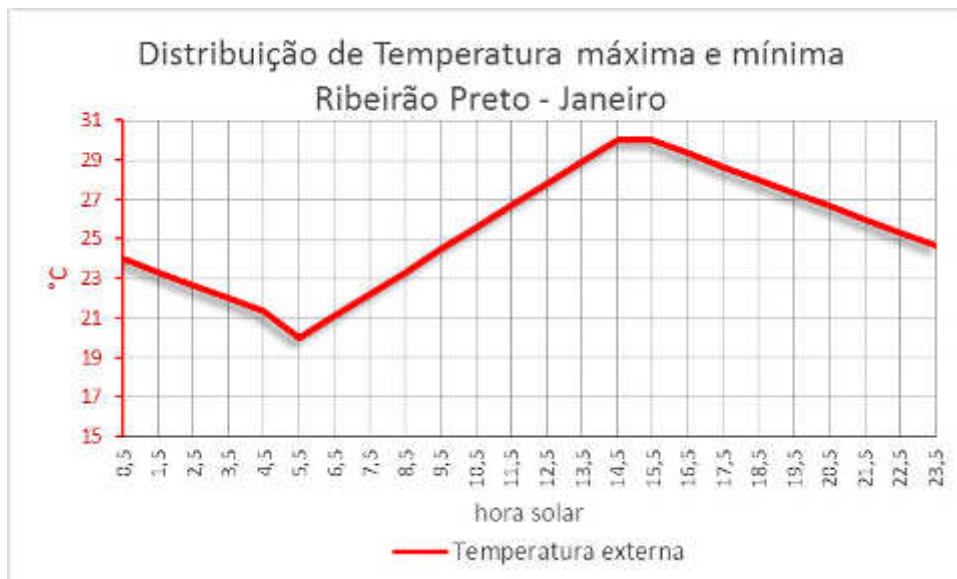


Figura 3.10 – Modelo de Distribuição de Temperatura em Ribeirão Preto.

3.3 Desempenho dos coletores solares.

A primeira é a determinação instantânea da eficiência com a radiação próxima a normal da placa absorvedora, com uma temperatura média externa fixa e variando a temperatura de entrada do fluido ou a temperatura média do fluido dependendo do método apresentado pelo fabricante.

A segunda é a determinação instantânea da eficiência com a radiação e temperatura do local de estudo com dados horários.

3.3.1 Desempenho dos coletores solares com dados médios.

(1) Desempenho dos coletores brasileiros.

A Tabela 3.8 abaixo mostra as características de alguns coletores solares disponíveis no Brasil conforme o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO).

Tabela 3.8 – Dados de Eficiência de coletores solares disponíveis no mercado brasileiro.

Coletor	Tipo	Mercado	Fabricante	Modelo	a_{2a}	a_{1a}	n_0
Coletor 1	FPC	Brasileiro	PRO-SOL	PRO - SOL TEC 1.9 V		-3,4100	0,7300
Coletor 2	FPC	Brasileiro	TRANSEN	ÔNIX 2.0		-9,8000	0,8200
Coletor 3	FPC	Brasileiro	PRO-SOL	BLUE Si 7 2.01 H		-3,7820	0,6360
Coletor 4	FPC	Brasileiro	SOLARIUM	PP 200		-14,7260	0,7800

Aonde:

Coletores Planos - Flat plate collectors (FPC);

Coletor Parabólico Composto - Compound parabolic collectors (CPC)

Coletor Parabólica tipo Calha (Parabolic trough collector (PTC))

Na figura 3.11 mostra a curva de eficiência dos coletores solares do mercado brasileiro. Utilizou-se a equação 2.71 de eficiência dos coletores solares e os dados da tabela 3.8 do INMETRO.

Dados adotados:

Temperatura do ar ambiente T_a a 20°C.

Radiação incidente adotada G a 800 W/m².

Temperatura do Fluido (T_{fi}): Variando entre 20°C e 200°C.

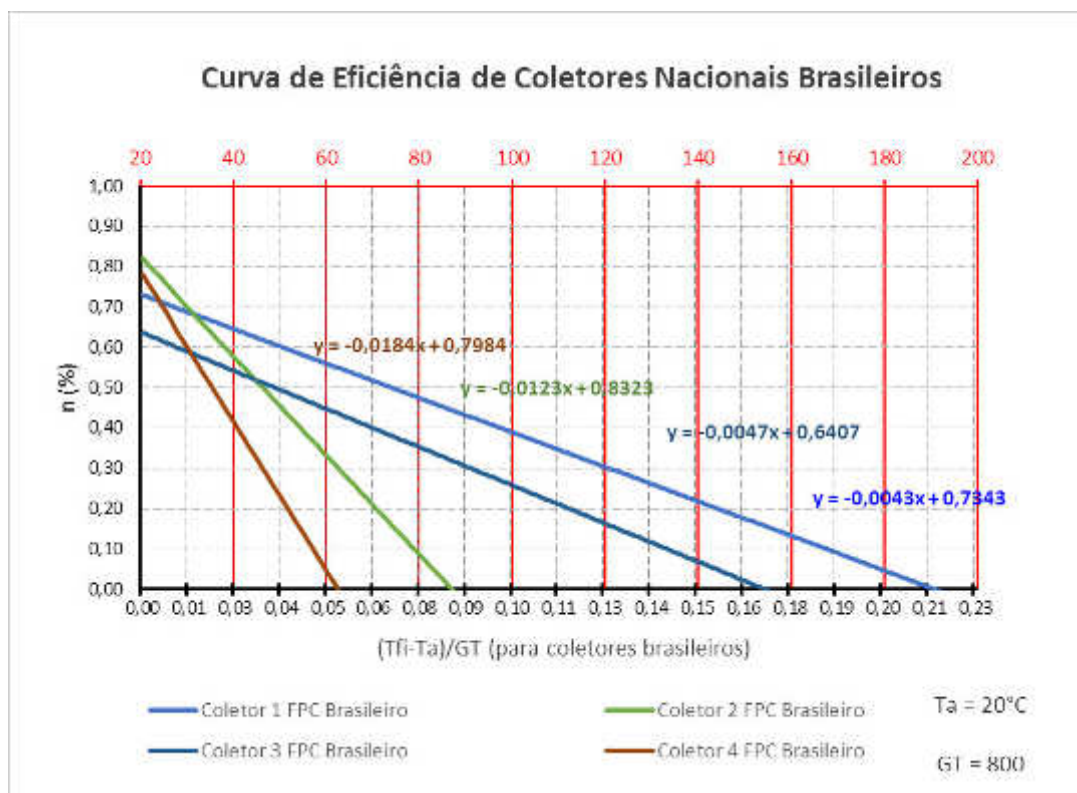


Figura 3.11 – Curva de eficiência de coletores solares nacionais brasileiros

(2) Desempenho dos coletores europeus.

A tabela 3.9 mostra os coletores europeus escolhidos (curva de 5 a 9), os FPC's europeus possuem um diferencial de dupla camada de vidro com antirreflexo e vácuo entre os dois vidros. Os coletores 7 e 8 são coletores parabólicos compostos, CPC (Compound parabolic collectors) e o coletor 9 é um coletor parabólico tipo calha, PTC (Parabolic trough collector).

Segue abaixo a tabela 2.9 com o resumo de alguns coletores europeus.

Tabela 3.9 - Dados de Eficiência de coletores solares disponíveis no mercado brasileiro.

Coletor	Tipo	Mercado	Modelo	a _{2a}	a _{1a}	n ₀
Coletor 5	FPC	Europeu	Double-Glazed Flat-Plate Collectors with Anti- Reflection Glass	-0,01	-2,5000	0,8000
Coletor 6	FPC	Europeu	SCHÜCO Double-Glazed Flat-Plate Collector	-0,02	-2,4000	0,8000
Coletor 7	CPC	Europeu	Ao Sol Stationary CPC Collector - Parabolic Fit	-0,01	-2,1000	0,6400
Coletor 8	CPC	Europeu	Solarfocus-CPC - collector	-0,08	-2,7000	0,8000
Coletor 9	PTC	Europeu	PTC 1000 - Modular parabolic trough collector	-0,001	-0,1123	0,7500

Dados: IEA SHC - TASK 33; IEA Solar PACES - TASK IV; Solar Heat for Industrial Processes.

Com base nos dados da tabela acima 3.9, foi possível construir as curvas de desempenho, figura 3.12.

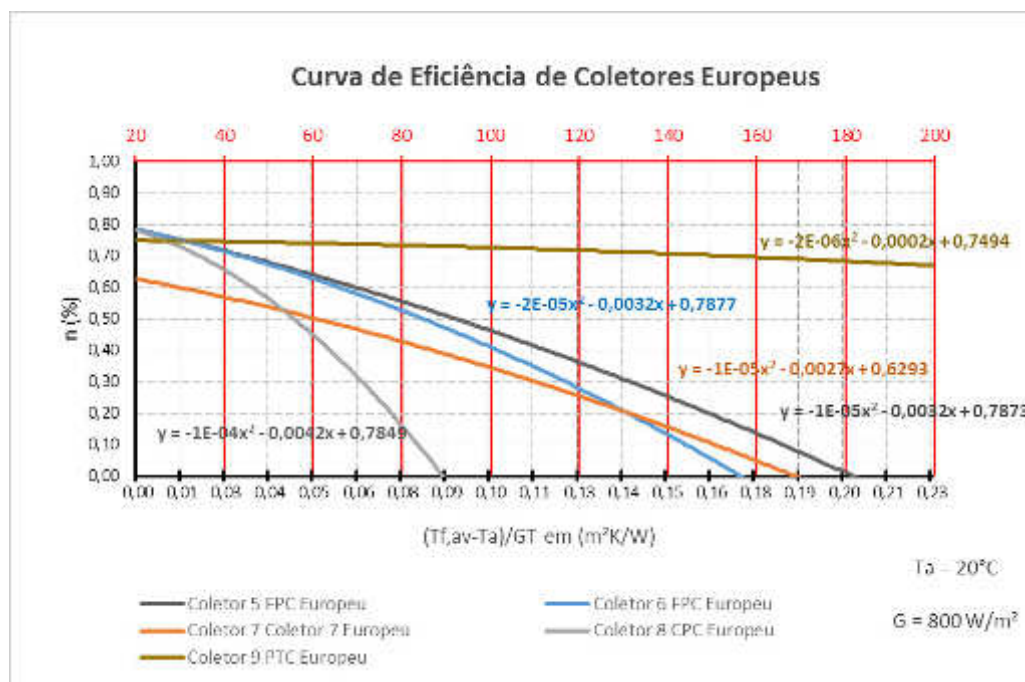


Figura 3.12 – Curva de eficiência de coletores disponíveis na Europa

(3) Comparação de desempenho de coletores solares brasileiros e europeus.

Para realizar a comparação adequada necessitaremos utilizar o método do capítulo 2.5 para converter os dados de temperatura média (T_f, av) e temperatura de entrada do fluido (T_{fi}), e também a conversão do rendimento pela área ocupada pelo coletor e o rendimento pela área de abertura do coletor.

Para encontrar a temperatura média precisamos do fluxo de massa utilizado nos testes para levantamento da curva de desempenho do coletor. Apesar da maioria dos fluxos de massa utilizados ser de $0,02 \frac{kg}{sm^2}$, vamos utilizar uma relação típica que no capítulo 6,9 de Duffie que diz que a temperatura média de fluido e temperatura média de placa para coletores com fluido líquidos, sendo expressa pela equação 3.90.

$$T_{pm} = T_{f,av} + 10^\circ \quad (3.90)$$

Para encontrar uma relação que seja aceitável consideraremos que a temperatura de saída do fluido é metade da somatória da temperatura média de placa e temperatura média de fluido.

$$T_{fo} \cong \frac{T_{pm} + T_{f,av}}{2} \quad (3.91)$$

Portanto:

$$T_{fo} = \frac{(T_{f,av} + 10^\circ C) + T_{f,av}}{2} \quad (3.92)$$

$$T_{fo} = T_{f,av} + 5^\circ C \quad (3.93)$$

A temperatura média de fluido é dada pela equação 3.94.

$$T_{f,av} = \frac{T_{fi} + T_{fo}}{2} \quad (3.94)$$

Substituindo T_{fo} da equação 3.94 na equação 3.93 teremos

$$T_{f,av} = \frac{T_{fi} + (T_{f,av} + 5^{\circ}C)}{2} \quad (3.95)$$

$$T_{f,av} = T_{fi} + 5 \quad (3.96)$$

A relação de conversão das equações que utilizam a área de abertura e área ocupada pelo coletor, considerou-se.

Para os coletores escolhidos diferença de área ocupada e área de abertura é relativamente pequena, portanto consideramos que esta relação representa 95%.

$$\frac{A_{ab}}{A_{oc}} = 0,95 \quad (3.97)$$

Portanto o desempenho dos coletores que estão em equações de segunda ordem e seu rendimento pela área de abertura, representará em área ocupada pelo coletor pela equação 3.98.

$$\eta = \eta_0 \cdot 0,95 - a_{1a} \cdot 0,95 \cdot \frac{(T_{f,av} - T_a)}{G_T} - a_{2a} \cdot 0,95 \cdot \frac{(T_{f,av} - T_a)^2}{G_T} \quad (3.98)$$

Para os coletores escolhidos diferença de área ocupada e área de abertura é relativamente pequena, portanto consideramos que esta relação representa 95%.

(a) Principais Resultados e Considerações.

A curva de eficiência na figura 3.13 demonstra que alguns coletores possuem ótima eficiência em baixas temperaturas, no entanto quando ocorre o aumento da temperatura do fluido a eficiência cai apresentando uma melhor eficiência de outros coletores que tinha um rendimento um pouco menor em baixas temperatura de fluido. A escolha do coletor mais adequado deve ser realizada definindo-se a faixa de temperatura a se trabalhar.

O figura 3.13 nos mostra que um dos quatro coletores disponíveis no Brasil tem boa eficiência comparadas aos coletores europeus. O coletor PTC curva 9 possui ótima eficiência mesmo em altas temperaturas

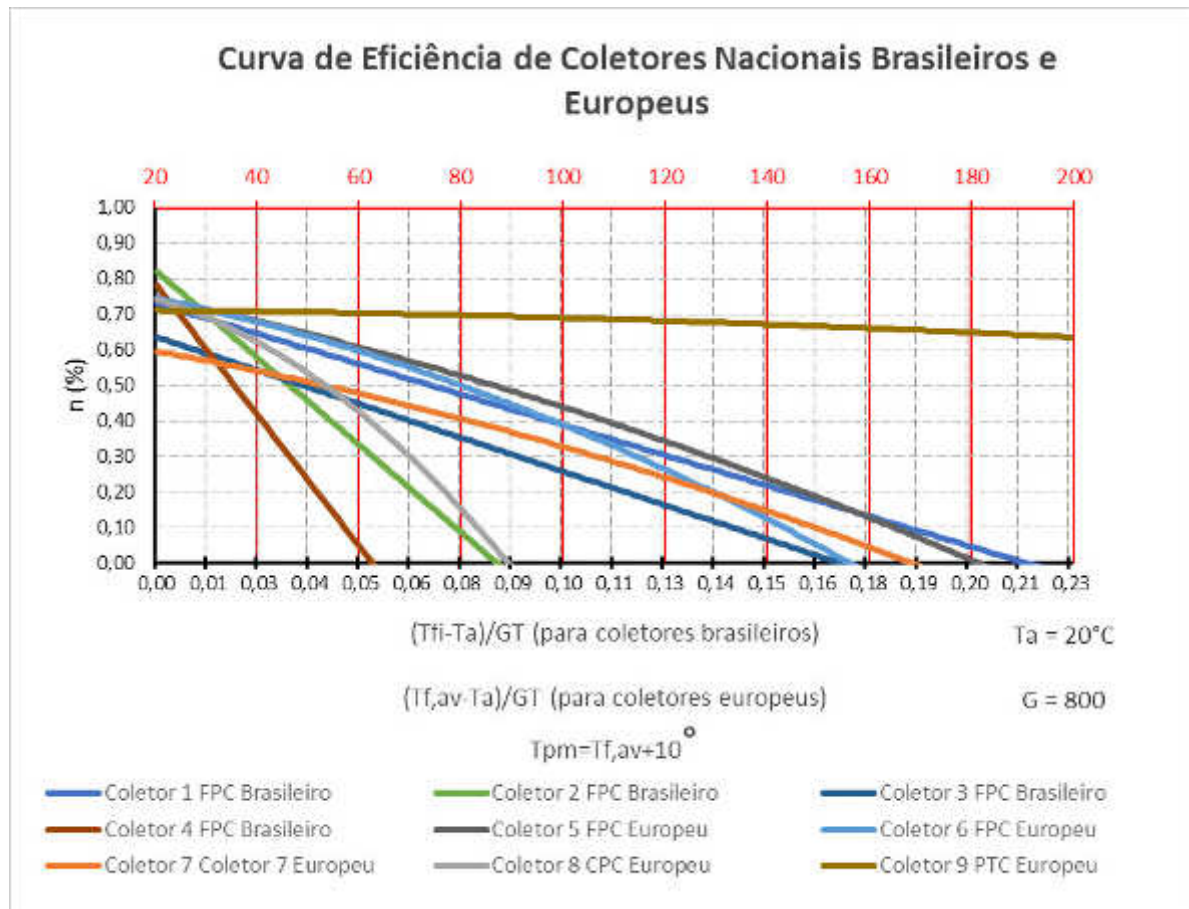


Figura 3.13 - Curva de Eficiência de Coletores Nacionais Brasileiros e Europeus.

3.3.2 Desempenho dos coletores solares com dados horários.

Para realizar a avaliação de desempenho dos coletores solares com base horária utilizamos a equação de rendimento e os dados de temperatura e radiação em cada hora. Para exemplificar vamos utilizar os dados de radiação realizados no capítulo 2.2 no horário de 12:30 hora solar.

Para os coletores FPC e CPC utilizamos a radiação no plano inclinado total GT. Por exemplo, para o coletor 1, com base nos dados da tabela 3.9, e a temperatura de processo escolhida 40°C .

$$\eta_1 = 0,73 - 3,41 \cdot \frac{(40 - 27,78)}{655,07} \quad (3.99)$$

$$\eta_1 = 0,67 \quad (3.100)$$

Para os coletores que utilizam temperatura média foi acrescido 10°C a mais na temperatura de fluído. Para os coletores que os dados de rendimento estão em equações de segundo grau foi necessária multiplicar o resultado final por 0,95 que representa um valor típico da razão da área de abertura do coletor e a área ocupada por ele.

Exemplo, para o coletor 5, com temperatura do fluído de 40° teremos:

$$\eta_5 = \left[0,8 - 2,5 \cdot \frac{(40 + 10 - 27,78)}{655,07} - 0,01 \cdot \frac{(40 + 10 - 27,78)^2}{655,07} \right] \cdot 0,95 \quad (3.101)$$

$$\eta_5 = 0,71 \quad (3.102)$$

Para o coletor 9, tipo PTC utilizamos G_{bn} no lugar G_T

$$\eta_9 = \left[0,75 - 0,1123 \cdot \frac{(40+10-27,78)}{384,42} - 0,01 \cdot \frac{(40+10-27,78)^2}{384,42} \right] \cdot 0,95 \quad (3.103)$$

$$\eta_9 = 0,71 \quad (3.104)$$

A energia útil será:

$$Q_{u1} = \eta_1 \cdot G \quad (3.105)$$

$$Q_{u1} = 0,66 \cdot 655,07 \quad (3.106)$$

$$Q_{u1} = 436,52 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2} \quad (3.107)$$

As tabelas 3.10 e 3.11, mostram os resultados de eficiência e energia útil horária com a temperatura de entrada do fluído a 40°C.

Tabela 3.10 Eficiência ao longo das horas do dia a temperatura de entrada do fluido a 40°C.

	Coletor 1	Coletor 2	Coletor 3	Coletor 4	Coletor 5	Coletor 6	Coletor 7	Coletor 8	Coletor 9
Hora Solar	FPC	FPC	FPC	FPC	FPC	FPC	CPC	CPC	PTC
	%	%	%	%	%	%	%	%	%
0:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6:30	0,06	0,00	0,00	0,00	0,27	0,11	0,07	0,00	0,64
7:30	0,466	0,06	0,34	0,00	0,57	0,50	0,39	0,33	0,69
8:30	0,58	0,38	0,47	0,12	0,65	0,61	0,48	0,51	0,70
9:30	0,63	0,52	0,52	0,33	0,68	0,66	0,52	0,59	0,70
10:30	0,65	0,59	0,55	0,43	0,70	0,68	0,54	0,63	0,71
11:30	0,66	0,62	0,56	0,48	0,71	0,69	0,55	0,65	0,71
12:30	0,67	0,64	0,57	0,51	0,71	0,69	0,55	0,66	0,71
13:30	0,67	0,64	0,57	0,51	0,72	0,69	0,55	0,66	0,71
14:30	0,66	0,63	0,56	0,49	0,71	0,69	0,55	0,65	0,71
15:30	0,64	0,56	0,53	0,38	0,69	0,66	0,52	0,61	0,70
16:30	0,57	0,36	0,46	0,09	0,65	0,59	0,46	0,50	0,70
17:30	0,33	0,00	0,19	0,00	0,47	0,34	0,25	0,12	0,67
18:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Aonde:

Coletores Planos - Flat plate collectors (FPC);

Coletor Parabólico Composto - Compound parabolic collectors (CPC)

Coletor Parabólica tipo Calha (Parabolic trough collector (PTC))

Tabela 3.11 – Energia útil horária a temperatura de entrada do fluido a 40°C.

	Qu	Qu	Qu	Qu	Qu	Qu	Qu	Qu	Qu
	Wh/m ²	Wh/m131	Wh/m132	Wh/m133	Wh/m134	Wh/m135	Wh/m136	Wh/m137	Wh/m138
Hora Solar	Coletor 1	Coletor 2	Coletor 3	Coletor 4	Coletor 5	Coletor 6	Coletor 7	Coletor 8	Coletor 9
	FPC	FPC	FPC	FPC	FPC	FPC	CPC	CPC	PTC
0:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
1:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6:30	6,26	0,00	0,00	0,00	26,00	10,97	6,86	0,00	28,86
7:30	106,74	13,78	78,58	0,00	129,62	114,92	90,01	76,39	77,88
8:30	214,75	141,74	173,58	44,76	241,05	226,66	179,41	191,50	137,73
9:30	315,93	262,02	262,63	165,17	345,35	331,25	263,09	299,30	197,76
10:30	395,25	357,75	332,64	262,24	426,88	413,05	328,55	384,16	246,30
11:30	440,30	414,99	372,79	322,69	472,71	459,14	365,46	433,16	273,47
12:30	444,09	425,88	376,99	339,06	475,57	462,24	367,97	439,01	273,64
13:30	406,61	390,41	345,24	311,32	435,44	422,34	336,10	401,72	246,80
14:30	334,87	316,46	283,64	246,98	359,63	346,73	275,67	328,56	198,60
15:30	237,49	207,07	198,80	142,93	258,24	245,34	194,56	227,17	138,74
16:30	130,99	83,47	105,47	21,75	148,05	135,03	106,27	115,40	78,97
17:30	32,02	0,00	18,71	0,00	45,68	32,53	24,25	11,40	30,03
18:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

(a) Principais Resultados.

Com os gráficos de eficiência horária baseados nos resultados de radiações e temperaturas variando a temperatura externa (conforme figura 3.9) e a de entrada do fluido entre 40°C, 60°C, 90°C, 120°C e 160°C temos que é possível realizar definições médias de horários de funcionamento de cada coletor em função de sua temperatura de fluido que é possível averiguá-los nas figuras 3.14, 3.15, .16, 3.17.

Ao analisarmos a figura 3.14 de junho temos que a maioria dos coletores possuem uma eficiência positiva a partir das 7 e 8 horas solar até as 17 e 18 horas solar. Quando comparamos esta figura 3.14 com a figura 3.15 de temperatura de fluido a 90°C os coletores de curva 2 e 8 perdem a capacidade de absorver energia. Outra observação é quanto ao horário de início e término do aproveitamento da energia que no gráfico de fluido a 40°C a maioria das curvas iniciam-se entre 7 e 8 horas solar, quando aumentamos a temperatura iniciamos o aproveitamento uma hora mais tarde.

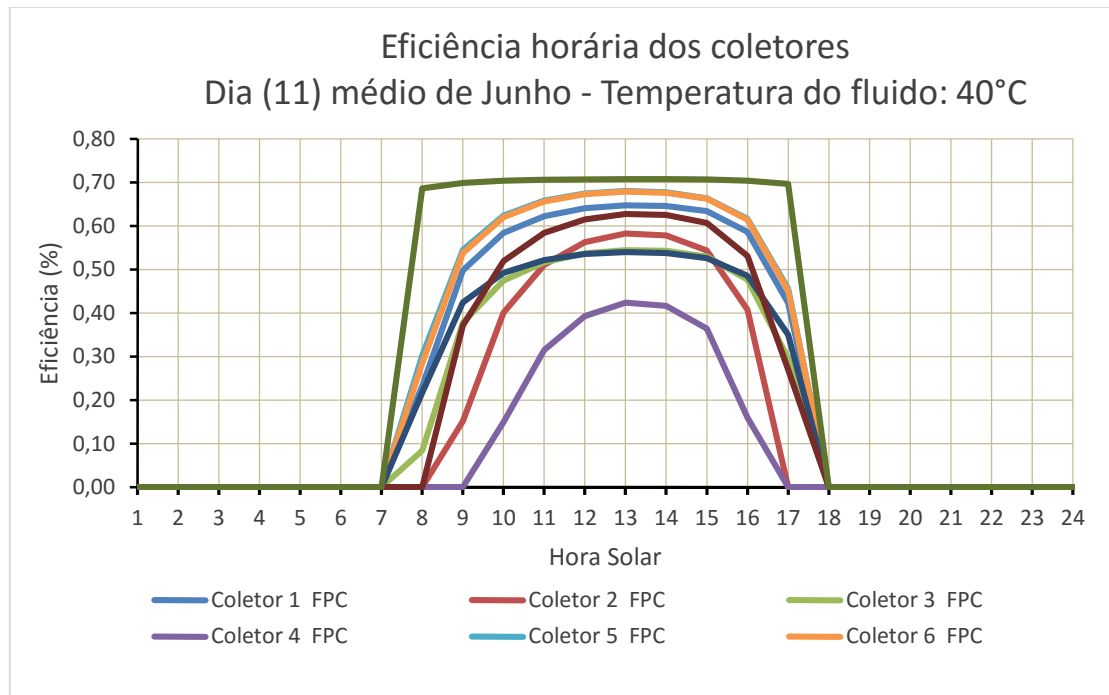


Figura 3.14 Fonte: Oliveira. & Pacheco - AGRENER - Eficiência de coletores ao longo das horas do dia – Dia (11) médio de Junho – Temperatura de Fluido a 40°C

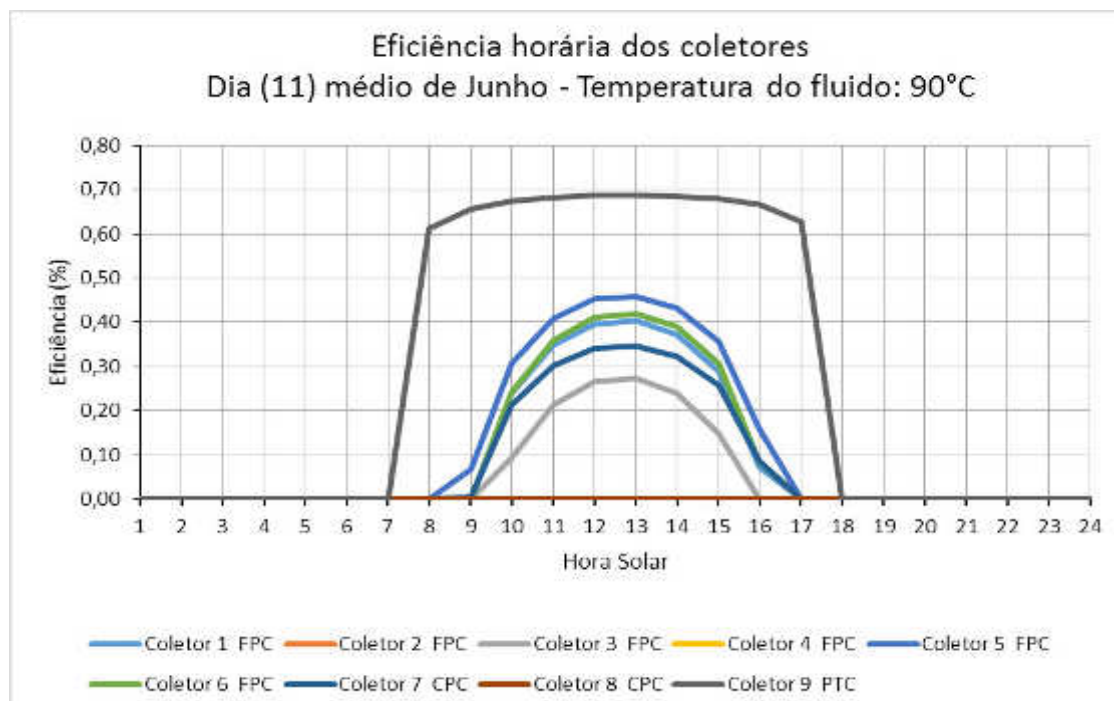


Figura 3.15 Fonte: Oliveira. & Pacheco - AGRENER - Eficiência de coletores ao longo das horas do dia – Dia (11) médio de Junho – Temperatura de Fluido a 90°C

Ao comparar a figura 3.14 de temperatura de 40°C do no mês de junho com a figura 3.16 de 40°C em dezembro temos um maior aproveitamento da energia em dezembro devido a incidência de radiação e ao aumento da temperatura externa. Pode-se notar que o

aproveitamento da radiação da maioria dos coletores inicia-se em 6 e 7 horas solar e em junho entre as 7 e 8 horas solar.

Quando comparamos a eficiência dos coletores com fluido a mesma temperatura de 90°C em junho e dezembro temos que o início do aproveitamento térmico é praticamente o mesmo.

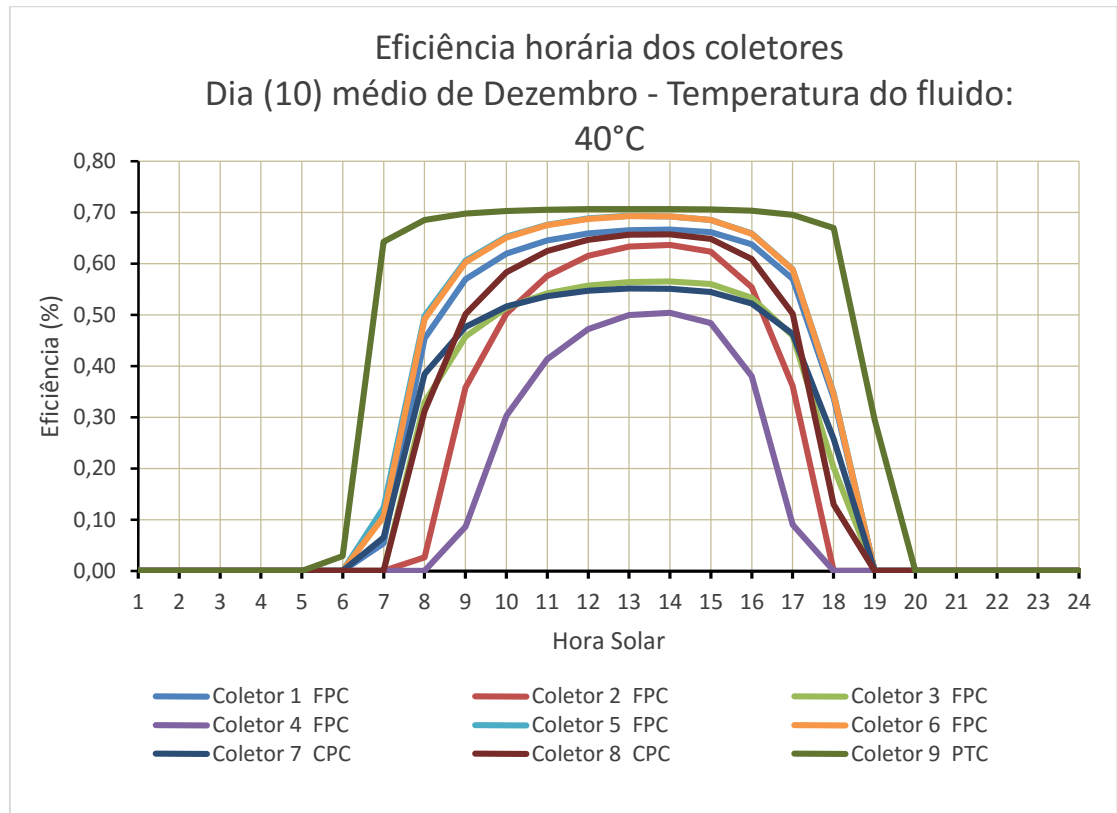


Figura 3.16 Eficiência de coletores ao longo das horas do dia – Dia (10) médio de Dezembro – Temperatura de Fluido a 40°C

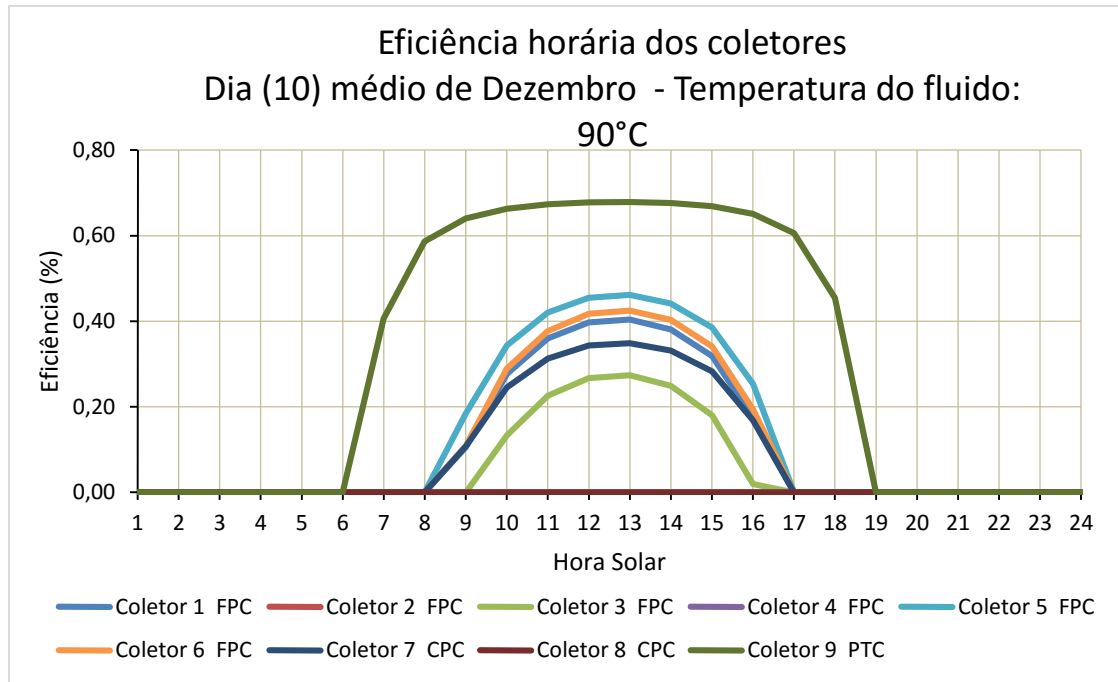


Figura 3.17 Eficiência de coletores ao longo das horas do dia – Dia (10) médio de Dezembro – Temperatura de Fluido a 90°C

Na figura 3.19 podemos observar que a energia útil diária para cada coletor varia em função do mês; exemplo: A curva 5 e 6 do coletor FPC é mais alta no mês de março e cai no mês de junho, já com o coletor PTC, de barra 9 acontece exatamente ao contrário, isso é devido ao melhor aproveitamento da radiação direta normal pois o mês de junho não chove muito e possibilita um melhor aproveitamento dos coletores que utilizam radiação direta normal.

Quando aumentamos a temperatura do fluido de 40°C para 90°C temos uma redução da energia útil de todos os coletores, sendo que os coletores 2 e 3 já não possuem capacidade de absortividade a essa temperatura.

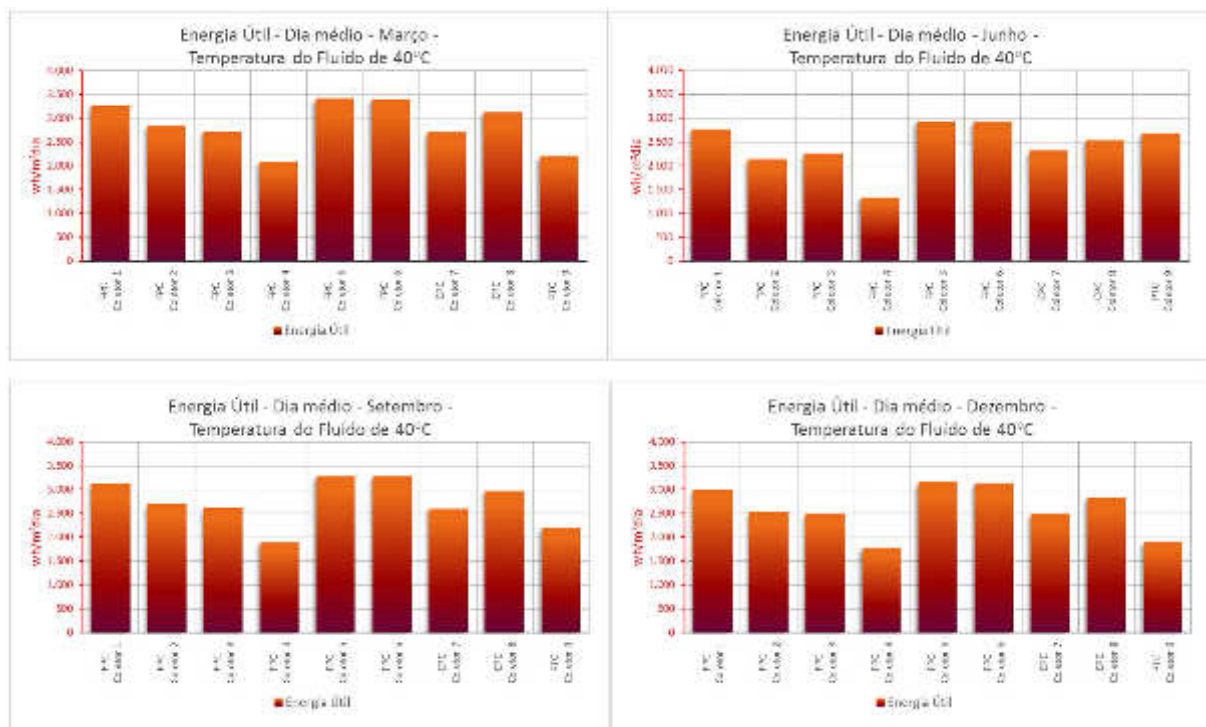


Figura 3.18 Energia útil diária com temperatura de fluido a 40°C para os dias médios dos meses de março, junho, setembro e dezembro.

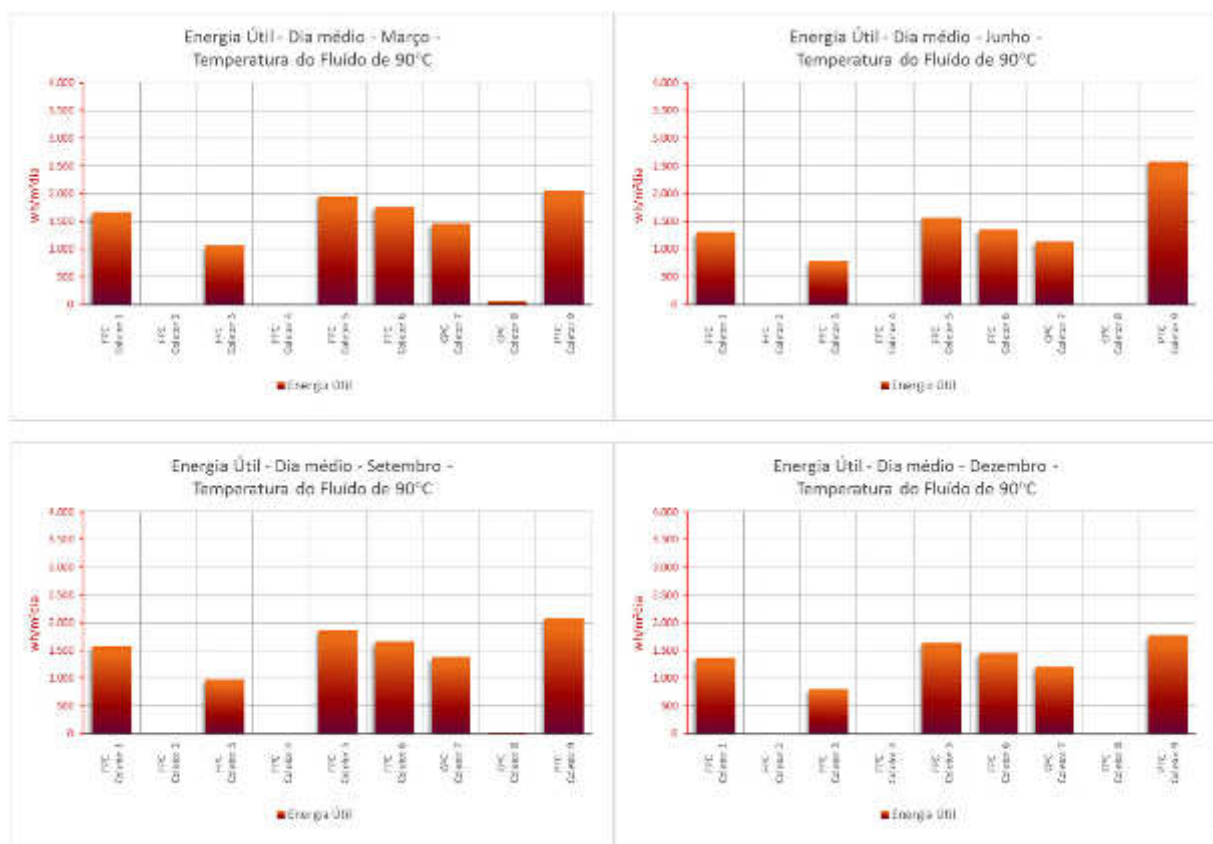


Figura 3.20 Energia útil diária com temperatura de fluido a 90°C para os dias médios dos meses de março, junho, setembro e dezembro.

No setor industrial é importante enfatizar que existem meses com maiores demandas de energia devido ao aumento da produção, devido a isso é importante sabermos qual o mês que pudesse obter o maior aproveitamento térmico para utilização no processo industrial. Os meses de maior aproveitamento térmico para os coletores planos é em agosto e outubro, porém se utilizarmos um coletor PTC essa informação não é igual. Ao notarmos as energias úteis com fluido a 40°C e 90°C no mês de agosto com as de outubro vemos que para o PTC a energia máxima do ano é em agosto. Neste mês temos que as temperaturas externas e a irradiação incidente também aumenta. Nos meses em torno do solstício de verão a radiação é bem alta, no entanto como é uma época de muita chuva a irradiação incidente total torna-se menor.

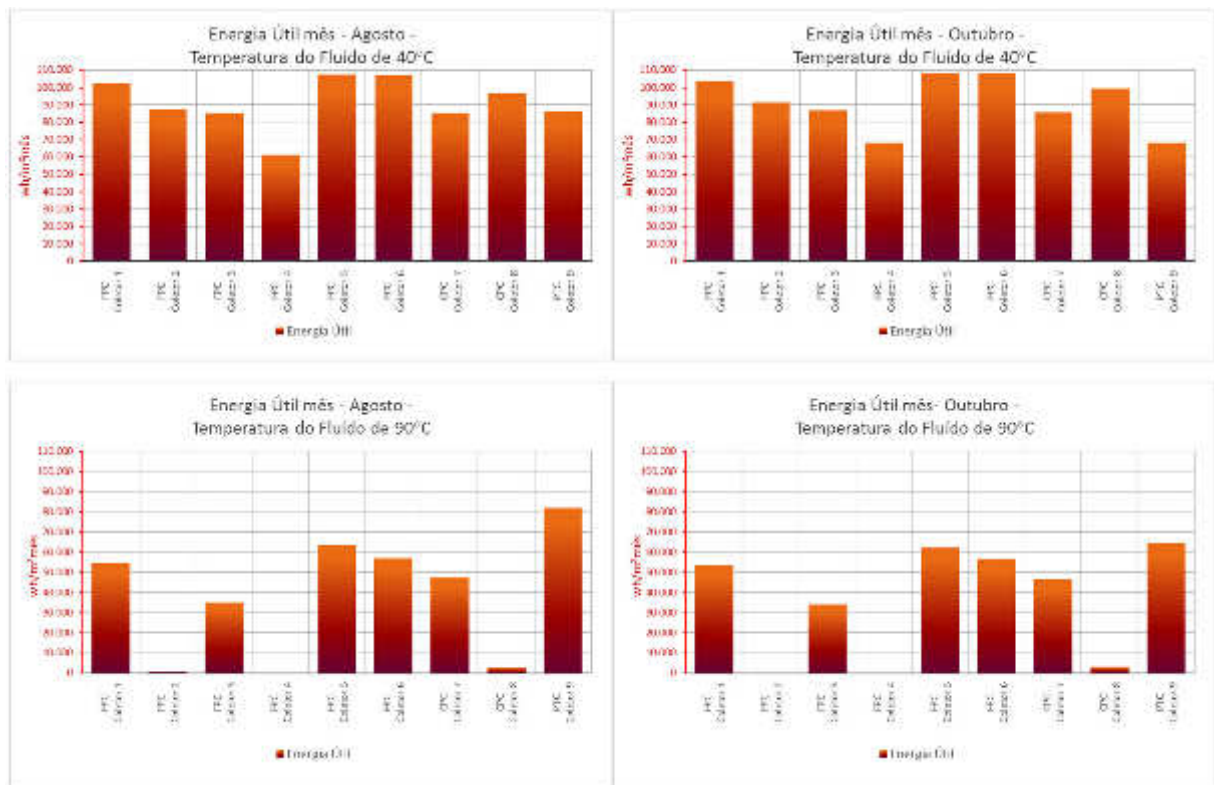


Figura 3.21 Energia útil mês com temperatura de fluido a 90°C para os meses de março, junho, setembro e dezembro.

Quando escolhemos o coletor pela eficiência é necessário se atentar a energia que o coletor pode absorver. Por exemplo, no caso de uma aplicação onde utilize a temperatura do fluido a 60°C o melhor coletor analisando a eficiência resultante anual, sem a menor dúvida seria utilizar o coletor 9, PTC que está com uma eficiência de quase 70%. Porém quando analisamos para a energia útil utilizada notas que os coletores 5 e 6 teriam uma maior energia útil absorvida.

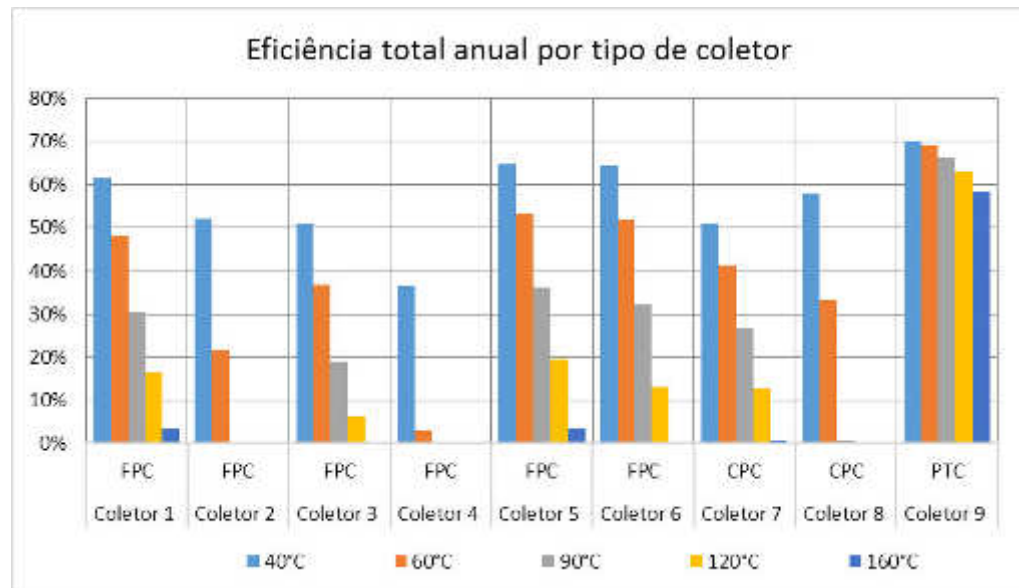


Figura 3.22 Eficiência total anual por coletor

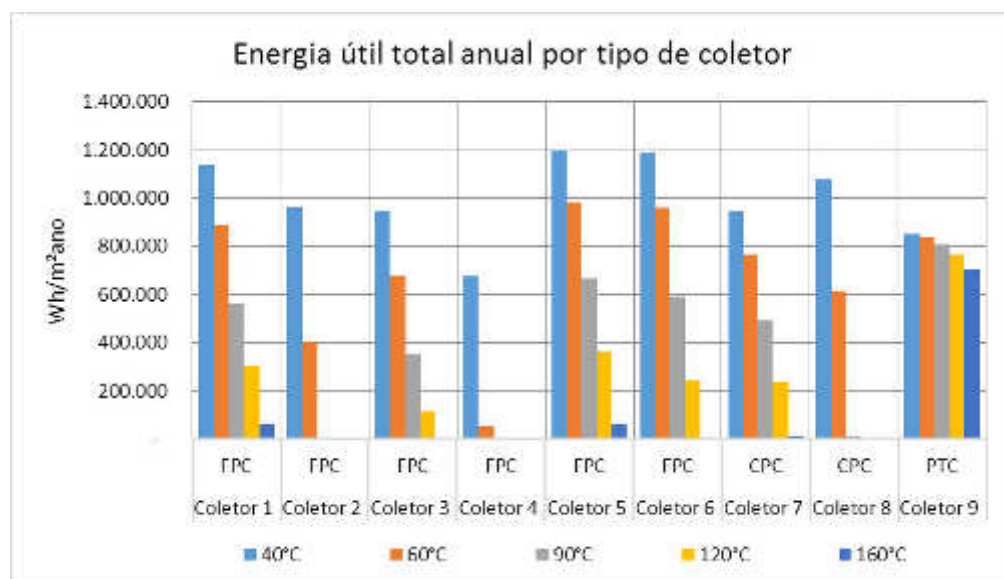


Figura 3.23 Fonte: Oliveira. & Pacheco - AGRENER - Eficiência útil total anual por coletor

3.4 Potencial de geração de energia solar térmica no Brasil.

Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2008; existem 23.133 mil empresas de fabricação de produtos alimentícios e bebidas.

Utilizando um coletor tipo PTC, curva 9 na figura 9, operando na temperatura de 90°C, teremos, para Ribeirão Preto uma energia disponibilizada de aproximadamente 800 Wh/m²ano (Mega Watt hora térmico por ano). Como as informações da área disponível para instalação dos coletores podem variar, foi adotada uma área disponível de 300 metros quadrados por indústria,

sendo, portanto, uma previsão de energia solar a ser gerada no país e utilizada nas indústrias alimentícias da ordem de 5,55 milhões MWht/ano, utilizando 6,9 milhões de metros quadrados de coletores, o que equivale a 560 mil toneladas de gás natural e 56 mil toneladas de CO₂ que deixarão de ser emitidas.

Potencial de geração de energia no Brasil = PGEB

$$PGEB = 800.000 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \text{ano}} * 300 \frac{\text{m}^2}{\text{industria}} * 23.133 \text{ industrias} \quad (3.108)$$

$$PGEB \cong 5,55 \text{ milhões} \frac{\text{MWht}}{\text{ano}} \quad (3.109)$$

Potencial de Utilização de Coletores = PUC

$$PUC = 5,55 \cdot 10^9 \frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \cdot \frac{1}{800} \frac{\text{m}^2 \text{ano}}{\text{kWh}} \quad (3.109)$$

$$PUC = 6,9. \text{milhões } \text{m}^2 \text{ de Coletores} \quad (3.110)$$

Cálculo do Potencial de Gás Natural a ser reduzido.

$$\text{Fator de conversão} = 8650 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^3} \cdot \frac{1}{0,78} \cdot \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \cdot \frac{1}{860} \cdot \frac{\text{kWh}}{\text{kcal}} \quad (3.111)$$

$$\text{Fator de conversão do GN} = 12,9 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} \quad (3.112)$$

$$\text{Energia térmica gerada pelo Gás Natural} = 5,5 \cdot 10^9 \cdot \frac{1}{0,761} \quad (3.113)$$

$$\text{Energia térmica gerada pelo Gás Natural} = 7,23 \cdot 10^9 \frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \quad (3.113)$$

$$\text{Gás Natural utilizado} = 7,23 \cdot 10^9 \frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \cdot \frac{1}{12,9} \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \quad (3.114)$$

$$\text{Gás Natural utilizado} = 560 \text{ mil ton de GN} \quad (3.115)$$

Sendo:

Dados do Gás Natural:

$$\text{PCI} = 8650 \text{ Kcal/m}^3$$

$$\rho_{GN} = 0,78 \text{ kg/m}^3$$

$$1 \text{ kWh} = 860 \text{ kcal}$$

$$\eta_{GN} = \text{Rendimento do gás natural (tabela 2.3)} = 76,1\%$$

A indústria de alimentos e bebidas consome em média uma energia térmica gerada por gás natural para calor de processo e aquecimento direto 491mil tep/ano (tabela 2.5) ou 5,7 milhões de MWht/ano o que equivale a 580 mil toneladas por ano de gás natural gerando 58 mil toneladas de CO₂.

Cálculo da Energia Útil utilizada para processos de aquecimento direto e calor de processo como combustível o gás natural.

$$\text{Energia útil Gerada por Gás Natural} = EUGGN \quad (3.116)$$

$$EUGGN = 491.000 \frac{\text{Tep}}{\text{ano}} = 5,7 \cdot \text{milhões} \cdot \frac{\text{Wht}}{\text{ano}} \quad (3.117)$$

$$\text{Energia Final Gerada por Gás Natural} = EFGGN \quad (3.118)$$

$$\text{Energia Final Gerada pelo Gás Natural} = 5,7 \cdot 10^9 \frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \cdot 0,761 \quad (3.119)$$

Cálculo da quantidade de gás natural utilizado.

$$\text{Energia gerada pelo Gás Natural} = 7,5 \cdot 10^9 \frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \quad (3.120)$$

$$\text{Quantidade de Gás Natural Utilizado} = 7,5 \cdot 10^9 \frac{\text{kWh}}{\text{ano}} \cdot \frac{1}{12,9} \frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \quad (3.121)$$

$$\textit{Quantidade de Gás Natural Utilizado} = 580 \text{ mil ton de GN} \quad (3.122)$$

Comparando o valor do potencial de geração de energia de 5,55 milhões de MWht/ano (equação 3.109) com a energia gerada pelo gás natural para os processos de aquecimento direto e calor de processo no valor de 5,7 milhões MWht/ano (equação 3.117); temos que o sistema solar térmico pode substituir o combustível gás natural para atender os processos de aquecimento direto e calor de processo.

4 CONCLUSÃO

A região de Ribeirão Preto possui um complexo industrial significativo do setor de alimentos e bebidas, que é um dos maiores consumidores de energia do país, sendo seu consumo principal a energia térmica, o que possibilita a aplicação de sistema solar térmico para atender processos de aquecimento direto e calor de processo.

Para a região de Ribeirão Preto dispõe-se de um potencial de energia solar médio anual no o plano inclinado de 1.850 KWht/m²ano dos quais 1.131 kWht/m²ano são de radiação direta e 1.213 kW/m² de radiação direta normal com rastreamento do ângulo zenital.

Utilizando um coletor tipo PTC, operando na temperatura de 90°C, teremos uma previsão de energia solar a ser gerada no país e utilizada nas indústrias alimentícias da ordem de 5,55 milhões MWht/ano, o que equivale a 560 mil toneladas de gás natural e 56 mil toneladas de CO₂ que deixarão de ser emitidas e também desenvolveria uma indústria de fabricação de coletores solares com um potencial de 6,9 milhões de metros quadrados de coletores.

O sistema solar térmico no Brasil para as indústrias de alimentos e bebidas possui uma capacidade de geração de 5,55 milhões MWht/ano. A demanda de energia para o calor de processo e aquecimento direto gerada por gás natural é de 5,7 milhões MWht/ano. Estes valores são próximos podendo, portanto, o sistema solar térmico substituir o gás natural para fornecimento desta energia a estes processos.

Um coletor solar plano especial de dupla camada de vidro e anti-reflexo se aplicado a processos industriais até 80°C de temperatura operará com um ganho de energia médio de 800 kWh/m²ano o que equivale ao coletor de calha parabólica a esta temperatura. Portanto para temperaturas abaixo de 80°C o coletor plano é recomendável, para temperaturas maiores recomenda-se um coletor de calha parabólica.

Um coletor solar plano (curvas 3 deste trabalho) de vidro disponível no Brasil se aplicado a processos a 80°C terá uma energia útil de 700 kWh/m², sendo que um coletor plano com dupla camada de vidro e anti-reflexo ainda não disponível no Brasil e um de calha parabólica chegariam a uma energia útil de 800 kWh/m². Portanto recomenda-se utilizar temperaturas abaixo de 70°C para o melhor coletor plano de vidro disponível atualmente no Brasil. Para os outros coletores disponíveis no Brasil recomenda-se utilizar em temperaturas abaixo de 60°C.

Utilizando os dados médios de avaliação para um coletor plano de vidro a temperatura de 90°C no mês de janeiro teremos uma eficiência de 48% da radiação total no plano inclinado

que resultaria em 2,37 kWh/m²dia e para essas simulações com variação horárias demonstram um valor de 1,7 kWh/m²dia e eficiência de 34%. Isso revela que há diferença de valores entre avaliações realizadas por médias e as avaliações horárias, sendo que as avaliações horárias proporcionam valores mais precisos pois eles consideram as variações de temperatura e radiação.

Este estudo demonstra a viabilidade técnica da utilização da energia solar para aplicações industriais na região de Ribeirão Preto.

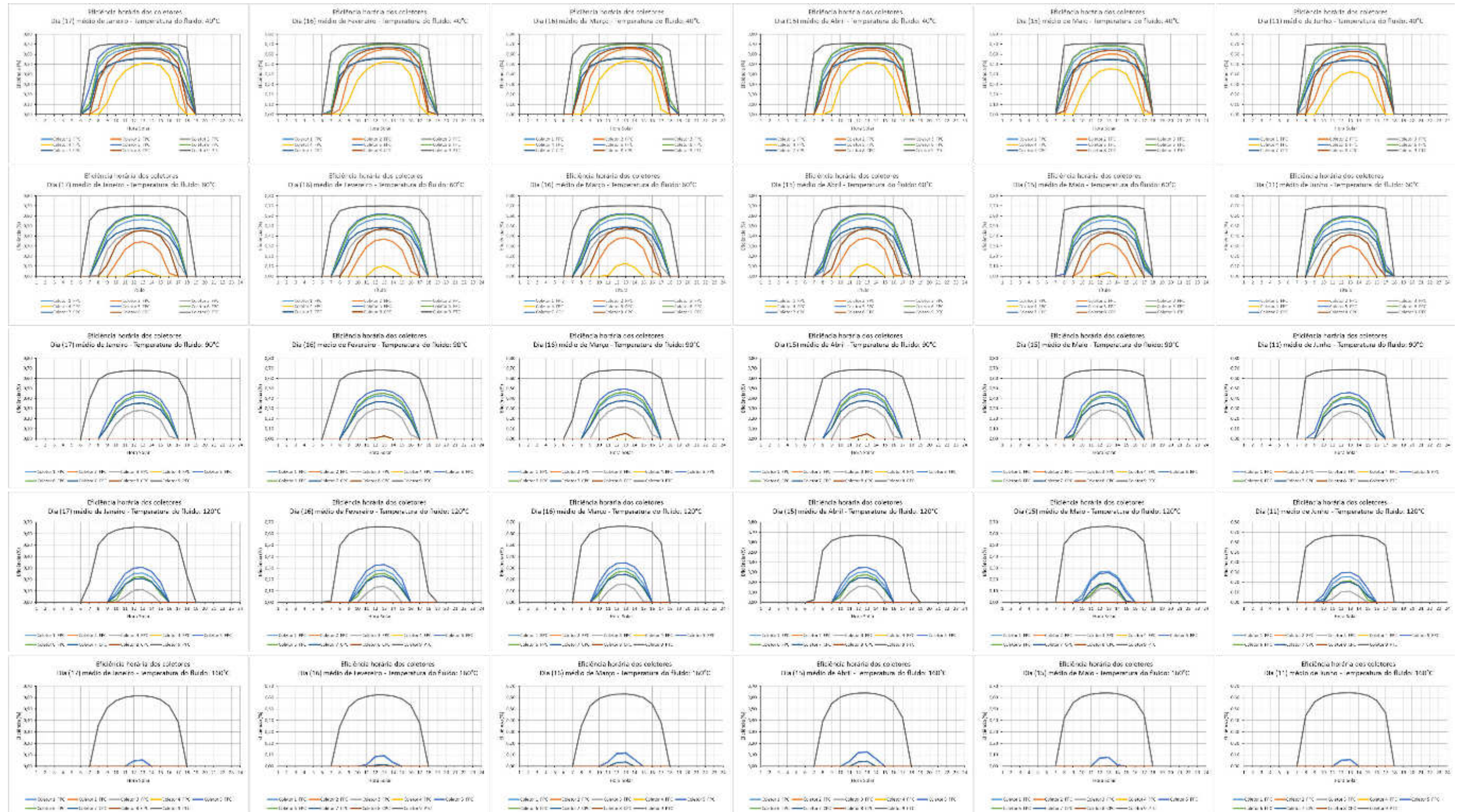
As sugestões para estudo futuro são: análise econômica e custos de cada tipo de coletor utilizado e inserir nas comparações os coletores de tubo evacuado entre outros não utilizados neste estudo.

REFERÊNCIAS

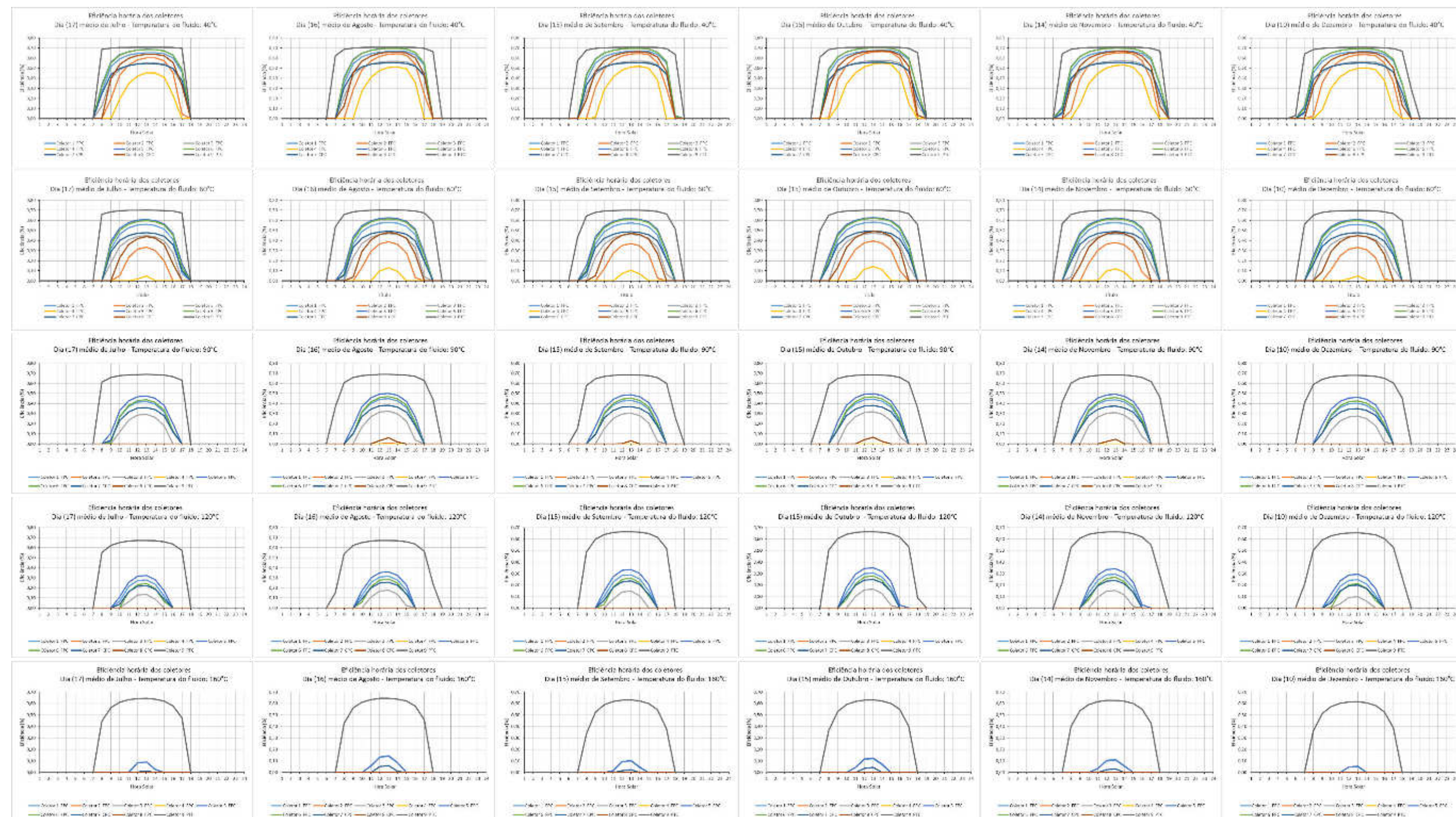
- Brasil. Ministério de Minas e Energia. Empresa de. (2013). *Balanço Energético Nacional 2013: Ano base 2012*.
- Brasil. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. (2007). *Balanço Energético Nacional 2007: Ano base 2006*.
- CRESESB. (22 de maio de 2015). www.creseb.cepel.br. Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php#data>
- DUFFIE, J. A., & BECKMAN, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). (2014). *Balanço Energético Nacional 2014: Ano base 2013*. Rio de Janeiro.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). (2014). *Consumo de Energia no Brasil*. Brasília.
- ESTIF, European Solar Thermal Industry Federation. (s.d.). Solar Industrial Process Heat. *Solar Industrial Process Heat – WP3, Task 3.5*.
- guidelines, S. d., & Trier, D. (agosto de 2012). Different types of collectors, their efficiencies and calculation of energy output is. Fonte: www.solar-district-heating.eu
- IBGE, Instituto Brasileiro de Pesquisas Estatísticas. Anuário Rais, Ministério do Trabalho e Emprego. (2013). Distribuição de Empresas dos Setores de Alimentos e Bebidas. Fonte: Instituto Brasileiro de Pesquisas Estatísticas.
- IBGE, Instituto Brasileiro de Pesquisas Estatísticas. Anuário Rais, Ministério do Trabalho e Emprego. (2012). *Produto Interno Bruto dos Municípios*. Rio de Janeiro.
- INMETRO, Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. (01 de Abril de 2015). *Informação ao Consumidor*. Fonte: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia: <http://www.inmetro.gov.br/consumidor/pbe/ColetoresSolares-banho.pdf>
- Kalogirou, S. A. (2009). *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Oxford: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ribeir%C3%A3o_Preto.
- Oliveira, A. S., & Pacheco, C. R. F. (2015). ESTUDO COMPARATIVO DE COLETORES SOLARES PARA UTILIZAÇÃO DE ENERGIA SOLAR TÉRMICA EM PROCESSOS INDUSTRIAIS NA REGIÃO DE RIBEIRÃO PRETO. *AGRENER*, 10.
- Rocha, Carlos Roberto; Bajay, Sergio Valdir ; Gorla, Filipe Debonzi. (2010). *Oportunidades de eficiência energética para a indústria: relatório setorial: alimentos e bebidas*. Brasília: CNI.
- Silva, L. C. (2015). Apostila de processos agro industriais de produção de alimentos.
- Weiss, W., & Rommel, M. (2005). Medium temperature collectors.

Wikipédia, a enciclopédia livre. (2006). *Wikipédia, a enciclopédia livre*. Fonte: Wikipédia, a enciclopédia livre: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ribeir%C3%A3o_Preto

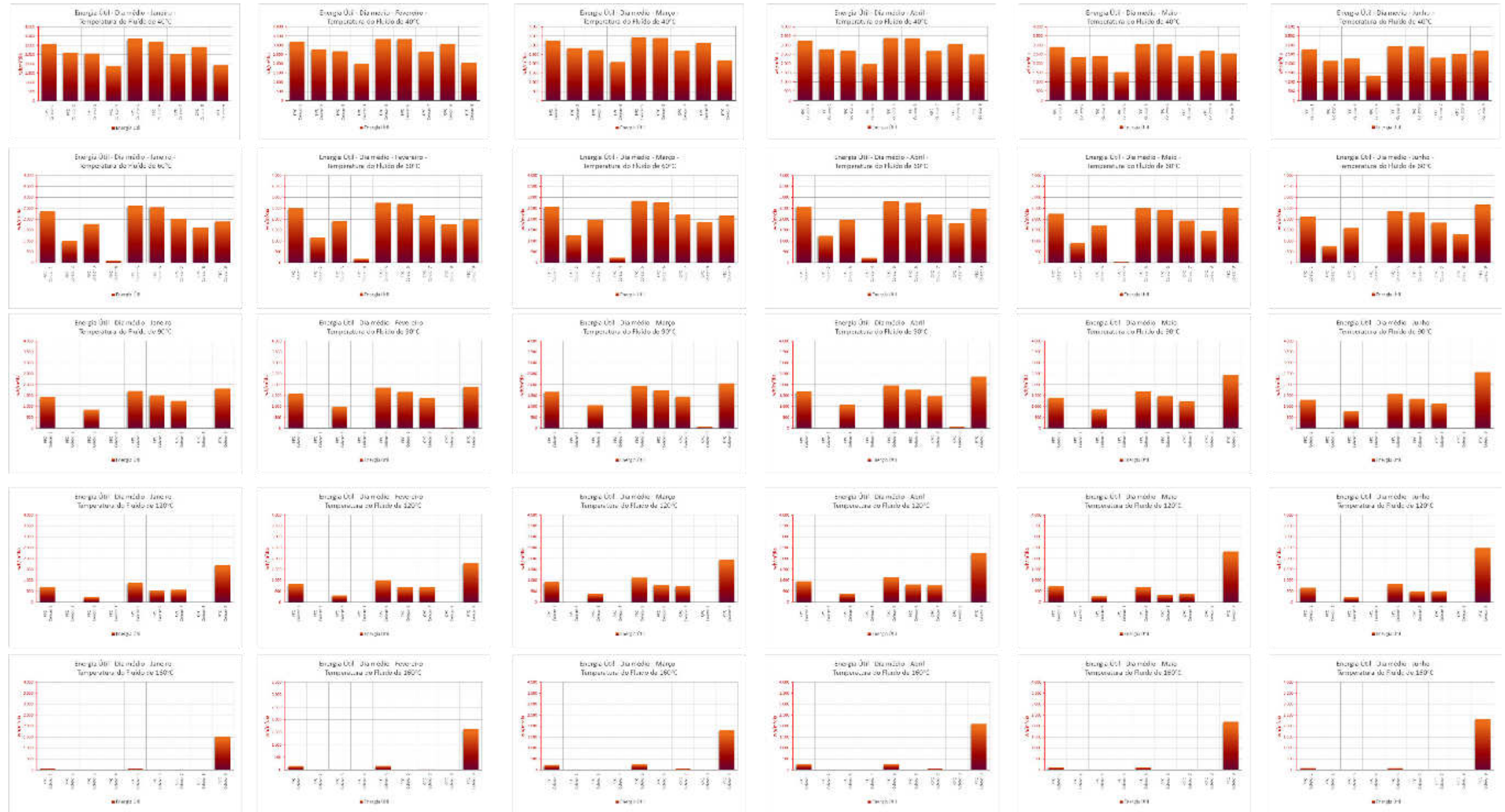
ANEXO A.1 – Eficiência ao Longo das horas do dia



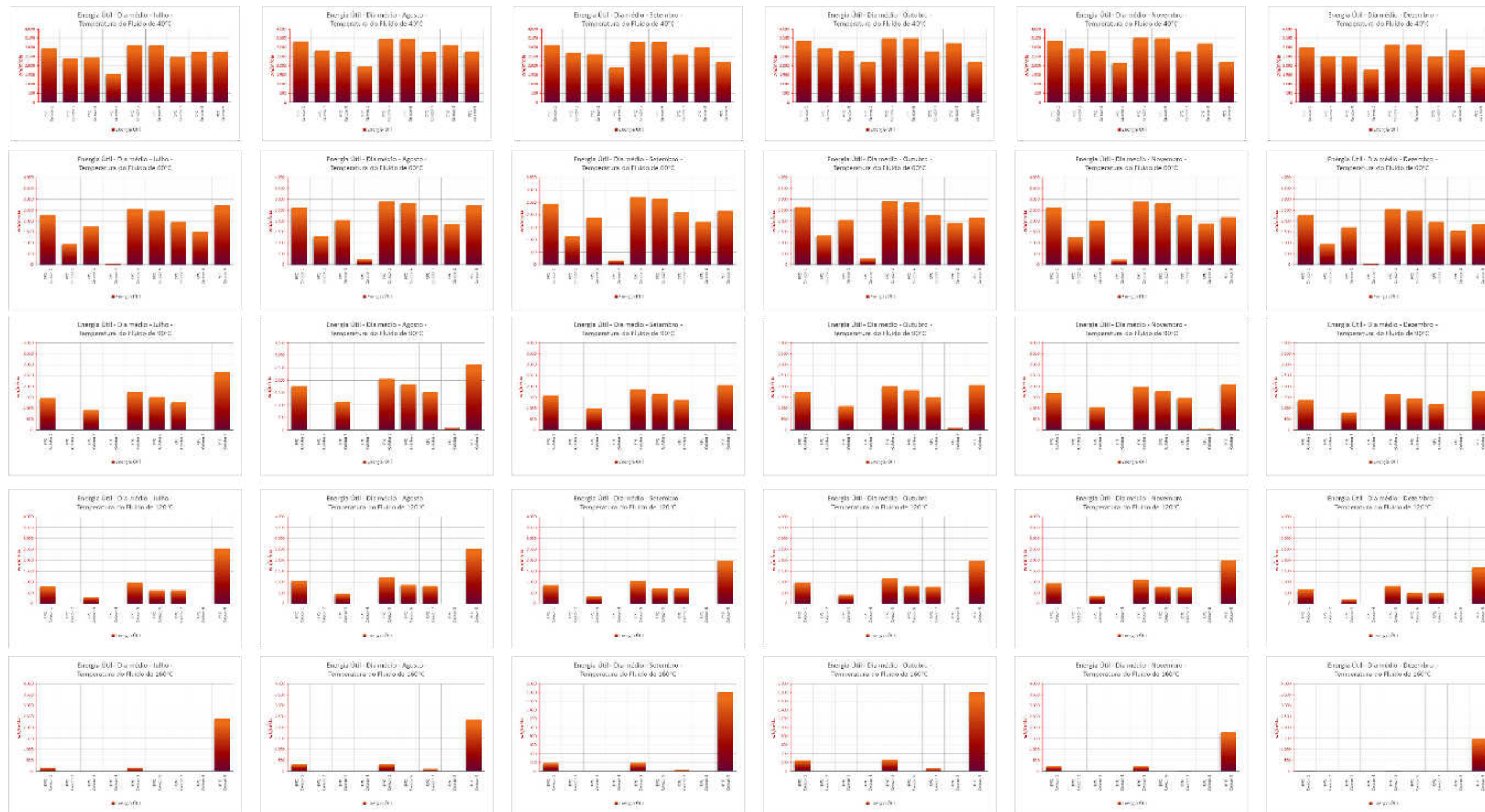
ANEXO A.2 – Eficiência ao Longo das horas do dia



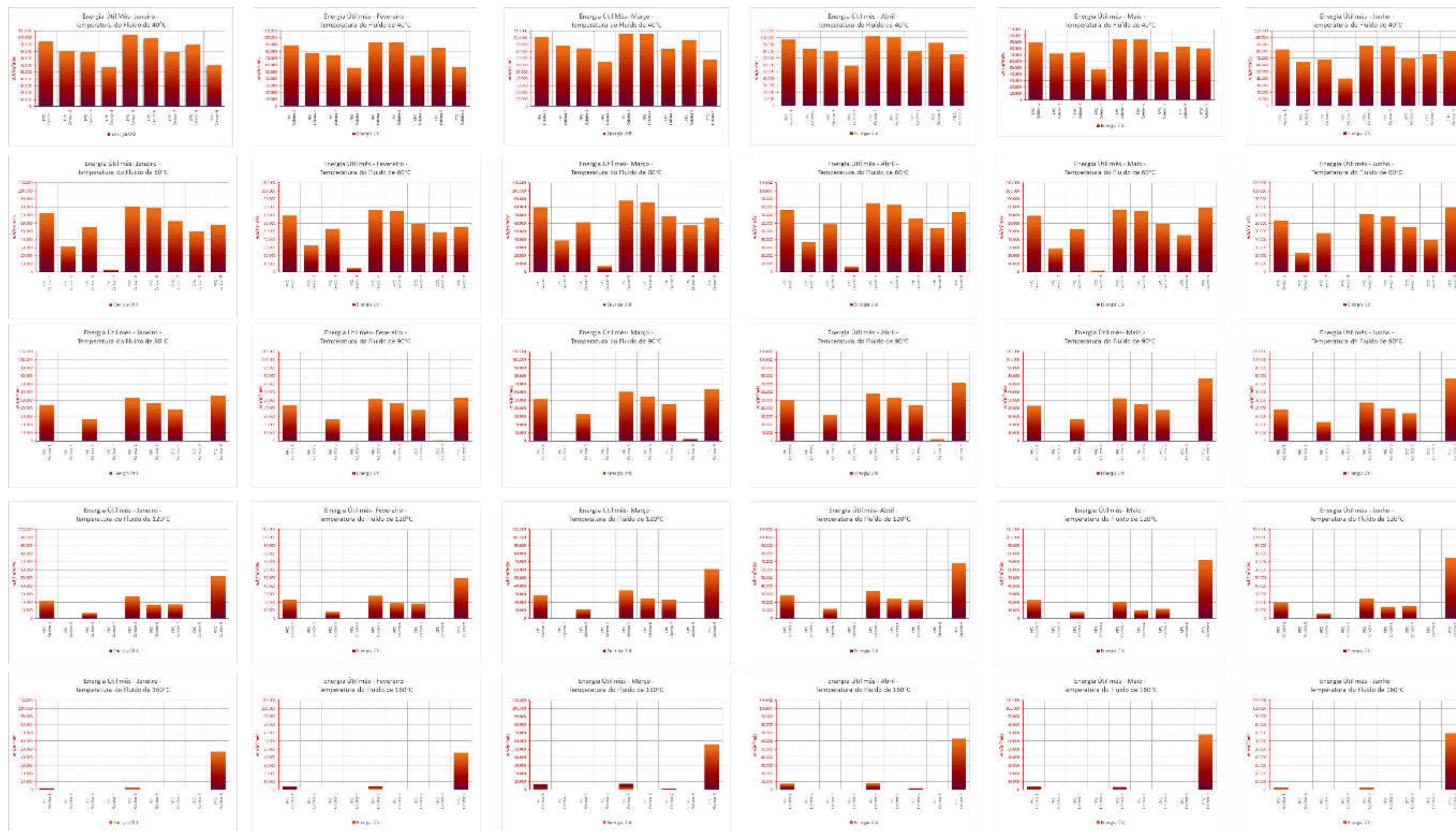
ANEXO B.1 – Energia útil dia



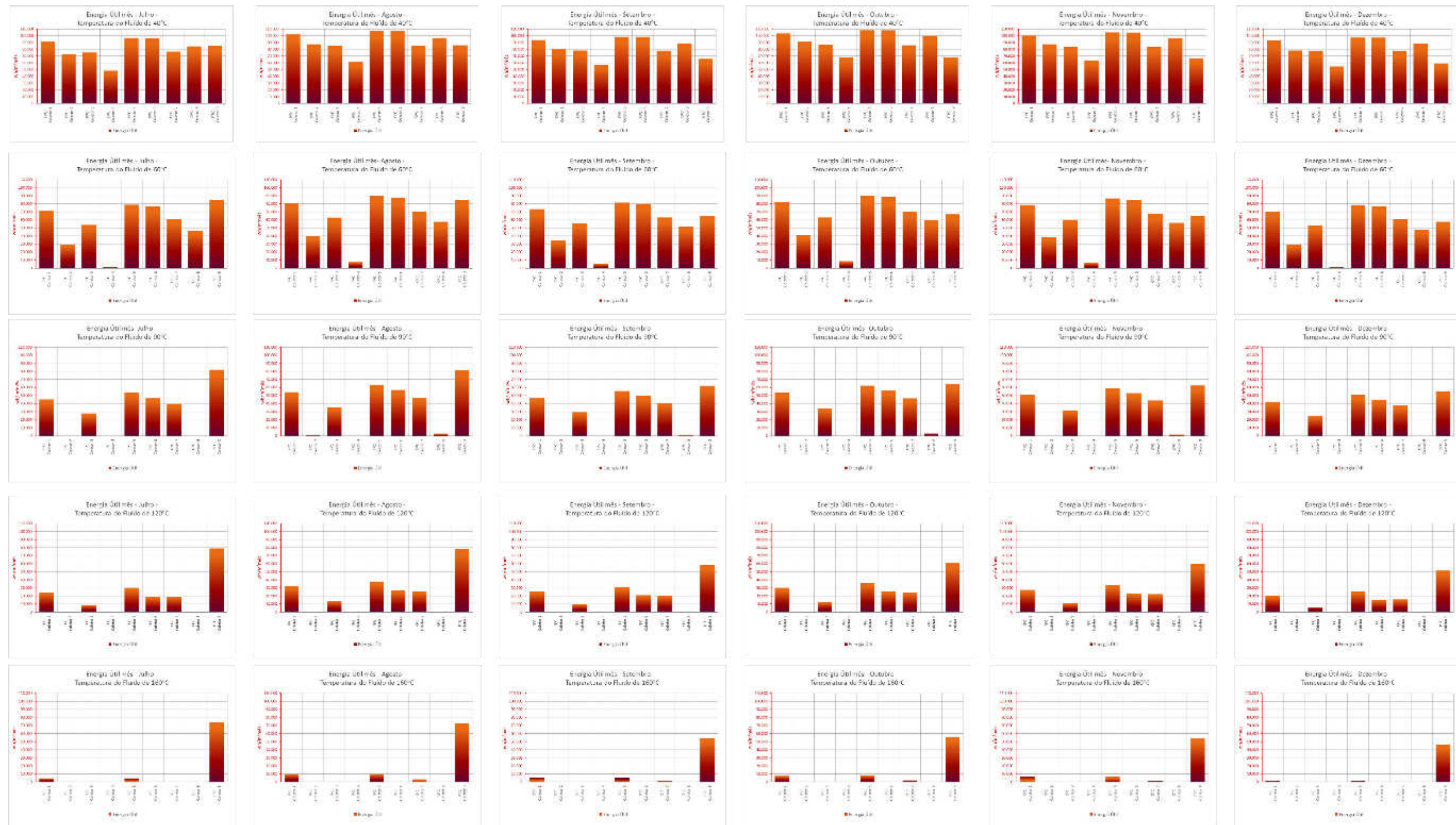
ANEXO B.2 – Energia útil dia



ANEXO C.1 – Energia útil mês



ANEXO C.2 – Energia útil mês



ANEXO D – Energia útil mês

