

**Ernesto Javier Ruano Herrera**

**Simulação de um ciclo Rankine Orgânico  
acionado por energia solar**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Sergio Leal Braga

Rio de Janeiro

Abril de 2012

**Ernesto Javier Ruano Herrera**

**Simulação de um ciclo Rankine orgânico  
acionado por energia solar**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Sergio Leal Braga**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. José Alberto dos Reis Parise**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Carlos Eduardo Leme Nóbrega**

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca-RJ

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de abril de 2012

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

**Ernesto Javier Ruano Herrera**

Graduo-se em Engenharia Mecânica pela EPN (Escuela Politécnica Nacional) de Quito, Ecuador em 2009

Ficha Catalográfica

Ruano Herrera, Ernesto Javier

Simulação de um ciclo Rankine orgânico acionado por energia solar / Ernesto Javier Ruano Herrera; orientador: Sergio Leal Braga. – 2012

215 f.: il. (color); 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Energia solar. 3. Ciclo Rankine orgânico (ORC). 4. Concentradores parabólicos. I. Braga, Sergio Leal. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD: 621

Dedico este trabalho a minha família pela educação e bons valores recebidos.

## Agradecimentos

A meus pais, irmãos e toda minha família pelo apoio incondicional, carinho e compreensão.

Ao professor Sergio Leal Braga por sua acertada colaboração no desenvolvimento do presente trabalho.

A meus amigos do Equador e os amigos que fiz durante estes anos no Brasil, pelos bons momentos vividos.

Aos professores e pessoal da PUC-Rio pela valiosa contribuição a meu processo educativo.

Aos órgãos de fomento à pesquisa: CNPq, CAPES e FAPERJ, pelo apoio financeiro fornecido, sem o qual este trabalho simplesmente não teria sido possível.

## Resumo

Ruano Herreria, Ernesto Javier; Braga, Sergio Leal. **Simulação de um ciclo Rankine orgânico acionado por energia solar**. Rio de Janeiro, 2012. 215p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta simulação considera um ciclo Rankine que utiliza um fluido de trabalho orgânico, com a particularidade que a fonte de energia de entrada ao sistema será solar. Esta energia renovável que provem do potencial do Sol é aproveitada com a utilização de coletores concentradores lineares parabólicos. Estes dois circuitos: do ciclo Rankine orgânico e do conjunto de coletores interatuam termicamente mediante um trocador de calor chamado de gerador de vapor. Adicionalmente, existe um sistema de armazenamento térmico que permite acumular parte da energia solar coletada para ser utilizada em períodos sem radiação solar ou com níveis baixos da mesma. A primeira parte deste trabalho mostra os aspectos teóricos introdutórios e as considerações para trabalhar com um ciclo Rankine de tipo orgânico, o tipo de coletores escolhido e a utilização de armazenamento térmico. O segundo capítulo mostra o modelo matemático apropriado para simular um sistema de geração de potência de baixa capacidade (50 kW) e os componentes de cada circuito: ciclo (bomba, expensor, condensador, recuperador, gerador de vapor), coletores (cobertura, refletor, absorvedor, etc.) e armazenamento (tanques, etc.). A simulação foi desenvolvida no software EES. O terceiro analisa os parâmetros do modelo, seus possíveis valores físicos, a sensibilidade da sua variação e sua seleção adequada com o objetivo de efetuar uma simulação bastante similar à realidade e as incertezas presentes. No capítulo final se apresentam os resultados em base as condições de desenho consideradas.

## Palavras-chave

Energia solar; ciclo Rankine orgânico (ORC); concentradores parabólicos.

## Abstract

Ruano Herrera, Ernesto Javier; Braga, Sergio Leal (Advisor). **Simulation of an organic Rankine cycle powered by solar energy**. Rio de Janeiro, 2012. 215p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This simulation considers a Rankine cycle that works with an organic fluid, but has the particularity of using solar power as the font of input energy. This renewable energy that comes from the sun's potential is taken with the use of parabolic trough collectors. These two circuits: that of the organic Rankine cycle (ORC) and the other of collector's ensemble interact termically in a heat exchanger called as vapor generator. Adicionally there's a thermal storage system that allows accumulating part of the collected solar energy to be used for periods of time when there's no solar radiation or with very low levels of it. The first part of this work shows the introductory theoretical aspects and the considerations to work with an organic Rankine cycle (ORC), the type of chosen collector and the use of heat storage. The second chapter shows the appropriate mathematic model to simulate a system of power generation of low capacity (50 kW) and the components of each circuit: ORC (pump, expander, condenser, recuperator, vapor generator), collectors (glass cover, reflector mirror, absorber tube, etc.) and thermal storage (storage tanks, etc.). The simulation was developed using EES software. The third chapter analyzes the parameters of the model, specially its values and possible variations to approach the simulation to the reality. In the final chapter, some results are presented based on some considered design conditions.

## Keywords

Solar energy; organic Rankine cycle (ORC); parabolic trough.

## Sumário

1 INTRODUÇÃO	35
1.1 OBJETIVOS	35
1.2 ENERGIA SOLAR	36
1.2.1 Radiação solar	37
1.2.2 Tipos de radiação incidente	38
1.2.3 Ângulos solares	39
1.3 COLETORES CONCENTRADORES LINEARES PARABÓLICOS	40
1.3.1 Geometria do coletor concentrador linear parabólico	41
1.3.1.1 Definição geral da parábola	41
1.3.1.2 Equação de uma parábola	42
1.3.1.3 Comprimento da parábola	43
1.3.2 Medidas de um coletor concentrador linear parabólico	43
1.3.3 Razão geométrica de concentração solar	44
1.3.4 Reflexão dos raios solares na parábola	45
1.3.5 Ângulo de seguimento do sol para concentradores lineares parabólicos	47
1.3.5.1 Rotação uniaxial ao redor do eixo horizontal oeste – leste com ajuste diário	47
1.3.5.2 Rotação uniaxial ao redor do eixo horizontal oeste – leste com ajuste contínuo	48
1.3.5.3 Rotação uniaxial ao redor do eixo horizontal norte – sul com ajuste contínuo	48
1.3.6 Eficiência óptica do coletor	49
1.3.7 Vantagens dos coletores concentradores lineares parabólicos	50
1.3.8 Desvantagens dos coletores concentradores lineares parabólicos	50
1.4 CICLO RANKINE ORGÂNICO	51
1.4.1 Balanço energético do ciclo Rankine orgânico	52
1.4.2 Irreversibilidades no ciclo Rankine	54

1.4.3 Fluido de trabalho no ciclo Rankine orgânico	55
1.4.3.1 Motivação para o uso de fluido orgânico num ciclo Rankine	55
1.4.3.2 Características desejadas para a seleção do fluido de trabalho orgânico	57
1.4.3.2.1 Impacto ambiental	57
1.4.3.2.2 Temperatura crítica	58
1.4.3.2.3 Pressão crítica	59
1.4.3.2.4 Temperatura de degradação	59
1.4.3.2.5 Disponibilidade comercial	59
1.4.4 Aplicações do ciclo Rankine orgânico	60
1.4.4.1 Recuperação de calor de rejeito	60
1.4.4.2 Aproveitamento de energia geotérmica	61
1.4.4.3 Biomassa	62
1.4.5 O ciclo Rankine orgânico com energia solar	62
1.5 ARMAZENAMENTO TÉRMICO	65
1.5.1 Tipos de armazenamento térmico	66
1.5.1.1 Armazenamento direto com dois tanques	66
1.5.1.2 Armazenamento indireto com dois tanques	67
1.5.1.3 Armazenamento direto com um tanque simples com efeito termoclina	68
1.5.1.4 Utilização de sal fundido como fluido térmico nos coletores solares	68
2 MODELO MATEMÁTICO	70
2.1 CIRCUITO DE COLETORES CONCENTRADORES SOLARES PARABÓLICOS	70
2.1.1 Processos no circuito de coletores concentradores solares parabólicos	71
2.1.2 Condições de análise do circuito de coletores concentradores solares parabólicos	72
2.1.3 Cálculo dos ângulos solares	72

2.1.4	Análise do refletor	74
2.1.5	Balço de energia na cobertura	76
2.1.5.1	Condução térmica na cobertura	78
2.1.5.2	Determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção entre o ar ambiental e a cobertura, $h_{ca}$	79
2.1.6	Balço de energia no tubo absorvedor	81
2.1.6.1	Determinação do coeficiente de transferência de calor por convecção entre o tubo absorvedor e o fluido térmico (HTF), $h_{ch}$	83
2.1.7	Influência das propriedades radiativas dos materiais	84
2.1.8	Considerações geométricas	85
2.1.9	Análise alternativa por resistências térmicas	86
2.1.10	Queda de pressão no fluxo do fluido térmico (HTF)	87
2.2	CIRCUITO DO CICLO RANKINE ORGÂNICO	88
2.2.1	Definição dos processos e estados termodinâmicos do ciclo	88
2.2.2	Parâmetros do ciclo	91
2.2.3	Relações de pressões	92
2.2.4	Bomba	92
2.2.5	Expansor	93
2.2.6	Recuperador	93
2.2.6.1	Balço energético do recuperador	93
2.2.6.2	Características geométricas do recuperador	94
2.2.6.3	Análise do fluxo na tubulação do recuperador	97
2.2.6.4	Análise do fluxo pelas placas do recuperador	99
2.2.6.5	Área de troca de calor no recuperador	100
2.2.7	Condensador	101
2.2.7.1	Balço energético do condensador	102
2.2.7.2	Características geométricas do condensador	103
2.2.7.3	Análise do fluxo na tubulação do condensador	105
2.2.7.4	Análise do fluxo pelas placas na zona superaquecida do condensador	106
2.2.7.5	Área de troca de calor na zona superaquecida do condensador	108

2.2.7.6	Análise do fluxo pelas placas na zona saturada do condensador	109
2.2.7.7	Área de troca de calor na zona saturada do condensador	110
2.2.8	Gerador de vapor	111
2.2.8.1	Balço energético do gerador de vapor	112
2.2.8.2	Características geométricas do gerador de vapor	113
2.2.8.3	Análise do fluxo na tubulação do gerador de vapor	115
2.2.8.4	Análise do fluxo pelo casco do gerador de vapor na zona sub-resfriada	116
2.2.8.5	Área de troca de calor na zona sub-resfriada do gerador de vapor	117
2.2.8.6	Análise do fluxo pelo casco do gerador de vapor na zona saturada	118
2.2.8.7	Área de troca de calor na zona saturada do gerador de vapor	120
2.2.8.8	Análise do fluxo pelo casco do gerador de vapor na zona superaquecida	121
2.2.8.9	Área de troca de calor na zona superaquecida do gerador de vapor	122
2.3	ARMAZENAMENTO TÉRMICO NO CICLO RANKINE ORGÂNICO COM ENERGIA SOLAR	124
2.3.1	Funcionamento sem utilização de armazenamento térmico	124
2.3.2	Funcionamento em carga térmica (horas de claridade)	125
2.3.3	Funcionamento em descarga térmica (horas sem luz solar)	126
3	ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO MODELO MATEMÁTICO	128
3.1	CIRCUITO DOS COLETORES CONCENTRADORES PARABÓLICOS	128
3.1.1	Análise do fluido térmico (HTF) no circuito dos coletores solares	128
3.1.1.1	Propriedades termodinâmicas dos fluidos térmicos (HTFs)	129
3.1.2	Radiação solar disponível	131
3.1.2.1	Primeira aproximação: radiação extraterrestre	131
3.1.2.2	Ângulos de incidência na horizontal (Zenith) e no plano do coletor	135

3.1.2.3 Radiação real	137
3.1.3 Principais medidas geométricas dos coletores concentradores parabólicos comerciais	138
3.1.4 Propriedades do coletor concentrador parabólico	141
3.1.4.1 Fator de intercepção	141
3.1.4.2 Refletância especular	142
3.1.4.3 Transmissividade da cobertura	143
3.1.4.4 Absortância do tubo absorvedor	144
3.1.4.5 Emissividade da superfície do tubo absorvedor	145
3.1.4.6 Condutividade térmica do receptor	146
3.1.4.7 Emissividade da cobertura	147
3.1.4.8 Condutividade da cobertura	147
3.1.4.9 Influência do coeficiente de transferência de calor por convecção entre o ar ambiental e a cobertura, $h_{ca}$	147
3.1.4.10 Influência do coeficiente de transferência de calor por convecção entre o tubo absorvedor e o HTF, $h_{ch}$	148
3.1.5 Estudo de número de receptores necessários em função da radiação solar incidente e vazão mássica do HTF	149
3.2 CICLO RANKINE ORGÂNICO	152
3.2.1 Seleção do fluido orgânico do ciclo Rankine orgânico (ORC)	152
3.2.2 Trocadores de calor de tubos e placas	157
3.2.3 Dimensionamento do recuperador	158
3.2.3.1 Para 40% de eficiência isentrópica do expensor	160
3.2.3.2 Para 50% de eficiência isentrópica do expensor	161
3.2.3.3 Para 60% de eficiência isentrópica do expensor	162
3.2.3.4 Para 70% de eficiência isentrópica do expensor	163
3.2.3.5 Para 80% de eficiência isentrópica do expensor	164
3.2.3.6 Comentários sobre o dimensionamento do recuperador	165
3.2.4 Dimensionamento do condensador	167
3.2.4.1 Para 40% de eficiência isentrópica do expensor	167
3.2.4.2 Para 50% de eficiência isentrópica do expensor	169

3.2.4.3 Para 60% de eficiência isentrópica do expensor	170
3.2.4.4 Para 70% de eficiência isentrópica do expensor	171
3.2.4.5 Para 80% de eficiência isentrópica do expensor	173
3.2.4.6 Para 100% de eficiência isentrópica do expensor	174
3.2.4.7 Comentários sobre o dimensionamento do condensador	175
3.2.5 Trocador de calor de casco e tubos	177
3.2.6 Dimensionamento do gerador de vapor	178
3.2.6.1 Para 40% de eficiência isentrópica do expensor	179
3.2.6.2 Para 50% de eficiência isentrópica do expensor	181
3.2.6.3 Para 60% de eficiência isentrópica do expensor	182
3.2.6.4 Para 70% de eficiência isentrópica do expensor	183
3.2.6.5 Para 80% de eficiência isentrópica do expensor	185
3.2.6.6 Para 100% de eficiência isentrópica do expensor	186
3.2.6.7 Comentários sobre o dimensionamento do gerador de vapor	187
3.3 ARMAZENAMENTO TÉRMICO	189
4 RESULTADOS	191
4.1 CIRCUITO DO CICLO RANKINE ORGÂNICO	191
4.1.1 Recuperador	191
4.1.2 Condensador	192
4.1.3 Gerador de vapor	193
4.1.4 Resumo dos parâmetros do ciclo termodinâmico	194
4.2 CIRCUITO DE COLETORES CONCENTRADORES SOLARES PARABÓLICOS	197
4.2.1 Análise de número de receptores necessários	197
4.3 ARMAZENAMENTO TÉRMICO	200
4.3.1 Possíveis dimensões do sistema de armazenamento térmico	201
4.4 COMPORTAMENTO DA PLANTA	203
4.5 SIMULAÇÃO DE FUNCIONAMENTO COM DADOS REAIS	205
4.5.1 1 de janeiro	206
4.5.2 3 de janeiro	207

4.5.3 4 de janeiro	209
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	211
5.1 CONCLUSÕES	211
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	212
6 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	213

## Lista de figuras

Figura 1.1 – Espectro solar	37
Figura 1.2 – Tipos de radiação incidente	38
Figura 1.3 - Ângulos solares	39
Figura 1.4 – Partes de um coletor concentrador linear parabólico	41
Figura 1.5 – Parábola	42
Figura 1.6 – Parábola com vértice num sistema de coordenadas cartesianas	43
Figura 1.7 - Medidas de um coletor concentrador linear parabólico	44
Figura 1.8 – Reflexão dos raios solares no concentrador parabólico	45
Figura 1.9 Duas parábolas possíveis para uma mesma abertura e igual razão geométrica de concentração	47
Figura 1.10 – Reflexão de luz numa superfície especular perfeita	49
Figura 1.11 – Aproveitamento de vapor superaquecido com recuperador	52
Figura 1.12 – Esquema do ciclo Rankine orgânico	54
Figura 1.13 – Diagrama T-s para água gerado em EES	56
Figura 1.14 – Diagramas T-s para os refrigerantes R123 e R124 gerados em EES	56
Figura 1.15 – ODP para diversos refrigerantes	58
Figura 1.16 – Esquema de recuperação de calor implementado pela GE	61
Figura 1.17 – Reservatório geotérmico	61
Figura 1.18 – Geração de energia com biomassa	62
Figura 1.19 – Ciclo Rankine orgânico solar com entrada direta de calor	63
Figura 1.20 – Ciclo Rankine orgânico solar com trocador de calor	63
Figura 1.21 – Usina de geração solar direta Rankine	64
Figura 1.22 – Ciclo Rankine orgânico solar comercial de baixa potência	65
Figura 1.23 – Armazenamento direto com dois tanques	66
Figura 1.24 – Armazenamento indireto com dois tanques	67

Figura 1.25 – Tanque de armazenamento direto com efeito termoclina	68
Figura 1.26 – Aquecimento de sal fundido numa torre solar	69
Figura 2.1 – Ciclo Rankine orgânico com coletores concentradores solares	70
Figura 2.2 – Circuito de coletores concentradores solares parabólicos	71
Figura 2.3 - Cobertura	77
Figura 2.4 – Balanço de energia no setor interno da cobertura	79
Figura 2.5 – Tubo absorvedor	81
Figura 2.6 – Resistências térmicas	87
Figura 2.7 – Circuito do ciclo Rankine orgânico	89
Figura 2.8 – Diagrama T-s do ciclo Rankine orgânico	91
Figura 2.9 – Esquema do recuperador	93
Figura 2.10 – Trocador de tubo e placas	94
Figura 2.11 – Medidas de um trocador de tubo e placas	95
Figura 2.12 – Relação entre aleta quadrada e aleta redonda	97
Figura 2.13 – Esquema do condensador	102
Figura 2.14 – Esquema da zona superaquecida do condensador	102
Figura 2.15 – Esquema da zona saturada do condensador	103
Figura 2.16 – Esquema do gerador de vapor	111
Figura 2.17 – Esquema da zona sub-resfriada do gerador de vapor	112
Figura 2.18 – Esquema da zona saturada do gerador de vapor	113
Figura 2.19 – Esquema da zona superaquecida do gerador de vapor	113
Figura 2.20 – Medidas do trocador de calor de casco e tubos	114
Figura 2.21 – Ciclo orgânico Rankine com armazenamento térmico carregando	126
Figura 2.22 – Ciclo orgânico Rankine com armazenamento térmico descarregando	127
Figura 3.1 - Regressão da viscosidade dinâmica a partir de dados de [24]	129
Figura 3.2 - ln da viscosidade dinâmica VS. ln da temperatura a partir de dados de [24]	129

Figura 3.3 - Regressão do calor específico a pressão constante a partir de dados de [24]	129
Figura 3.4 - Regressão da massa específica a partir de dados de [24]	129
Figura 3.5 - Regressão do condutividade térmica a partir de dados de [24]	130
Figura 3.6 – Ângulo de declinação em função do dia do ano (n)	132
Figura 3.7 - Radiação extraterrestre em função do dia para o meio-dia, latitude 23° N	132
Figura 3.8 - Radiação extraterrestre em função do dia para o meio-dia, latitude 23° S	132
Figura 3.9 - Radiação extraterrestre em função do dia para o meio-dia, latitude 0°	133
Figura 3.10 - Radiação extraterrestre em função da hora para o dia 1 do ano, latitude 23° N	133
Figura 3.11 - Radiação extraterrestre em função da hora para o dia 1 do ano, latitude 23° S	133
Figura 3.12 - Radiação extraterrestre em função da hora para o dia 1 do ano, latitude 0°	134
Figura 3.13 - Energia radiativa extraterrestre incidente em função do dia entre 11.30 e 12.30 h, latitude 23° N	134
Figura 3.14 - Energia radiativa extraterrestre incidente em função do dia entre 11.30 e 12.30 h, latitude 23° S	134
Figura 3.15 - Energia radiativa extraterrestre incidente em função do dia entre 11.30 e 12.30 h, latitude 0°	135
Figura 3.16 - Ângulo $\theta_z$ em função do dia para o meio-dia, latitude 23° N	135
Figura 3.17 - Ângulo $\theta_z$ em função do dia para o meio-dia, latitude 23° S	135
Figura 3.18 - Ângulo $\theta_z$ em função do dia para o meio-dia, latitude 0°	136
Figura 3.19 - R em função da hora para o dia 1 do ano, latitude 23° N	136
Figura 3.20 - R em função da hora para o dia 1 do ano, latitude 23° S	136
Figura 3.21 - R em função da hora para o dia 1 do ano, latitude 0°	137
Figura 3.22 - Radiação direta horizontal em função da hora para o dia 1 do ano, latitude 23° S	138

Figura 3.23 - Radiação direta no concentrador em função da hora para o dia 1 do ano, latitude 23° S	138
Figura 3.24 - Radiação direta horizontal em função da hora para o dia 170 do ano, latitude 23° S	138
Figura 3.25 - Radiação direta no concentrador em função da hora para o dia 170 do ano, latitude 23° S	138
Figura 3.26 – Características dos coletores Luz	139
Figura 3.27 – Fator de intercepção vs. razão de concentração	142
Figura 3.28 – Fator de intercepção vs. desvio padrão	142
Figura 3.29 – Refletividade dos concentradores Guardian	143
Figura 3.30 – Refletividade dos concentradores FLABEG	143
Figura 3.31 – Transmissividade do vidro pyrex	144
Figura 3.32 – Tubo absorvedor Siemens UVAC 2010	145
Figura 3.33 – Equações de emissividade para diferentes recobrimentos	146
Figura 3.34 – Emissividade superficial VS. Temperatura para diferentes recobrimentos	146
Figura 3.35 – Coeficiente de transferência de calor por convecção entre o ar ambiental e a cobertura em função da temperatura de película e a velocidade do vento	148
Figura 3.36 - Coeficiente de transferência de calor por convecção entre o fluido térmico e a tubo absorvedor em função da vazão mássica XCEL THERM® MK1	148
Figura 3.37 - Coeficiente de transferência de calor por convecção entre o fluido térmico e a tubo absorvedor em função da vazão mássica SYLTHERM 800	148
Figura 3.38 - Coeficiente de transferência de calor por convecção entre o fluido térmico e a tubo absorvedor em função da vazão mássica DOWTHERM A	149
Figura 3.39 - Coeficiente de transferência de calor por convecção entre o fluido térmico e a tubo absorvedor em função da vazão mássica Therminol VP-1	149

Figura 3.40 - Eficiência do ciclo orgânico Rankine em função da temperatura máxima, $\eta_{st}=40\%$ e $P_{alta}=3600$ kPa	154
Figura 3.41 - Eficiência do ciclo orgânico Rankine em função da temperatura máxima, $\eta_{st}=50\%$ e $P_{alta}=3600$ kPa	154
Figura 3.42 - Eficiência do ciclo orgânico Rankine em função da temperatura máxima, $\eta_{st}=60\%$ e $P_{alta}=3600$ kPa	155
Figura 3.43 - Eficiência do ciclo orgânico Rankine em função da temperatura máxima, $\eta_{st}=70\%$ e $P_{alta}=3600$ kPa	155
Figura 3.44 - Eficiência do ciclo orgânico Rankine em função da temperatura máxima, $\eta_{st}=80\%$ e $P_{alta}=3600$ kPa	155
Figura 3.45 - Eficiência do ciclo orgânico Rankine em função da temperatura máxima, $\eta_{st}=90\%$ e $P_{alta}=3600$ kPa	155
Figura 3.46 - Eficiência do ciclo orgânico Rankine em função da temperatura máxima, $\eta_{st}=100\%$ e $P_{alta}=3600$ kPa	155
Figura 3.47 - Eficiência do ciclo orgânico Rankine em função da temperatura máxima, $\eta_{st}=40\%$ e $P_{alta}=0,9 \cdot P_{cr}$	156
Figura 3.48 - Eficiência do ciclo orgânico Rankine em função da temperatura máxima, $\eta_{st}=50\%$ e $P_{alta}=0,9 \cdot P_{cr}$	156
Figura 3.49 - Eficiência do ciclo orgânico Rankine em função da temperatura máxima, $\eta_{st}=60\%$ e $P_{alta}=0,9 \cdot P_{cr}$	156
Figura 3.50 - Eficiência do ciclo orgânico Rankine em função da temperatura máxima, $\eta_{st}=70\%$ e $P_{alta}=0,9 \cdot P_{cr}$	156
Figura 3.51 - Eficiência do ciclo orgânico Rankine em função da temperatura máxima, $\eta_{st}=80\%$ e $P_{alta}=0,9 \cdot P_{cr}$	156
Figura 3.52 - Eficiência do ciclo orgânico Rankine em função da temperatura máxima, $\eta_{st}=90\%$ e $P_{alta}=0,9 \cdot P_{cr}$	156
Figura 3.53 - Eficiência do ciclo orgânico Rankine em função da temperatura máxima, $\eta_{st}=100\%$ e $P_{alta}=0,9 \cdot P_{cr}$	157
Figura 3.54 - Área de transferência de calor do recuperador ( $m^2$ ) $7.75 - \frac{5}{8} T \eta_{st}=100\%$	159

Figura 3.55 - Área de transferência de calor do recuperador ( $m^2$ ) 8.0 – 3/8 T $\eta_{st}=100\%$	159
Figura 3.56 - Comprimento dos tubos do recuperador (m) 7.75 – 5/8 T $\eta_{st}=100\%$	159
Figura 3.57 - Comprimento dos tubos do recuperador (m) 8.0 – 3/8 T $\eta_{st}=100\%$	159
Figura 3.58 - Volume recuperador ( $m^3$ ) 7.75 – 5/8 T $\eta_{st}=100\%$	159
Figura 3.59 - Volume recuperador ( $m^3$ ) 8.0 – 3/8 T $\eta_{st}=100\%$	159
Figura 3.60 - Área de transferência de calor do recuperador ( $m^2$ ) $\eta_{st}=40\%$	160
Figura 3.61 - Comprimento dos tubos do recuperador (m) $\eta_{st}=40\%$	160
Figura 3.62 - Volume recuperador ( $m^3$ ) $\eta_{st}=40\%$	160
Figura 3.63 - Queda de pressão na tubulação do recuperador $\eta_{st}=40\%$	160
Figura 3.64 - Queda de pressão no casco do recuperador $\eta_{st}=40\%$	160
Figura 3.65 - Área de transferência de calor do recuperador ( $m^2$ ) $\eta_{st}=50\%$	161
Figura 3.66 - Comprimento dos tubos do recuperador (m) $\eta_{st}=50\%$	161
Figura 3.67 - Volume recuperador ( $m^3$ ) $\eta_{st}=50\%$	161
Figura 3.68 - Queda de pressão na tubulação do recuperador $\eta_{st}=50\%$	161
Figura 3.69 - Queda de pressão no casco do recuperador $\eta_{st}=50\%$	161
Figura 3.70 - Área de transferência de calor do recuperador ( $m^2$ ) $\eta_{st}=60\%$	162
Figura 3.71 - Comprimento dos tubos do recuperador (m) $\eta_{st}=60\%$	162
Figura 3.72 - Volume recuperador ( $m^3$ ) $\eta_{st}=60\%$	162
Figura 3.73 - Queda de pressão na tubulação do recuperador $\eta_{st}=60\%$	162
Figura 3.74 - Queda de pressão no casco do recuperador $\eta_{st}=60\%$	162
Figura 3.75 - Área de transferência de calor do recuperador ( $m^2$ ) $\eta_{st}=70\%$	163
Figura 3.76 - Comprimento dos tubos do recuperador (m) $\eta_{st}=70\%$	163
Figura 3.77 - Volume recuperador ( $m^3$ ) $\eta_{st}=70\%$	163
Figura 3.78 - Queda de pressão na tubulação do recuperador $\eta_{st}=70\%$	163
Figura 3.79 - Queda de pressão no casco do recuperador $\eta_{st}=70\%$	163
Figura 3.80 - Área de transferência de calor do recuperador ( $m^2$ ) $\eta_{st}=80\%$	164
Figura 3.81 - Comprimento dos tubos do recuperador (m) $\eta_{st}=80\%$	164
Figura 3.82 - Volume recuperador ( $m^3$ ) $\eta_{st}=80\%$	164

Figura 3.83 - Queda de pressão na tubulação do recuperador $\eta_{st}=80\%$	164
Figura 3.84 - Queda de pressão no casco do recuperador $\eta_{st}=80\%$	164
Figura 3.85 - Vazão mássica de água em função da temperatura de saída, $T_{ao}$	167
Figura 3.86 - Área de transferência de calor do condensador ( $m^2$ ) $\eta_{st}=40\%$	167
Figura 3.87 - Comprimento dos tubos do condensador (m) $\eta_{st}=40\%$	167
Figura 3.88 - Volume do condensador ( $m^3$ ) $\eta_{st}=40\%$	168
Figura 3.89 - Queda de pressão na zona superaquecida do condensador $\eta_{st}=40\%$	168
Figura 3.90 - Queda de pressão na zona saturada do condensador $\eta_{st}=40\%$	168
Figura 3.91 - Queda de pressão na tubulação do condensador $\eta_{st}=40\%$	168
Figura 3.92 - Área de transferência de calor do condensador [ $m^2$ ] $\eta_{st}=50\%$	169
Figura 3.93 - Comprimento dos tubos do condensador (m) $\eta_{st}=50\%$	169
Figura 3.94 - Volume do condensador ( $m^3$ ) $\eta_{st}=50\%$	169
Figura 3.95 - Queda de pressão na zona superaquecida do condensador $\eta_{st}=50\%$	169
Figura 3.96 - Queda de pressão na zona saturada do condensador $\eta_{st}=50\%$	169
Figura 3.97 - Queda de pressão na tubulação do condensador $\eta_{st}=50\%$	170
Figura 3.98 - Área de transferência de calor do condensador ( $m^2$ ) $\eta_{st}=60\%$	170
Figura 3.99 - Comprimento dos tubos do condensador (m) $\eta_{st}=60\%$	170
Figura 3.100 - Volume do condensador ( $m^3$ ) $\eta_{st}=60\%$	170
Figura 3.101 - Queda de pressão na zona superaquecida do condensador $\eta_{st}=60\%$	171
Figura 3.102 - Queda de pressão na zona saturada do condensador $\eta_{st}=60\%$	171
Figura 3.103 - Queda de pressão na tubulação do condensador $\eta_{st}=60\%$	171
Figura 3.104 - Área de transferência de calor do condensador ( $m^2$ ) $\eta_{st}=70\%$	171
Figura 3.105 - Comprimento dos tubos do condensador (m) $\eta_{st}=70\%$	171
Figura 3.106 - Volume do condensador ( $m^3$ ) $\eta_{st}=70\%$	172

Figura 3.107 - Queda de pressão na zona superaquecida do condensador $\eta_{st}=70\%$	172
Figura 3.108- Queda de pressão na zona saturada do condensador $\eta_{st}=70\%$	172
Figura 3.109 - Queda de pressão na tubulação do condensador $\eta_{st}=70\%$	172
Figura 3.110 - Área de transferência de calor do condensador ( $m^2$ ) $\eta_{st}=80\%$	173
Figura 3.111 - Comprimento dos tubos do condensador (m) $\eta_{st}=80\%$	173
Figura 3.112 - Volume do condensador ( $m^3$ ) $\eta_{st}=80\%$	173
Figura 3.113 - Queda de pressão na zona superaquecida do condensador $\eta_{st}=80\%$	173
Figura 3.114 - Queda de pressão na zona saturada do condensador $\eta_{st}=80\%$	173
Figura 3.115 - Queda de pressão na tubulação do condensador $\eta_{st}=80\%$	174
Figura 3.116 - Área de transferência de calor do condensador ( $m^2$ ) $\eta_{st}=100\%$	174
Figura 3.117 - Comprimento dos tubos do condensador (m) $\eta_{st}=100\%$	174
Figura 3.118 - Volume do condensador ( $m^3$ ) $\eta_{st}=100\%$	174
Figura 3.119 - Queda de pressão na zona superaquecida do condensador $\eta_{st}=100\%$	175
Figura 3.120 - Queda de pressão na zona saturada do condensador $\eta_{st}=100\%$	175
Figura 3.121 - Queda de pressão na tubulação do condensador $\eta_{st}=100\%$	175
Figura 3.122 - Vazão mássica do fluido térmico em função da temperatura $T_b$ $\eta_{st}=40\%$	178
Figura 3.123 - Vazão mássica do fluido térmico em função da temperatura $T_b$ $\eta_{st}=50\%$	178
Figura 3.124 - Vazão mássica do fluido térmico em função da temperatura $T_b$ $\eta_{st}=60\%$	178
Figura 3.125 - Vazão mássica do fluido térmico em função da temperatura $T_b$ $\eta_{st}=70\%$	178

Figura 3.126 - Vazão mássica do fluido térmico em função da temperatura $T_b$ $\eta_{st}=80\%$	179
Figura 3.127 - Vazão mássica do fluido térmico em função da temperatura $T_b$ $\eta_{st}=100\%$	179
Figura 3.128 - Área de transferência de calor do gerador de vapor ( $m^2$ ) $\eta_{st}=40\%$ (XCELTHERM® MK1, DOWTHERM A e Therminol VP-1)	179
Figura 3.129 - Área de transferência de calor do gerador de vapor ( $m^2$ ) $\eta_{st}=40\%$ (SYLTHERM 800)	179
Figura 3.130 - Comprimento dos tubos do gerador de vapor (m) $\eta_{st}=40\%$ (XCELTHERM® MK1, DOWTHERM A e Therminol VP-1)	180
Figura 3.131 - Comprimento dos tubos do gerador de vapor (m) $\eta_{st}=40\%$ (SYLTHERM 800)	180
Figura 3.132 - Volume do gerador de vapor ( $m^3$ ) $\eta_{st}=40\%$ (XCELTHERM® MK1, DOWTHERM A e Therminol VP-1)	180
Figura 3.133 - Volume do gerador de vapor ( $m^3$ ) $\eta_{st}=40\%$ (SYLTHERM 800)	180
Figura 3.134 - Queda de pressão no casco do gerador de vapor $\eta_{st}=40\%$	180
Figura 3.135 - Área de transferência de calor do gerador de vapor ( $m^2$ ) $\eta_{st}=50\%$ (XCELTHERM® MK1, DOWTHERM A e Therminol VP-1)	181
Figura 3.136 - Área de transferência de calor do gerador de vapor ( $m^2$ ) $\eta_{st}=50\%$ (SYLTHERM 800)	181
Figura 3.137 - Comprimento dos tubos do gerador de vapor (m) $\eta_{st}=50\%$ (XCELTHERM® MK1, DOWTHERM A e Therminol VP-1)	181
Figura 3.138 - Comprimento dos tubos do gerador de vapor (m) $\eta_{st}=50\%$ (SYLTHERM 800)	181
Figura 3.139 - Volume do gerador de vapor ( $m^3$ ) $\eta_{st}=50\%$ (XCELTHERM® MK1, DOWTHERM A e Therminol VP-1)	181
Figura 3.140 - Volume do gerador de vapor ( $m^3$ ) $\eta_{st}=50\%$ (SYLTHERM 800)	181
Figura 3.141 - Queda de pressão no casco do gerador de vapor $\eta_{st}=50\%$	182

Figura 3.142 - Área de transferência de calor do gerador de vapor ( $m^2$ ) $\eta_{st}=60\%$ (XCEL THERM <sup>®</sup> MK1, DOW THERM A e Therminol VP-1)	182
Figura 3.143 - Área de transferência de calor do gerador de vapor ( $m^2$ ) $\eta_{st}=60\%$ (SYLTHERM 800)	182
Figura 3.144 - Comprimento dos tubos do gerador de vapor (m) $\eta_{st}=60\%$ (XCEL THERM <sup>®</sup> MK1, DOW THERM A e Therminol VP-1)	182
Figura 3.145 - Comprimento dos tubos do gerador de vapor (m) $\eta_{st}=60\%$ (SYLTHERM 800)	182
Figura 3.146 - Volume do gerador de vapor ( $m^3$ ) $\eta_{st}=60\%$ (XCEL THERM <sup>®</sup> MK1, DOW THERM A e Therminol VP-1)	183
Figura 3.147 - Volume do gerador de vapor ( $m^3$ ) $\eta_{st}=60\%$ (SYLTHERM 800)	183
Figura 3.148 - Queda de pressão no casco do gerador de vapor $\eta_{st}=60\%$	183
Figura 3.149 - Área de transferência de calor do gerador de vapor ( $m^2$ ) $\eta_{st}=70\%$ (XCEL THERM <sup>®</sup> MK1, DOW THERM A e Therminol VP-1)	183
Figura 3.150 - Área de transferência de calor do gerador de vapor ( $m^2$ ) $\eta_{st}=70\%$ (SYLTHERM 800)	183
Figura 3.151 - Comprimento dos tubos do gerador de vapor (m) $\eta_{st}=70\%$ (XCEL THERM <sup>®</sup> MK1, DOW THERM A e Therminol VP-1)	184
Figura 3.152 - Comprimento dos tubos do gerador de vapor (m) $\eta_{st}=70\%$ (SYLTHERM 800)	184
Figura 3.153 - Volume do gerador de vapor ( $m^3$ ) $\eta_{st}=70\%$ (XCEL THERM <sup>®</sup> MK1, DOW THERM A e Therminol VP-1)	184
Figura 3.154 - Volume do gerador de vapor ( $m^3$ ) $\eta_{st}=70\%$ (SYLTHERM 800)	184
Figura 3.155 - Queda de pressão no casco do gerador de vapor $\eta_{st}=70\%$	184
Figura 3.156 - Área de transferência de calor do gerador de vapor ( $m^2$ ) $\eta_{st}=80\%$ (XCEL THERM <sup>®</sup> MK1, DOW THERM A e Therminol VP-1)	185
Figura 3.157 - Área de transferência de calor do gerador de vapor ( $m^2$ ) $\eta_{st}=80\%$ (SYLTHERM 800)	185

Figura 3.158 - Comprimento dos tubos do gerador de vapor (m) $\eta_{st}=80\%$ (XCELTHERM® MK1, DOWTHERM A e Therminol VP-1)	185
Figura 3.159 - Comprimento dos tubos do gerador de vapor (m) $\eta_{st}=80\%$ (SYLTHERM 800)	185
Figura 3.160 - Volume do gerador de vapor (m <sup>3</sup> ) $\eta_{st}=80\%$ (XCELTHERM® MK1, DOWTHERM A e Therminol VP-1)	185
Figura 3.161 - Volume do gerador de vapor (m <sup>3</sup> ) $\eta_{st}=80\%$ (SYLTHERM 800)	185
Figura 3.162 - Queda de pressão no casco do gerador de vapor $\eta_{st}=80\%$	186
Figura 3.163 - Área de transferência de calor do gerador de vapor (m <sup>2</sup> ) $\eta_{st}=100\%$ (XCELTHERM® MK1, DOWTHERM A e Therminol VP-1)	186
Figura 3.164 - Área de transferência de calor do gerador de vapor (m <sup>2</sup> ) $\eta_{st}=100\%$ (SYLTHERM 800)	186
Figura 3.165 - Comprimento dos tubos do gerador de vapor (m) $\eta_{st}=100\%$ (XCELTHERM® MK1, DOWTHERM A e Therminol VP-1)	186
Figura 3.166 - Comprimento dos tubos do gerador de vapor (m) $\eta_{st}=100\%$ (SYLTHERM 800)	186
Figura 3.167 - Volume do gerador de vapor (m <sup>3</sup> ) $\eta_{st}=100\%$ (XCELTHERM® MK1, DOWTHERM A e Therminol VP-1)	187
Figura 3.168 - Volume do gerador de vapor (m <sup>3</sup> ) $\eta_{st}=100\%$ (SYLTHERM 800)	187
Figura 3.169 - Queda de pressão no casco do gerador de vapor $\eta_{st}=100\%$	187
Figura 3.170 – Formas de energia numa planta solar com armazenamento e energia fóssil auxiliar	190
Figura 4.1 – Esquema de troca de calor no recuperador	191
Figura 4.2 – Fração de superaquecimento aproveitada vs. temperatura de saída do lado quente do recuperador	192
Figura 4.3 - Esquema de troca de calor no condensador	193
Figura 4.4 – Esquema de troca de calor no gerador de vapor	193
Figura 4.5 – Diagrama Temperatura (T) vs. Entropia (s) para os ciclos orgânicos Rankine estudados	195

Figura 4.6 - Calor rejeitado e potência gerada para um ORC com $\eta_{st} = 40\%$ como fração da energia fornecida ao ciclo	196
Figura 4.7 - Calor rejeitado e potência gerada para um ORC com $\eta_{st} = 50\%$ como fração da energia fornecida ao ciclo	196
Figura 4.8 - Calor rejeitado e potência gerada para um ORC com $\eta_{st} = 60\%$ como fração da energia fornecida ao ciclo	196
Figura 4.9 - Calor rejeitado e potência gerada para um ORC com $\eta_{st} = 70\%$ como fração da energia fornecida ao ciclo	196
Figura 4.10 - Calor rejeitado e potência gerada para um ORC com $\eta_{st} = 80\%$ como fração da energia fornecida ao ciclo	196
Figura 4.11 - Calor rejeitado e potência gerada para um ORC com $\eta_{st} = 100\%$ como fração da energia fornecida ao ciclo	196
Figura 4.12 – Eficiência do ciclo termodinâmico em função da temperatura $T_6$ para diferentes eficiências isentrópicas do expensor	197
Figura 4.13 – Fluxos energéticos de ganho para o HTF ( $\dot{Q}_{ca-htf}$ ), perdas térmicas ( $\dot{Q}_p$ ) e perdas ópticas do coletor, considerando 50 receptores	199
Figura 4.14 – Eficiência térmica do circuito de coletores ( $\eta_c$ ) vs. radiação direta no plano de abertura do coletor	200
Figura 4.15 – Vazão mássica do HTF vs. Radiação direta no plano de abertura	200
Figura 4.16 – Esquema de troca de calor entre o HTF e o sal fundido em modo de carga	201
Figura 4.17 – Esquema de troca de calor entre o HTF e o sal fundido em modo de descarga	201
Figura 4.18 – Radiação total na horizontal para os dias 1, 2, 3, 4 e 5 de janeiro / 2012	206
Figura 4.19 - Radiações diretas horizontal ( $G_b$ ) e no concentrador ( $G_a$ ) calculadas a partir da medição para o dia 1 de janeiro, no Rio de Janeiro (latitude $23^\circ$ S)	206

Figura 4.20 - Radiações diretas horizontal ( $G_b$ ) e no concentrador ( $G_a$ ) calculadas a partir da medição para o dia 3 de janeiro, no Rio de Janeiro (latitude $23^\circ$ S)	207
Figura 4.21 - Radiações diretas horizontal ( $G_b$ ) e no concentrador ( $G_a$ ) calculadas a partir da medição para o dia 4 de janeiro, no Rio de Janeiro (latitude $23^\circ$ S)	209

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Estados termodinâmicos no circuito de coletores	71
Tabela 2.2 – Constantes para o cálculo de Nusselt para fluxo externo	80
Tabela 2.3 – Estados termodinâmicos do circuito do ciclo Rankine orgânico	89
Tabela 3.1 – Características dois principais fluidos térmicos (HTFs) estudados	128
Tabela 3.2 – Equações das propriedades termodinâmicas dos HTFs estudados	130
Tabela 3.3 – Características dos coletores concentradores parabólicos Euro Trough	140
Tabela 3.4 – Características geométricas de outros coletores concentradores parabólicos	140
Tabela 3.5 – Principais parâmetros atuais para o desenho de coletores concentradores parabólicos	141
Tabela 3.6 – Resultados da simulação no circuito de coletores solares para radiação incidente de $1 \text{ kW/m}^2$ e diferentes vazões mássicas	150
Tabela 3.7 – Resultados da simulação no circuito de coletores solares para radiação incidente de $0,8 \text{ kW/m}^2$ e diferentes vazões mássicas	151
Tabela 3.8 – Resultados da simulação no circuito de coletores solares para radiação incidente de $0,5 \text{ kW/m}^2$ e diferentes vazões mássicas	151
Tabela 3.9 – Resultados da simulação no circuito de coletores solares para radiação incidente de $0,3 \text{ kW/m}^2$ e diferentes vazões mássicas	151
Tabela 3.10 – Características dos principais refrigerantes	152

Tabela 3.11 – Refrigerantes escolhidos para determinar seu comportamento no ORC	153
Tabela 3.12 – Características dos tipos de trocadores de calor de tubos e placas estudados	157
Tabela 3.13 – Funções do fator $j$ de Colburn e do fator de atrito para os trocadores de calor de tubos e placa estudados	158
Tabela 3.14 – Características dos trocadores de calor de casco e um passo em tubos estudados	177
Tabela 3.15 – Características dos principais sais fundidos utilizados no armazenamento térmico	189
Tabela 4.1 - Principais parâmetros resultantes para o recuperador	192
Tabela 4.2 - Principais parâmetros resultantes para o condensador	193
Tabela 4.3 - Principais parâmetros resultantes para o gerador de vapor	194
Tabela 4.4 - Principais parâmetros característicos do ciclo termodinâmico	194
Tabela 4.5 - Calor rejeitado, potência gerada e energia fornecida ao ciclo ORC para diferentes $\eta_{st}$	195
Tabela 4.6- Número de receptores necessários para o ciclo de 50 kW de potência para diferentes fluxos de radiação no plano de abertura para os HTFs: XCEL THERM® MK1, DOW THERM A, Therminol VP-1	198
Tabela 4.7 - Número de receptores necessários para o ciclo de 50 kW de potência para diferentes fluxos de radiação no plano de abertura para o HTF: SYLTHERM 800	198
Tabela 4.8 - Resultados para 50 receptores considerando distintos níveis de radiação incidente no plano de abertura do coletor ( $G_a$ )	199
Tabela 4.9 - Temperaturas nos processos de carga e descarga no armazenamento térmico	201
Tabela 4.10 - Vazão mássica do sal fundido necessária para manter a potência nominal	202

Tabela 4.11 - Massa de sal fundido necessária para 6 horas de armazenamento térmico	202
Tabela 4.12 - Massa de sal fundido necessária para 8 horas de armazenamento térmico	202
Tabela 4.13 - Volume de sal fundido necessário para 6 horas de armazenamento térmico	203
Tabela 4.14 - Volume de sal fundido necessário para 8 horas de armazenamento térmico	203
Tabela 4.15 - Análise de vazões mássicas e potências do ciclo considerando dois conjuntos em paralelo de 50 receptores cada	204
Tabela 4.16 - Diagrama de eficiência total da planta	205
Tabela 4.17 - Radiação direta no plano de abertura do coletor ( $G_a$ ) e na horizontal ( $G_b$ ) para o dia 1 de janeiro de 2012	207
Tabela 4.18 - Radiação direta no plano de abertura do coletor ( $G_a$ ) e na horizontal ( $G_b$ ), e vazões mássicas de HTF resultantes para o dia 3 de janeiro de 2012	208
Tabela 4.19 - Radiação direta no plano de abertura do coletor ( $G_a$ ) e na horizontal ( $G_b$ ), e vazões mássicas de HTF resultantes para o dia 4 de janeiro de 2012	210

## Símbolos

A: área

a: abertura

C: razão geométrica de concentração solar

$C_p$ : calor específico a pressão constante

D, d: diâmetro

$\dot{E}$ : transferência de energia

F: fator de correção do trocador de calor

f: função de, fator de atrito, distância focal

G: irradiância, velocidade de massa

g: aceleração da gravidade

h: coeficiente de transferência de calor por convecção, entalpia específica

I: energia radiativa por unidade de área

$j_H$ : fator j de Colbert

k: condutividade térmica

L, l: comprimento

m: massa

$\dot{m}$ : vazão massica

Nu: número de Nusselt

P: pressão, efetividade de temperatura, perímetro

Pr: número de Prandtl

$\dot{Q}$ : fluxo de calor

q: calor específico

R: razão da taxa de capacidade calorífica

r: radio

Ra: número de Rayleigh

Ra\*: número de Rayleigh modificado

Re: número de Reynolds

S: parâmetro para cálculo de fator de correção do trocador

s: entropia específica

St: número de Stanton

T: temperatura

t: tempo

U: coeficiente global de transferência de calor

V: velocidade

$\bar{V}$ : volume

v: volume específico

W: parâmetro para cálculo de fator de correção do trocador

$\dot{W}$ : taxa de trabalho

w: trabalho específico

x: título

## Letras gregas

$\alpha$ : difusividade térmica, absortância

$\beta$ : coeficiente de expansão volumétrica, ângulo de inclinação do coletor

$\gamma$ : ângulo de azimute, fator de intercepção

$\Delta$ : variação

$\delta$ : ângulo de declinação

$\varepsilon$ : emissividade, efetividade

$\eta$ : eficiência

$\theta$ : ângulo de incidência

$\mu$ : Viscosidade dinâmica

$\nu$ : Viscosidade cinemática

$\rho$ : Massa específica, refletância especular

$\sigma$ : constante de Steffan-Boltzmann

$\varnothing$ : ângulo de latitude

$\tau$ : transmissividade

$\omega$ : ângulo horário

## Subscritos

O: inicial

a: absorvedor

b: direta na horizontal, suporte do elemento coletor, bomba

c: convecção, condensador

col: coletor

cr: referente ao ponto crítico

D: referente ao diâmetro

d: modo descarga

e: exterior, equivalente

ef: efetiva

f: final

g: gerador de vapor

htf: fluido térmico

i: interior

k: condução

L: referente ao comprimento

liq: líquido

o: saída

opt: óptica

r: radiação, regenerador

s: solar, isentrópico, modo carga

sky: céu

t: expensor

v: cobertura

∞: ar ambiental